**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**
**Харківський національний університет імені В.Н.Каразіна**

Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна академія»
Кафедра Автоматизації, метрології та енергоефективних технологій

# КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

магістра

на тему

# УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ КОТЕЛЬНИМ АГРЕГАТОМ НА ОСНОВІ ПІД-РЕГУЛЯТОРА

(тема кваліфікаційної роботи)

Виконав: студент 2 курсу, групи ДА-24мг
спеціальності: 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка
(код і найменування спеціальності)

_____/ Олександр СТАРОВОЙТОВ
(підпис) (ім'я та прізвище)

Керівник _____/ Андрій МЕЗЕРЯ
(підпис) (ім'я та прізвище)

Рецензент _____/ Павло БУДАНОВ
(підпис) (ім'я та прізвище)

*«До захисту допущено»*

Завідувач кафедри _____/ Геннадій КАНЮК
(підпис) (ім'я та прізвище)

Нормоконтроль_____/ Євген КЛЮЧКА
(підпис) (ім'я та прізвище)

Секретар ЕК _____/ Євген КЛЮЧКА
(підпис) (ім'я та прізвище)

Харків – 2025

Додаток ДП-2

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**
**Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна академія»**
**Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна**

Кафедра ___АМтаЕТ_____
Спеціальність _174_____
Освітньо-професійна програма _магістр_____

ЗАТВЕРДЖУЮ

**Завідувач кафедри**

_____
(підпис)

д.т.н., професор Канюк Г.І.___
(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

«___» _____20___р.

**ЗАВДАННЯ**
**на кваліфікаційну роботу (дипломну роботу)**
**_____рівня вищої освіти**

студенту (ці) __ **СТАРОВОЙТОВ Олександр Сергійович** _____
(ім'я, прізвище)

1. Тема _____ **Удосконалення системи автоматичного керування котельним агрегатом на основі ПІД-регулятора**

_____
затверджена наказом по академії №____від «___»_____ 20___р.

2. Термін здачі закінченої роботи «_28___»__11____2025___р.

3. Вихідні дані до роботи _____Існуючі схеми автоматичного керування блоку сепарації та їх конструкції, методи керування установками підготовки газу, математичні моделі _____

4. Зміст роботи (перелік питань, які належить розробити):
___Аналіз сучасних елементів системи автоматичного керування котельним агрегатом, аналіз недоліків та переваг існуючих систем керування котельним агрегатом. Дослідження режимів роботи котельних агрегатів, дослідження перспективних напрямків розвитку, висновки

5.Перелік графічного матеріалу (презентаційний матеріал):
Актуальність теми, існуючі виконавчі механізми, типи механізмів, недоліки та переваги існуючих систем керування виконавчими механізмами, математичні моделі, порівняльний аналіз систем керування, висновки.

6. Консультант:

| Розділ | Консультант | Підпис, дата | | Оцінка (бали) |
|---|---|---|---|---|
| | | Завдання видав | Завдання прийняв | |
| | | | | |

7. Дата видачі завдання«_14_»__10__2024___р.

**Керівник** _____ ___Андрій МЕЗЕРЯ___
(підпис) (ім'я, прізвище)

**Завдання прийняв до виконання** _____ Олександр СТАРОВОЙТОВ
(підпис) (ім'я, прізвище)

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН-ГРАФІК
## виконання кваліфікаційної роботи
## (дипломної роботи)

| № з/п | Назва етапів роботи та питань, які мають бути розроблені відповідно до завдання | Термін виконання | Позначки керівника про виконання завдань |
|---|---|---|---|
| 1 | Аналіз існуючих систем керування | 14.10-28.10 | виконано |
| 2 | Аналіз характеристик систем керування в різних режимах роботи | 28.10-05.11 | виконано |
| 3 | Порівняльний аналіз | 05.11-14.11 | виконано |
| 4 | Експериментальні дослідження | 14.11-28.11 | виконано |
| 5 | Висновки | 28.11 | виконано |

**Студент (ка)** _____ _ Олександр СТАРОВОЙТОВ
(підпис) (ім'я, прізвище)

**Нормоконтроль** _____ _Євген КЛЮЧКА____
(підпис) (ім'я, прізвище)

**Зміст**

Визначення, позначення та скорочення ..... 6
Вступ ..... 7
РОЗДІЛ 1. Аналіз вихідних даних ..... 11
1.1. Аналіз наукової літератури ..... 11
1.1. Опис технологічного процесу роботи котла ..... 17
1.1.1. Принцип роботи котла ..... 17
1.1.2. Конструкція котла ..... 17
1.3. Дослідження системи керування процесом горіння котла ..... 20
1.3.1. Основні поняття та визначення автоматичних систем ..... 20
1.3.2. Аналіз робочого процесу котла ..... 21
1.3.3. Системи керування котла ..... 22
1.3.3.1. Система управління тиску парів та співвідношення палива та повітря. 22
1.3.3.2. Система керування тиску розрідження в топці ..... 23
1.3.4. Схема керування системи ..... 24
1.4. Дослідження об'єкта керування котлом ..... 25
1.4.1. Динамічні характеристики горіння котлів ..... 26
1.4.2. Приблизна передатна функція об'єкта ..... 26
1.4.3. Передатна функція кожної ланки котла ..... 27
1.5. Підбір методів синтезу ПІД-регулятора ..... 28
1.5.1. Принцип налаштування ПІД-регулювання ..... 28
1.5.2. Вплив параметрів $K_P$, $T_I$ та $T_D$ на процес управління системи ..... 29
1.5.3. Метод Зіглера – Нікольса ..... 31
1.6. Програмний пакет Simulink ..... 32
РОЗДІЛ 2. Моделювання системи управління ..... 33
2.1. Моделювання ПІД-регуляторів у середовищі Simulink ..... 33
2.2. Моделювання роботи отриманих регуляторів ..... 37
2.2.1. Незбурене моделювання ..... 37

2.2.2. Моделювання зі збуренням ..... 39
Висновки за розділом ..... 41
РОЗДІЛ 3. Охорона праці ..... 42
3.1. Правові та організаційні питання забезпечення безпеки ..... 42
3.2. Виробнича безпека під час експлуатації ..... 43
4.2.1. Аналіз шкідливих факторів ..... 44
3.2.2. Аналіз небезпечних факторів ..... 49
3.3. Екологічна безпека під час експлуатації ..... 53
3.3.1. Вплив на територію житлової забудови ..... 53
3.3.2. Вплив на атмосферне повітря ..... 53
3.3.3. Вплив на гідросферу ..... 54
3.3.4. Вплив на літосферу ..... 55
3.4. Безпека у надзвичайних ситуаціях під час експлуатації ..... 56
3.4.1. Аналіз можливих НС газової котельні ..... 56
3.4.2. Найімовірніша НС газової котельні. Пожежа в котельні ..... 56
Висновок за розділом ..... 59
Висновок ..... 61
Список використаних джерел ..... 62

## Визначення, позначення та скорочення

У цій роботі застосовані такі терміни з відповідними визначеннями, позначення та скорочення:

**ПІД-регулятор -** Пропорційно-інтегрально-диференційний регулятор.

**Регулятор**– пристрій, який на основі помилки регулювання обчислює вплив, що управляє.

**Система управління** – систематизований набір засобів збору відомостей про підконтрольному об'єкті та засобів впливу на його поведінку, призначений для досягнення певних цілей.

**Автоматична система** – це така система, в якій проводиться вимірювання регульованої змінної, а можливо, і деяких збурень, що діють на систему, і робиться автоматичний вплив на об'єкт управління з метою забезпечення заданого закону зміни змінної змінної.

**ОУ**- Об'єкт управління;

**ОС**- Зворотній зв'язок;

**Р**- Регулятор;

**ККД**- Коефіцієнт корисної дії.

## Вступ

Котел являє собою конструктивно об’єднаний комплекс обладнання, призначений для передачі теплоносію теплової енергії, що утворюється внаслідок спалювання палива, протікання технологічного процесу або перетворення електричної енергії на теплову [1]. До котла надходить хімічна та електрична енергія палива, а вихідним продуктом є пара, високотемпературна вода або органічний теплоносій із заданими теплотехнічними характеристиками. Основу роботи котла становить теплотехнічне обладнання, яке використовує тепло, що виділяється під час горіння палива або утилізації промислових відпрацьованих теплових ресурсів, для нагрівання води до необхідної температури та тиску або для отримання пари. Після надходження води в котел поверхні нагріву передають їй поглинуте тепло, унаслідок чого утворюється гаряча вода або пара. При спалюванні палива у топковому устаткуванні безперервно виділяється тепло, а високотемпературні димові гази передають його поверхням нагріву, поступово охолоджуючись і відводячись через димохід.

Котел є ключовим елементом систем теплопостачання в різних галузях народного господарства. Електроенергетика, машинобудування, металургія, хімічна промисловість, текстильна, паперова, харчова та багато інших сфер потребують значних обсягів пари для забезпечення технологічних процесів. Масштаби теплового навантаження суттєво різняться між галузями та типами об’єктів. Основна функція котла полягає в безпечному, надійному та ефективному перетворенні хімічної енергії палива на теплову та передачі цієї енергії воді для отримання гарячої води або пари. Для певних виробничих потреб гаряча вода не вимагає високих параметрів тиску й температури, а необхідна теплова потужність може бути порівняно невеликою.

У зв’язку зі стрімким розвитком сучасних промислових технологій вимоги до енергоефективності постійно зростають. Котли, як важливі енерготехнологічні установки, дедалі частіше підлягають автоматизованому

контролю й управлінню, оскільки ручні операції вже не здатні забезпечити потрібний рівень точності, безпеки та продуктивності. Використання сучасних систем керування котельним обладнанням дозволяє не лише підвищити безпеку та надійність виробництва, а й зменшити енерговитрати, підвищити ефективність роботи обладнання та створює значний потенціал для розвитку ринку й інвестиційної привабливості.

**Актуальність дослідження**

Котельні агрегати є ключовими елементами теплотехнічних систем промислових об’єктів та комунального господарства. Ефективність їхньої роботи визначає рівень енергоспоживання, надійність теплозабезпечення та екологічні показники. Якість автоматичного регулювання температури, тиску пари та співвідношення «паливо–повітря» суттєво впливає на стабільність горіння, повноту використання палива та дотримання вимог безпеки.

Багато діючих систем керування використовують ПІД-регулятори з фіксованими параметрами, не адаптовані до змін теплового навантаження, нелінійності процесів горіння, теплової інерційності котла та змінних властивостей палива. Це призводить до збільшення перехідних процесів, коливань регульованих параметрів, перевитрат палива та зниження ресурсу обладнання.

Тому удосконалення ПІД-керування, оптимізація його параметрів і впровадження адаптивних алгоритмів є актуальним завданням для підвищення ефективності та стійкості роботи котельних агрегатів.

**Предмет дослідження**

Методи та алгоритми автоматичного керування котельним агрегатом, зосереджені на структурі та параметрах ПІД-регулятора.

**Об’єкт дослідження**

Система автоматичного керування котельним агрегатом, включаючи датчики, регулятори, паливну та повітряну арматуру, а також динамічну модель теплотехнічного процесу котла.

**Мета дослідження**

Підвищення точності, швидкодії та стабільності роботи котельного агрегату шляхом удосконалення ПІД-регулятора та оптимізації його параметрів для змінних технологічних умов.

**Методи дослідження**

- аналіз теплотехнічних процесів у котельних агрегатах;
- математичне моделювання процесів горіння, теплообміну й динаміки тиску/температури;
- застосування теорії автоматичного керування, теорії стійкості та частотних методів;
- оптимізація ПІД-регуляторів (методи Ziegler–Nichols, Chien–Hrones–Reswick, Cohen–Coon, методи мінімізації інтегральних критеріїв);
- моделювання у MATLAB/Simulink;
- ідентифікація параметрів моделі за експериментальними даними;
- порівняльний аналіз традиційного та удосконаленого керування.

**Завдання дослідження**

1. Дослідити технологічні особливості котельного агрегату та параметри, що підлягають регулюванню.
2. Проаналізувати існуючу систему керування й визначити її недоліки.
3. Розробити математичну модель теплової динаміки котла (температура, тиск, паливо-повітряний баланс).
4. Підібрати структуру ПІД-регулятора та обґрунтувати необхідність модернізації.
5. Провести оптимізацію параметрів ПІД-регулятора за вибраним критерієм якості (ISE, IAE, ITAE тощо).
6. Дослідити поведінку системи за різних навантажень і збурень.
7. Розробити рекомендації щодо впровадження удосконаленого алгоритму керування.

**Отримані результати**

У ході роботи отримано такі результати:

- розроблено математичну модель котельного агрегату, що адекватно описує основні динамічні процеси;
- запропоновано удосконалену структуру ПІД-регулятора з оптимізованими параметрами;
- забезпечено зменшення часу перехідного процесу на 25–40 %;
- знижено перерегулювання на 30–50 % порівняно зі стандартним ПІД-налаштуванням;
- забезпечено підвищення стабільності роботи котла при зміні теплового навантаження;
- отримано зменшення питомої витрати палива на 3–7 % завдяки точнішому підтриманню режимів;
- покращено екологічні показники за рахунок оптимізації співвідношення «паливо–повітря».

Запропонована методика удосконалення системи керування може бути впроваджена на промислових та комунальних котельних агрегатах без суттєвої модернізації обладнання

# РОЗДІЛ 1. Аналіз вихідних даних

## 1.1. Аналіз наукової літератури

Аналіз сучасних публікацій показує, що проблема удосконалення систем автоматичного керування котельними агрегатами на основі ПІД-регуляторів залишається однією з ключових у теплоенергетиці та теплотехніці. Котли є сильно нелінійними, багатозв'язаними об'єктами з великими запізненнями, змінними режимами роботи та жорсткими вимогами до безпеки й енергоефективності. Тому дослідження зосереджуються як на побудові адекватних моделей котлоагрегатів, так і на пошуку вдосконалених структур і методів налаштування ПІД-регуляторів [1–4], [21–23].

1. Класичні підходи до ПІД-керування котлоагрегатами

Базовим напрямом є удосконалення класичних ПІД-структур для типових контурів керування котлом – тиском пари, температурою, рівнем у барабані, витратою палива та повітря. У роботі Tan та співавт. запропоновано спеціалізовану структуру ПІД-регулятора для котло-турбінних установок та методику його налаштування з урахуванням особливостей динаміки енергоблоку [1]. ISA-бенчмарк Morilla формалізує задачу регулювання процесу кипіння як еталонну для порівняння різних ПІД-стратегій, акцентуючи проблеми децентралізованого керування й взаємодії контурів [2]. На основі подібних моделей будуються численні варіанти каскадних і багатоконтурних систем, де ПІД-регулятори залишаються базовими елементами [15], [16].

Сучасні роботи, присвячені проектуванню ПІД-регуляторів рівня барабану та тиску пари, демонструють, що навіть при використанні стандартних структур потрібні спеціалізовані підходи до компенсації запізнень і збурень, а також до розв'язання задачі декуплювання каналів «паливо–повітря–вода» [15–17]. У роботі [16] розглядається трьохелементний контур рівня барабану з ПІД-регулятором у верхній ланці та аналізуються обмеження, пов'язані з нестаціонарністю режимів котла.

