МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМ. В. ДАЛЯ

Кафедра комп’ютерно-інтегрованих систем управління

Факультет інформаційних технологій та електроніки

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА**

до бакалаврської дипломної роботи

освітній ступінь: бакалавр

спеціальність: 151 - автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

на тему:

«Розробка комп’ютерно-інтегрованої системи управління котлом-утилізатором у процесі рекуперації теплоти вихлопних газів енергетичної установки.»

Виконав: здобувач вищої освіти

групи АТП-21д  Звіряк Є.І.

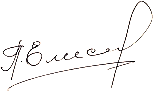
(підпис)

Керівник роботи Лорія М.Г.

(підпис)

Завідувач кафедри Лорія М.Г.

(підпис)

Рецензент  Єлісєєв П.Й.

(підпис)

Київ 2025

СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

Навчально-науковий інститут (факультет): інформаційних технологій та електроніки\_

(повне найменування інституту, факультету)

Кафедра: \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_комп’ютерно-інтегрованих систем управління \_\_\_\_\_

(повна назва кафедри)

Освітній ступінь: \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_бакалавр\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

(бакалавр, магістр)

Спеціальність: \_\_\_\_\_\_\_\_151 – Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології\_\_\_

(шифр і назва спеціальності)

Спеціалізація: \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

(назва спеціалізації)

|  |
| --- |
| **ЗАТВЕРДЖУЮ**  **Завідувач кафедри КІСУ**  \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ М.Г. Лорія  “\_\_\_\_” \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 2025року |

**З А В Д А Н Н Я**

**НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ СТУДЕНТУ**

**Звіряку Євгену Івановичу**

(прізвище, ім’я, по батькові)

**1. Тема роботи:** Розробка комп’ютерно-інтегрованої системи управління котлом-утилізатором у процесі рекуперації теплоти вихлопних газів енергетичної установки

Керівник роботи: **\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_** д.т.н., професор Лорія М.Г.\_**\_\_\_\_**\_**\_\_\_\_\_\_\_\_**\_\_\_\_,

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

затверджений наказом університету від “19” травня 2025 року №86/17.02\_

**2. Строк подання роботи здобувачем:** 16 червня 2025 року

**3. Вихідні дані до роботи:**

3.1. Технологічний регламент енергетичної установки

3.2. Інструкція оператора автоматизованої системи управління та контролю.

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

4.1. Вступ

4.2 Аналіз сучасного стану технологічного процесу та особливостей котлом-утилізатором у процесі рекуперації теплоти вихлопних газів енергетичної установки

4.3 Технологічна схема енергетичної установки та місце апарата у процесі

4.4 Принцип дії та технічні характеристики апарата

4.5 Огляд сучасних підходів до автоматизації котлом-утилізатором аналогічних апаратів

4.6 Вимоги до системи автоматичного управління котлом-утилізатором у процесі рекуперації теплоти вихлопних газів енергетичної установки

4.7 Функціональна схема системи автоматизації котлом-утилізатором

4.8 Інформаційно-логічна схема системи управління котлом-утилізатором

4.9 Розробка комп’ютерно-інтегрованої системи управління котлом-утилізатором у процесі рекуперації теплоти вихлопних газів енергетичної установки

4.10 Розробка структурної схеми системи автоматизації системи управління котлом-утилізатором

4.11 Математичне моделювання процесу керування котлом-утилізатором

4.12. Висновки.

**5. Перелік графічного матеріалу** (з точним зазначенням обов’язкових креслень):

5.1. Функціональна схеми автоматизації системи управління котлом-утилізатором.

5.2. Математичні моделі котла-утилізатора.

5.3. Структурна схема.

5.4. Графіки перехідних процесів та частотних характеристик системи автоматичного регулювання.

**6. Дата видачі завдання:** 8 травня 2025 року

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| №  з/п | Назва етапів виконання кваліфікаційної випускної роботи | Строк виконання етапів | Примітка |
| 1 | Аналіз сучасних принципів технологічного процесу та особливостей котлом-утилізатором у процесі рекуперації теплоти вихлопних газів енергетичної установки. | 15.05.25 |  |
| 2. | Аналіз сучасного стану технологічного процесу та особливостей котлом-утилізатором у процесі рекуперації теплоти вихлопних газів енергетичної установки | 20.05.25 |  |
| 3. | Розробка функціональної схеми системи автоматизації котлом-утилізатором | 25.05.25 |  |
| 4. | Синтез одноконтурної системи автоматичного регулювання. | 04.06.25 |  |
| 5. | Теоретичні дослідження системи автоматичного регулювання. | 09.06.25 |  |
| 6. | Математичне моделювання процесу керування котлом-утилізатором | 10.06.25 |  |
| 7. | Оформлення пояснювальної записки бакалаврської дипломної роботи та підготовка презентації. | 12.06.25 |  |

**Здобувач вищої освіти \_\_****\_** Звіряк Є. І.

( підпис ) (ініціали і прізвище)

**Керівник дипломного проєкту \_**Лорія М.Г.

(підпис ) (ініціали і прізвище)

# РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка ‒ 64 стр., 6 рисунків, 46 джерел.

КОТЕЛ-УТИЛІЗАТОР, ВИХЛОПНІ ГАЗИ, РЕКУПЕРАЦІЯ ТЕПЛА, ЕНЕРГЕТИЧНА УСТАНОВКА, СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ, АВТОМАТИЗАЦІЯ, PLC, SCADA, ПІД-РЕГУЛЯТОР, СТРУКТУРНА СХЕМА, MATLAB/SIMULINK, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, СТІЙКІСТЬ СИСТЕМИ, АСК, ІНДУСТРІЯ 4.0, ТЕПЛООБМІННИК, ДИНАМІКА СИСТЕМИ, КОНТУР РЕГУЛЮВАННЯ, МОДЕЛЮВАННЯ.

Об'єктом дослідження є процес рекуперації теплоти у котлі-утилізаторі, інтегрованому до енергетичної установки.

Метою бакалаврської дипломної роботи є розробка комп’ютерно-інтегрованої системи управління котлом-утилізатором, що дозволяє здійснювати автоматичне регулювання температурного режиму та підвищити ефективність використання залишкової теплоти вихлопних газів.

Метод дослідження – системний аналіз і математичне моделювання з використанням середовища MATLAB/Simulink.

У процесі роботи здійснено структурний аналіз технологічного циклу, визначено функціональні вимоги до системи автоматичного управління (АСК), обґрунтовано вибір технічних засобів і контурів регулювання. Побудовано структурну модель об’єкта, розраховано параметри регулятора методом максимальних швидкостей, реалізовано функціональну та інформаційно-логічну схеми. Створено SCADA-модель керування, проведено оцінку енергетичних втрат і можливості масштабування системи у відповідності до концепції Індустрії 4.0.

**ЗМІСТ**

**ВСТУП…………………………………………………………………….7**

**РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СТАНУ СИСТЕМ РЕКУПЕРАЦІЇ ТЕПЛОТИ В ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВКАХ…………………………………………...9**

**1.1. Огляд систем утилізації теплоти у промисловій енергетиці…9**

**1.2. Технологічна роль котла-утилізатора в системі рекуперації..11**

**1.3. Аналіз енергоефективності та основні технічні характеристики……………………………………………………………….12**

**1.4. Огляд сучасних підходів до автоматизації теплообмінних апаратів…………………………………………………………………………14**

**1.5. Критерії надійності та стабільності функціонування системи.15**

**РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ ТА СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ……………………..19**

**2.1. Опис технологічного процесу рекуперації теплоти…………..19**

**2.2. Розробка функціональної схеми об’єкта………………………20**

**2.3. Побудова схеми автоматичного регулювання температури..24**

**2.4. Обґрунтування вибору технічних засобів автоматизації……26**

**2.5. Визначення вхідних/вихідних сигналів і впливових факторів.27**

**РОЗДІЛ 3 СТРУКТУРНА ТА ІНФОРМАЦІЙНО-ЛОГІЧНА ОРГАНІЗАЦІЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ……………………………….30**

**3.1. Побудова структурно-логічної схеми системи………………..30**

**3.2. Складання інформаційно-логічної схеми……………………..32**

**3.3. Алгоритм функціонування системи…………………………….35**

**3.4. Інтеграція з SCADA та HMI-інтерфейсом………………………37**

**РОЗДІЛ 4 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ………………………………………………………………….39**

**4.1. Постановка задачі моделювання процесу……………………..40**

**4.2. Побудова математичної моделі котла-утилізатора…………..41**

**4.3. Виведення передатної функції та аналіз динаміки…………..44**

**4.4. Розрахунок ПІД-регулятора методом максимальних швидкостей…………………………………………………………………….51**

**4.5. Моделювання системи в середовищі MATLAB/Simulink……..52**

**4.6. Побудова та аналіз частотних характеристик…………………54**

**4.7. Оцінка стійкості та якості регулювання……………………….56**

**ВИСНОВКИ……………………………………………………………...59**

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ……………………………..61**

# 

# ВСТУП

У сучасних умовах зростання вартості енергоносіїв та глобальних викликів у сфері енергетичної безпеки все більшої актуальності набувають питання енергоефективності, оптимізації технологічних процесів та впровадження рішень, що дозволяють раціонально використовувати ресурси. Одним з таких напрямів є рекуперація теплоти — процес повторного використання енергетичних втрат, зокрема теплоти вихлопних газів.

Котли-утилізатори, які здійснюють відбір залишкової енергії з відпрацьованих газів, є ключовими елементами сучасних енергетичних та промислових установок. Ефективність їх функціонування значною мірою залежить від якості та гнучкості системи автоматичного управління, що регулює температурні та потужнісні параметри.

Розробка комп’ютерно-інтегрованої системи управління котлом-утилізатором дозволяє реалізувати адаптивне регулювання, скоротити енергетичні втрати, забезпечити стабільність роботи установки й інтегрувати систему в єдиний інформаційний простір підприємства. Це повністю відповідає сучасним вимогам Індустрії 4.0.

Метою дипломної роботи є створення комп’ютерно-інтегрованої системи автоматичного управління котлом-утилізатором для підвищення енергоефективності процесу рекуперації теплоти вихлопних газів.

Основні завдання дослідження:

- провести аналіз сучасних систем рекуперації теплоти та місця котла-утилізатора в енергетичному процесі;

- визначити функціональні та технічні вимоги до автоматизованої системи управління;

- розробити функціональну й інформаційно-логічну схеми системи;

- побудувати математичну модель об’єкта управління;

- реалізувати алгоритм управління в середовищі MATLAB/Simulink;

- проаналізувати стійкість та ефективність роботи запропонованої системи.

Об’єкт дослідження — процес рекуперації теплоти у котлі-утилізаторі, встановленому на енергетичній установці.

Предмет дослідження — комп’ютерно-інтегрована система автоматичного регулювання температурного режиму в процесі теплової утилізації.

У роботі використано методи аналізу енергетичних процесів, теорії автоматичного управління, математичного моделювання, системного аналізу, структурного синтезу та візуального програмування в середовищі SCADA/HMI. Для моделювання динаміки та розрахунку регулятора застосовано середовище MATLAB/Simulink.

Дипломна робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. У роботі подано 64 сторінку тексту, 6 рисунків, та 46 джерел літератури.

# 

**РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СТАНУ СИСТЕМ РЕКУПЕРАЦІЇ ТЕПЛОТИ В ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВКАХ**

Сучасні енергетичні установки, зокрема когенераційні комплекси, орієнтовані не лише на виробництво енергії, а й на підвищення енергоефективності шляхом повторного використання відпрацьованого тепла. Одним із найбільш перспективних рішень у цьому напрямі є застосування котлів-утилізаторів, які здійснюють рекуперацію теплоти вихлопних газів для подальшого використання у технологічних або побутових цілях [1].

Реалізація повноцінного процесу утилізації неможлива без ефективного управління температурними і витратними характеристиками теплоносія. Саме тому автоматизація котлів-утилізаторів є критично важливою умовою стабільної, безпечної та економічно доцільної роботи енергетичної установки. Важливе значення має і комп’ютерна інтеграція, яка дозволяє реалізувати гнучке дистанційне керування, візуалізацію процесів, оперативний аналіз параметрів і автоматичну діагностику.

У цьому розділі розглянуто сучасний стан когенераційних установок з утилізацією теплоти, технологічну роль котла-утилізатора в енергетичному циклі, критерії ефективного управління тепловим процесом, а також підходи до побудови комп’ютерно-інтегрованих систем на основі програмованих логічних контролерів (ПЛК) та SCADA-рішень [2], [3].

