

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Західноукраїнський національний університет
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем

КЛИМІВ Віталій Ярославович

Комп'ютеризована система управління пароутворюючим котлом промислового підприємства / Computerized control system for a steam-generating boiler at an industrial enterprise

спеціальність: 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка
освітньо-професійна програма – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Кваліфікаційна робота

Виконав студент групи АКІТм - 21
В.Я Климів

Науковий керівник
д.т.н., професор Я.М. Николайчук

Кваліфікаційну роботу допущено до захисту:

« ____ » _____ 2025 р.

Завідувач кафедри

_____ А.І.Сегін

ТЕРНОПІЛЬ – 2025

Західноукраїнський національний університет
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем
Освітній ступінь "магістр"
спеціальність: 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка
освітньо-професійна програма – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри СКС

_____ А.І.Сегін
" ____ " _____ 20__ р.

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ
КЛИМІВ Віталій Ярославович

(прізвище, ім'я по-батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи

Комп'ютеризована система управління паротворюючим котлом
промислового підприємства / Computerized control system for a steam-generating
boiler at an industrial enterprise.

керівник роботи _____ д.т.н., професор Я.М.Николайчук
затверджені наказом по університету від 28 листопада 2024 р. № 938

2. Строк подання студентом закінченої кваліфікаційної роботи

01 грудня 2025р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи:

1. Типи та та функціональне призначення котлів.

2. Принцип дії паротворюючих агрегатів.

3. Технологічний процес паротворення.

4. Будова парового котла промислових підприємств.

4. Основні питання, які потрібно розробити

1. Дослідження об'єкта управління та аналіз систем автоматизації.

2. Проектування комп'ютеризованої системи управління паротворюючим
котлом.

3. Дослідження та оптимізація комп'ютеризованої системи управління.

5. Перелік графічного матеріалу у роботі

1. Архітектура комп'ютеризованої системи управління.

2. Структура КСУ промислового ПК.

3. Функціональна схема автоматизації ПК.

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1	Я.М.Николайчук д.т.н., професор, професор кафедри СКС		
2	Я.М.Николайчук д.т.н., професор, професор кафедри СКС		
3	Я.М.Николайчук д.т.н., професор, професор кафедри СКС		

7. Дата видачі завдання 12 грудня 2024р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назви етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Дослідження об'єкта управління та аналіз систем автоматизації	12.2024р. – 02.2025р.	
2	Проектування комп'ютеризованої системи управління пароутворюючим котлом	03.2025р. – 06.2025р.	
3	Дослідження та оптимізація комп'ютеризованої системи управління	07.2025р. – 11.2025р.	

Студент

_____ В.Я. Климів
(підпис)

Керівник роботи

_____ д.т.н., професор Я.М. Николайчук
(підпис)

АНОТАЦІЯ

Климів В.Я. Комп'ютеризована система управління пароутворюючим котлом промислового підприємства. – Рукопис.

Дослідження на здобуття освітнього ступеня «магістр» за спеціальністю спеціальність: 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка», освітньо-професійна програма. – Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, 2025.

Проаналізовано будову та принцип дії пароутворюючих агрегатів. Проведено дослідження системи автоматизації технологічного процесу пароутворення та визначено основні параметри контролю і регулювання. Розроблено архітектуру комп'ютеризованої системи управління пароутворюючим котлом, принципові та функціональні схеми контурів регулювання. Реалізовано та проведено тестування алгоритму керування з прогнозуванням стану технологічного процесу.

ANNOTATION

Klymiv V.Ya. Computerized control system for a steam-generating boiler at an industrial enterprise. - Manuscript.

Doctoral studies for the education level «Master» with the title 174 «Automation, computer-integrated technologies and robotics». – West Ukrainian National University, Ternopil, 2025.