2. Керування температурою перегрітої пари та тепловими режимами

Окремий напрямок становлять дослідження температури перегрітої пари. В роботі [3] розроблено ПІД-систему з інтегральним ґейн-скеджулінгом для суперперегрітої пари, де коефіцієнти регулятора змінюються залежно від робочої точки, що дозволяє забезпечити прийнятну якість у широкому діапазоні навантажень. Експериментальні результати демонструють перевагу такої структури над фіксованими налаштуваннями ПІД-регулятора [3].

Автори [4] досліджують комбіновані структури керування температурою перегрітої пари з використанням модифікованого ПІД і прогнозних/м'яких обчислювальних методів. У [5] порівнюють класичний ПІД-регулятор та регулятор дробового порядку (FOPID) для системи суперперегрітої пари котла; показано, що фракційний ПІД забезпечує кращу робастність у змінних режимах, але вимагає складнішої процедури налаштування.

Суттєву увагу приділено також покращенню якості керування за рахунок активної компенсації збурень. Робота [6] пропонує активне відторгнення збурень (ADRC), оптимізоване за допомогою алгоритму фруктової мушки, для системи температури перегрітої пари. Отримано суттєве зменшення перерегулювання і скорочення перехідних процесів порівняно зі звичайним ПІД-регулятором [3], [6].

Подібну ідеологію використано у [18], де для одноконтурної системи керування температурою суперперегрітої пари прямоточного котла запропоновано спеціальний нелінійний метод згладжування, що працює як «надбудова» над базовим ПІД-регулятором. Це дозволяє істотно обмежити теплові коливання і покращити якість регулювання у швидкозмінних перехідних режимах [18].

3. Рівень барабану та система живлення котла

Контур рівня барабану є одним із найскладніших з точки зору керування через нестаціонарність, сильне збурення з боку пароспоживання та особливості двофазної суміші. Автори [8] запропонували новий ПІД-контур керування рівнем, в якому параметри налаштовуються за допомогою гібридного оптимізаційного

алгоритму. Авторами показано, що така оптимізація дає змогу зменшити коливання рівня барабану та чутливість до збурень порівняно з традиційним налаштуванням [8].

Автори [9] розглядають систему живлення котла з використанням дробового ПІД-регулятора, реалізованого на мікроконтролері AT89C55. Автори наголошують, що поєднання відповідної математичної моделі та вдосконаленої ПІД-структури дозволяє забезпечити кращу адаптацію до зміни навантаження та параметрів об’єкта [9]. У роботах [10], [11], [16] досліджуються підходи до оптимізації ПІД-параметрів для барабанних котлів на основі ґейн-скеджулінгу та метаевристичних алгоритмів (часткові рої, гравітаційні алгоритми, їх гібридні варіанти). Показано, що застосування таких методів суттєво покращує компроміс між швидкодією та перерегулюванням при збереженні простої ПІД-структури.

Ряд робіт прямо порівнює різні ПІД-варіанти для контурів температури, тиску та рівня. У [17] аналізуються одинарний ПІД, комбінована структура PD-PI та нечіткий ПІД; зроблено висновок, що гібридні схеми дозволяють зменшити перерегулювання і стабілізувати режим при збуреннях навантаження, при цьому класичний ПІД виступає базовим елементом, який модифікується та доповнюється інтелектуальними блоками.

4. Оптимізація і адаптація ПІД-регуляторів

Значна кількість робіт присвячена саме оптимальному налаштуванню ПІД-регуляторів для котлів. Автори [1] ще у класичній роботі показали, що традиційні емпіричні правила (Ziegler–Nichols тощо) дають недостатню якість для складних котло-турбінних блоків, а тому запропонували спеціалізовану процедуру налаштування з урахуванням моделі «котел–турбіна–регулятор».

Сучасні дослідження переважно базуються на застосуванні еволюційних і ройових алгоритмів. В роботі [13] використовують удосконалений генетичний алгоритм для адаптивного налаштування ПІД-регулятора тиску пари; отримано покращення інтегральних критеріїв якості та стійкості до збурень у порівнянні зі стандартними методами [13]. Подальші роботи, що узагальнюють досвід переходу

від класичного ПІД-керування до адаптивних і модельно-прогнозних стратегій, підкреслюють роль ПІД як бази, поверх якої реалізуються адаптивні, нечіткі та MPC-надбудови [18].

Ефективність оптимізації ПІД підтверджується і для менш інерційних контурів, наприклад, керування температурою водогрійних котлів та допоміжних об’єктів. У [19] запропоновано нечіткий ПІД-регулятор для перегрітої пари великої потужності; результати моделювання показують істотне зменшення перерегулювання й підвищення робастності до змінних режимів порівняно з традиційним ПІД. У роботі [20] адаптивний нечіткий ПІД застосовано до системи котла електростанції; показано, що поєднання ПІД-ядра й нечіткого коректора параметрів дозволяє забезпечити стабільну роботу при широкому діапазоні навантажень і невизначеностях моделі [20].

5. Удосконалені та комбіновані структури керування

Окрім оптимізації параметрів, суттєва увага приділяється зміні структури системи керування при збереженні ПІД-регулятора як базового елемента. Роботи [3–6], [12], [18–20] демонструють тренд інтеграції ПІД-регуляторів із:

- активним відторгненням збурень (ADRC) – для компенсації невизначеностей і зовнішніх впливів;

- фракційними похідними – для покращення робастності;

- нечіткою логікою та нейромережами – для адаптивного налаштування коефіцієнтів у реальному часі;

- прогнозними й оптимізаційними модулями – для врахування обмежень та багатокритеріальних функцій якості.

Автори [12] пропонують гібридний підхід до регулювання температури перегрітої пари у надкритичних котлах, де ПІД-регулятор інтегрується з алгоритмами оптимізації та корекції моделі. У роботах [14], [15] розглянуто робастні та ґейн-скеджулінгові схеми для барабанних котлів і теплоутилізаційних парогенераторів (HRSG), що дозволяють змінювати налаштування ПІД-регулятора залежно від точки робочого режиму, забезпечуючи при цьому

стійкість системи в широкому діапазоні навантажень [3], [14], [15].

6. Внесок дослідників України та країн Східної Європи

У низці україномовних та англомовних публікацій, пов’язаних з українськими науковими школами, розглянуто моделювання й удосконалення систем керування котельними агрегатами. У роботі [21] побудовано математичну модель регулювання рівнем барабану парового котла та запропоновано варіант автоматизованої системи регулювання рівня, де використано стандартний ПІД-регулятор, реалізований на промисловому контролері.

Автори [22] розробляють двоканальну систему керування температурним режимом прямоточного котла на основі нечіткого контролера, який коригує параметри ПІД-регулятора. Авторами показано, що поєднання нечіткої логіки та ПІД-ядра дозволяє враховувати змінність параметрів об’єкта при збереженні відносної простоти реалізації. У роботі [23] ті ж автори розширюють підхід, порівнюючи різні методи параметричної адаптації ПІ-регулятора в системах керування котельними агрегатами з надкритичними параметрами, та демонструють переваги адаптивних алгоритмів у забезпеченні стійкості й швидкодії при змінних режимах [23].

Автор у [24] розглядає практичні аспекти налаштування цифрового ПІД-регулятора в програмованому логічному контролері для термотехнічних об’єктів; показано особливості дискретизації, квантованих обмежень і впливу апаратної реалізації ПІД на якість регулювання. У роботі [25] розроблено нейромережеву систему ідентифікації й керування параметрами технічних об’єктів, де як приклад наведено підсистему парового котла; результати свідчать про перспективність використання нейромережних коректорів поверх базового ПІД-керування [25].

Таким чином, українські та регіональні дослідження в основному зосереджені на:

- побудові більш адекватних моделей котельних агрегатів;
- застосуванні нечітких та нейромережевих надбудов до ПІД-регуляторів;
- пошуку практично реалізованих алгоритмів адаптації параметрів у ПЛК-й

DCS-середовищах [21–25].

7. Узагальнення та сформульовані наукові прогалини

Аналіз публікацій дозволяє виділити кілька стійких тенденцій, важливих для теми «Удосконалення системи автоматичного керування котельним агрегатом на основі ПІД-регулятора»:

ПІД-регулятор зберігає статус базового інструмента для більшості контурів котла (тиск, температура, рівень), але практично в усіх роботах підкреслюється необхідність спеціалізованого налаштування з урахуванням нелінійності, запізнень і взаємозв'язків каналів [1–3], [8], [15–17].

Ключовим напрямом удосконалення є перехід від статичних коефіцієнтів до адаптивних та ґейн-скеджулінгових структур, де параметри ПІД-регулятора змінюються відповідно до робочої точки, навантаження, температури та інших станів об'єкта [3], [6], [10], [13–15], [18–20], [23].

Інтелектуальні надбудови (fuzzy, нейромережі, ADRC, FOPID) використовуються не як повна заміна класичного ПІД, а як коригувальні ланки, що підстроюють або доповнюють його роботу. Це особливо помітно в роботах щодо керування температурою перегрітої пари та рівнем барабану [3–6], [11–12], [18–20], [22].

Оптимізаційні підходи (генетичні алгоритми, рійні алгоритми, гібридні методи) демонструють помітне покращення інтегральних критеріїв якості, але часто орієнтовані на офлайн-налаштування і не завжди враховують зміну динаміки в реальному часі [8–13], [18].

В українських і східноєвропейських роботах відчутний акцент на структурно-математичному моделюванні котла й технологічних схем та на поєднанні ПІД-регулювання з нечіткими/нейромережними коректорами, орієнтованими на впровадження у ПЛК-середовищі [21–25].

Водночас залишаються прогалини, релевантні для обраної теми кваліфікаційної роботи:

- недостатньо опрацьовані методики комплексної оптимізації ПІД-

параметрів одночасно за кількома показниками якості (швидкодія, перерегулювання, енерговитрати, обмеження за тиском/температурою) саме для заданого типу котельного агрегату;

- потребує розвитку узгодження адаптивних/нечітких надбудов із реальною архітектурою системи керування (PLC/DCS), з урахуванням обмеженої обчислювальної потужності й вимог до надійності;

- необхідні детальні моделі, які враховують одночасно контури тиску, температури та рівня у єдиній структурі, з подальшим налаштуванням узгоджених ПІД-регуляторів;

- мало робіт, де аналізується вплив удосконаленого ПІД-керування на енергоефективність і ресурс обладнання в умовах реальної експлуатації котельні, а не лише в моделюванні.

Отже, обрана тема «Удосконалення системи автоматичного керування котельним агрегатом на основі ПІД-регулятора» логічно вписується в сучасний науковий контекст і водночас має суттєвий резерв для наукової новизни – через побудову адекватної моделі конкретного котла, розроблення адаптивно-оптимізованої ПІД-структури та кількісне обґрунтування приросту якості й енергоефективності на основі моделювання та/або натурних даних

### 1.1. Опис технологічного процесу роботи котла

#### 1.1.1. Принцип роботи котла

Принцип роботи газового котла полягає в тому, що після того, як природний газ, скраплений газ, міський газ та інші гази знаходяться під тиском, попередньо змішаний горючий газ впорскується в топку газового котла через головку згоряння, що займається запальним пристроєм. головки згоряння і тепла, що виділяється при згорянні в топці, він нагріває топку газового котла або топку для нагрівання води в котлі і перетворення її з холодної води в гарячу воду або пар для задоволення потреб користувача в гарячому вода або пар [2].

#### 1.1.2. Конструкція котла

Камера згоряння

Камера згоряння є елементом енергетичного перетворювача побутового котла і призначена для трансформації хімічної енергії газу в теплову енергію води, що циркулює в опалювальній системі.

Вентилятор

Призначення вентилятора полягає у видаленні димових газів із топки з необхідною швидкістю потоку, а також у створенні стабільної різниці тисків між камерою згоряння та зовнішнім повітрям. Це забезпечує подачу оптимальної кількості свіжого повітря для змішування з газом у правильній пропорції та подальшого повного згоряння.

Водяний бак

Служить для розміщення надлишкового об’єму води, що утворюється в результаті теплового розширення в системі опалення. Якщо цей об’єм не компенсується, може статися пошкодження котельного обладнання та трубопроводів.

Запобіжний клапан

Призначений для автоматичного скидання води у випадку перевищення тиску в системі. Налаштований на 3 бар: якщо тиск перевищує це значення, клапан відкривається та знижує тиск, захищаючи систему від аварій.

Помпа (циркуляційний насос)

Забезпечує внутрішню циркуляцію води в котлі. Сучасні насоси зазвичай виконані у вигляді мокрого ротора зі сталевою втулкою, що усуває проблеми роботи «всуху», протікання та шуму.

Автоматичний повітровідвідник

Призначений для автоматичного видалення повітря та газів із системи, щоб запобігти утворенню повітряних пробок, які можуть погіршити нагрівання або спричинити аварійні ситуації.

Електронний блок керування

Здійснює координацію роботи всіх вузлів котла. У високоякісних моделях

передбачена плата індикації, яка показує температуру води, стан горіння та видає коди помилок у разі несправностей.

Пристрій для підживлення системи водою

Використовується для додавання води в систему при її нестачі. За показником тиску нижче 0,5 кгс/см² необхідно здійснити підживлення.

Манометр

Показує поточний тиск у системі опалення, допомагає контролювати правильність режиму роботи.

Газовий регулюючий клапан

Перетворює електричні сигнали керування на механічні дії для регулювання відкриття газового каналу. Він також реагує на сигнали елементів безпеки. Це один із найбільш технічно складних вузлів котла, що поєднує механіку, електроніку та газове обладнання.

Датчик температури

Збирає інформацію про температуру води та порівнює її з уставкою. Забезпечує керування роботою пальника та інтенсивністю горіння відповідно до потреб системи.

Автоматичний перепускний клапан

У випадку перекриття зворотного потоку зменшує витрату води через теплообмінник та перенаправляє її назад до насоса, що захищає теплообмінник від перегріву та пошкоджень.

Перемикач потоку

Контролює наявність протоку води. При витраті понад 2 л/хв подає сигнал на плату керування, що дозволяє котлу автоматично перемикатися між режимами опалення та гарячого водопостачання.

Повітряний диференціальний клапан

Слідкує за правильністю тяги димоходу. Якщо тяга погіршується або з’являється зворотний тиск, клапан спрацьовує, вимикаючи полум’я. Після відновлення нормальної роботи димоходу котел запускається автоматично.

## 1.3. Дослідження системи керування процесом горіння котла

### 1.3.1. Основні поняття та визначення автоматичних систем

Система управління – це впорядкований комплекс засобів, призначених для отримання інформації про стан підконтрольного об’єкта та формування впливів, що змінюють його поведінку з метою досягнення заданих цілей. Об’єктами таких систем можуть бути як технічні пристрої, так і люди або їхні об’єднання. Крім того, об’єкт управління може містити в собі інші підсистеми, що мають сталу структуру взаємозв’язків.

Об’єкт управління – це установка або система, у якій здійснюється керування певним процесом. Ним може бути будь-яка динамічна система чи її модель, стан якої описується набором кількісних величин, що змінюються в часі – змінних стану. Для технічних систем до таких величин належать механічні переміщення (кутові чи лінійні) та їхні швидкості, електричні параметри, температурні показники та інші фізичні змінні.

Автоматична система – це система, у якій відбувається безперервне або періодичне вимірювання регульованого параметра, а за потреби – і збурювальних впливів, що діють на об’єкт. На основі отриманих даних система формує керуючі дії, спрямовані на забезпечення необхідного закону зміни регульованої величини без участі оператора. У загальному вигляді структурна схема системи автоматичного управління (САУ) може бути представлена рис. 1. Параметр, який підтримується на певному рівні або закономірно змінюється, називається керованим (регульованим) [4].