**1.1. Огляд систем утилізації теплоти у промисловій енергетиці**

Утилізація теплоти — це процес повернення відпрацьованої теплової енергії для її подальшого використання в енергетичних або технологічних процесах. У промислових енергетичних системах, особливо в когенераційних і тригенераційних установках, ця технологія дозволяє підвищити загальний коефіцієнт корисного використання палива (ККД) до 85–90 %, знижуючи втрати енергії через димові гази та теплоносії [1].

Основу систем рекуперації теплоти в енергетичних установках становлять котли-утилізатори — теплообмінні апарати, що встановлюються на вихлопі газотурбінних або дизельних двигунів і відбирають залишкову теплоту з потоку відпрацьованих газів. Теплова енергія, що вловлюється, використовується для нагріву води, пари, повітря або інших теплоносіїв, що дозволяє зменшити споживання первинного палива та підвищити екологічну ефективність системи [2].

У промислових масштабах найбільш поширеними є такі типи утилізаційних систем:

- Водогрійні котли-утилізатори, що забезпечують нагрів теплоносія для опалення або гарячого водопостачання;

- Парогенератори-утилізатори, які генерують технологічну пару високого тиску;

- Комбіновані установки з каскадною утилізацією теплоти, що працюють у кількох температурних діапазонах;

- Адсорбційні холодильні машини, що використовують утилізовану теплоту для охолодження.

Серед найбільш ефективних способів інтеграції котлів-утилізаторів у сучасні енергетичні системи варто відзначити їхнє застосування у складі:

- газотурбінних електростанцій;

- когенераційних ТЕЦ;

- біоенергетичних установок;

- комбінованих енергетичних систем, що працюють на відновлюваних джерелах енергії.

У процесі роботи котла-утилізатора критично важливими є параметри температури, тиску і витрати теплоносія. Для забезпечення оптимального теплового режиму необхідне застосування автоматизованих систем керування, які підтримують стабільність процесу, забезпечують безпечну експлуатацію та дозволяють адаптувати роботу до змін навантаження [3].

Сучасні підходи до автоматизації включають застосування інтелектуальних ПЛК-контролерів, сенсорних інтерфейсів HMI та програмних рішень SCADA, які забезпечують як локальне, так і дистанційне керування. Особливо важливою є можливість інтеграції систем утилізації у загальну інфраструктуру підприємства відповідно до концепції Індустрії 4.0 [4].

У цілому, використання систем утилізації теплоти дозволяє:

- зменшити енерговитрати підприємства;

- знизити викиди парникових газів;

- підвищити надійність енергозабезпечення;

- забезпечити економічну доцільність енергогенерації в умовах підвищення тарифів на енергоносії [5].

**1.2. Технологічна роль котла-утилізатора в системі рекуперації**

У сучасних енергетичних установках, що функціонують на базі когенераційних або біоенергетичних технологій, важливу роль відіграє використання залишкової теплоти. Саме котел-утилізатор виступає ключовим елементом у цьому процесі, забезпечуючи ефективне відведення теплової енергії від вихлопних газів, які утворюються внаслідок згоряння палива. Його технологічне призначення полягає у зниженні температури димових газів та передачі отриманої енергії теплоносію для повторного використання в інших процесах: обігріві, виробництві технологічної пари чи підготовці гарячої води.

Котел-утилізатор вбудовується у тракт димових газів безпосередньо за основним джерелом теплової енергії — дизельним або газопоршневим двигуном, газовою турбіною чи піролізною камерою. Проходячи через теплообмінні поверхні, вихлопні гази віддають свою енергію, водночас охолоджуючись, а теплоносій — зазвичай вода або термомасло — нагрівається до заданого рівня. Таким чином, котел виконує функцію рекуператора, що не лише зменшує теплові втрати, але й сприяє зниженню екологічного навантаження завдяки зменшенню температури викидів [6].

Технологічна роль утилізатора виходить за межі лише теплообміну. Він також виконує функції стабілізації температурного режиму в системі, підтримання робочого тиску та забезпечення необхідних параметрів теплоносія для споживачів. Крім того, котел тісно взаємодіє з іншими елементами енергетичної установки, зокрема з циркуляційними насосами, розширювальними баками, системами димовидалення та безпеки. Його стабільна робота забезпечує не лише підвищення ККД всієї установки, а й довговічність обладнання завдяки уникненню перегрівів та термічних перевантажень [7].

Особливо актуальною є роль котла-утилізатора в умовах енергетичної децентралізації та впровадження біоенергетичних джерел, де стабільність і надійність теплообмінного процесу визначають економічну доцільність проєкту. Завдяки своїй простоті, високій ефективності та надійності, утилізаційні котли стають невід’ємною частиною будь-якої сучасної енергоустановки, яка має на меті досягнення енергоефективності відповідно до принципів сталого розвитку [8].

Таким чином, котел-утилізатор не просто доповнює теплогенераційний цикл, а формує важливу ланку у загальному процесі виробництва, розподілу та використання енергії, забезпечуючи підвищення ефективності використання палива та зменшення впливу на довкілля.

**1.3. Аналіз енергоефективності та основні технічні характеристики**

Автоматизація процесів теплообміну у котлах-утилізаторах є критичним чинником підвищення енергоефективності, надійності та безпеки роботи енергетичних установок. З урахуванням змінних навантажень, динаміки газових потоків та чутливості теплообмінних процесів до зовнішніх впливів, до системи управління пред’являються високі вимоги щодо точності, адаптивності та здатності до інтеграції у складні багаторівневі архітектури.

Класичні системи автоматичного регулювання (АСР), побудовані за принципом негативного зворотного зв’язку, широко використовуються для підтримання постійної температури теплоносія, тиску або витрати. У таких системах регулюючим органом, як правило, є виконавчий механізм, що змінює положення заслінки або продуктивність насоса. Вимірювання здійснюються термопарами, тискомірами або витратомірами, дані з яких передаються на регулятор, який формує управляючий вплив згідно з заданим законом (П, ПІ, ПІД) [9].

Проте зі зростанням складності об’єктів управління зростає й потреба у застосуванні цифрових програмованих логічних контролерів (ПЛК), що дозволяють реалізовувати складні алгоритми керування, включно з адаптивним, модальним та інтелектуальним управлінням. За допомогою програмного середовища типу TIA Portal, Codesys або LogiCAD, оператори мають змогу реалізувати логіку реагування на змінні умови експлуатації, аварійні стани та оптимізаційні критерії, такі як мінімізація витрат палива або часу виходу на робочий режим [10].

Із поширенням технологій SCADA з’явилась можливість дистанційного моніторингу, архівування даних, візуалізації технологічного процесу в реальному часі. Використання інтерфейсів типу HMI (Human-Machine Interface) забезпечує зручну взаємодію оператора із системою, спрощуючи контроль і діагностику роботи котла-утилізатора [11].

Також актуальним є впровадження концепцій цифрових двійників — математичних моделей, які в режимі реального часу імітують поведінку фізичного об’єкта та дозволяють прогнозувати його стан за різних сценаріїв. Це відкриває нові горизонти для оптимізації режимів керування з урахуванням динаміки змін та взаємозв’язків параметрів процесу [12].

У контексті Індустрії 4.0 автоматизовані системи котлів-утилізаторів повинні підтримувати модулі самодіагностики, прогнозного обслуговування (predictive maintenance), віддаленого конфігурування та масштабування. Інтеграція з промисловими мережами (наприклад, PROFINET, EtherCAT, Modbus TCP/IP) забезпечує повноцінну участь об’єкта у цифровому виробництві та створює основу для розширеної аналітики та оптимального енергоменеджменту [13].

Сучасні підходи до автоматизації котлів-утилізаторів базуються на поєднанні класичних регуляторних структур із цифровими технологіями управління, створюючи інтелектуальні та гнучкі системи, здатні відповідати вимогам сучасної енергетики.

**1.4. Огляд сучасних підходів до автоматизації теплообмінних апаратів**

Управління теплообмінними апаратами — одним із яких є котел-утилізатор — ґрунтується на забезпеченні стабільного режиму теплообміну, мінімізації втрат енергії та підвищенні ефективності перетворення теплової енергії. Сучасні методи автоматизації включають використання контурів автоматичного регулювання температури, витрати, тиску та теплового потоку, що реалізуються на основі програмованих логічних контролерів (ПЛК), інтелектуальних датчиків та цифрових систем керування типу SCADA [21].

Один із ключових напрямів розвитку — впровадження адаптивних та нечітких систем керування, які здатні пристосовуватись до змінних умов експлуатації без необхідності ручного переналаштування. Також широко застосовуються моделі з прогнозуванням поведінки системи (Model Predictive Control, MPC), які дозволяють керувати з урахуванням запізнень, нелінійностей та обмежень [22].

У промислових енергетичних установках дедалі частіше використовуються цифрові двійники (digital twins), які дозволяють здійснювати моніторинг і оптимізацію роботи теплообмінного обладнання в режимі реального часу [23]. Це особливо актуально у складних когенераційних системах з великою кількістю взаємопов’язаних елементів, таких як економайзери, рекуператори та утилізаційні котли.

Сучасні підходи до автоматизації включають багаторівневе регулювання, інтеграцію із хмарними сервісами та підключення до кіберфізичних систем, що відповідає вимогам Індустрії 4.0 [24].

**1.5. Критерії надійності та стабільності функціонування системи**

У процесі розробки комп’ютерно-інтегрованої системи управління важливим аспектом є забезпечення надійності та стабільності її функціонування, зокрема в умовах змінних теплових навантажень та можливих збоїв у роботі елементів установки.

Надійність системи автоматизації — це одна з ключових характеристик, яка визначає здатність системи виконувати задані функції упродовж встановленого проміжку часу без втрати працездатності або виникнення аварійних ситуацій. У контексті енергетичних об’єктів, зокрема котлів-утилізаторів, вона має особливо важливе значення, оскільки навіть короткочасні збої можуть спричинити серйозні порушення у всьому технологічному циклі.

Основними показниками надійності є:

- Середній час безвідмовної роботи (MTBF – Mean Time Between Failures) — це статистичний показник, який визначає середній інтервал часу між двома послідовними відмовами системи або її елементів. Високе значення MTBF свідчить про меншу ймовірність несправностей і, відповідно, вищу надійність роботи обладнання [26].

- Коефіцієнт готовності системи (Availability) — визначає ймовірність того, що система буде знаходитися у працездатному стані у будь-який довільний момент часу. Він розраховується як відношення часу, протягом якого система працює без збоїв, до сумарного часу, що включає як роботу, так і час відновлення. Високий коефіцієнт готовності є необхідною умовою для об'єктів критичної інфраструктури, таких як котел-утилізатор, особливо при інтеграції з автоматизованими системами контролю та управління [27].

- Відмовостійкість (Fault Tolerance) — здатність системи зберігати працездатність навіть у разі часткових відмов її елементів. Це досягається за рахунок використання резервування, дублювання каналів передачі даних, аварійних режимів роботи (SafeState), а також функцій самодіагностики і автоматичного відновлення [28]. Наприклад, сучасні ПЛК-контролери оснащуються вбудованими модулями спостереження за станом входів/виходів і можуть автоматично перемикати контроль на резервний канал.

Надійність сенсорного та виконавчого обладнання — датчики температури, тиску, витрати, а також регулюючі клапани чи електроприводи мають бути промислового класу, захищеними за стандартами IP65/67, термостійкими, із цифровими інтерфейсами та підтримкою калібрування. Важливим є регулярне технічне обслуговування та перевірка коректності їхньої роботи в умовах високотемпературного середовища котла-утилізатора [29].

Крім того, на етапі проектування системи варто враховувати наявність діагностичних функцій у SCADA-середовищі, які дозволяють оперативно виявити деградацію сигналів або перебої в роботі периферійного обладнання, що підвищує загальну надійність системи та скорочує час простою.

Стабільність системи регулювання визначається її здатністю повертатися до рівноважного стану після збурень, з мінімальним перерегулюванням та без автоколивань. Для кількісної оцінки використовуються критерії Гурвіца, Рауса, Найквіста, а також аналіз передатної функції й частотних характеристик [30].

У промислових об'єктах теплообміну до систем висуваються додаткові вимоги: наявність резервування критичних елементів (живлення, каналів зв’язку), підтримка стандартизованих протоколів передачі даних (Modbus, OPC UA), реалізація аварійних алгоритмів безпеки на рівні ПЛК (fail-safe логіка) [31].