The structure and operating principle of steam-generating units have been analyzed. A study of the automation system of the steam-generation technological process has been conducted, and the main control and regulation parameters have been identified. The architecture of the computerized control system for the steam-generating boiler, as well as the principal and functional schemes of the control loops, have been developed. An algorithm for control with process state prediction has been implemented and tested.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	5
ВСТУП	6
1. ДОСЛІДЖЕННЯ ОБ'ЄКТА УПРАВЛІННЯ ТА АНАЛІЗ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦІЇ	9
1.1 Типи та функціональне призначення котлів.....	9
1.2 Принцип дії пароутворюючих агрегатів.....	12
1.3 Будова парового котла промислових підприємств.....	13
1.4 Аналіз технологічного процесу пароутворення.....	16
2. ПРОЄКТУВАННЯ КОМП'ЮТЕРИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПАРОУТВОРЮЮЧИМ КОТЛОМ.....	20
2.1 Архітектура проєктованої системи.....	20
2.2 Компоненти комп'ютеризованої системи управління.....	22
2.3 Принципова схема автоматизації парового котла.....	24
2.3.1 Контур регулювання тиску.....	26
2.3.2 Контур регулювання температури.....	27
2.3.3 Контур регулювання рівня води в барабані.....	28
2.3.4 Контур регулювання витрати.....	33
2.3.5 Контур регулювання співвідношення «повітря–паливо».....	34
2.3.6 Контур регулювання тиску пари.....	36
3. ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ КОМП'ЮТЕРИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ	38
3.1 Моделювання процесу керування пароутворюючим котлом.....	38
3.2 Оптимізація та оцінка ефективності проєктованої системи.....	42
3.3 Алгоритм керування з врахуванням прогнозу зміни технологічних параметрів.....	45
ВИСНОВКИ.....	49
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	51
ДОДАТОК А Імітаційна модель КСУ пароутворюючим котлом.....	55
ДОДАТОК Б Прогнозування стану котла та предиктивне керування.....	60
ДОДАТОК В Копії публікацій.....	67

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- АРМ - автоматизоване робоче місце;
- ВМ - виконавчий механізм;
- КВП - контрольно–вимірювальний прилад;
- ККД – коефіцієнт корисної дії;
- КСУ - комп'ютеризована система управління;
- ОУ - об'єкт управління;
- ПК - пароутворюючий котел;
- ПЛК - програмований логічний контролер;
- САК - система автоматичного керування;
- САУ - система автоматичного управління;
- ТЗА - технічні засоби автоматизації;
- ТП - технологічний процес.

ВСТУП

Процес пароутворення є одним із найпоширеніших і найважливіших у промислових технологіях, оскільки забезпечує ефективне перетворення теплової енергії згоряння палива на енергію водяної пари. Завдяки своїм термодинамічним властивостям пара має високу теплопровідність і тепломісткість, що робить її універсальним теплоносієм і джерелом енергії для різних технологічних процесів.

Пароутворюючі котли (ПК) мають широке застосування в різних галузях, зокрема промисловості, енергетиці, сільському господарстві, тощо. Вони використовуються для генерації пари та підігріву води в хімічній, харчовій, текстильній і паперовій промисловості, де пара необхідна для сушіння, нагрівання, стерилізації та дезінфекції. В енергетиці пара приводить у рух турбіни генераторів, а в суднобудуванні використовується як компактне джерело енергії для механізмів і систем опалення. Крім того, парові котли застосовуються для опалення промислових приміщень і як джерело енергії для технологічного обладнання.

Стабільність і ефективність технологічного процесу (ТП) пароутворення визначається точністю підтримання основних параметрів, порушення яких призводить до зниження енергоефективності, нестійкої роботи й може стати причиною аварійних ситуацій. Традиційні системи автоматичного керування (САК) з аналоговими регуляторами часто не забезпечують необхідної точності та швидкодії при змінних режимах навантаження. Це зумовлює потребу у впровадженні комп'ютеризованих систем управління (КСУ), які використовують сучасні методи оброблення сигналів, моделювання та оптимізації параметрів регуляторів.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є дослідження та розробка КСУ ПК, що забезпечує стабілізацію основних технологічних параметрів, підвищення енергоефективності та надійності функціонування об'єкта управління (ОУ).

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести дослідження будови та принципу дії пароутворюючих агрегатів;
- провести аналіз структури та технічних засобів автоматизації процесу пароутворення;
- розробити архітектуру КСУ та її компонентів з врахуванням основних параметрів регулювання;
- реалізувати імітаційну модель процесу керування пароутворюючим котлом;
- провести дослідження та виконати оптимізацію проєктованої системи.

Об’єкт дослідження – процес контролю та керування технологічними параметрами парового котла.

Предмет дослідження – комп’ютеризована система управління пароутворюючим котлом промислового підприємства.