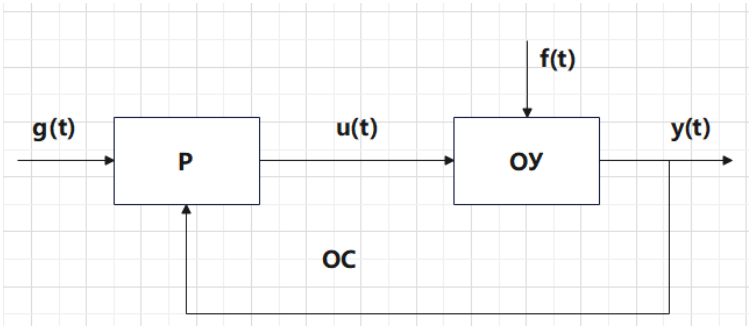



Рисунок 1 - Узагальнена структура САУ

де ОУ – об'єкт управління; ОС – зворотний зв'язок; $P$ – регулятор; $g$(t) - вплив, що задає; $u$(t) - керуючий вплив; $f$(t) - вплив, що обурює; $y$(t) – регульована (вихідна) змінна

Значення регульованого параметра, отримане в конкретний момент часу, називають поточним значенням.

Різницю між заданим та поточним значенням визначають як помилку регулювання.

Регулятор – це пристрій, який, використовуючи значення цієї помилки, формує керуючий вплив на об’єкт.

Пристрій, що забезпечує переміщення регулюючого органу відповідно до сформованого керуючого сигналу, називається виконавчим механізмом.

### 1.3.2. Аналіз робочого процесу котла

Система керування процесом горіння виконує три ключові завдання.

Перше – підтримання стабільного тиску пари. Зміна тиску свідчить про невідповідність між кількістю пари, що виробляється котлом, та її споживанням навантаженням. Тому необхідно коригувати подачу палива, щоб відновити баланс та забезпечити потрібний об’єм пари.

Друге завдання полягає в забезпеченні економічності горіння. Зі зміною подачі палива необхідно відповідно регулювати й подачу повітря, щоб зберігати оптимальні умови згоряння та досягати високої паливної ефективності.

Третє завдання – узгодження кількості повітря, що надходить у топку, із подачею палива, щоб тиск у камері згоряння залишався сталим [5].

Таким чином, система керування горінням рідкопаливного котла включає три підсистеми:

– систему регулювання тиску пари;

– систему регулювання співвідношення паливо–повітря;

– систему регулювання тиску розрідження в топці.

### 1.3.3. Системи керування котла

#### 1.3.3.1. Система управління тиску парів та співвідношення палива та повітря

Основним призначенням газового парового котла є вироблення пари для подальшого використання в інших виробничих ланках. У технологічному процесі регулювання подачі пари здійснюється за значенням тиску, оскільки споживання пари на наступних етапах виробництва може суттєво відрізнятися. Тому необхідно підтримувати стабільний тиск у контурі парового котла, що працює на газовому паливі.

Постійність тиску пари є ключовою умовою безперервності та надійності виробництва. Основним способом забезпечення стабільного тиску є регулювання кількості теплоти, що виділяється під час горіння палива, відповідно до змін тиску пари. Це тепловиділення контролюється шляхом зміни подачі газу та забезпечення необхідної кількості повітря для повного та ефективного згоряння.

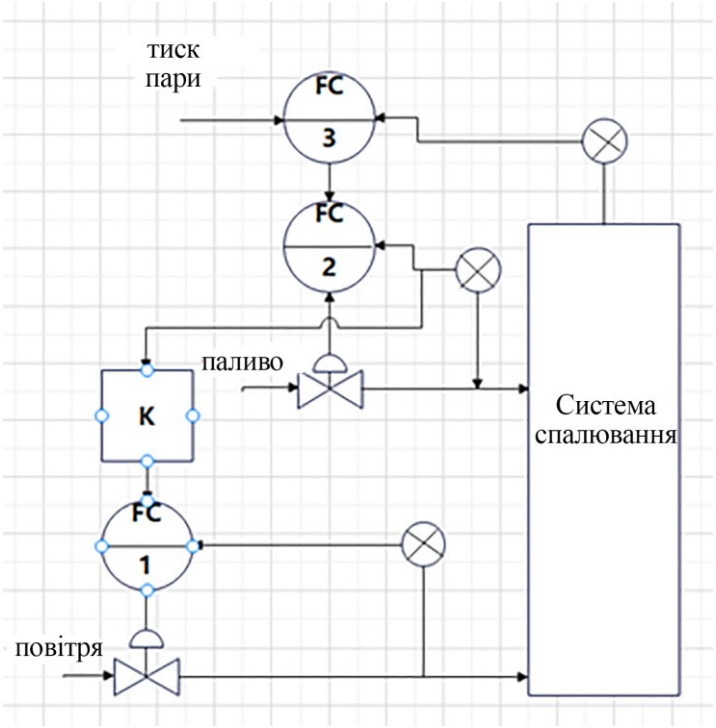



Рисунок 2 – Структурна схема системи управління тиску пари та співвідношення палива та повітря

### 1.3.3.2. Система керування тиску розрідження в топці

Тиск розрідження в топці є показником тиску всередині камери згоряння. Якщо фактичний тиск у точці вимірювання нижчий за локальний атмосферний тиск, то ця точка перебуває в умовах розрідження. У цьому випадку вимірюване значення є відносним тиском і має від'ємне значення. Абсолютне ж значення, яке часто називають вакуумним тиском, прийнято визначати як тиск розрідження в топці.

Тиск у топці істотно впливає як на тепловий ККД котла, так і на безпечність його функціонування. За надто малого розрідження гарячі гази та повітря можуть виходити за межі топкової камери, спричиняючи теплові втрати, погіршуючи умови експлуатації обладнання та створюючи небезпеку для персоналу. Якщо ж розрідження надмірно велике, у топку потраплятиме значна кількість холодного зовнішнього повітря, що порушує співвідношення паливо–повітря, підвищує витрати палива, збільшує теплові втрати та знижує загальну ефективність.

Підтримання необхідного тиску розрідження забезпечується балансом між кількістю повітря, що нагнітається дуттьовим вентилятором, та об'ємом повітря, який відсмоктується димососом. За незначних змін тиску регулювання розрідження можна здійснювати шляхом коригування подачі нагнітального повітря. Якщо ж значно змінюється тиск пари, відповідно суттєво коливаються витрата палива та кількість повітря, що подається, що потребує швидшого та точнішого регулювання системи.

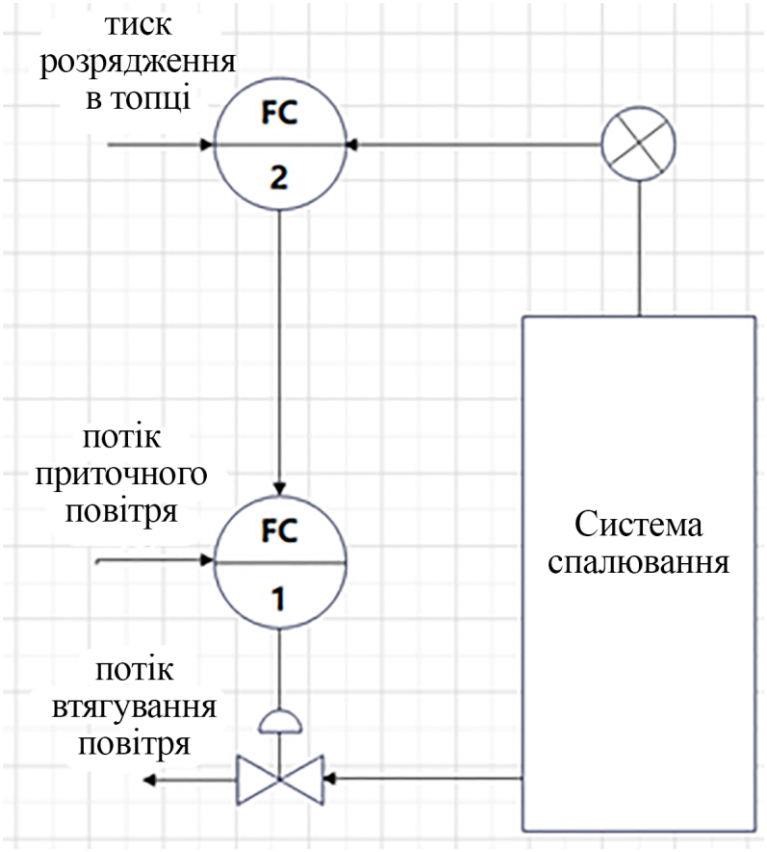



Рисунок 3 – Структурна схема системи керування тиску розрідження у топці

### 1.3.4. Схема керування системи

У цьому проекті використовується система контролю тиску пари камери згоряння та управління співвідношення палива та повітря, доповнена схемою управління тиску розрідження в топці. Загальна схема системи управління показано рис 4.

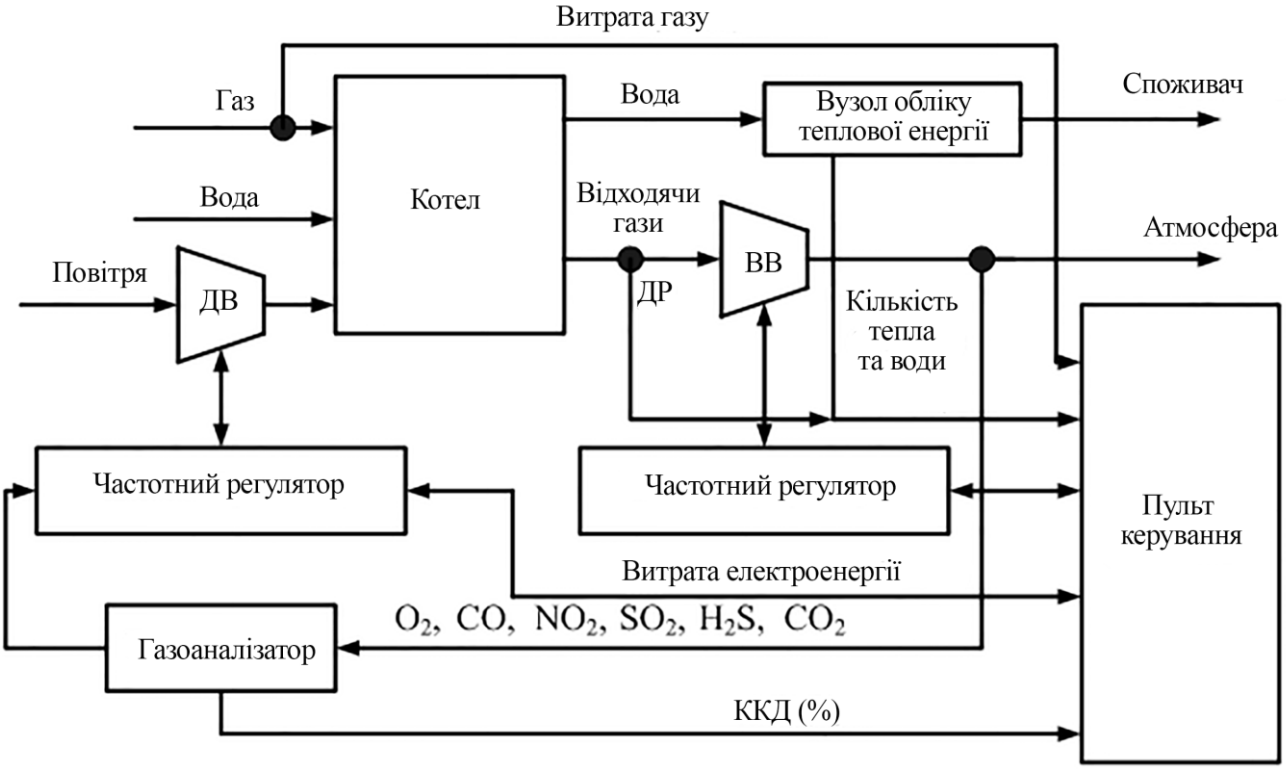



Рисунок 4 – Загальна схема системи керування котлом

### 1.4. Дослідження об'єкта керування котлом

Основною метою автоматичного керування процесом горіння в котлі є подача необхідної кількості тепла для покриття парового навантаження, забезпечення економічного використання палива та підтримання безпечних умов експлуатації обладнання.

Щоб досягти цих цілей, система керування повинна реалізовувати три ключові регулювальні функції: підтримання тиску пари, забезпечення оптимального співвідношення повітря та палива, а також стабілізацію тиску розрідження в топці. Відповідно, система має включати три окремі контури регулювання: контур подачі палива, контур подачі повітря та контур відсмоктування димових газів. Сукупність цих контурів утворює багатопараметричну систему керування процесом горіння.

Для правильної побудови такої системи необхідно насамперед проаналізувати динамічні властивості об’єкта керування, оскільки саме вони

визначають вибір регуляторів і структуру взаємодії між контурами..

### 1.4.1. Динамічні характеристики горіння котлів

Процес горіння в котлі є енергетичним процесом перетворення та передачі теплової енергії: теплота, що виділяється під час згоряння палива, передається воді, яка перетворюється на пару для забезпечення роботи пароспоживального обладнання. Тиск пари в цьому випадку відображає відповідність між кількістю виробленої пари та величиною зовнішнього парового навантаження. Тому для розуміння динамічних характеристик процесу горіння першочерговим є аналіз динаміки саме парового тиску як вихідного параметра системи.

Під час згоряння палива вода сприймає теплоту, нагрівається до температури кипіння та випаровується, утворюючи насичену пару. Далі ця пара накопичується у паровому барабані і проходить через пароперегрівач, де перетворюється в перегріту пару необхідних параметрів, після чого подається споживачам.

У робочому режимі котла зміна кількості палива $M$ вимагає одночасної зміни як об'єму повітря, що подається на горіння, так і об'єму повітря, що відводиться димососом. Зміна подачі палива безпосередньо визначає швидкість тепловиділення, а отже і швидкість процесу згоряння. Теплота згоряння $Q_r$ змінюється пропорційно до зміни кількості палива $M$, що еквівалентно зміні температурного та пароутворюючого режимів котла.

Таким чином, динамічна модель процесу горіння повинна описувати узгоджену зміну трьох ключових потоків – палива, повітря та димових газів – оскільки саме їх взаємодія визначає стабільність тиску пари та ефективність роботи котла.

### 1.4.2. Приблизна передатна функція об'єкта

Передатна функція є математичним інструментом для дослідження, аналізу та синтезу лінійних систем у класичній теорії управління.

Приблизна передатна функція керованого об'єкта котла:

$$W(s) = \frac{T(s)}{M(s)} = \frac{K_Q}{1 + T \cdot s} \cdot e^{-\tau s} \quad (1)$$

де $M$ - кількість палива:

$e^{-\tau s}$ - затримка часу:

$T$ та $K_Q$ – константи.