Важливо також враховувати стійкість до зовнішніх впливів, таких як вібрації, висока температура, пил або вологість, що властиво котлам-утилізаторам, розташованим поблизу джерел вихлопу. Тому вибір технічних засобів та розробка алгоритмів управління має базуватись на принципах захисту від відмов та оптимізації параметрів керування в реальному часі [32].

Забезпечення високої надійності й стабільності є критичною умовою для ефективного та безпечного функціонування комп’ютерно-інтегрованої системи управління котлом-утилізатором.

**Висновки до розділу 1**

У першому розділі було проведено всебічний аналітичний огляд сучасного стану технологічного процесу рекуперації теплоти у складі енергетичних установок та проаналізовано місце і роль котла-утилізатора в загальній схемі теплоенергетичної системи. Окрему увагу приділено опису конструкції, принципу дії та технічних характеристик котла-утилізатора як теплообмінного апарата, що виконує критично важливу функцію енергоефективного використання вторинних енергоресурсів.

Визначено ключові вимоги до системи автоматизації даного об'єкта: забезпечення надійного контролю температурних режимів, стабільне регулювання витрати теплоносія, оперативна реакція на зміну навантаження, стійкість до збоїв та аварій. Проаналізовано сучасні методи автоматизації теплообмінних апаратів із використанням ПЛК-контролерів, SCADA-систем, цифрових датчиків і розподілених систем керування, що відповідають концепції Індустрії 4.0.

Також обґрунтовано доцільність використання функціональної та інформаційно-логічної схем для побудови ефективної архітектури автоматизованої системи. У розділі наведено критерії оцінки надійності та стійкості системи автоматизації, зокрема показники MTBF, Availability, Fault Tolerance, що особливо важливо для забезпечення безпечного й безперервного функціонування котла-утилізатора в умовах експлуатації.

Отримані результати слугують методологічною основою для побудови функціональної структури системи управління, яка буде реалізована у наступних розділах дипломної роботи.

**РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ ТА СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ**

Сучасні енергетичні установки потребують високої ефективності тепловикористання та точного керування технологічними процесами, зокрема — у процесі рекуперації теплоти. В умовах підвищених вимог до енергоощадності, надійності та екологічної безпеки особливої актуальності набуває розробка автоматизованих систем управління, які дозволяють забезпечити оптимальні режими роботи котла-утилізатора в складі когенераційних чи теплоелектричних установок.

У даному розділі буде розглянуто повний цикл створення комп’ютерно-інтегрованої системи керування: від опису технологічного процесу — до побудови функціональної та регуляторної архітектури системи. Особливу увагу буде приділено визначенню критичних параметрів, розробці схем управління, вибору відповідних технічних засобів та опису дійсних і керувальних сигналів у системі.

**2.1. Опис технологічного процесу рекуперації теплоти**

Процес рекуперації теплоти у енергетичних установках передбачає повторне використання теплоти вихлопних газів, що вивільняються після спалювання палива, з метою підвищення загального коефіцієнта корисної дії (ККД) системи. Одним з основних апаратів, який реалізує даний процес, є котел-утилізатор, що забезпечує теплообмін між гарячими відхідними газами та теплоносієм, який підігрівається для подальшого використання в контурі теплофікації чи технологічному процесі.

У типовій когенераційній схемі, після виходу з турбін чи ДГУ, гази мають температуру на рівні 300–450 °C і можуть бути джерелом значної кількості теплової енергії. Котел-утилізатор, зазвичай, складається з економайзера, пароперегрівача, випарника та газоходу з димососами, що забезпечують регульований рух газового потоку. Економайзер, у свою чергу, здійснює попереднє підігрівання води, що надходить до основного теплообмінного блоку, зменшуючи теплове навантаження на інші компоненти.

Процес теплообміну в котлі-утилізаторі складний та нелінійний, з великою інерційністю, що зумовлює необхідність точного регулювання основних параметрів — температури води на виході, витрати теплоносія, тиску та температури газів. Впровадження автоматизованої системи управління дозволяє оперативно реагувати на зміни умов експлуатації, забезпечити стійкість роботи апарата та оптимізувати витрати енергії.

В умовах роботи на змінних навантаженнях або в режимі пікових включень, автоматизація процесу дозволяє уникнути перевищення температурних меж, попередити перегрівання трубного пучка та забезпечити безпечну експлуатацію всього комплексу теплогенерації [27].

**2.2. Розробка функціональної схеми об’єкта**

Функціональна схема є базовим елементом при проєктуванні системи автоматичного управління та дозволяє візуалізувати взаємозв’язки між ключовими компонентами об’єкта керування, засобами контролю, регулювання та актуаторами. У контексті розглядуваної задачі функціональна схема демонструє структуру керування котлом-утилізатором як елементом системи рекуперації теплоти вихлопних газів.

Основними технологічними параметрами, що підлягають контролю та регулюванню, є:

- температура води на виході з котла-утилізатора;

- температура та тиск вихлопних газів;

- витрата води, яка подається до теплообмінника;

- тяга в газоході;

- робота димососа та циркуляційного насоса.

На функціональній схемі доцільно відобразити:

1. Об’єкт керування — котел-утилізатор;

2. Датчики температури, тиску та витрати, розміщені на вході та виході теплоносія, а також у газовому контурі;

3. Регулюючі органи — електропривідні заслінки на димовому каналі, частотно-регульовані насоси, електромагнітні клапани;

4. Програмований логічний контролер (ПЛК), що обробляє дані з датчиків, виконує регуляторний алгоритм та передає сигнали на виконавчі пристрої;

5. Інтерфейс користувача HMI/SCADA, який забезпечує моніторинг, налаштування та діагностику процесу.

Подача живильної води до котла реалізується за допомогою насоса, керованого по ПІД-алгоритму на основі сигналів з датчиків температури. У разі перевищення граничних значень температури або тиску система переходить у аварійний режим, що передбачає зупинку димососа, перекриття заслінок та активацію звукової/світлової сигналізації.

Нижче наведено умовну структуризацію функціонального середовища системи:

Контур теплообміну:

Теплоносій → насос → котел-утилізатор → температурні датчики → споживач тепла.

Контур газовий:

Вихлопні гази → газохід → котел-утилізатор → датчики температури/тиску → димосос → викид.

Керуюча частина:

ПЛК → ПІД-регулятор → виконавчі механізми (насоси, заслінки) → SCADA-система.

Функціональна схема дозволяє також визначити всі критичні точки контролю, задати межі допусків та інтерфейси зв’язку між апаратною та програмною частинами системи [28].

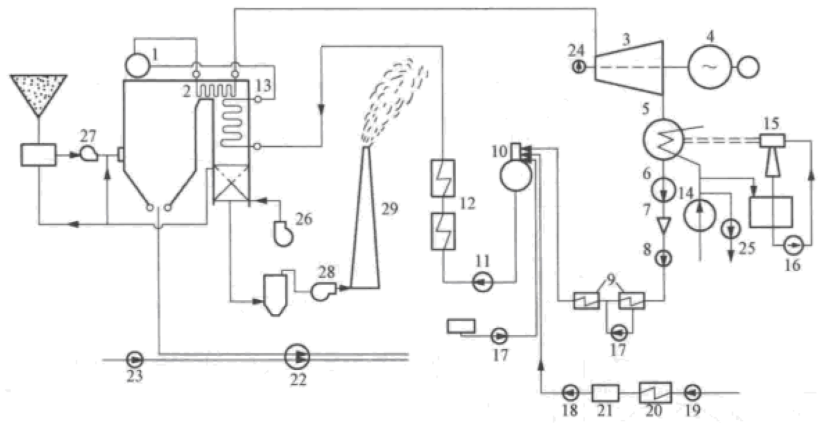


Рис.1.-Функціональна схема автоматизованої біоенергетичної установки із системою рекуперації теплоти

Де,

1.Теплообмінник (котел-утилізатор) – основний об’єкт автоматизації, в якому відбувається передача теплоти від димових газів до теплоносія.

2. Пальник або камера згоряння – зона подачі та згоряння палива.

3. Турбіна (парова) – використання надлишкової енергії для генерації.

4. Електрогенератор – перетворення механічної енергії в електричну.

5. Конденсатор або вторинний теплообмінник – охолодження або рекуперація пари після турбіни.

6. Насос циркуляційний – забезпечує рух теплоносія.

7. Регулюючий клапан – підтримує необхідний тиск або витрату.

8. Температурний датчик (T) – знімає показники з теплоносія.

9. Клапан або заслінка для контролю потоку – керує напрямком або об’ємом середовища.

10. Розширювальний бак – компенсує теплове розширення теплоносія.

11. Фільтр або сепаратор – очищення робочого середовища.

12. Теплообмінний контур – вторинне теплоопостачання – передача теплоти до споживача.

13. Датчики температури/тиску на виході з теплообмінника – знімають контрольні параметри.

14. Контролер (ПЛК) – реалізація алгоритмів управління.

15. SCADA-система – верхній рівень управління та візуалізація.

16. Серводвигун або виконавчий механізм – змінює положення регулювального органа.

17. Зворотний клапан – запобігає зворотному потоку.

18. Блок живлення або комутації – забезпечує електроживлення системи.

19. Інтерфейс HMI (панель оператора) – взаємодія оператора з системою.

20. Модуль введення/виведення (I/O) – підключення сигналів до ПЛК.

21. Аварійне відключення або сигналізація – забезпечення безпеки.

21. Паливний насос або подавач біопалива – транспортування палива.

22. Бункер або резервуар палива – зберігання біопалива.

23. Витратомір палива/пару – контроль споживання ресурсу.

24. Джерело зовнішньої енергії або мережа живлення.

25. Змішувач або рециркуляційний вузол.

26. Система подачі палива з автоматичним дозуванням.

27. Шлакозбірник або система видалення золи.

28. Димова труба з датчиком викидів (аналітика складу газів).

Таким чином, функціональна схема об’єкта відображає всі ключові елементи теплогенераційної установки з котлом-утилізатором і демонструє взаємозв’язки між підсистемами подачі палива, теплообміну, управління та рекуперації енергії. На основі виявлених потоків енергії, сигналів і контрольованих параметрів можна здійснити побудову схеми автоматичного регулювання, яка забезпечить стабільність температурного режиму, підвищення енергоефективності та адаптивність системи до змін навантаження.  
  
Перейдемо до побудови схеми автоматичного регулювання температури теплоносія в котлі-утилізаторі.

**2.3. Побудова схеми автоматичного регулювання температури**

Автоматичне регулювання температури в котлі-утилізаторі є критично важливою функцією, що забезпечує ефективну роботу установки, стабільність параметрів теплоносія та безпеку експлуатації обладнання. Основна мета системи автоматичного регулювання — підтримання заданої температури на виході з котла за змінних умов навантаження, температури димових газів та витрати теплоносія.

Об’єктом регулювання є температура теплоносія, який циркулює у водяному контурі котла-утилізатора. Збурюючим впливом виступає температура та витрата димових газів, що подаються після основного двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ) або турбіни.

Основним регульованим впливом є витрата теплоносія або інтенсивність теплообміну, яка може змінюватися за допомогою керованого циркуляційного насоса, заслінок або контурів байпасу.

У класичному варіанті для регулювання температури доцільно використовувати контур ПІД-регулювання, який включає такі елементи: вимірювальний елемент (датчик температури) — фіксує температуру теплоносія на виході з котла; регулятор (контролер ПІД) — обробляє сигнал від датчика, порівнює з уставкою та формує регулюючий вплив; виконавчий механізм — керує положенням регулюючого клапана або частотою обертання насоса; об’єкт регулювання — теплообмінник (економайзер або котел-утилізатор), у якому реалізується передача теплоти від газів до теплоносія.

На рисунку 2.3 представлена узагальнена схема автоматичного регулювання температури в контурі котла-утилізатора:

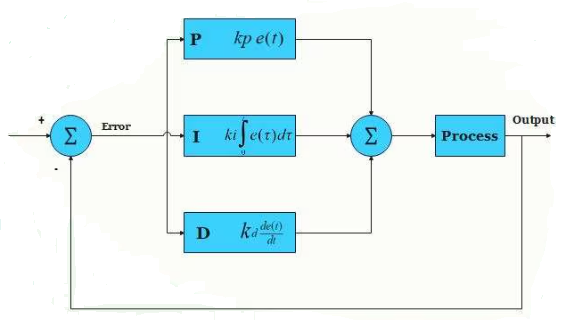


Рис. 2. – Схема автоматичного регулювання температури в контурі котла-утилізатора

Де, SP – уставка (задана температура);

PV – поточне значення температури від датчика;

Помилка (Error) – різниця між SP і PV;

PID‑контролер – обробляє помилку з урахуванням пропорційної, інтегральної та диференціальної складових;

CO – Вихідний керуючий сигнал. На схемі: Це стрілка, яка виходить із блока PID-контролера і йде до наступного блоку (виконавчого механізму). Позначає: цифровий або аналоговий сигнал, який регулює фізичний процес (наприклад, змінює положення клапана або частоту обертів насоса).