Методи досліджень: аналітичні, математичні та імітаційні методи моделювання процесів теплообміну й пароутворення; модель першого порядку з запізненням; синтез і налаштування регуляторів; методи внутрішнього моделювання; методи предиктивного керування.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у поєднанні класичних контурів автоматичного регулювання парового котла з методами комп’ютерного моделювання та оптимізації параметрів регуляторів. Запропоновано розширення функціональних можливостей КСУ за рахунок інтеграції предиктивного контролю, що дозволяє адаптувати регулятор до змін навантаження.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблені рекомендації можуть бути використані при проєктуванні КСУ парових котлів середньої та малої потужності, зокрема у промислових енергетичних установках. Впровадження алгоритмів оптимального та предиктивного керування в існуючі системи автоматизації для підвищення їх точності та

енергоефективності.

Публікації та апробація кваліфікаційної роботи.

1. Дячок Б., Климів В. Комп'ютеризована система контролю маси транспортних засобів.– Збірник матеріалів всеукраїнської науково–практичної конференції «Автоматизація та комп'ютерно–інтегровані технології» (АКІТ–2025), Тернопіль, 2025, с. 5–9.

2. Климів В., Давлетова А. Комп'ютеризована система управління паровим енергетичним агрегатом. Збірник матеріалів науково-практичного симпозиуму «Технології Інтернету речей: системи та рішення» (ТІР:СТ - 2025), Тернопіль, 2025. -с. 59-62.

1. ДОСЛІДЖЕННЯ ОБ'ЄКТА УПРАВЛІННЯ ТА АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦІЇ

1.1 Типи та функціональне призначення котлів

Елементами енерготехнологічного комплексу промислових підприємств, що забезпечують перетворення хімічної енергії палива у теплову енергію водяної пари є ПК [1–5]. Отримана пара використовується як енергетичний або технологічний агент у різних сферах, від хімічного виробництва й металургії до харчової промисловості та систем централізованого теплопостачання. Ефективність роботи ПК безпосередньо впливає на загальну енергоємність виробництва, рівень технологічної безпеки та собівартість продукції підприємства [6–8].

На рисунку 1.1 наведено типи котлів та їх класифікацію за різними критеріями [9–11].

За призначенням ПК поділяють на енергетичні та технологічні. Енергетичні котли застосовуються на теплоелектростанціях і теплоелектроцентралях для вироблення пари, що використовується для приводу парових турбін та генерації електричної енергії. Наприклад, на ТЕС або когенераційних установках працюють високопродуктивні барабанні котли типу БКЗ чи Е–50–3,9–440ГМ, які забезпечують стабільні параметри перегрітої пари для турбінного циклу.

Технологічні котли, у свою чергу, забезпечують тепловою енергією різні виробничі процеси – сушіння, підігрів, стерилізацію, випарювання, нагрівання реагентів тощо. Такі установки поширені на підприємствах харчової, хімічної, фармацевтичної, текстильної промисловості, а також у комунальному господарстві. Наприклад, ПК серії ДКВР широко використовуються на цукрових заводах і харчових комбінатах для технологічного обігріву обладнання.