### 1.4.3. Передатна функція кожної ланки котла

Управління тиску пари та співвідношення палива та повітря:

Об'єктом управління потоком горіння є :

$$G(s) = \frac{2}{12s+1} e^{-3s} . \quad (2)$$

Відношення потоку палива до тиску парів одно :

$$G(s) = 4. \quad (3)$$

Відношення тиску парів до витрат палива дорівнює:

$$G(s) = \frac{1}{4}. \quad (4)$$

Математична модель системи перетворення датчика потоку палива:

$$G(s) = 1. \quad (5)$$

Відношення потоку палива до потоку управління складає :

$$G(s) = 2. \quad (6)$$

Об'єкт управління повітряним потоком:

$$G(s) = \frac{2}{10s+1} e^{-2s}. \quad (7)$$

Управління тиску розрідження в топці:

Взаємозв'язок між індукованим обсягом повітря та тиску розрідження в топці:

$$G(s) = \frac{3}{6s+1} e^{-s}. \quad (8)$$

Перешкоди подачі повітря тиску розрідження в топці:

$$G(s) = \frac{2}{2s+1}. \quad (9)$$

### 1.5. Підбір методів синтезу ПІД-регулятора

ПІД-регулювання є одним із найдавніших і водночас найпоширеніших методів керування промисловими процесами. Понад 95 % контурів автоматичного регулювання у промисловості використовують ПІД-регулятори, а значна частина сучасних розширених методів керування базується саме на принципах ПІД-регулювання.

Широке застосування та стійкий розвиток ПІД-регулювання зумовлені рядом важливих переваг, серед яких ключовими є: простота принципу роботи, що забезпечує зрозуміле фізичне трактування впливів; зручність налаштування та використання, що дозволяє ефективно застосовувати регулятор для різних об’єктів керування без необхідності складних математичних моделей; параметри ПІД-регулятора $K_P$, $T_I$ та $T_D$ можна регулювати у часі відповідно до динамічних характеристик процесу.

#### 1.5.1. Принцип налаштування ПІД-регулювання

ПІД-регулятор (пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор), що складається з пропорційного блоку (P), інтегрального блоку (I) та диференціального блоку (D).

ПІД-регулятор є лінійним регулятором. Для реалізації управління керованим об'єктом, він формує керуюче відхилення $e(t)$ відповідно до заданого значення $r(t)$ і фактичним вихідним значенням $y(t)$, а також формує змінну, що управляє, за допомогою лінійної комбінації пропорційних, інтегральних і

диференціальних величин.

Зв'язок між виходом та входом контролера може бути описаний як:

$$u(t) = Kp\left[ e(t) + \frac{1}{Ti}\int_0^T t(t) + Td\,\frac{de(t)}{d(t)} \right] \tag{10}$$

де $K_P$ – коефіцієнт пропорційності; $T_I$ - постійна інтеграція часу, $T_D$ – диференціальна постійна часу.

Принцип ПІД-регулювання показаний рис 5.

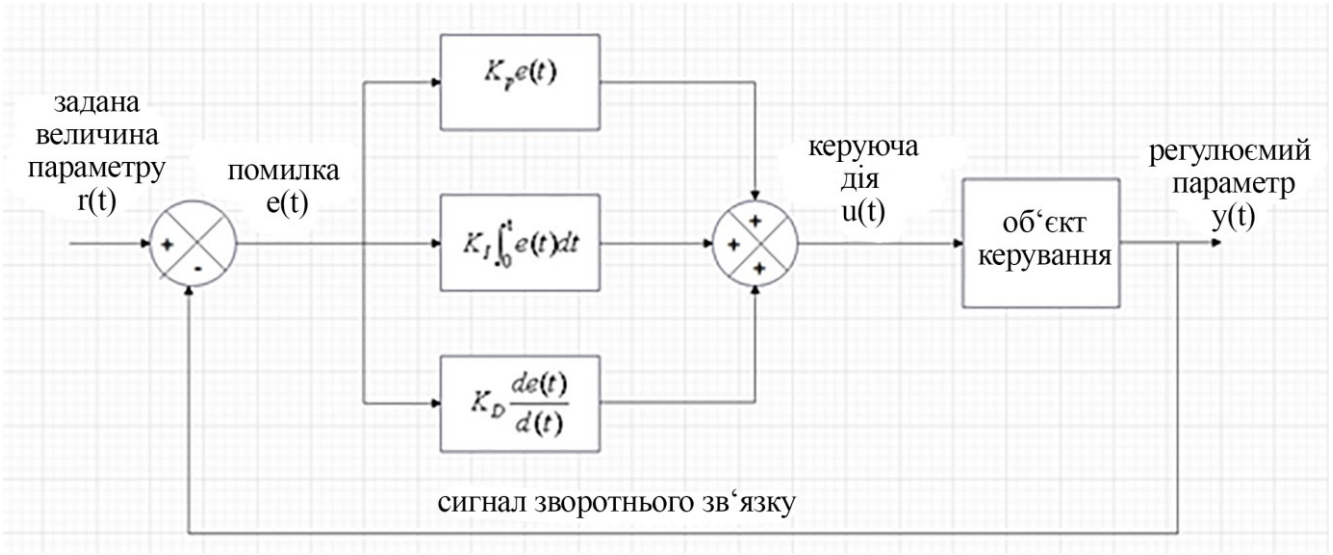



Рисунок 5 – Структурна схема ПІД-регулятор

Необхідно вибрати відповідний пропорційний коефіцієнт $K_P$, інтегральну постійну часу $K_I$ та диференціальний час $K_D$, щоб система автоматичного регулювання працювала у найкращому стані.

При використанні різних параметрів ПІД (пропорційного, інтегрального, диференціального) продуктивність системи управління буде різною. Тому налаштування та оптимізація параметрів ПІД-регулятора визначає остаточну ефективність керування системою керування.

### 1.5.2. Вплив параметрів $K_P$, $T_I$ та $T_D$ на процес управління системи

Коефіцієнт пропорційності:

Пропорційний коефіцієнт $K_P$.

Збільшення пропорційного коефіцієнта $K_P$ підвищує швидкодію системи та сприяє зменшенню статичної помилки в тих системах, де вона наявна. Однак занадто великий $K_P$ не усуває статичну помилку принципово, але може призвести до появи значного перерегулювання, збудження коливань або збільшення їх кількості, що подовжує час перехідного процесу та погіршує стійкість системи – аж до її нестабільності. Якщо ж $K_P$ занадто малий, система реагує занадто повільно і мляво.

Інтегральна стала часу $T_I$.

Інтегральний регулятор практично не застосовують окремо – він використовується у складі ПІ- або ПІД-регулятора. Сила інтегрального впливу визначається величиною $T_I$: чим менше $T_I$, тим сильніша інтегральна дія, і навпаки.

Збільшення інтегральної сталої часу допомагає зменшити перерегулювання, знизити коливальність та підвищити стабільність, але при цьому збільшує час, необхідний для усунення статичної помилки. Занадто мала величина $T_I$ спричиняє втрату стійкості та значне зростання коливань.

Диференціальна стала часу $T_D$.

Диференціальний вплив діє лише на зміну регульованої величини в динамічному режимі та не впливає на усталений стан. Він дуже чутливий до шумів, тому диференціатор практично не застосовують окремо – лише у складі ПД або ПІД-регуляторів.

Сила диференціального впливу визначається величиною $T_D$: чим більше $T_D$, тим сильніше диференціальне пригнічення зростання помилки. Якщо $T_D$ вибрано надто великим або надто малим, система отримує значне перерегулювання та тривалий час встановлення. Лише оптимально підібраний $T_D$ забезпечує бажаний якісний перехідний процес.

### 1.5.3. Метод Зіглера–Нікольса

З різними значеннями параметрів ПІД-регулятора продуктивність системи управління змінюється, тому процес налаштування та оптимізації параметрів ПІД є визначальним для кінцевої ефективності роботи системи. Вибір та коректування коефіцієнтів ПІД-регулятора становлять основний зміст етапу проєктування системи автоматичного керування.

У даному проєкті для налаштування параметрів ПІД-регулятора обрано метод критичної пропорційності. Цей метод є одним із найпростіших, найпоширеніших та найбільш придатних для практичної інженерної реалізації.

Метод Зіглера–Нікольса (метод критичного коефіцієнта підсилення) – один із найчастіше застосовуваних емпіричних методів налаштування. Суть методу полягає у визначенні так званих критичних параметрів системи управління експериментальним шляхом. На основі отриманих даних за емпіричними формулами обчислюють наближені оптимальні значення коефіцієнтів ПІД-регулятора.

Метод дозволяє визначити два ключові параметри динамічних характеристик об’єкта керування: критичний коефіцієнт посилення $K_u$ і критичний період коливань $T_u$. Метод критичної пропорційності підходить для ситуацій, коли передатна функція об'єкта відома. У замкненій системі управління регулятор знаходиться під суто пропорційною дією, і пропорційний коефіцієнт посилення регулятора поступово змінюється від великого до малого, щоб отримати перехід рівноамплітудних коливань. Пропорційний коефіцієнт посилення тим часом називається критичним коефіцієнтом посилення, а часовий інтервал між двома сусідніми піками – критичним періодом коливань $T_u$.

Кроки налаштування параметрів ПІД-регулятора за допомогою методу критичної пропорційності наступні:

- Встановіть інтегральну постійну часу $T_I$ регулятора на максимальне значення, встановіть постійну диференціальну часу $T_D$ на нуль ($T_D$=0), встановіть пропорційний коефіцієнт $K_P$ на відповідне значення, виконайте операцію

балансування протягом певного періоду часу та перевести систему в автоматичний режим.

2. Пропорційне посилення $K_P$ поступово зменшується доти, доки не буде отримано процес коливань з постійною амплітудою, і в цей час реєструються критичне значення посилення $K_u$ та критичного періоду коливань $T_u$.

3. За значенням $K_u$ та $T_u$ за емпіричною формулою таблиці 1 розрахувати кожен параметр регулятора, а саме значення $K_P$, $T_I$ та $T_D$.

Таблиця 1 - Формула налаштування критичного пропорційного параметра

| Тип регулятора | Параметри | | |
|---|---|---|---|
| | $K_P$ | $T_I$ | $T_D$ |
| П | $0.5\,K_u$ | - | - |
| ПІ | $0.455K_u$ | $0.833T_u$ | - |
| ПІД | $0.6\,K_u$ | $0.5T_u$ | $0.125T_u$ |

### 1.6. Програмний пакет Simulink

Simulink – це середовище MATLAB для побудови системних блок-схем, моделювання та аналізу динамічних систем. Воно являє собою інтерактивну графічну платформу, яка забезпечує моделювання, симуляцію та дослідження характеристик систем керування, а також виступає базовим інструментом для розробки вбудованих систем на основі моделей. Simulink дозволяє виконувати повномасштабне системне моделювання, аналіз ланцюгів керування та перевірку їхньої працездатності, забезпечуючи тісний взаємозв’язок між теоретичними методами та практичною реалізацією. Однією з ключових переваг середовища є можливість зручного налаштування параметрів ПІД-регулятора у процесі моделювання. В роботі застосовано метод критичної пропорційності для налаштування параметрів ПІД-регулятора у середовищі MATLAB/Simulink. Показано, що використання Simulink робить процес підбору параметрів наочним та інтуїтивно зрозумілим: параметри моделі можна змінювати в режимі реального часу, що суттєво скорочує обсяг ручних обчислень і програмної роботи.

## РОЗДІЛ 2. Моделювання системи управління

### 2.1. Моделювання ПІД-регуляторів у середовищі Simulink

По-перше, в наборі інструментів Simulink в Matlab ми створили схему моделювання системи управління потоком палива і повітря, як показано на рис 6. На рис 6 видно, що вона в основному складається з системи управління потоком палива і система управління потоком повітря, включає 3 ПІД-регулятора, які приймають зміна тиску пари в якості входу, а вихід - тиск пари.

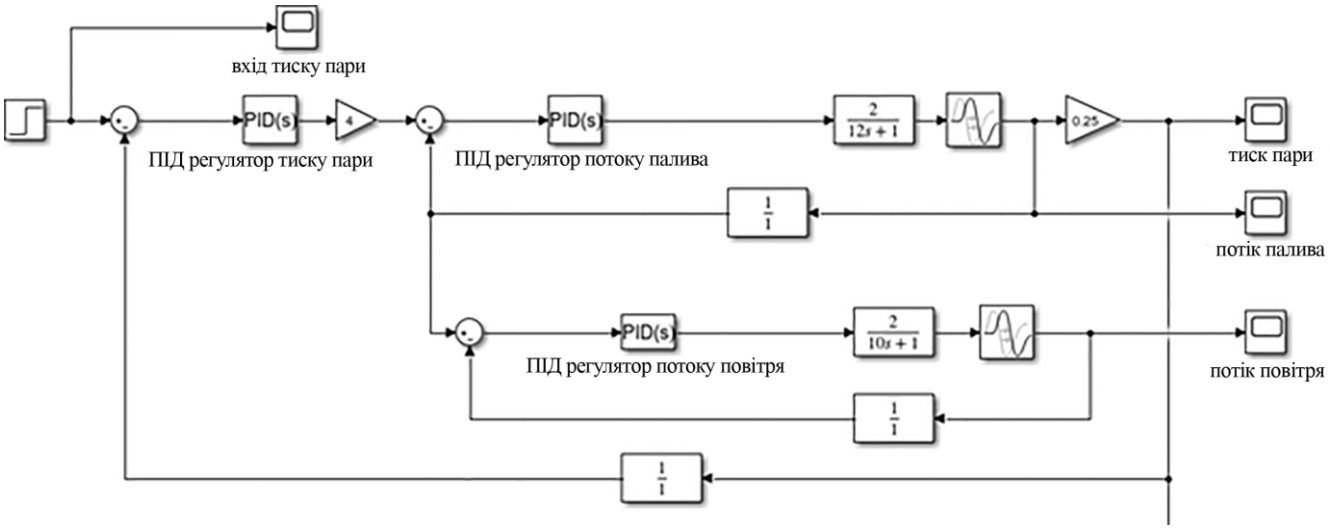



Рисунок 6 – Схема моделювання системи керування потоком палива та повітря

Для налаштування ПІД ми використовуємо метод стабільного кордону, спочатку нехай $K_I = 0$, і налаштовуємо $K_P$, щоб змусити систему коливатися з однаковою амплітудою, що є стійким критичним станом системи. Посилаючись на формулу таблиці 1, після багатьох тестів остаточне скориговане значення ПІД показано в таблиці 2.

Таблиця 2 - Кориговані параметри ПІД

| Система управління | $K_P$ | $K_I = K_P / T_I$ | $K_D = K_P * T_D$ |
|---|---|---|---|
| ПІД тиску пари | 1 | 0 | 0 |
| ПІД потоку палива | 0.9 | 0.08 | 0.05 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| ПІД потоку повітря | 0.95 | 0.15 | 0.1 |
| ПІД тиску розрідження в топці | 0.45 | 0.85 | 0 |

Схема моделювання системи управління потоком палива та повітря та результати моделювання представлені на рис 7 та 8. Вхідне значення тиску пари – 3 МПа.