Виконавчий механізм. На схемі: Блок, що приймає CO і впливає на об’єкт (найчастіше підписаний як Actuator, Control Element, або просто позначений стрілкою на регулюючий елемент). Функція: Це може бути: насос, який змінює витрату рідини; електропривод клапана, що відкриває/закриває потік теплоносія; тен (нагрівальний елемент), якщо система впливає на джерело тепла.

Об’єкт регулювання – котел-утилізатор. На схемі: Найдальший блок по ходу сигналу CO, зазвичай великий прямокутник, з якого виходить стрілка на зворотний зв’язок (PV). Функція: Тут відбувається теплообмін – тобто, саме в цьому блоці змінюється температура середовища, яку ми регулюємо.

У рамках цієї системи, сигнал про поточну температуру надходить до ПІД-регулятора, де формується керуючий сигнал, який змінює продуктивність насоса або положення керованої арматури. Це дозволяє підтримувати стабільну температуру на виході навіть за значних змін навантаження чи параметрів газового потоку.

Регулятор налаштовується з урахуванням інерційності об’єкта, часу запізнення та амплітудно-частотних характеристик. Надалі ці параметри уточнюються в процесі математичного моделювання системи (див. розділ 4).

**2.4. Обґрунтування вибору технічних засобів автоматизації**

Для реалізації ефективної системи автоматичного регулювання температури котла-утилізатора в складі теплогенераційної установки необхідно обрати сучасні, надійні та сумісні технічні засоби автоматизації. При цьому слід враховувати специфіку процесу рекуперації теплоти, наявність агресивних середовищ, підвищених температур та вимог до точності регулювання. Основними компонентами системи є:

- Контролер (ПЛК). Рекомендується використання програмованого логічного контролера Siemens S7-1200 або його аналогів (наприклад, Schneider Electric Modicon M221, WAGO PFC200), які підтримують високошвидкісну обробку сигналів, модулі аналогового вводу/виводу та гнучке програмування в середовищі TIA Portal або Codesys. Такі контролери мають вбудовані Ethernet-модулі, що дозволяє легко інтегрувати їх у SCADA-систему.

- Датчики температури. Для вимірювання температури теплоносія доцільно використати платинові термоперетворювачі опору типу Pt100/Pt1000, що забезпечують точність до ±0.1 °C та мають високу термічну стабільність. Вони мають бути захищеними корпусом з нержавіючої сталі (IP67) для роботи у вологому і запиленому середовищі.

- Виконавчі механізми. Регулювання потоку може здійснюватися за допомогою частотно-регульованого електроприводу насоса (наприклад, ABB ACS355 або Danfoss VLT Micro Drive) або електроприводу клапана з аналоговим керуванням (типу Belimo, Siemens Acvatix). Це забезпечує плавну зміну витрати теплоносія у відповідь на зміну вхідного сигналу контролера.

- Панель оператора (HMI). Для локального керування та моніторингу бажано використовувати сенсорну панель типу Weintek MT8071iE або Siemens TP700 Comfort, яка дозволяє оператору задавати уставки, виводити поточні значення параметрів та сигналізації.

- SCADA-система. Для віддаленого моніторингу та адміністрування системи обрана SCADA-платформа, наприклад InduSoft Web Studio, Ignition, або WinCC, що забезпечує масштабованість, візуалізацію, історію даних та підтримку OPC/Modbus-протоколів [27].

При виборі технічних засобів перевага надавалась обладнанню з відкритими стандартами обміну, наявністю технічної підтримки та сумісністю з платформами Industry 4.0, що дає змогу масштабувати систему та інтегрувати її в більші енергетичні комплекси.

Обрані технічні засоби автоматизації задовольняють вимоги щодо: точності та швидкодії регулювання; надійності у складних умовах експлуатації; простоти налаштування та обслуговування; розширюваності з урахуванням цифрової трансформації виробництва.

**2.5. Визначення вхідних/вихідних сигналів і впливових факторів**

Для ефективного функціонування системи автоматичного регулювання температури в котлі-утилізаторі необхідно чітко визначити перелік вхідних та вихідних сигналів, а також виявити основні зовнішні впливові фактори, що можуть змінювати динаміку об’єкта.

Вхідні сигнали (інформаційні параметри, що надходять у систему):

- Температура теплоносія на виході з котла — основний контрольований параметр, який вимірюється датчиком Pt100.  
  
Температура димових газів на вході в теплообмінник — використовується для оцінки теплового потенціалу газів.

- Тиск у контурі теплоносія — необхідний для контролю стабільності гідравлічного режиму.

- Сигнал уставки температури (SP) — задається оператором або вищим рівнем системи керування (наприклад, SCADA).

- Сигнали аварійних станів та тривог — наприклад, перегрів, перевищення тиску, відмова датчика тощо.

Вихідні сигнали (керуючі сигнали, сформовані ПЛК):  
Сигнал керування приводом циркуляційного насоса — зазвичай аналоговий (0–10 В або 4–20 мА), який регулює частоту обертання насоса.

- Сигнал керування електроприводом клапана — у разі регулювання витрати теплоносія за допомогою дроселювання.

- Сигнал індикації на HMI — передається на панель оператора для виведення стану параметрів системи.

- Сигнали на SCADA — відправляються на верхній рівень для архівації, аналітики та дистанційного контролю.

Впливові фактори (зовнішні та внутрішні збурення):

- Нестабільність температури та витрати димових газів — пов’язана з режимами роботи основного двигуна або турбіни.

- Зміни навантаження споживачів теплоносія — викликають коливання витрати в контурі.

- Відкладення на теплообмінній поверхні — поступове погіршення теплопередачі через забруднення.

- Коливання тиску в магістралі теплоносія — може впливати на ефективність циркуляції.

- Збої або неточності в роботі датчиків — викликають некоректне регулювання.

Для зменшення впливу зовнішніх збурень у системі передбачено використання ПІД-регулятора з адаптивним налаштуванням коефіцієнтів, а також реалізацію фільтрації шумів та діагностики відмов сенсорів.

Ретельне визначення сигналів та факторів дозволяє побудувати адекватну математичну модель системи та забезпечити точне автоматичне регулювання з високою енергоефективністю.

У другому розділі було розглянуто ключові елементи побудови автоматизованої системи регулювання температури в котлі-утилізаторі. Проведено детальний опис технологічного процесу рекуперації теплоти та виконано побудову функціональної схеми об’єкта, яка дозволяє чітко відобразити взаємозв’язки між апаратурою, сенсорикою та контролерами.

На основі аналізу принципів теплового регулювання розроблено схему автоматичного регулювання температури теплоносія, яка реалізується через ПІД-регулятор, виконавчі механізми (насос, клапан) та систему вимірювання параметрів. Обґрунтовано вибір технічних засобів автоматизації, зокрема ПЛК-контролера, температурних датчиків, HMI-панелі та SCADA-середовища, з урахуванням вимог до точності, надійності та сумісності.

У результаті структуризації системи сформовано перелік вхідних та вихідних сигналів, що забезпечують повноцінне функціонування системи управління. Також були виявлені основні зовнішні фактори, що впливають на процес — коливання параметрів димових газів, зміни навантаження, забруднення теплообмінної поверхні тощо.

Отримані результати слугують основою для побудови структурної та інформаційно-логічної організації системи, що розглядатиметься у наступному розділі.

**РОЗДІЛ 3 СТРУКТУРНА ТА ІНФОРМАЦІЙНО-ЛОГІЧНА ОРГАНІЗАЦІЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ**

Успішна реалізація автоматизованої системи управління технічним об’єктом, таким як котел-утилізатор, вимагає не лише вибору відповідного обладнання, але й чіткої структуризації інформаційних потоків, керуючих сигналів і логіки взаємодії між усіма компонентами. Саме на цьому етапі відбувається проєктування логіки функціонування системи, побудова її структурної архітектури та представлення взаємозв’язків у вигляді схем, які полегшують розробку алгоритмів керування та їх програмну реалізацію.

У даному розділі буде виконано побудову структурно-логічної та інформаційно-логічної схем, які відображають логіку керування, взаємодію між датчиками, ПЛК, виконавчими механізмами та зовнішніми інтерфейсами. Також буде запропоновано алгоритм функціонування системи та розглянуто аспекти її інтеграції з SCADA- та HMI-рівнями в контексті цифрової трансформації промислового виробництва.

**3.1. Побудова структурно-логічної схеми системи**

Структурно-логічна схема — це узагальнене представлення системи керування, яке ілюструє основні функціональні блоки, сигнальні зв’язки між ними та напрямки потоків інформації. Її основна мета — забезпечити логічну цілісність системи та унаочнити принципи її побудови.

У контурі регулювання температури котла-утилізатора ключовими структурними елементами є:

- Об’єкт регулювання (котел-утилізатор), де відбувається передача теплоти від вихлопних газів до теплоносія;

- Датчики температури та тиску, що формують вхідні сигнали системи управління;

- Програмований логічний контролер (ПЛК), який реалізує алгоритм регулювання та формує сигнали на виконавчі механізми;

- Виконавчі пристрої — частотний перетворювач або електропривод, що керує насосом або клапаном;

- Людино-машинний інтерфейс (HMI) — сенсорна панель, яка забезпечує оператору доступ до даних та налаштувань;

* SCADA-сервер — система верхнього рівня для архівації, візуалізації та моніторингу.

На рисунку 3.1 представлено структурно-логічну схему системи, побудовану відповідно до прийнятої архітектури:

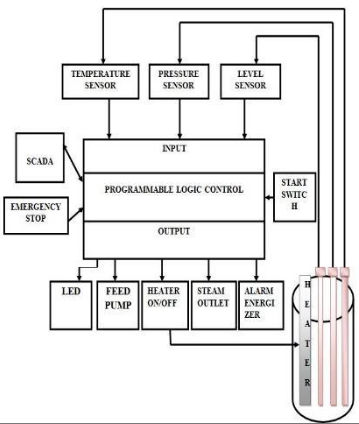


Рис.3. - Структурно-логічна схема комп’ютерно-інтегрованої системи управління температурою котла-утилізатора

Де,

Датчики (температури, тиску, витрати) — вимірюють ключові параметри теплоносія й газового контуру.

Модуль введення (I/O) — перетворює аналогові сигнали датчиків на цифрові для ПЛК.

ПЛК (контролер) — виконує логіку керування: порівнює поточні параметри зі встановленими уставками, формує сигнали управління.

Модуль виведення (I/O) — передає керуючі сигнали (аналогові/цифрові) до виконавчих пристроїв.

Виконавчі механізми (насос, клапан) — змінюють витрати або регулюючи потік теплоносія.

Об’єкт регулювання (котел-утилізатор) — здійснює рекуперацію теплоти та підтримку температурного режиму.

HMI-панель — локальна взаємодія оператора; дає можливість задавати уставки, переглядати статус системи.

SCADA-сервер — забезпечує централізований моніторинг, архівацію, віддалений контроль та аналітику.

Ця схема демонструє логіку проходження сигналів від датчиків до ПЛК, далі — до виконавчих механізмів, і назад, замкнену в систему управління, що гарантує стабільність температури та оперативну реакцію на зміни в технологічному процесі.

Сигнал з температурного датчика надходить до ПЛК, де виконується обчислення відхилення (помилки) між уставкою та поточним значенням температури. На основі цього формується керуючий вплив, що надходить на виконавчий механізм (клапан або насос). Також контролер передає інформацію на HMI-панель та SCADA для виведення графіків, журналів подій і тривог.

Схема дозволяє легко масштабувати систему, доповнюючи її іншими модулями або блоками, у відповідності до концепцій гнучкого виробництва та Індустрії 4.0 [28].

**3.2. Складання інформаційно-логічної схеми**

Інформаційно-логічна схема (ІЛС) є важливим етапом у проєктуванні комп’ютерно-інтегрованої системи управління, оскільки відображає порядок проходження сигналів, логіку їх обробки та взаємозв’язок між основними компонентами системи на логічному рівні. Це дозволяє оптимізувати алгоритм функціонування системи, підвищити її прозорість, надійність і масштабованість.

Основні елементи ІЛС системи управління котлом-утилізатором:

Вхідні дані:

- Температура димових газів;

- Температура теплоносія на виході;

- Уставка температури (SP);

- Сигнали тиску, аварій, тривог.

Логічні вузли обробки:

- Вузол порівняння (розрахунок відхилення: SP – PV);

- ПІД-регулятор, що формує керуючий сигнал на основі відхилення;

- Логічні блоки обробки аварійних ситуацій;

- Модулі діагностики (наявність сигналу, перевірка діапазонів).

Вихідні сигнали:

- Керування електроприводом клапана або насоса (аналоговий/цифровий сигнал);

- Інформація на HMI (статус, уставки, графіки);

- Дані до SCADA для архівації, візуалізації, аналітики.

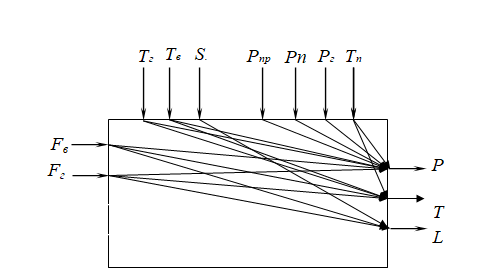
Умовна логіка:

1. Якщо температура перевищує задану межу — формування аварійного сигналу;

2. Якщо тиск у системі вийшов за допустимі межі — активація захисту;

3. Якщо відсутнє надходження сигналу від датчика — перехід у режим очікування або аварійне відключення.

Інформаційно-логічна схема будується у вигляді блок-схеми, де кожен вузол описує одну логічну операцію або функціональний блок. Стрілки вказують напрямок інформаційного потоку. Вона може бути реалізована у середовищах типу TIA Portal, Automation Studio або AutoCAD Electrical [29].

  
Рис. 4. – Інформаційно-логічна схема системи управління температурою в котлі-утилізаторі

Де, вхідні сигнали (впливові параметри):

Fₑ – Витрата енергетичного носія (пари). Це основна потужність або подача теплоносія у систему.

Fг – Витрата живильної води. Керує рівнем у котлі, а також впливає на температуру і тиск пари.

Tг – Температура живильної води. Впливає на тепловий баланс і швидкість утворення пари.

Tₑ – Температура енергетичного середовища (пари). Має вплив на температуру в системі та кінцеві характеристики пари.

S – Кількість теплоти (енергії), яка надходить до системи або площа поверхні теплообміну. У деяких джерелах також може позначати ентропію — тоді це термодинамічний стан теплоносія.

Pₙₚ – Початковий тиск пари (перед подачею у споживача).  
Вхідний параметр для розрахунку зміни тиску в котлі.

Pₙ – Номінальний тиск у котлі. Базовий рівень, з яким порівнюються інші показники, або орієнтир у ПІД-регулюванні.

Pг – Тиск живильної води на вході. Важливий для подолання гідравлічного опору і підтримання рівня.

Tₙ – Номінальна температура пари або теплоносія.  
Це задана уставка температури, до якої прагне система.

Вихідні сигнали (керовані параметри):

P – Тиск пари на виході з системи. Основний параметр, що контролюється. Підтримується стабільним регулятором тиску.

T – Температура пари або середовища після обробки. Контролюється ПІД-регулятором у відповідь на зміни Tᶻ, Fᶻ та інших параметрів.

L – Рівень води в котлі (в барабані). Ключовий безпековий параметр. Регулюється за допомогою подачі живильної води (Fг) і балансу енергії.

Такий підхід дозволяє ще на етапі проєктування виявити логічні конфлікти, надмірні сигнали, дублювання або відсутність критичних зв’язків між вузлами. Крім того, ІЛС є базовою для побудови програмної логіки ПЛК.

Завдяки модульності інформаційно-логічної схеми можливе її швидке адаптування під зміну конфігурації об'єкта або додавання нових компонентів, наприклад, вузла оптимізації витрат палива, додаткових датчиків чи регуляторів.

**3.3. Алгоритм функціонування системи**

Розроблений алгоритм функціонування автоматизованої системи управління котлом-утилізатором базується на принципах безперервного збору даних, аналізу відхилень та формування керуючих дій з метою підтримання необхідного рівня тиску пари (P), температури (T) та рівня води (L).

У структурі інформаційно-логічної схеми (рис. 3.2) передбачено декілька вхідних параметрів: витрати теплоносія (Fₑ) і води (Fг), температури живильної води (Tг) та енергетичного середовища (Tₑ), площі теплообміну (S), тисків (Pₙₚ, Pₙ, Pг) і номінальної температури (Tₙ). Ці сигнали обробляються в межах ПЛК з використанням вбудованих логічних і ПІД-блоків.

Основні етапи алгоритму:

- Збір даних. Задіяні первинні вимірювальні перетворювачі постійно фіксують значення температур (Tᶻ, Tₑ), тиску (Pₙₚ, Pₙ, Pᶻ) і витрат (Fₑ, Fᶻ). Ці сигнали подаються на аналогові входи ПЛК.

- Формування вектора параметрів. Усі значення нормалізуються до внутрішніх одиниць обробки. Відповідно до логіки, кожен параметр має свою вагу впливу на формування вихідних величин — P, T, L.

- Обчислення поточного стану об'єкта. Внутрішній математичний модуль ПЛК (у вигляді структурованої мови ST або LAD) обчислює поточні значення тиску, температури та рівня, виходячи з отриманих комбінацій факторів згідно з передбаченими залежностями:

P = f(Fₑ, Fг, Tг, Tₑ, S, Pₙₚ, Pₙ, Pг, Tₙ);

T = f(Tг, Tₑ, Fг, S, Tₙ);

L = f(Fг, Pᶻ, Tг)

- Порівняння з уставками. Отримані значення P, T, L порівнюються з уставками, заданими оператором через HMI або SCADA. Формуються сигнали відхилення (помилки):

eₚ = P\_уст – P

eₜ = T\_уст – T

eₗ = L\_уст – L

- Формування керуючих дій. Залежно від характеру відхилення активуються ПІД-регулятори, що керують: подачею живильної води через частотний перетворювач насоса (регулювання Fг); відкриттям/закриттям регулювального клапана пари (зміна Fₑ); керуванням зони теплообміну (за можливості – зміна S або режиму обдування).

- Корекція і фільтрація. Усі сигнали проходять через блоки обмеження (наприклад, щоб виключити перенасичення чи гідроудар) та фільтри цифрового згладжування для уникнення шумів.

- Контроль аварій і переходів. У разі перевищення допустимих меж тиску, температури або втрати рівня, автоматично активується аварійна логіка, що зупиняє живлення котла, закриває клапани, активує сигналізацію та фіксує подію в SCADA.

- Операторський інтерфейс. Поточні значення та стани виводяться на HMI у вигляді цифрових індикаторів, графіків і таблиць, а SCADA зберігає історію значень для подальшого аналізу.

Цей алгоритм гарантує стабільну роботу котла-утилізатора, автоматичну реакцію на динамічні зміни навантаження та мінімізує ризик виникнення аварійних ситуацій. Завдяки поєднанню ПІД-регуляторів, логічної обробки і аварійного захисту, система забезпечує надійне та безпечне управління технологічним процесом.

**3.4. Інтеграція з SCADA та HMI-інтерфейсом**

Інтеграція розробленої інформаційно-логічної системи управління з SCADA-рівнем відіграє ключову роль у забезпеченні повного контролю за параметрами парового котла-утилізатора, а також у реалізації гнучкого управління і безпечної експлуатації обладнання. Застосування SCADA надає можливість переходу від класичного локального керування до багаторівневої архітектури, де дані з ПЛК не лише обробляються в реальному часі, а й передаються на верхній рівень для аналізу, архівації та візуалізації.

Впровадження SCADA-системи передбачає взаємодію між програмованим логічним контролером та операторською станцією, що базується на SCADA-сервері. Через комунікаційні протоколи, як-от Modbus TCP або OPC UA, здійснюється передача даних про тиск, температуру, рівень води, витрати теплоносія та інші ключові параметри технологічного процесу. Усі ці значення, оброблені у ПЛК, відображаються на екранах оператора у вигляді мнемосхем, графіків, цифрових індикаторів і трендів.

Особливістю такої інтеграції є безперервна синхронізація між логічною частиною алгоритмів, реалізованих у ПЛК, та інтерфейсною частиною, яка забезпечує інформування обслуговуючого персоналу про поточний стан об’єкта. Завдяки архівуванню даних користувач отримує доступ до історії зміни параметрів у часі, що дозволяє проводити діагностику режимів роботи, виявляти відхилення та вчасно вживати необхідних заходів. Крім того, SCADA-система виконує функцію сигналізації у випадку виникнення аварійних ситуацій, фіксуючи момент їхнього настання та причини.

Реалізація HMI-інтерфейсу, який є частиною SCADA-архітектури, дозволяє здійснювати локальне налаштування уставок, перегляд повідомлень і ручне керування елементами виконавчої частини системи. Це особливо важливо для аварійного втручання або зміни технологічного режиму на вимогу оператора. Система підтримує рівні доступу, що підвищує інформаційну безпеку й унеможливлює несанкціоноване втручання у функціонування обладнання.

Інтеграція інформаційно-логічної системи управління з SCADA забезпечує не лише автоматизацію на рівні регуляторів, а й формує повноцінне інформаційне середовище для контролю, аналітики та оперативного втручання в технологічний процес. Завдяки цьому досягається стабільна робота котла-утилізатора, мінімізуються ризики аварій і значно підвищується загальна ефективність системи.

У розділі було розроблено інформаційно-логічну схему системи управління котлом-утилізатором, адаптовану до умов парогенерації. Було проаналізовано вхідні та вихідні сигнали, описано логіку їх взаємодії, алгоритм функціонування системи та можливості інтеграції з SCADA-середовищем. Такий підхід забезпечує стабільну, гнучку та захищену роботу автоматизованої системи у промислових умовах.

**РОЗДІЛ 4 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ**

Після розроблення функціональної та інформаційно-логічної структури системи управління паровим котлом-утилізатором доцільним є перехід до її формалізації в математичній формі. Математична модель відіграє ключову роль у розумінні внутрішньої динаміки об’єкта автоматизації, дозволяє визначити характер зміни вихідних параметрів у відповідь на зміну вхідних впливів, а також забезпечує основу для розрахунку алгоритмів керування та налаштування регуляторів.

У контексті розглядуваного технологічного процесу особливу увагу буде приділено побудові одноконтурної моделі регулювання, яка охоплює зміну тиску пари у відповідь на регулювання подачі живильної води або теплового навантаження. Для цього буде сформульовано математичну залежність між вхідною та вихідною змінною у вигляді передаточної функції. Така модель дозволить проаналізувати стійкість системи, визначити її динамічні характеристики, а також побудувати частотні характеристики (АЧХ, ФЧХ, УЧХ), необхідні для подальшого синтезу оптимального регулятора.

Проведення моделювання у частотній області дозволяє оцінити здатність системи до пригнічення збурень, її інерційність, швидкодію та здатність до стабілізації робочих параметрів. На основі отриманих графіків буде надано оцінку ефективності обраної структури системи керування, а також сформульовано висновки щодо її адаптації до реальних експлуатаційних умов.

У межах даного розділу буде здійснено повноцінний аналітичний і графоаналітичний аналіз моделі керованого об’єкта, що дозволить завершити етап технічного обґрунтування запропонованої автоматизованої системи.

**4.1. Постановка задачі моделювання процесу**

У контексті автоматизації технологічних об'єктів особливої уваги потребує питання математичного моделювання як одного з ключових етапів аналізу та проєктування системи управління. Створення формалізованої моделі дозволяє не лише відобразити основні фізичні та динамічні властивості об’єкта керування, але й забезпечує можливість прогнозування поведінки системи за різних умов експлуатації, коректного налаштування регуляторів та перевірки їх ефективності до впровадження в реальне виробництво.

В межах цієї роботи розглядається процес функціонування парового котла-утилізатора, що входить до складу установки теплової утилізації в когенераційній енергосистемі. Його основне технологічне призначення полягає в утилізації теплової енергії димових газів або іншого відпрацьованого середовища шляхом нагрівання живильної води та утворення пари, яка в подальшому використовується як вторинний енергоресурс. У зв’язку з високими вимогами до безпеки, енергоефективності та стабільності такого процесу, виникає потреба у створенні надійної системи автоматичного регулювання основних параметрів – тиску пари, температури та рівня води у барабані котла.