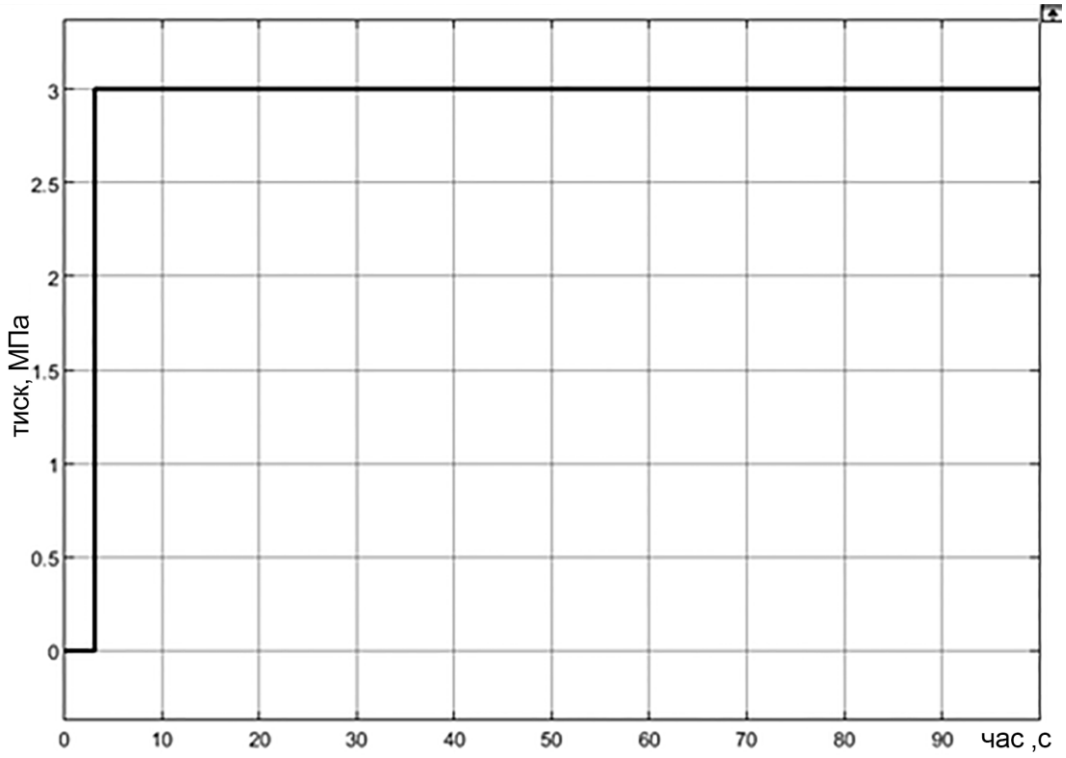



Рисунок 7 – Графік відгуку вхідного сигналу системи

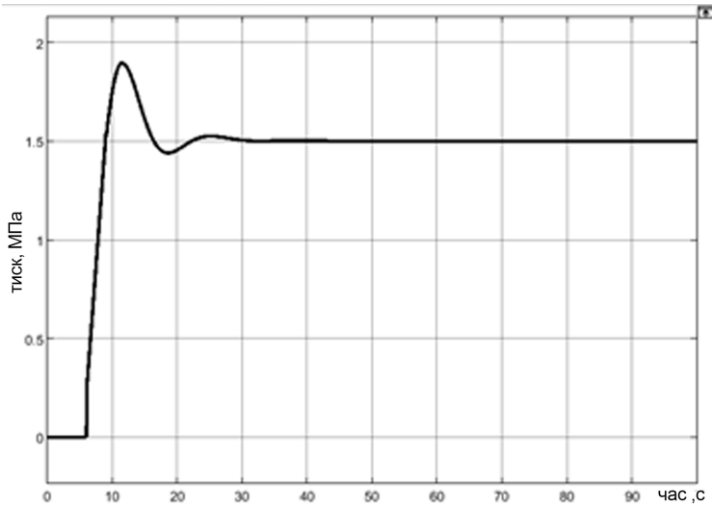



Рисунок 8 – Результат моделювання системи керування тиску пари

- перерегулювання системи – 23%.

Далі йде відгук системи управління витратою палива та системи управління потоком повітря. Для початку подивимося на відгук системи керування потоком палива у системі.

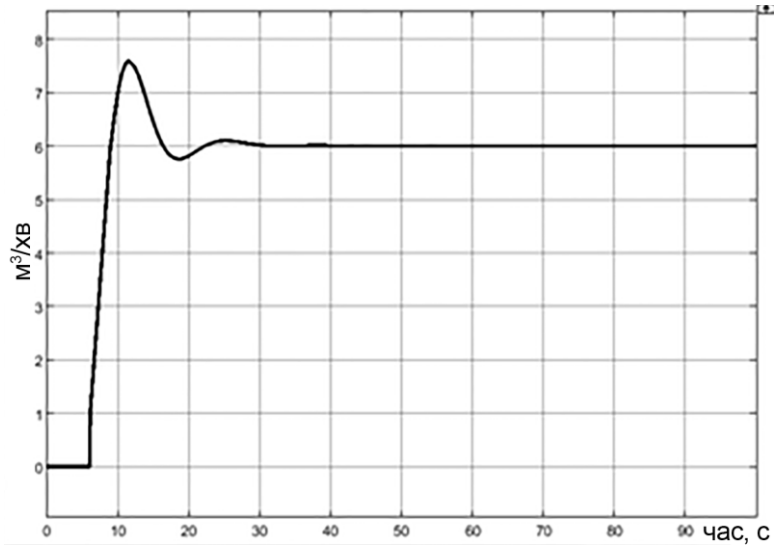



Рисунок 9 – Результат моделювання системи управління потоком палива

Перерегулювання системи – 25%.

Нижче наведено відгук системи керування потоком повітря у системі.

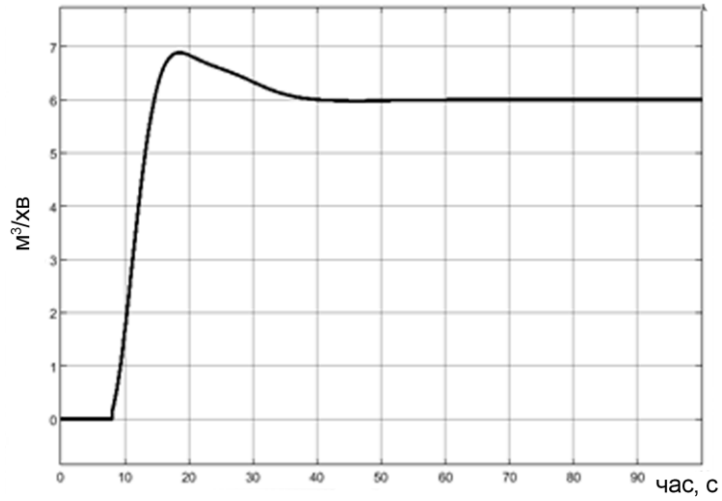



Рисунок 10 – Результат моделювання системи керування потоком повітря

Перерегулювання системи – 14%.

З цієї симуляції бачимо, що система управління потоком палива та система управління потоком повітря впливають та обмежують один одного. Тільки коли система працює в розумному діапазоні співвідношення повітря-паливо, вона може заощаджувати енергію та досягати більшої ефективності використання палива. , І тоді вихід тиску пари можна добре відрегулювати. З нього видно, що використання ПІД-регулятора дозволяє краще оптимізувати систему керування тиском пари. Нижче наведена реакція системи контролю тиску розрідження в топці в системі.

Система керування тиску розрідження в топці: $K_P$=0.45 та $K_I$=0.085

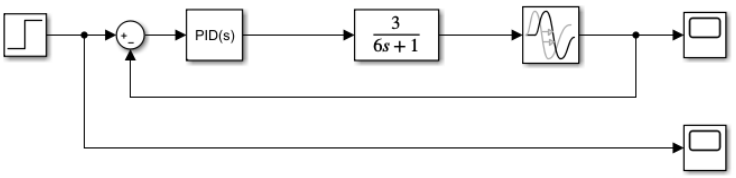



Рисунок 11 – Структурна схема моделювання системи керування тиску розрідження у топці

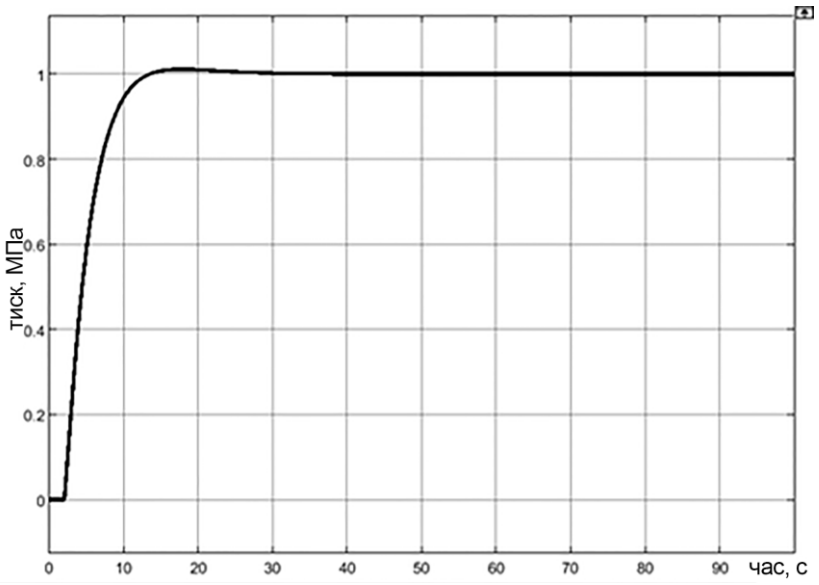



Рисунок 12 – Результат моделювання системи керування тиску розрідження у топці

Перерегулювання системи – 0%.

Налаштування прямого зв'язку функція компенсації системи контролю тиску розрідження в топці:

При використанні динамічного налаштування з прямим зв'язком функція компенсації з прямим зв'язком виглядає так:

$$G(s) = \frac{2}{2s+1} \cdot \frac{6s+1}{3} = \frac{12s+2}{6s+3} \tag{11}$$

## 2.2. Моделювання роботи отриманих регуляторів

### 2.2.1. Незбурене моделювання

Використовуємо отримані параметри системи керування, складемо модель системи у середовищі Simulink. Поставимо значення тиску пари на 5 і значення тиску розрідження в топці 1. Схема моделювання системи та результати моделювання представлені на рис 13, 14 та 15.

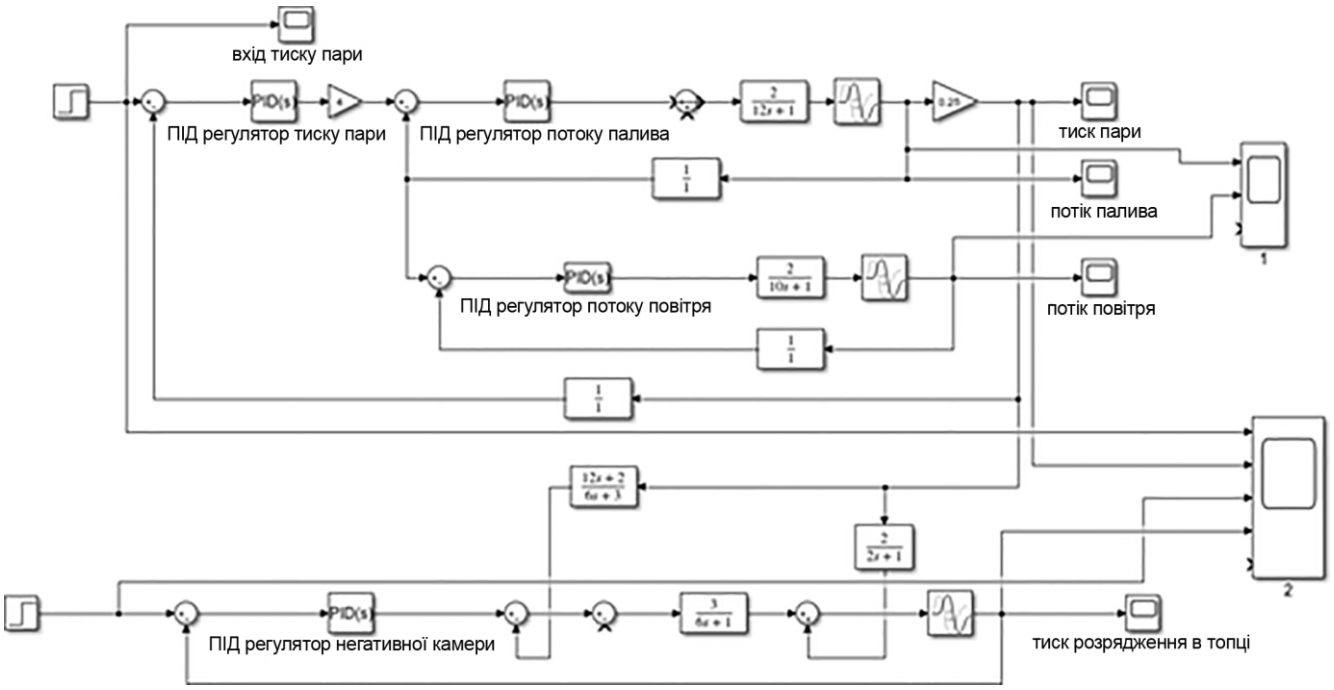



Рисунок 13 – Схема моделювання системи керування котлом

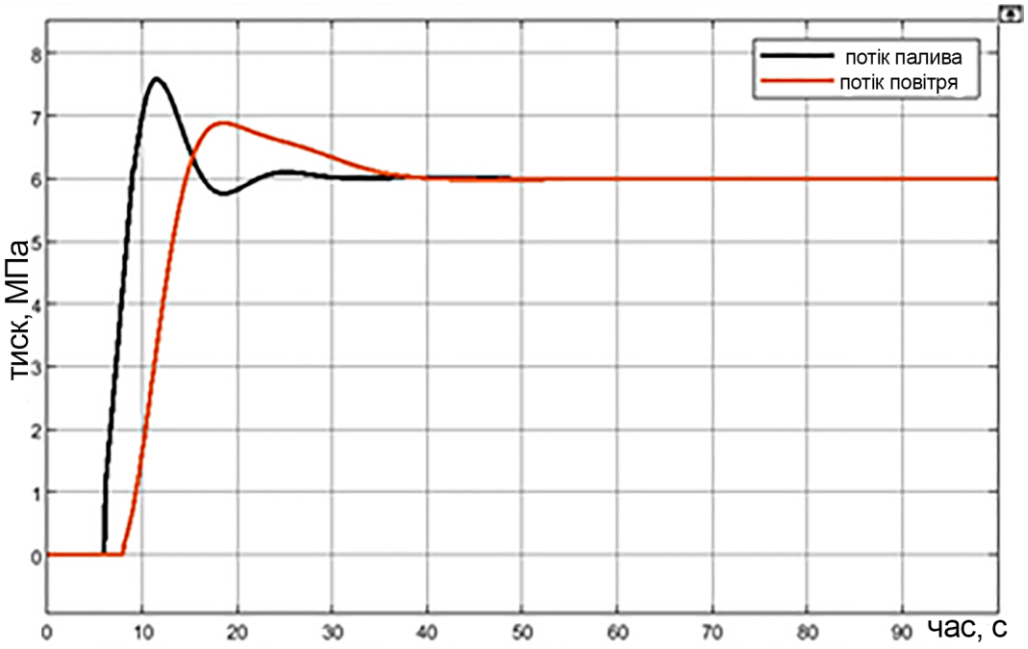



Рисунок 14 – Результати моделювання системи керування співвідношення палива та повітря

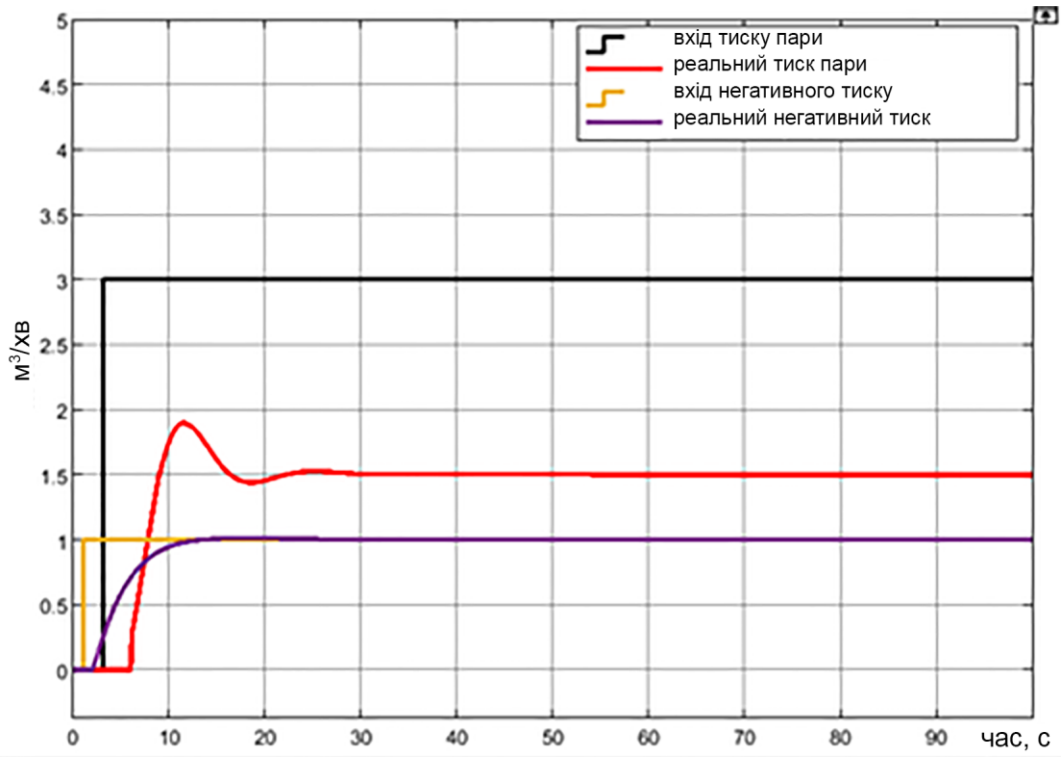



Рисунок 15 – Результати моделювання системи тиску пари та тиску розрідження в топці

### 2.2.2. Моделювання зі збуренням

До трьох частин системи додається випадкове збурення з амплітудою 0,1.