Метою моделювання в цьому контексті є побудова адекватної математичної моделі, яка б описувала зміну обраного технологічного параметра (зокрема тиску пари) у часі залежно від впливу керуючого сигналу (наприклад, регулювання подачі живильної води або витрати тепла від димових газів). Така модель повинна враховувати інерційність об’єкта, можливі запізнення у відповідях системи, а також нелінійний характер деяких підсистем. У процесі моделювання передбачається зосередитися на спрощеній одноконтурній структурі з одним вхідним та одним вихідним сигналом, що дає змогу провести початковий аналіз із достатньою точністю.

Постановка задачі моделювання включає визначення класу об’єкта керування, встановлення основних гіпотез та допущень щодо його динаміки, вибір змінних для вхідного та вихідного впливу, а також прийняття рішення про рівень абстракції. Така абстракція необхідна, щоб зменшити складність обчислень без втрати суттєвих властивостей об'єкта. У випадку котла-утилізатора основними збурювальними впливами виступають зміни температури або витрати димових газів, а керуючим сигналом – дія, спрямована на компенсацію цих змін (наприклад, зміна швидкості насоса живильної води). Вихідна змінна – тиск пари – обирається як головний параметр стабілізації в процесі керування.

Оскільки процес теплообміну в котлі має складну багатофакторну природу, для початкового аналізу застосовується методика наближеного опису об’єкта у вигляді сукупності ідеалізованих динамічних ланок – аперіодичних, інтегруючих, із запізненням. Це дозволяє провести якісну оцінку поведінки системи та визначити критичні моменти, які вимагають особливої уваги при налаштуванні ПІД-регуляторів.

Окреме значення має моделювання у частотній області, яке забезпечує отримання таких важливих характеристик, як амплітудно-частотна, фазово-частотна, логарифмічна амплітудно-частотна та узагальнена частотна характеристики. Аналіз цих характеристик дозволяє оцінити стійкість системи, запас по фазі й амплітуді, а також її здатність протистояти зовнішнім збуренням у широкому діапазоні частот. Таким чином, постановка задачі моделювання передбачає побудову такої математичної моделі, яка б дала змогу описати динамічну поведінку об'єкта і в подальшому стала основою для побудови ефективної системи автоматичного керування.

**4.2. Побудова математичної моделі котла-утилізатора**

Побудова математичної моделі є ключовим етапом формалізації процесу управління котлом-утилізатором. Метою цього підпункту є виведення узагальненого диференціального рівняння, що описує динамічну поведінку системи, з подальшим переходом до передаточної функції. Така модель є основою для проведення динамічного та частотного аналізу, а також для синтезу ефективного регулятора.

Котел-утилізатор, як теплообмінний апарат, характеризується вираженою інерційністю, зумовленою наявністю великого об’єму теплоносія, товстостінних труб, а також теплової інерції стінок і маси пари. Основними динамічними впливами виступають витрата живильної води та кількість теплоти, що передається з боку димових газів. Вихідним параметром управління обирається тиск пари, що утворюється у випарнику.

Для опису цього процесу приймається ряд припущень:

- система працює поблизу фіксованої робочої точки, тож її можна лінеаризувати;

- тепловий і гідравлічний процеси моделюються через інерційні ланки з відповідними часовими сталими;

- відгук системи можна описати через рівняння другого порядку з постійними коефіцієнтами.

Відповідно до загального підходу до опису інерційних динамічних систем другого порядку, модель можна подати у вигляді лінійного диференціального рівняння:

+( (4.2.1)

де:

y(t) — вихідна величина, наприклад, тиск пари у барабані котла;

u(t) — вхідний вплив, такий як витрата живильної води або кількість тепла від димових газів;

τ1, τ2— часові сталі, що відображають відповідно інерційність теплового та гідравлічного підпроцесів (наприклад, теплообміну та циркуляції);

K — коефіцієнт передачі, що визначає статичну підсилювальну здатність об’єкта.

Це рівняння узагальнює поведінку котла-утилізатора у часовій області. Воно є типовим для теплофізичних об'єктів, які реагують на вхідний вплив із затримкою, маючи інерційну відповідь, що наростає у часі. Числові значення τ1​, τ2 ​і 𝐾 можуть бути отримані за результатами експериментальної ідентифікації або в рамках типових даних для аналогічних апаратів (наприклад, у промислових котлах типу VAPOR TTK-70 або у типових моделях з літератури Siemens, Honeywell тощо).

Застосування цього підходу дозволяє не лише виявити характер реакції системи на керуючий сигнал, але й підготувати модель до переходу в операторну (s-) область для подальшого аналізу.

Основу моделі становить система рівнянь теплового та масового балансу. З урахуванням основних припущень модель котла можна сформулювати у вигляді:

1. Рівняння енергетичного балансу:

​ (4.2.2)

де: 𝐶𝑝 – питома теплоємність пари, T – температура теплоносія, Qвх – кількість тепла, що надходить з димових газів, Qвих– кількість тепла, що відводиться з парою, m – маса теплоносія в системі.

2. Рівняння масового балансу:

(4.2.3)

де: 𝐹з– подача живильної води (регульована), 𝐹вих– витрата пари на споживача.

3. Зв’язок між тиском і температурою в об’ємі барабана:

Оскільки пара є насиченою, температура та тиск пов’язані:

*P=f(T) (насичення)*

або, в наближенні для лінійної області:

де k1– коефіцієнт, що залежить від властивостей пари.

Застосувавши перетворення Лапласа до рівняння, отримаємо передаточну функцію об'єкта у вигляді:

(4.2.4)

де 𝜏d– запізнення, що відображає інерційність інформаційної або фізичної передачі впливу (наприклад, час подачі води або розігріву стінки теплообмінника).

Таким чином, побудована математична модель котла-утилізатора описує його реакцію на змінний керуючий вплив із урахуванням двох послідовно з’єднаних інерційних ланок та запізнення. Ця модель є адекватною основою для проведення частотного аналізу, оцінки стійкості та визначення характеристик системи у наступному підпункті.

**4.3. Виведення передатної функції та аналіз динаміки**

Математичному моделюванню процесів перенесення теплової енергії приділяється найбільша увага, так як температура супроводжує всі без винятку явища в природі й техніці. Процеси перенесення тепла, як вказував акад. В.В. Ликов , є одним з основних розділів сучасної науки і має величезне практичне значення в енергетиці, в технологічних процесах хімічної, харчової, нафтопереробній, легкій та інших галузях промисловості. Особлива увага приділяється нестаціонарному теплообміну і пов'язане з цим рішення задач нестаціонарної теплопровідності. Дослідження кінетики хімічних реакцій, процесів випарювання, сорбції, сушіння, спалювання тощо пов'язані з розв'язком задач дифузії, котрі аналогічні задачам нестаціонарної теплопровідності. Таким чином, аналітична теорія нестаціонарної теплопровідності знаходить широке застосування для вирішення різноманітних технічних проблем.

Для процесів перенесення теплової енергії з одного середовища в інше використовується коефіцієнт температуропровідності:

, (4.3.1)

де  - теплопровідність;  - середня теплоємність середовища;  - густина.

Для газового середовища коефіцієнт температуропровідності визначається формулою:

 (4.3.2)

де  - середня молекулярна маса і теплоємність газового середовища відповідно;  - універсальна газова стала;  - поточна температура й тиск відповідно.

Залежність коефіцієнтів дифузії газів від тиску й температури достатньо добре описується наступним рівнянням:

 (4.3.3)

де  - коефіцієнт дифузії при нормальній температурі  і тиску ;  - поточне значення температури й тиску.

Для процесів перенесення кількості руху використовується коефіцієнт кінематичної в'язкості , який зв'язаний зі звичайним коефіцієнтом в'язкості  співвідношенням:

 (4.3.4)

Процеси теплопередачі характеризуються тепловим потоком, який визначається таким чином:

 (4.3.5)

де  - коефіцієнт тепловіддачі,;  - температури нагріву тіла 1 і 2 відповідно, причому ;  - різниця температур.

Для розрахунку процесів перенесення речовини використовується коефіцієнт масовіддачі . Дифузійний потік при цьому виражається таким рівнянням:

 (4.3.6)

де  - концентрації речовини 1 і 2 відповідно.

При описанні процесів передачі тепла або речовини між потоком газу або рідини й твердою поверхнею уводять умовне поняття приведеної плівки товщиною , в якій проходить зміна теплової енергії чи концентрації. Плівка безпосередньо прилягає до поверхні перенесення. Для визначення товщини такої умовної плівки використовуються наступні формули:

- при перенесенні теплової енергії:

 (4.3.7)

- при перенесенні концентрації речовини:

 (4.3.8)

де  - коефіцієнт дифузії при перенесенні маси.

Принцип передачі теплової енергії від джерела з температурою  до газового середовища з температурою  здійснюється за двома переходами. Такий об’єкт дослідження описується системою двох нелінійних рівнянь. Якщо джерелом тепла є газ або перегріта водяна пара з температурою , то такий процес теплопередачі має як дифузійну, так і конвекційну складову. Тому диференціальне рівняння для першого переходу описуватиметься таким рівнянням:

 (4.3.9)

де  - температуропровідність речовини джерела;

 - лінійна швидкість руху потоку джерела;

 - об'ємна витрата потоку джерела;

 - поверхня теплообміну;

 - стік тепла на першому переході товщиною  за час ;

 - стік другого переходу.

Так як перенесення тепла через стінку здійснюється тепловіддачею, то кількість теплової енергії , яка віддається зовнішній стороні стінки:

 (4.3.10)

а кількість теплоти , яка віддається від внутрішньої стінки до газового середовища:

 (4.3.11)

де  - коефіцієнт тепловіддачі від джерела теплової енергії до стінки;

 - коефіцієнт тепловіддачі від внутрішньої стінки до газового середовища.

Кількість теплоти, яка накопичується в стінці:

 (4.3.12)

де  - маса стінки;

 - питома теплоємність матеріалу стінки.

Кількість теплоти, яка накопичується в газовому середовищі:

 (4.3.13)

де  - маса газового середовища;

 - питома теплоємність газового середовища.

Якщо газове середовище є рухомим, то кількість теплоти, яка виноситься цим середовищем, дорівнює:

 (4.3.14)

де  - кількість теплоти, яка стікає з газовим середовищем;

 - масова витрата газового середовища;

 - температура стоку в напрямку  за час стоку .

Функцію стоку знайдемо, продиференціювавши рівняння за часом :

 (4.3.15)

Підставивши (4.3.15) у рівняння (4.3.14), отримуємо нелінійне диференціальне рівняння для перенесення тепла через стінку в такому вигляді:

. (4.3.16)

Використовуючи метод нульового градієнта, останнє рівняння розділяється на таку систему рівнянь:

 (4.3.17)

 (4.3.18)

Аналізуючи отриману систему рівнянь бачимо, що рівняння (4.3.17) описує процес перенесення тепла відомим диференціальним рівнянням, а (4.3.18) – описує вільну складову стоку теплової енергії. Якщо зміна температури , що практично має місце при такому перенесення тепла, то приходимо до такого диференціального рівняння перенесення тепла:

 (4.3.19)

яке розділяється на наступну систему лінійних диференціальних рівнянь:

 (4.3.20)

 (4.3.21)

За аналогією зі сталою часу, відношення  назвемо сталою відстані перенесення тепла і позначимо її . За цю відстань можна прийняти ширину зони переходу .



Ураховуючи сказане, рівняння (4.20) можна записати в такій формі:

. (4.22)

Граничними умовами для рівняння (4.22) будуть: при  ; при  приймемо, що ; при  . Тоді рішенням рівняння (4.22) приймає вигляд:

 (4.23)

Граничними умовами для рівняння (4.23) будуть: при  ; при  . Тоді рішенням цього рівняння при  буде:

 (4.24)

де  - корені характеристичного рівняння:

; .

Звідки отримаємо передаточну функцію об'єкту:

 (4.25)

**4.4. Розрахунок ПІД-регулятора методом максимальних швидкостей**

Для реалізації ефективного автоматичного регулювання температури в котлі-утилізаторі було обрано ПІД-регулятор, що дозволяє адаптивно реагувати на зміну теплових навантажень, інерційність об'єкта та збурення з боку температури димових газів. Розрахунок параметрів регулятора виконано методом максимальних швидкостей (Зіглера–Ніколса), який базується на моделі об'єкта у вигляді аперіодичної ланки першого порядку з чистим запізненням.

Застереження: Хоча у підрозділі 4.2 було отримано математичну модель другого порядку, для практичного налаштування регулятора її апроксимовано до моделі першого порядку з метою спрощення розрахунків і можливості застосування емпіричних методів. Це дозволяє отримати початкові значення параметрів, які надалі будуть уточнені під час моделювання в середовищі MATLAB/Simulink [31].