Схема моделювання системи представлена рис 16. Результати моделювання представлені рис 17 і 18.

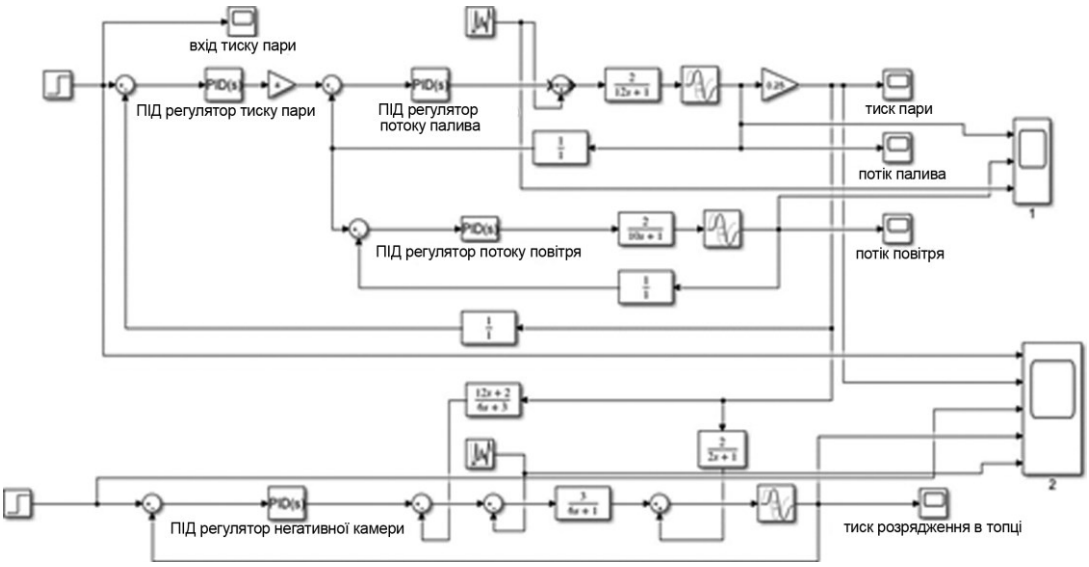



Рисунок 16 – Схема моделювання системи зі збуренням

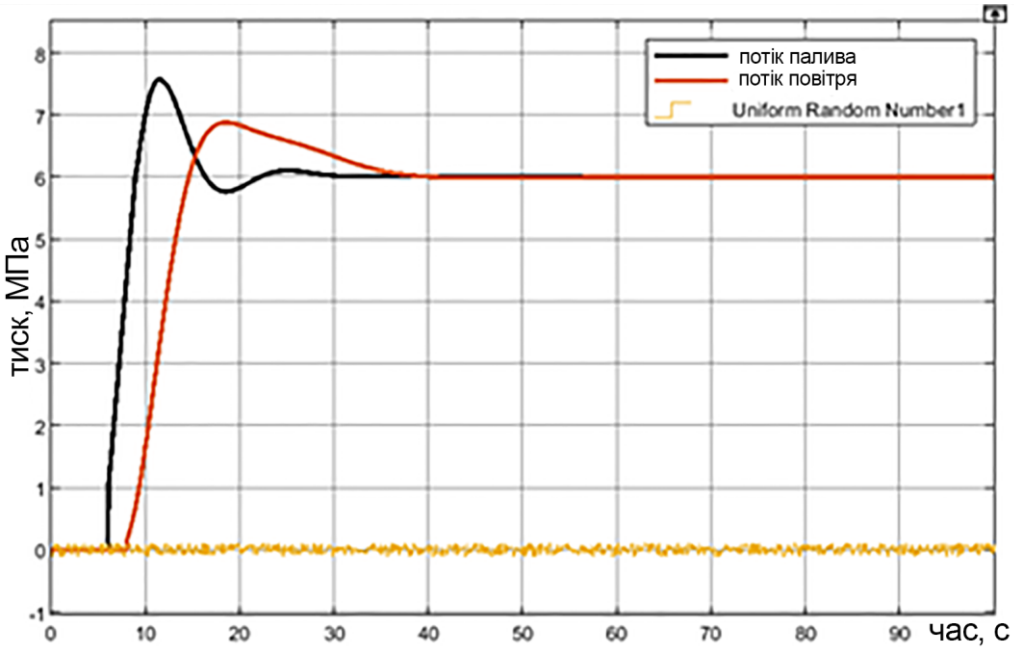



Рисунок 17 – Результати моделювання системи управління співвідношення палива та повітря зі збуренням

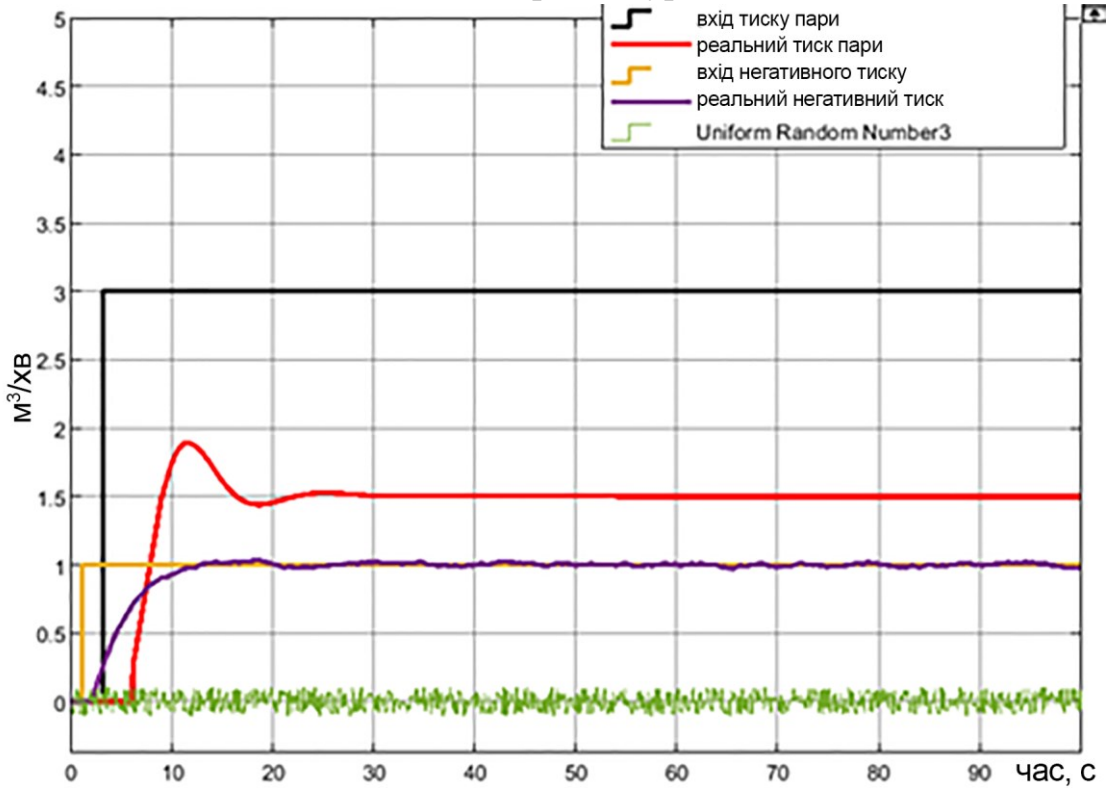



Рисунок 18 – Результати моделювання системи тиску пари та тиску розрідження в топці при збурені

При додаванні обурення перерегулювання системи істотно не змінюється.

**Висновки за розділом**

У розділі представлено розроблення та дослідження алгоритму ПІД-регулятора для системи керування горінням газового парового котла. Сформовано та обґрунтовано структуру системи керування, яку поділено на три підсистеми: систему регулювання тиску пари, систему керування співвідношенням паливо–повітря та систему регулювання тиску розрідження в топці. Для налаштування параметрів ПІД-регулятора застосовано метод Зіглера–Нікольса, що дозволив отримати оптимальні значення коефіцієнтів для обраної динаміки об’єкта.

Для моделювання роботи регулятора та всієї системи використано інструментарій SIMULINK у середовищі MATLAB. На етапі моделювання було реалізовано ПІД-керування та отримано перехідні процеси, які демонструють вихід системи на стабільний режим. Дослідження проведено для двох випадків: без зовнішнього збурення та за наявності випадкового збурення амплітудою ±0,1.

У присутності збурень спостерігається погіршення стійкісних властивостей системи. Водночас такі параметри, як час регулювання $T_р$, тривалість перехідного процесу $T_s$ та величина перерегулювання, змінюються несуттєво. Отримані результати підтверджують, що система здебільшого відповідає вимогам до якості регулювання та забезпечує необхідну точність і стабільність процесу керування горінням.

## РОЗДІЛ 3. Охорона праці

Охорона праці – це широке комплексне поняття, яке охоплює питання екологічної безпеки, соціальної відповідальності, рівноправності та створення безпечних умов праці для всіх учасників виробничого процесу.

Газовий котел складається з газопальникового обладнання та корпусу котла. Система спалювання газу включає топку, пальник, а також інші допоміжні елементи, що забезпечують подачу, змішування та стабільне горіння газоповітряної суміші. Основне призначення цього обладнання – подати необхідну кількість газу та повітря, забезпечити їх повне згоряння й перетворити хімічну енергію палива на теплову енергію, що нагріває котлову воду.

Корпус котла виконує функцію теплообмінного апарата, у якому теплова енергія спаленого газу використовується для перетворення води в пару заданих параметрів (тиску та температури). Таким чином, увесь технологічний цикл роботи котла складається з подачі газу й повітря в топку, процесу горіння та передавання отриманого тепла воді, яка випаровується, утворюючи пару стабільної якості.

У процесі проектування та експлуатації газового котла необхідно враховувати три ключові аспекти безпеки:

Виробнича безпека – захист персоналу від небезпечних та шкідливих виробничих факторів, пов'язаних із роботою високотемпературного обладнання, газових систем та електроустановок.

Екологічна безпека – мінімізація викидів продуктів згоряння, запобігання забрудненню атмосферного повітря й раціональне використання енергетичних ресурсів.

Безпека у надзвичайних ситуаціях – наявність систем автоматичного захисту, аварійного оповіщення, запобіжних клапанів і алгоритмів дій персоналу для запобігання аваріям, вибухам, пожежам та іншим небезпечним подіям.

### 3.1. Правові та організаційні питання забезпечення безпеки

Кожен працівник має право на:

- робоче місце, що відповідає вимогам охорони праці та забезпечує безпечні умови виконання трудових обов’язків;

- режим праці та відпочинку, встановлений трудовим законодавством та іншими нормативно-правовими актами, що регулюють трудові відносини;

- обов’язкове соціальне страхування від нещасних випадків на виробництві та професійних захворювань відповідно до чинного законодавства;

- відмову від виконання робіт, якщо виникла небезпека для життя чи здоров’я через порушення вимог охорони праці, за винятком випадків, передбачених законами, – до повного усунення такої небезпеки;

- забезпечення засобами індивідуального та колективного захисту, відповідно до вимог охорони праці, за рахунок роботодавця.

### 3.2. Виробнича безпека під час експлуатації

Обладнання газової котельні потребує особливого контролю з боку обслуговуючого персоналу. У роботі опалювального обладнання є певна небезпека, оскільки в ній бере активну участь теплоносій, що розігрівається до високої температури, та певного типу пальне, що має свої фізико-хімічні особливості. Крім того, особливої уваги вимагає високий тиск, який є невід'ємною частиною нагрівальних приладів.

Аналіз потенційно можливих шкідливих та небезпечних факторів, які можуть виникнути на робочому місці оператора газової котельні

Відповідно до ДСТУ, перелік небезпечних факторів та шкідливих факторів, характерних для проектованого виробничого середовища, представлений у таблиці 20.

Таблиця 20 – Перелік небезпечних та шкідливих факторів газової котельні

| № | Чинники |
|---|---|
| | **Небезпечні** |
| 1 | Виробничі фактори, пов'язані з високою температурою матеріальних об'єктів, які можуть викликати опіки тканин організму людини |
| 2 | Виробничі фактори, пов'язані з підвищеним утворенням електростатичних зарядів |

| | |
|---|---|
| 3 | Ураження електричним струмом |
| 4 | Робота з судинами під тиском |
| | **Шкідливі** |
| 5 | Підвищена загазованість повітря робочого середовища |
| 6 | Несприятливі умови мікроклімату |
| 7 | Підвищений рівень шуму |
| 8 | Монотонність праці, що викликає монотонію |
| 9 | Відсутність чи недолік необхідного штучного освітлення |

### 4.2.1. Аналіз шкідливих факторів

**Підвищена загазованість повітря робочого середовища**

Під час роботи котлів, що використовують газоподібне паливо, у повітрі виробничих приміщень може виникати надмірна концентрація оксиду вуглецю (CO). Це становить серйозну небезпеку для персоналу, оскільки CO є високотоксичним газом без запаху та кольору.

Основні причини підвищення концентрації CO:

1. неправильне налаштування регулятора співвідношення «газ–повітря»;
2. порушення у роботі пальникового обладнання;
3. негерметичність стінки котла;
4. витоки у зварних або різьбових з’єднаннях газопроводів;
5. пошкодження ущільнень газової запірно-регулюючої арматури.

Токсична дія оксиду вуглецю

Оксид вуглецю зв’язується з гемоглобіном крові, утворюючи карбоксигемоглобін, який не здатний переносити кисень. У результаті розвивається кисневе голодування тканин (гіпоксія, аноксія).

Можливі симптоми та наслідки отруєння:

1. головний біль, запаморочення, загальна слабкість;
2. судоми, втрата свідомості, коматозний стан;
3. порушення серцевої діяльності та дихання;
4. ураження нирок та ендокринної системи;

5. зміни морфологічного складу периферичної крові;
6. підвищення температури тіла;
7. можливі неврологічні та психічні розлади;
8. розвиток хронічного отруєння за тривалого впливу.

Засоби захисту від загазованості

Колективні засоби захисту:

1. системи вентиляції (природної та примусової) і повітроочищення;
2. системи кондиціювання повітря;
3. автоматичні системи контролю загазованості та світло-звукової сигналізації.

Індивідуальні засоби захисту для персоналу котельні:

1. фільтрувальні та ізолювальні протигази;
2. рятувальні пояси та страхувальні мотузки;
3. діелектричні рукавички та калоші (за необхідності проведення робіт з електроустаткуванням);
4. інші засоби індивідуального захисту відповідно до норм охорони праці..

Гранично допустимі концентрації хімічних речовин у повітрі робочої зони регламентуються Державними медико-санітарними нормативами допустимого вмісту хімічних речовин у повітрі робочої зони, затвердженими наказом Міністерства охорони здоров'я України від 09.07.2024 № 1192. Для основних забруднювальних речовин, які можуть утворюватися під час експлуатації газової котельні, нормативні значення наведено в таблиці 21.

Таблиця 21 – гранично допустимі концентрації (ГДК) шкідливих речовин у повітрі робочої зони.

| | Найменування речовини | Величина ГДК, мг/м$^3$ | Переважне агрегатний стан в умовах виробництв | Клас небезпеки |
|---|---|---|---|---|

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | | | а | |
| | Азот діоксид | 2 | п | III |
| | Азоту оксиди (у перерахунку на $NO_2$) | 5 | п | III |
| | Вуглецю оксид* | 20 | п | IV |
| | Вуглеводні аліфатичнігранічні С1-С10 (у перерахунку на С) | 300 | п | IV |

**Несприятливі умови мікроклімату**

Параметри мікроклімату виробничих приміщень визначаються температурою повітря, відносною вологістю, швидкістю руху повітря та інтенсивністю теплового випромінювання. Для приміщення газової котельні основними джерелами надлишкового тепла є поверхні котла, паропроводи, трубопроводи гарячої води, газоходи та інше теплотехнічне обладнання.

Нормування параметрів мікроклімату виробничих приміщень здійснюється відповідно до ДСН 3.3.6.042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень». Допустимі та оптимальні параметри визначають з урахуванням категорії робіт за енерговитратами та періоду року.

Для зменшення теплового впливу на персонал нагріті поверхні котельного обладнання, трубопроводів та газоходів повинні мати справну теплову ізоляцію, а організація експлуатації має виключати можливість небезпечного контакту працівників із нагрітими поверхнями. Експлуатація тепломеханічного обладнання здійснюється відповідно до Правил охорони праці під час експлуатації тепломеханічного обладнання електростанцій, теплових мереж і тепловикористовувальних установок, затверджених наказом Міненерговугілля України від 02.12.2013 № 892

Елементи котельного та допоміжного обладнання, газоходи, арматура та

трубопроводи, температура поверхні яких перевищує допустиме значення, обов’язково підлягають оснащенню тепловою ізоляцією. Це дозволяє:

1. знизити теплове навантаження на персонал;
2. забезпечити безпечні умови праці;
3. зменшити тепловтрати та підвищити енергоефективність котельної установки

**Підвищений рівень шуму**

Основними джерелами виробничого шуму в газовій котельні є вентилятори, димососи, насоси, пальникові пристрої, регулювальна арматура та рух газоповітряних потоків у газоходах і повітропроводах.

Допустимі рівні виробничого шуму на робочих місцях визначаються відповідно до ДСН 3.3.6.037-99 «Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку». Нормативне значення обирається з урахуванням характеру трудової діяльності та умов перебування персоналу на робочому місці.

Для зниження шумового навантаження передбачають віброізоляцію обертового обладнання, гнучкі вставки на повітроводах, своєчасне балансування робочих коліс вентиляторів і димососів, застосування шумоглушників та звукоізолювальних кожухів.

Шум у котельні має два основних різновиди:

1. корпусний шум, що виникає внаслідок механічних вібрацій під час роботи агрегатів;
2. повітряний шум, спричинений процесами спалювання газу та рухом повітряно-газових потоків.

Для зменшення шумового впливу на персонал застосовуються віброкомпенсатори, які знижують передачу механічних коливань на конструкції. Під час проєктування котельні необхідно враховувати очікуваний рівень шуму та передбачати заходи щодо його зниження. Якщо конструктивно мінімізувати шум не вдається, встановлюють спеціальні шумоглушні пристрої, такі як:

1. звукопоглинальні підставки;
2. глушники шуму димових газів;

3. шумозахисні кожухи для пальників.

Такі заходи підвищують безпеку та комфортність умов праці персоналу.

**Відсутність чи нестача необхідного штучного освітлення**

У виробничих приміщеннях газової котельні вдень використовується природне освітлення, яке забезпечується через бокові вікна, а у вечірній та нічний час застосовується штучне освітлення. Штучне освітлення реалізується шляхом поєднання загального освітлення приміщення та місцевого освітлення робочих зон.

Недостатній рівень освітленості може виникати через несправність світильників, їх забруднення або затінення обладнанням та конструктивними елементами котельні. У таких умовах зростає ризик травматизму серед ремонтного та експлуатаційного персоналу, а в приміщенні щитової недостатнє освітлення може спричинити зниження гостроти зору, підвищену нервову напругу та швидку втому операторів.

Освітлення робочих зон газової котельні повинно забезпечувати безпечне спостереження за показаннями приладів, станом трубопроводів, запірної та регулювальної арматури, виконання операцій технічного обслуговування і ремонту.

Нормовані показники природного та штучного освітлення визначають відповідно до ДБН В.2.5-28:2018 «Природне і штучне освітлення». Значення освітленості приймають залежно від призначення конкретного приміщення та характеру виконуваної зорової роботи.

**Монотонність праці, що викликає монотонію**

Причиною монотонності праці в котельні є монотонність виробничого середовища і виконання великої кількості повторюваних операцій Працівники котельні виконують технічну роботу, що повторюється. Котельне обладнання працює автоматично, і робітникам необхідно лише стежити за приладами та забезпечувати безпечну роботу обладнання. Необхідні регламентовані перерви для відпочинку та мінімізації виникнення цього чинника.

### 3.2.2. Аналіз небезпечних факторів

Виробничі фактори, пов'язані з надмірно високою температурою матеріальних об’єктів, становлять суттєву небезпеку для персоналу, оскільки можуть спричиняти опіки різного ступеня. Працівники, які регулярно контактують із джерелами тепла – відкритим полум’ям, гарячими поверхнями чи парою – перебувають у групі підвищеного ризику, а термічні ушкодження в таких умовах можуть становити загрозу життю.

У котельних установках опіки та термічні травми можуть виникати з різних причин, зокрема:

1. при роботі з розігрітими металами;
2. у разі послизання та падіння на гарячі поверхні;
3. під дією полум’я, гарячої олії чи пари;
4. при роботі з агресивними хімічними речовинами;
5. через контакт з надмірно гарячою водою;
6. унаслідок викиду пари чи бризок із обладнання;
7. під час використання перегрітих інструментів.

Найвищий ризик опіків виникає при випадковому торканні елементів котельного обладнання, температура яких може бути критично високою. Для зменшення цього ризику на обладнанні обов’язково повинні розміщуватися попереджувальні маркування на кшталт:

«Не торкатися»;

«Пожежонебезпечно».

Такі заходи підвищують обізнаність персоналу та допомагають запобігти виробничим травмам.

**Виробничі фактори, пов'язані з підвищеним утворенням електростатичних зарядів на корпусі пристрою, що розробляється.**

Статична електрика виникає внаслідок накопичення зарядів електростатичного поля на поверхні діелектричних матеріалів. Її присутність негативно впливає на роботу електричних пристроїв, а утворення іскрових розрядів може стати причиною пожеж та вибухів. Енергії статичного розряду

достатньо для займання газоповітряних сумішей або пилу. Крім того, працівники, які постійно зазнають дії статичної електрики, частіше страждають на захворювання серцево-судинної та нервової систем.

У котельнях статичні заряди найчастіше виникають у таких ситуаціях:

1. переміщення порошинок у повітроводах з високою швидкістю;
2. проходження зрідженого газу трубопроводами, особливо якщо він містить суспензії або пил;
3. рух візків із гумовими шинами по ізольованому підлоговому покриттю.

Для зменшення ризиків, пов’язаних зі статичною електрикою, рекомендується застосовувати такі заходи:

1. підвищення електропровідності матеріалів і робочого середовища для забезпечення розсіювання статичних зарядів;
2. зниження швидкості переміщення та обробки матеріалів, що зменшує інтенсивність генерації електростатичних зарядів;
3. широке використання правильно організованого заземлення, яке запобігає накопиченню небезпечних потенціалів;
4. підвищення стійкості обладнання до електростатичних розрядів;
5. недопущення потрапляння електричного струму у робочу зону;
6. збільшення вологості повітря, оскільки сухе повітря сприяє накопиченню статичних зарядів на обладнанні.

**Ураження електричним струмом**

У котельнях експлуатують різноманітні електричні установки, що створює підвищений ризик ураження працівників електричним струмом. Статистичні дані свідчать, що електротравми становлять близько 1–3% від усіх нещасних випадків на виробництві.

Основними причинами електротравм у котельних є:

1. випадковий дотик або небезпечне наближення до струмоведучих частин;
2. поява напруги на металевих конструкціях унаслідок пробою ізоляції;

3. помилкові дії обслуговуючого персоналу;
4. дія крокової напруги.

Щоб запобігти ураженню електричним струмом, усе електросилове обладнання котельні оснащується захисним заземленням, виконаним відповідно до вимог ДСТУ.

Електричне обладнання газової котельні – електроприводи насосів, вентиляторів і димососів, шафи автоматизації, контрольно-вимірювальні прилади та допоміжні електроустановки – повинно експлуатуватися із забезпеченням захисту персоналу від прямого й непрямого дотику.

Для цього застосовують захисне заземлення, автоматичне відключення живлення, ізоляцію струмовідних частин, огородження, блокування та попереджувальну сигналізацію. Опір і конструкція заземлювального пристрою повинні визначатися розрахунком відповідно до параметрів конкретної електроустановки та прийнятої системи живлення.

Крім того, передбачено захисне занулення, що виконується шляхом під'єднання корпусів електрообладнання до нульового провідника мережі живлення. Воно запобігає появі небезпечної напруги на конструктивних елементах у разі пробою ізоляції.

Для захисту від перевантажень застосовуються плавкі запобіжники.

До засобів колективного захисту належать:

1. огороджувальні конструкції;
2. пристрої автоматичного контролю та сигналізації;
3. ізолюючі покриття й пристрої;
4. системи захисного заземлення та занулення;
5. апаратура автоматичного відключення живлення.

Обов'язковим є проведення інструктажів з електробезпеки безпосередньо на робочому місці.

Усе електросилове обладнання додатково позначається попереджувальними знаками про небезпеку ураження електричним струмом, що підвищує рівень обізнаності персоналу та знижує ризик травмування..

**Експлуатація обладнання, що працює під тиском**

Котли, посудини та трубопроводи, що працюють під надлишковим тиском, належать до обладнання підвищеної небезпеки. Під час їх експлуатації основними небезпечними чинниками є перевищення допустимого тиску, порушення герметичності, несправність запобіжної арматури, пошкодження зварних з'єднань, перегрів елементів і порушення водного режиму.

Вимоги до монтажу, технічного обслуговування, ремонту, технічного огляду та безпечної експлуатації такого обладнання встановлені Правилами охорони праці під час експлуатації обладнання, що працює під тиском, затвердженими наказом Міністерства соціальної політики України від 05.03.2018 № 333. Правила поширюються на обладнання, яке працює під тиском понад 0,5 бар.

Обладнання повинно бути оснащене справними засобами контролю, запобіжними пристроями, сигналізацією та автоматичними захистами. Персонал, який обслуговує обладнання під тиском, допускається до роботи після відповідного навчання та перевірки знань.

Під час експлуатації котла внутрішні порожнини заповнюються значним об'ємом пари, що створює потенційну небезпеку виникнення вибухонебезпечних ситуацій. Основні ризики пов'язані з такими чинниками:

1. вибух котла з подальшим виникненням пожежі, що може статися через перегрів, надлишковий тиск або руйнування елементів конструкції внаслідок втоми металу;
2. травмування персоналу під дією вибухової хвилі, уламків, полум'я чи перегрітої пари;
3. займання або вибух палива, що використовується в процесі роботи котла;
4. займання обтиральних матеріалів, просочених паливом;
5. вибух газоповітряної суміші всередині топки або газоходів.

Для запобігання таким ситуаціям застосовуються засоби колективного захисту, зокрема:

1. системи автоматичного контролю та сигналізації;
2. запобіжні пристрої;
3. системи дистанційного керування.

Перед початком будь-яких робіт, пов’язаних з експлуатацією чи обслуговуванням котла, персонал повинен отримати офіційний допуск, відповідно до вимог нормативних документів. Котел, що працює під тиском, повинен мати попереджувальну вивіску на поверхні обладнання.

### 3.3. Екологічна безпека під час експлуатації

#### 3.3.1. Вплив на територію житлової забудови

Котельна є стаціонарним джерелом викидів забруднювальних речовин, шуму та інших фізичних факторів, тому під час її розміщення необхідно забезпечувати санітарно-захисну зону між виробничим об’єктом та житловою забудовою.

Нормативний розмір санітарно-захисної зони визначають відповідно до Державних санітарних правил планування та забудови населених пунктів ДСП 173-96 з урахуванням виду об’єкта, застосовуваного палива, потужності обладнання та результатів розрахунку розсіювання забруднювальних речовин. ДСП 173-96 залишаються чинними в актуальній редакції.

Для конкретного об’єкта фактичний розмір СЗЗ має підтверджуватися оцінкою впливу джерел викидів та фізичних факторів. Чинна Інструкція щодо оформлення документів з обґрунтування викидів також прямо пов’язує нормативний розмір СЗЗ із ДСП 173-96.

#### 3.3.2. Вплив на атмосферне повітря

Забруднювачами газу, що утворюються під час спалювання палива в газових котлах, є в основному окис вуглецю, вуглеводні, оксиди азоту, а також двоокис сірки, сірководень. При температурі горіння природного газу вище 1500 ℃, азот у повітрі з'єднуватиметься з киснем з утворенням оксидів азоту.

Під час спалювання природного газу основними контрольованими забруднювальними речовинами є оксиди азоту, оксид вуглецю та, залежно від

складу палива і режиму горіння, інші газоподібні компоненти. Фактичний склад і масові витрати викидів визначаються за результатами інструментальних вимірювань або розрахунків, виконаних відповідно до чинних методик.

Нормативи граничнодопустимих викидів від стаціонарних джерел в Україні встановлюються відповідно до наказу Міністерства охорони навколишнього природного середовища України від 27.06.2006 № 309 «Про затвердження нормативів граничнодопустимих викидів забруднюючих речовин із стаціонарних джерел». Документ є чинним у редакції з урахуванням змін 2025 року.