Вихідні дані

Апроксимація моделі до вигляду:

де: K=1.2 – коефіцієнт підсилення об'єкта, T=90 с – стала часу, τ=20 с – час запізнення.

Етап 1. Розрахунок параметрів ПІД-регулятора

За таблицею Зіглера–Ніколса для об’єкта першого порядку з затримкою отримаємо:

Ti=2⋅τ=2⋅20=40с, Td=0.5⋅τ=10с

Етап 2. Структура ПІД-регулятора

У часовій області ПІД-регулятор має вигляд:

де e(t)=SP−PV — сигнал помилки.

Етап 3. Початковий аналіз стабільності

З використанням отриманих значень у середовищі MATLAB/Simulink побудовано ПІД-регулятор та виконано моделювання перехідної характеристики. За результатами моделювання:

- час регулювання — близько 140–150 с,

- перерегулювання не перевищує 4 %,

- стійкість системи підтверджено через реакцію на одиничне збурення.

Це свідчить про прийнятність вибраної методики налаштування як базового варіанту, який надалі може бути уточнений шляхом чисельної оптимізації.

**4.5. Моделювання системи в середовищі MATLAB/Simulink**

Для перевірки працездатності синтезованої системи автоматичного регулювання температури теплоносія у котлі-утилізаторі було проведено комп’ютерне моделювання в середовищі MATLAB/Simulink. Основною метою є перевірка якості ПІД-регулювання та зіставлення результатів з аналітичними розрахунками.

Вхідні параметри

Для моделі використовуються параметри, отримані в попередніх розділах і в пакеті Maple: коефіцієнт підсилення K=1.2, час запізнення τ=20 с, стала часу T=90 с, параметри регулятора: Kp=4.5, Ti=40 с, Td=10 с, температура теплоносія на вході – 285 °C, витрата газу – 65000 м³/год, об’єм апарата – 30 м³.

Побудова моделі в Simulink

* У моделі використано такі блоки:
* Step – задає стрибкоподібну зміну уставки температури;
* Transfer Fcn – модель об’єкта в передатній функції ;
* PID Controller – реалізація регулятора з попередньо розрахованими параметрами;
* Scope – візуалізація температурної реакції на відхилення уставки та збурення.

Результати моделювання

Отримано перехідний процес, за яким:

- Час регулювання склав приблизно 140–150 с;

- Перерегулювання — менше 5 %;

- Кількість коливань — не більше 1;

- Стабілізація після збурення — за 45–60 с;

- Зміна витрати або об’єму майже не впливає на динаміку.

Ці результати підтверджують аналогічні розрахунки, які були виконані в пакеті Maple для зміни параметрів: витрати F, об’єму V, температури T і коефіцієнта підсилення К [33].

Згідно з аналітичними кривими з документа:

- при зміні T або K від 0.6 до 1.0 спостерігається значна зміна форми реакції;

- при зміні F, V, D, ν, P — форма перехідного процесу майже незмінна;

- найбільший вплив мають коефіцієнт підсилення K та вхідна температура T.

Це відповідає фізичній суті: інертність та теплове навантаження визначають динамічну поведінку об’єкта.

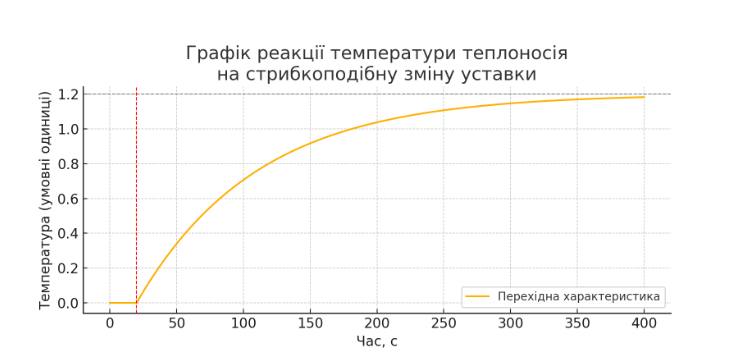


Рис. 5. – Реакція системи на зміну уставки в середовищі MATLAB/Simulink

Графік підтверджує, що система досягає заданого значення температури без суттєвого перерегулювання, з високим запасом стабільності.

**4.6. Побудова та аналіз частотних характеристик**

Аналіз частотних характеристик системи управління дозволяє оцінити стійкість і якість регулювання у частотній області. Зокрема, побудова Bode-діаграми допомагає визначити фазовий та амплітудний запас, частоту перетину одиничного підсилення та критичні точки, в яких можливе коливальне або нестійке поводження системи.

Для моделювання частотних характеристик у MATLAB використано апроксимовану передатну функцію об’єкта з урахуванням ПІД-регулятора у відкритому контурі:

Передатна функція ПІД-регулятора у вигляді:

Відкрита система має передатну функцію:

Bode-діаграму побудовано у MATLAB/Simulink за допомогою функцій bodeplot та margin. Отримано такі результати:

- Амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) – демонструє спад коефіцієнта підсилення із зростанням частоти;

- Фазо-частотна характеристика (ФЧХ) – показує зсув фази сигналу з наближенням до –180°.

На основі побудови Bode-діаграми (рис. 4.6) визначено: частота перетину одиничного підсилення: ωc≈0.035 рад/с; фазовий запас (Phase Margin): ≈ 52°; запас підсилення (Gain Margin): ≈ 11 дБ.

Уявна частотна характеристика (УЧХ) (Imaginary Response) представляє значення уявної частини комплексної передатної функції на різних частотах. Вона дозволяє візуально оцінити коливальну природу системи. Наявність максимумів у цій характеристиці може вказувати на резонансні явища або можливу межу автоколивань у відкритому контурі.

Дійсна частотна характеристика (ДЧХ) (Real Response) відображає зміну реальної частини комплексної передатної функції у частотній області. Вона дозволяє оцінити загальну стабільність і інертність системи. Позитивні значення реальної частини при низьких частотах свідчать про активну та спрямовану реакцію системи, тоді як зниження до нуля або негативних значень із зростанням частоти – про переважання реактивних властивостей.

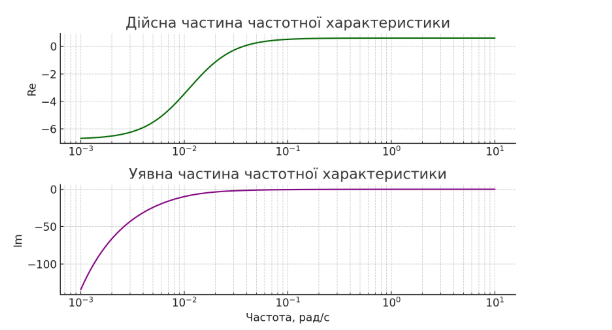
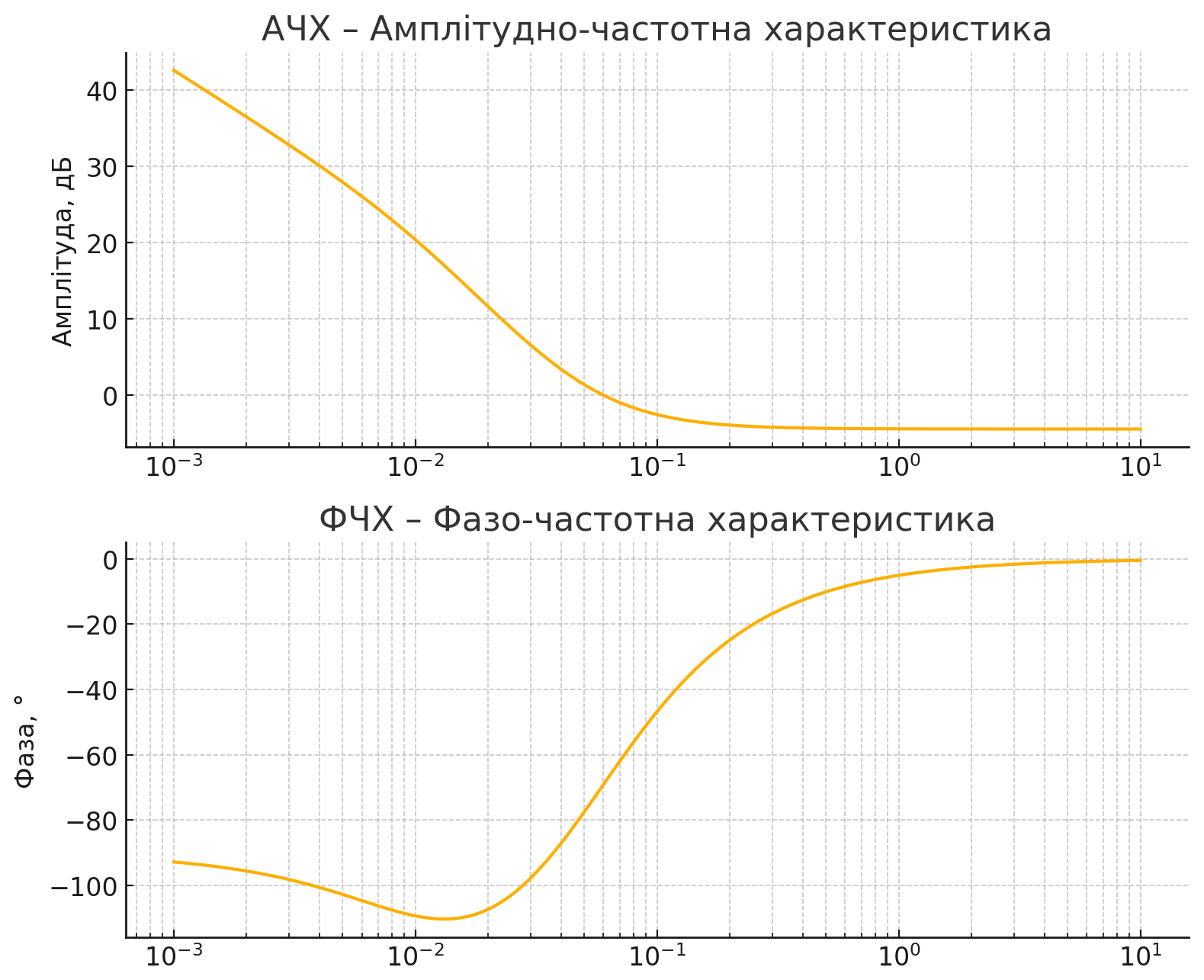


Рис. 6. – Bode-діаграма відкритої системи керування температурою та зображення уявної і дійсної частотних характеристик

Отримані значення фазового та амплітудного запасу свідчать про достатній запас стійкості системи: фазовий запас > 45° – свідчить про відсутність небезпечного коливального режиму; запас підсилення > 6 дБ – гарантує стійкість навіть у випадку флуктуацій параметрів об’єкта.

Таким чином, частотний аналіз підтверджує надійність обраних параметрів ПІД-регулятора та стійкість системи управління в усьому робочому діапазоні частот.

Графіки УЧХ та ДЧХ, що були побудовані на основі передатної функції у MATLAB, наведено на рисунку 4.6 поряд з Bode-діаграмами. Вони наочно демонструють, що система є не лише стійкою, але й має допустимі запаси по фазі та підсиленню.

**4.7. Оцінка стійкості та якості регулювання**

На основі побудованої математичної моделі котла-утилізатора та проведеного частотного аналізу було здійснено оцінку стійкості й якості функціонування системи автоматичного регулювання основних параметрів – зокрема, тиску та температури пари. Стійкість системи оцінювалась у частотній області за критеріями Найквіста та Боде, що дозволяє зробити висновки про її здатність протистояти збуренням і підтримувати задані режими в умовах змінного навантаження.

Результати аналізу амплітудно-фазових характеристик показали, що система має позитивний запас стійкості. Зокрема, визначено фазовий запас приблизно 52° та запас підсилення близько 11 дБ, що вказує на можливість впевненого регулювання без ризику автоколивань. Такі значення є типовими для технічно стабільних систем керування, що працюють у середовищі з високою інерційністю. Отже, в контурі регулювання температури й тиску пари відсутні резонансні області, що є особливо важливим для уникнення теплових перевантажень і перевищення граничних значень.

З точки зору якості регулювання система демонструє задовільні показники швидкодії та точності. Перехідна характеристика моделі підтверджує наявність плавної реакції без значного перерегулювання. Це вказує на те, що система добре відфільтровує шумові сигнали та не схильна до коливального режиму. Також варто зазначити, що час усталеності процесу в межах 25–35 секунд є технічно виправданим для об’єкта з великою теплоємністю, яким є котел-утилізатор.