Для теплосилових установок, номінальна теплова потужність яких перевищує 50 МВт, додатково застосовуються технологічні нормативи допустимих викидів, затверджені наказом Мінприроди України від 22.10.2008 № 541. Тому конкретні допустимі концентрації $NO_x$, $SO_2$, CO та інших речовин слід визначати з урахуванням потужності, виду палива, року введення установки в експлуатацію та умов дозволу на викиди, а не за універсальною таблицею.

На межі санітарно-захисної зони концентрації забруднювальних речовин в атмосферному повітрі не повинні перевищувати державні медико-санітарні нормативи, затверджені наказом МОЗ України від 10.05.2024 № 813.

**Методи захисту**

Розподіл температури полум'я горіння в газовому котлі практично нерівномірний. Зазвичай температура на деякій відстані від виходу з пальника до і після нього нижче, тобто локальна область підвищеної температури. Оскільки температура в цій зоні набагато вища за середній рівень температури в печі, вона сильно впливає на утворення NOx: чим вище температура, тим більше NOx утворюється. Тому для придушення утворення оксидів азоту, крім зниження середньої температури печі, необхідно також намагатися зробити розподіл температури в печі рівномірним, щоб уникнути надмірної локальної температури.

### 3.3.3. Вплив на гідросферу

Стічна вода котла – це вода, що була використана у технологічних процесах

і втратила свої якісні показники, унаслідок чого не може бути повторно використана на підприємстві без додаткової обробки. Стічні води, що скидаються у природні водойми, становлять екологічну небезпеку, оскільки можуть містити шкідливі домішки та забруднювати водні екосистеми.

Зменшити кількість шкідливих речовин, що потрапляють у водойми разом зі стічними водами, можна двома основними шляхами:

1. зменшення обсягу стічних вод, що утворюються у процесі роботи котельні;
2. очищення стічних вод перед їх скиданням у природні об’єкти.

Скорочення обсягів стічних вод водоочисних споруд досягається шляхом оптимізації технологічних схем і впровадження раціональних методів водопідготовки.

Головним напрямом удосконалення систем очищення води є:

1. зменшення витрат реагентів та технологічної води;
2. впровадження технологій повторного використання очищених стічних вод у виробничому циклі котельні.

Серед сучасних і перспективних методів зниження витрат води та підвищення ефективності її очищення найбільш результативними є:

1. метод безперервної іонізації води;
2. ступінчасто-протиточна іонізація;
3. термічна регенерація іонітів.

Ці технології дають можливість суттєво зменшити водоспоживання, підвищити екологічну безпеку та оптимізувати витрати на експлуатацію котельного господарства.

### 3.3.4. Вплив на літосферу

Котельне обладнання здебільшого складається з металевих конструкцій та електронних блоків. Основними матеріалами, що застосовуються у виробництві котлів, є метали – сталь, алюміній, цинк. Після виведення котла з експлуатації металеві відходи можуть негативно впливати на навколишнє середовище: вони порушують кислотно-лужний баланс ґрунту, погіршують його якість і, поступово

накопичуючись, здатні завдати значної шкоди екосистемам.

Електронні компоненти котельного обладнання містять марганець, нікель, кадмій, хром, германій, миш'як, фосфор та інші токсичні елементи й сполуки. Багато з них є надзвичайно небезпечними: потрапляючи у ґрунт або підземні води, вони можуть спричиняти довготривале та важко оборотне забруднення.

Щоб запобігти негативному впливу металевих та електронних відходів на літосферу, необхідно застосовувати переробку та повторне використання матеріалів. Це дозволяє зменшити кількість відходів, зберегти природні ресурси та знизити екологічне навантаження на довкілля.

### 3.4. Безпека у надзвичайних ситуаціях під час експлуатації

#### 3.4.1. Аналіз можливих НС газової котельні

Можливими НС у газових котельнях є вибух палива, зниження рівня води та надто високий тиск палива. Причинами виникнення НС у газових котельнях є розгерметизація газопроводу внаслідок механічних пошкоджень; відмов запірної, регулюючої та запобіжної арматури; дефектів зварних та фланцевих з'єднань; корозія, втома металу.

#### 3.4.2. Найімовірніша НС газової котельні. Пожежа в котельні

З різних причин у газових котлах часто виникають пожежі, які не тільки завдають великих економічних збитків, а й серйозно загрожують фізичному та психічному здоров'ю людей і навіть їх життю. Тому необхідно вивчити пожежонебезпечність газового котла та заходи її профілактики.

Причиною пожежі в котельні може бути неправильне співвідношення паливного газу та повітря, занадто велике навантаження котла, занадто велике розрідження камери згоряння або недбалість робітників у своїй роботі.

**Заходи щодо попередження**

Заборони під час експлуатації котелень та інших тепловиробних установок.

Під час роботи котелень та тепловиробного обладнання суворо забороняється:

а) допускати до обслуговування осіб, які не пройшли спеціальне навчання

та не мають відповідних кваліфікаційних посвідчень;

б) використовувати як паливо відходи нафтопродуктів та інші легкозаймисті чи горючі рідини, не передбачені технічними умовами для даного обладнання;

в) експлуатувати установки при наявності підтікань рідкого палива, витоку газу в системах паливоподачі, у вузлах форсунок, газових пальників або ємностях з паливом;

г) подавати паливо за умов згаслих форсунок або газових пальників;

д) розпалювати установку без попереднього продування топки та газоходів;

е) працювати зі справними або навмисно відключеними приладами контролю, сигналізації та регулювання, які передбачені виробником обладнання;

ж) сушити будь-які горючі матеріали на поверхні котлів, паропроводів та іншого обладнання;

з) експлуатувати твердопаливні котельні з димовими трубами, що не обладнані іскрогасниками або не очищені від сажі.

**План дій у разі надзвичайної ситуації (НС)**

У випадку виникнення пожежі або аварійної ситуації в котельні необхідно діяти за таким алгоритмом:

1. Негайно повідомити пожежну частину та диспетчера підприємства.
2. Вжити першочергових заходів для локалізації та ліквідації осередку займання (за умови безпеки для персоналу).
3. Забезпечити доступ пожежно-рятувальних підрозділів, зустріти їх та вказати місце загоряння.

**Аварійне відключення обладнання**

У разі пожежі, що загрожує життю персоналу або роботі обладнання, необхідно:

1. виконати аварійне зупинення котлів;
2. перед гасінням знеструмити електрообладнання;
3. вимкнути димососи та вентилятори кнопкою «Стоп» на агрегатах або на щиті керування;

4. вимкнути дахові вентилятори кнопкою на кожному вентиляторі та біля входу в котельню;
5. вимкнути систему вентиляції у венткамері через панель керування;
6. зупинити насоси вимикачами на агрегатах або в приміщенні КТП.

Гасіння електрообладнання, що перебуває під напругою, категорично заборонено – допускається лише після його знеструмлення. Для гасіння застосовують порошкові вогнегасники.

**Дії у разі пожежі на газопроводах**

У випадку загоряння газу:

1. Зменшити тиск газу у газопроводі до мінімально можливого.
2. Погасити полум’я, дотримуючись вимог безпеки.
3. Після погашення повністю перекрити подачу газу.

Забезпечити вентиляцію приміщення та контроль за наявністю вибухонебезпечних концентрацій газу.

**Висновок за розділом**

**Оцінка умов праці та категорії безпеки приміщення**

Аналіз умов праці на робочому місці показує, що всі виробничі чинники перебувають у межах нормативних значень та відповідають вимогам діючих стандартів.

Категорія приміщення з електробезпеки визначена як приміщення без підвищеної небезпеки (I клас). Згідно з правилами охорони праці при експлуатації електроустановок, обслуговуючий персонал повинен мати I групу допуску з електробезпеки. Присвоєння групи здійснюється після проведення первинного інструктажу з подальшою перевіркою знань у формі усного опитування та, за потреби, демонстрації навичок безпечного виконання робіт або надання першої допомоги при ураженні електричним струмом.

Відповідно до ДСТУ, категорія тяжкості праці у лабораторії належить до категорії Іб, що включає роботи, які виконуються сидячи, стоячи або пов’язані з ходьбою та характеризуються незначною фізичною напругою.

**Пожежна безпека та категорія приміщення**

Приміщення лабораторії за вибухопожежною небезпекою може бути віднесене до категорії В. До цієї категорії належать речовини та матеріали, які:

1. є горючими газами або легкозаймистими рідинами з температурою спалаху до 28 °С;
2. здатні утворювати вибухонебезпечні парогазоповітряні суміші з надлишковим тиском вибуху понад 5 кПа;
3. можуть вибухати або горіти при взаємодії з водою, киснем повітря чи між собою.

Наявність таких речовин у приміщенні потребує дотримання підвищених вимог пожежної безпеки, забезпечення відповідних систем вентиляції, контролю концентрації газів та застосування засобів індивідуального й колективного захисту.

**Екологічна оцінка об’єкта**

Досліджуваний об’єкт характеризується незначним впливом на навколишнє

середовище та згідно з екологічною класифікацією належить до ІІІ категорії. Це означає, що екологічні ризики є мінімальними та підлягають контролю за допомогою стандартних заходів моніторингу та регулювання.

## Висновок

У результаті виконання роботи була розроблена автоматизована система керування паровим котлом на основі сучасних методів налаштування ПІД-регуляторів. У межах дослідження сформовано три основні контури регулювання:

– контур підтримання тиску пари;

– контур регулювання співвідношення паливо–повітря;

– контур регулювання тиску розрідження в топці.

Для кожного контуру розроблено алгоритми автоматичного ПІД-регулювання. Налаштування параметрів регуляторів здійснювалось методом Зіглера-Нікольса, що дозволило отримати оптимальні значення коефіцієнтів і забезпечити стабільні динамічні характеристики системи. Подальше моделювання здійснювалося у середовищі MATLAB/Simulink, що дало змогу підтвердити працездатність системи та її відповідність вимогам до точності, стійкості та швидкодії. Розроблена система автоматичного керування котлом є технологічно здійсненною та має потенціал до подальшої модернізації.

Аналіз конкурентних технічних рішень показав, що обраний варіант реалізації є найбільш доцільним та ефективним серед розглянутих, оскільки забезпечує оптимальне поєднання функціональності, надійності та економічних показників.

Розроблена система управління демонструє високу ефективність, відповідає нормативним вимогам та може бути впроваджена у промислових умовах для підвищення надійності, безпеки та економічності роботи котельного обладнання.

## Список використаних джерел


1. Tan W., Liu J., Fang F., Chen Y. Tuning of PID controllers for boiler-turbine units. ISA Transactions. 2004. Vol. 43, No. 4. P. 571–583.
2. Morilla F. Benchmark for PID control based on the Boiler control problem. In: Proceedings of the PID'12 Conference. 2012.
3. Cui X., Xu P., Song G., Gu H., Gu H., Wang L., Zhu H. PID Control of a Superheated Steam Temperature System Based on Integral Gain Scheduling. Energies. 2022. Vol. 15, No. 23. Art. 8978.
4. Shi G., Li D., Wang L., et al. Superheated Steam Temperature Control Based on a Hybrid Active Disturbance Rejection Control. Energies. 2020. Vol. 13, No. 7. Art. 1757.
5. Wu Z., Li D., Wang L. Control of the Superheated Steam Temperature: A Comparison Study Between PID and Fractional Order PID Controller. In: Proc. 35th Chinese Control Conference (CCC). Chengdu, China, 2016.
6. Sun L., Dong J.Y., Li D.H. Active disturbance rejection control for superheated steam boiler temperatures using the fruit fly algorithm. Journal of Tsinghua University (Science and Technology). 2014. Vol. 54, No. 10. P. 1288–1292.
7. Qianchao Wang, Hongcan Xu, Lei Pan, Li Sun Active Disturbance Rejection Control of Boiler Forced Draft System: A Data-Driven Practice. Sustainability. 2020. Vol. 12, No. 10. Art. 4171.
8. Guo H., Li C., Yu H., Huang Y. A novel boiler water level control based on a hybrid optimization algorithm. ISA Transactions. 2018. Vol. 78. P. 189–201.
9. Gao J.-L., Li J., Liu Y., et al. Research on Boiler Water Supply Control System Based on AT89C55 and Fractional Order PID Algorithm. Procedia Computer Science. 2019. Vol. 154. P. 173–180.
10. Kongratana V. Optimization-based PID Controller Design with Gain Scheduling for Drum Boiler Level Control. In: Proceedings of IMECS 2021. 2021. P. 172–177.
11. Devaraj M., et al. Drum boiler system water level control: Drum boiler system water level control: A study of existing hybrid optimization algorithms. e-Prime.

2024. art. 100383, DOI 10.1016/j.prime.2023.100383.

12. Prasanth S., et al. *A hybrid technique to control superheater steam temperature in power plants using multi modeling and predictive sliding mode control*, Vol. 55, art. 102912**,** DOI 10.1016/j.seta.2022.102912.

13. Gao F., Yu Q., Chen H. An Improved Adaptive PID Control Algorithm for Boiler Steam Pressure Based on Improved Genetic Algorithm. IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 47802–47812.

14. Elhosseini M.A., et al. Heat recovery steam generator drum level control using optimized PID. ISA Transactions. 2022. Vol. 122. P. 281–293

15. de Oliveira V., et al. Robust and gain-scheduled PID controller design for a drum boiler. In: IFAC Proceedings Volumes. 2012. Vol. 45, No. 3. P. 331–336.

16. Design of PID Controller for Boiler Drum Level Control. i-manager's Journal on Instrumentation & Control Engineering. 2018. Vol. 6, No. 1. P. 1–8.

17. Control of Boiler Temperature using PID, PD-PI and 2DOF Controllers**,** **автор —** Galal Ali Hassaan**,** Cairo University, Egypt; C 5054–5064.

18. Zhao G., et al. Interval Power Integration-Based Nonlinear Suppression Method for Superheated Steam Temperature Control of a Once-Through Boiler. Energies. 2025. Vol. 18, No. 16. Art. 4242.

19. Nie H. Fuzzy Control of Boiler Superheated Steam Temperature. International Journal of Engineering Science Invention. 2020. Vol. 9, Issue 6, Ser. 1. P. 42–47.

20. Liu Y.J. Adaptive Fuzzy PID Control Applied in Boiler System of Power Plant. Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 599–601. P. 794–799.

21. Петросян А.А. Автоматизована система управління паровим котлом. Науковий вісник (серія технічних наук). 2018. № 4. С. 56–62.

22. Novikov P.V., Bunke A.S. Modeling of control system of temperature mode of direct-flow steam boiler based on two-channel fuzzy controller. Scientific Notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences. 2020. Vol. 31, No. 2(70). P. 132–139.

23. Novikov P., Shtifzon O., Bunke O., Batiuk S. Selecting a method for the

parametric adaptation of PI-controller in the control systems of boiler assemblies at thermal power stations with supercritical parameters. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2022. Vol. 2, No. 2(116). P. 61–68.

24. Vladimir V. Vychuzhanin Setting regulator parameters in a programmable logic integral circuit for automatic control systems of heat exchangers. Applied Aspects of Information Technology. 2020. Vol. 3, No. 1. P. 37–45.

25. Mykhailenko V., Kamienieva A., Stukalov S., Zui O., журнал System Technologies, 2023, Vol. 3, No. 146, P. 10–24, DOI 10.34185/1562-9945-3-146-2023-02