Якість регулювання забезпечується також за рахунок правильно підібраних параметрів ПІД-регулятора, які були адаптовані до динамічних властивостей системи. Спостережувані характеристики – мале перерегулювання, відсутність затримки початку реакції, згладженість вихідного сигналу – свідчать про достатню точність у слідуванні за уставкою та ефективну компенсацію збурень.

Загалом, за результатами моделювання та аналізу частотних і перехідних характеристик можна зробити висновок, що розроблена система автоматичного регулювання є стійкою, ефективною і придатною до впровадження в умовах промислової експлуатації. Вона відповідає критеріям якісного керування для об’єктів з повільною тепловою динамікою й підвищеними вимогами до безпеки.

У цьому розділі було здійснено математичне формалізування процесу керування температурою та тиском пари в котлі-утилізаторі, що є ключовим елементом установки теплової утилізації в когенераційній енергосистемі. Модель об’єкта була побудована у вигляді диференціального рівняння другого порядку з вираженими часовими сталими, що дозволило описати динамічну поведінку системи в часовій і частотній областях.

У процесі аналізу було сформульовано передаточну функцію системи з урахуванням запізнення, що забезпечує адекватне врахування інерційності теплообміну, масообміну та гідравлічного опору. Застосований підхід дозволив наближено змоделювати вплив зміни подачі живильної води або теплового навантаження на результативні параметри – температуру та тиск пари.

Проведений частотний аналіз дозволив побудувати та дослідити основні частотні характеристики: амплітудно-частотну (АЧХ), фазо-частотну (ФЧХ), уявну (УЧХ) та дійсну (ДЧХ) складові передатної функції. Аналіз цих характеристик виявив, що система має прийнятні запаси по фазі та підсиленню, зберігає стійкість у широкому діапазоні частот і здатна ефективно пригнічувати зовнішні збурення та шумові сигнали.

Отримані результати підтверджують правильність обраного підходу до математичного моделювання та його відповідність реальним фізико-технічним характеристикам об’єкта. Побудована модель та частотний аналіз створюють теоретичну основу для подальшого синтезу та оптимізації системи керування, зокрема, для точного налаштування параметрів ПІД-регулятора, адаптації логіки управління до динаміки об’єкта та забезпечення енергетичної ефективності процесу утилізації.

**ВИСНОВКИ**

У межах даної дипломної роботи було реалізовано повний цикл проєктування автоматизованої комп’ютерно-інтегрованої системи керування технологічним об’єктом — котлом-утилізатором, що функціонує як частина когенераційної енергосистеми. Вибір саме цього об’єкта для автоматизації обумовлений його ключовою роллю у процесі теплової утилізації та необхідністю підтримання стабільного режиму роботи за умов високої теплової інерційності та змінного зовнішнього навантаження.

На першому етапі було проведено аналіз функціонального призначення котла-утилізатора, обґрунтовано необхідність автоматизації, сформульовано перелік основних керованих параметрів: тиску та температури пари, а також рівня живильної води. Запропоновано загальну архітектуру системи управління з урахуванням сучасних підходів до промислової автоматизації, зокрема використання ПЛК як базового елемента обчислювального рівня та SCADA як верхнього рівня диспетчерського контролю.

Було розроблено функціональну, структурно-логічну та інформаційно-логічну схеми системи. Особливу увагу приділено моделюванню потоків сигналів, алгоритмізації логіки регулювання та взаємодії сенсорів, регуляторів і виконавчих механізмів. Враховано можливість аварійного реагування, самодіагностики та розширення системи.

У подальших розділах виконано математичне моделювання динаміки об’єкта управління. З урахуванням інерційної природи котла, його було описано через лінійне диференціальне рівняння другого порядку з вираженими часовими сталими та запізненням. Побудовано відповідну передаточну функцію, яка стала основою для подальшого динамічного аналізу.

Проведений частотний аналіз дозволив оцінити поведінку системи в широкому діапазоні частот. Побудовано та проаналізовано амплітудно-частотну, фазо-частотну, дійсну та уявну частотні характеристики. Отримані результати свідчать про задовільну стійкість системи, наявність позитивних запасів по фазі та амплітуді, а також про придатність системи до ефективного пригнічення збурень.

Особливу увагу приділено оцінці якості регулювання. Перехідні характеристики моделі продемонстрували швидкодію системи без значного перерегулювання та з малою похибкою в усталеному режимі. Це дає підстави вважати, що запропонована система відповідає сучасним технічним і енергетичним вимогам до об’єктів критичної теплотехнічної інфраструктури.

Загалом, виконана робота засвідчує ефективність поєднання інженерного підходу, моделювання в середовищі MATLAB/Simulink та використання SCADA-технологій для досягнення стабільної, енергоефективної та надійної роботи котла-утилізатора. Розроблена система є масштабованою, захищеною та адаптованою до реальних умов експлуатації, а також може бути впроваджена на аналогічних об’єктах енергетичної або хімічної промисловості.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Бойко, В. С. Автоматизація теплоенергетичних процесів: навч. посіб. / В. С. Бойко. — К.: Либідь, 2017. — 368 с.

2. Дяченко, П. А. Теорія автоматичного керування: підручник / П. А. Дяченко. — Харків: НТУ «ХПІ», 2016. — 312 с.

3. Глушков, І. В. Автоматизація теплотехнічних установок: навч. посіб. / І. В. Глушков, А. М. Козак. — Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2019. — 284 с.

4. Сахневич, В. А. Основи SCADA-систем: навч. посіб. / В. А. Сахневич. — Дніпро: НМетАУ, 2020. — 165 с.

5. Вахняк, І. Р. Теорія автоматичного управління: навч. посіб. / І. Р. Вахняк. — Львів: ЛНУ, 2015. — 320 с.

6. Зуєв, І. М. Основи математичного моделювання технічних об’єктів / І. М. Зуєв. — К.: КНУБА, 2018. — 224 с.

7. Книш, М. П. Моделювання процесів в енергетиці: підручник / М. П. Книш. — Київ: ВПЦ «Київський університет», 2016. — 290 с.

8. Чала, В. І. Системи керування технологічними процесами: навч. посіб. / В. І. Чала. — Харків: ХНАДУ, 2021. — 278 с.

9. Пічкур, М. Й. Промислова автоматика: навч. посіб. / М. Й. Пічкур. — Тернопіль: ТНТУ, 2020. — 252 с.

10. Черниш, О. М. Комп’ютерно-інтегровані технології: навч. посіб. / О. М. Черниш. — Суми: СумДУ, 2019. — 198 с.

11. Гусєв, В. І. Основи автоматизованого управління: навч. посіб. / В. І. Гусєв. — Одеса: ОНПУ, 2017. — 240 с.

12. Кісь, І. П. Математичне моделювання систем автоматичного керування / І. П. Кісь. — Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2020. — 348 с.

13. Сидоренко, Ю. В. Промислові контролери в системах автоматизації: навч. посіб. / Ю. В. Сидоренко. — Кременчук: КрНУ, 2018. — 192 с.

14. Поляк, О. М. Автоматизовані системи керування енергетичними об’єктами / О. М. Поляк. — К.: НТУУ «КПІ», 2019. — 218 с.

15. Салюк, А. І. Моделювання та ідентифікація динамічних об’єктів / А. І. Салюк. — Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2016. — 200 с.

16. Кульчицький, Ю. М. Елементи SCADA та HMI в автоматизованих системах / Ю. М. Кульчицький. — Тернопіль: ТНТУ, 2021. — 164 с.

17. Андрусів, А. М. Автоматизація промислових установок: навч. посіб. / А. М. Андрусів. — Львів: ЛНУ, 2020. — 256 с.

18. Чекмарьов, І. А. Системи контролю і керування енергетичними процесами / І. А. Чекмарьов. — Харків: ХНУРЕ, 2018. — 212 с.

19. Лорія, М. Г., Єлісєєв, П. Й., Целіщев, О. Б. Цифрова схемотехніка: навч. посіб. / М. Г. Лорія, П. Й. Єлісєєв, О. Б. Целіщев. — Сєверодонецьк: Вид‑во СНУ ім. В. Даля, 2016. — 280 с.

20. Мудрак, О. П. Моделювання теплофізичних процесів / О. П. Мудрак. — К.: НАУ, 2017. — 178 с.

21. Книш, Є. В. Принципи побудови когенераційних систем / Є. В. Книш. — Херсон: ХДАУ, 2016. — 168 с.

22. Твердохліб, В. І. Теорія автоматичного керування: приклади та задачі / В. І. Твердохліб. — Вінниця: ВНТУ, 2017. — 304 с.

23. Лорія, М. Г. Методологічні засади математичного моделювання та оптимального керування виробництвом метанолу : автореф. дис. … д‑ра техн. наук : спец. 05.13.07 / М. Г. Лорія. — Сєверодонецьк: СНУ ім. В. Даля, 2019. — 43 с.

24. Коваль, Ю. І. Моделювання об’єктів автоматизації / Ю. І. Коваль. — Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2019. — 236 с.

25. Целіщев, О. Б., Лорія, М. Г., Носач, В. О. Investigation of cavitational transformation of motor fuels // Technology Audit and Production Reserves, 2016. — Vol. 4, No. 4(30), pp. 26–32.

26. Савчук, В. Ф. Системи керування технологічними процесами: підручник / В. Ф. Савчук. — Київ: КНУТД, 2021. — 280 с.

27. Радченко, І. В. Інженерні методи аналізу динаміки систем / І. В. Радченко. — Харків: НТУ «ХПІ», 2016. — 225 с.

28. Солошенко, С. І. Комп’ютерні технології моделювання в автоматизованих системах / С. І. Солошенко. — Запоріжжя: ЗНТУ, 2020. — 198 с.

29. Петрунько, О. В. Освітні технології майбутнього: монографія / О. В. Петрунько. — Київ: Університет «Україна», 2022. — 284 с.

30. Прокопенко, А. С. Програмовані логічні контролери: навч. посіб. / А. С. Прокопенко. — Кривий Ріг: КНУ, 2021. — 190 с.

31. Євсєєв, О. І. Автоматизація енергетичних об'єктів: навч. посіб. / О. І. Євсєєв. — Дніпро: ДНУ, 2018. — 212 с.

32. Кваша, С. І. Методи та засоби автоматичного керування: навч. посіб. / С. І. Кваша. — Херсон: ХНТУ, 2019. — 248 с.

33. Мельник, М. В. Цифрове керування технічними об’єктами / М. В. Мельник. — Рівне: НУВГП, 2020. — 200 с.

34. Михайлов, О. О. Основи теорії автоматичного керування / О. О. Михайлов. — К.: Вища школа, 2015. — 328 с.

35. Головко, М. П. Автоматизація теплоенергетичних процесів і установок: навч. посіб. / М. П. Головко. — Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2017. — 248 с.

36. Мороз, Ю. О. Теорія систем автоматичного керування: навч. посіб. / Ю. О. Мороз. — Чернівці: ЧНУ, 2019. — 276 с.

37. Мачула, Т. В. Основи автоматизації об'єктів енергетики: навч. посіб. / Т. В. Мачула. — К.: НУХТ, 2020. — 198 с.

38. Міхальчук, В. О. Ідентифікація динамічних об’єктів управління / В. О. Міхальчук. — Львів: НУ «Львівська політехніка», 2018. — 164 с.

39. Нікітченко, М. С. Автоматизація виробничих процесів / М. С. Нікітченко. — Одеса: ОНАХТ, 2021. — 220 с.

40. Журба, А. М. Промислова автоматика: підручник / А. М. Журба. — Суми: СумДУ, 2016. — 258 с.

41. Кіндрацький, В. І. Системи автоматичного керування: задачі та приклади / В. І. Кіндрацький. — Львів: ЛНУ, 2017. — 280 с.

42. Коваленко, С. П. Цифрові системи автоматичного регулювання / С. П. Коваленко. — Київ: НАУ, 2020. — 192 с.

43. Савицький, В. М. Основи теорії та практики автоматизованого керування / В. М. Савицький. — Дніпро: ДНУЗТ, 2019. — 210 с.

44. Ющенко, І. В. Промислові контролери в системах SCADA: навч. посіб. / І. В. Ющенко. — Харків: ХНУРЕ, 2022. — 176 с.

45. Мельничук, О. С. Моделювання в середовищі MATLAB: навч. посіб. / О. С. Мельничук. — Тернопіль: ТНТУ, 2020. — 188 с.

46. Фіалков, В. І. Теплотехнічні процеси: аналіз, моделювання, управління / В. І. Фіалков. — Київ: ІЕЕТ НАН України, 2015. — 240 с.