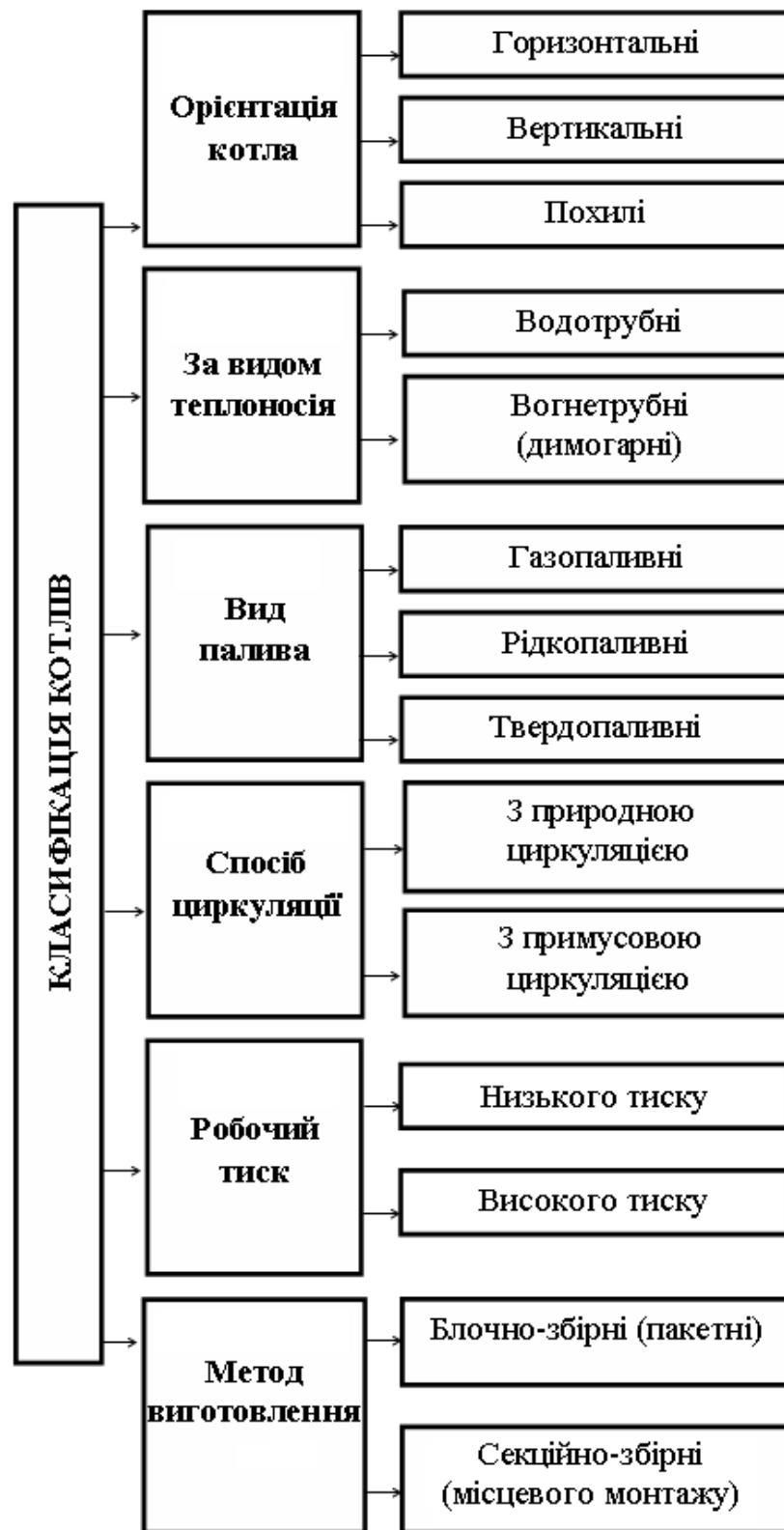


Рисунок 1.1 – Класифікація пароутворюючих котлів

Залежно від способу циркуляції теплоносія котли бувають з природною, примусовою або комбінованою циркуляцією. У котлах з природною циркуляцією рух води і пари відбувається під дією різниці

густини, що характерно для середньо– і низькотискових барабанних котлів, які застосовуються в системах централізованого теплопостачання. Котли з примусовою циркуляцією, у яких рух робочого середовища забезпечується насосами, використовуються переважно на великих енергетичних об'єктах або в парогенераторах із високим тиском, де потрібна інтенсивна теплопередача. Комбінована циркуляція поєднує обидва підходи, що дозволяє забезпечити стабільність гідродинамічних процесів у змінних режимах роботи.

За типом конструкції розрізняють барабанні та прямоточні котли. Барабанні котли мають резервуар (барабан), у якому здійснюється відокремлення пари від води; вони відзначаються високою надійністю й простотою обслуговування, тому широко застосовуються на промислових підприємствах та в комунальних котельнях. Прямоточні котли не мають барабана – вода проходить через нагрівальні поверхні лише один раз, перетворюючись на пару. Такий тип котлів використовується на об'єктах з великим тиском і температурою пари, наприклад на електростанціях високої потужності, де важлива компактність і швидкодія системи.

Залежно від виду палива парові котли поділяються на газомазутні, твердопаливні та електрокотли. Газомазутні котли отримали найбільше поширення завдяки зручності експлуатації, стабільності горіння і можливості автоматизації процесів подачі палива та регулювання полум'я. Твердопаливні котли (вугілля, торф, деревна біомаса) часто застосовуються у промислових котельнях з доступом до місцевих видів палива або як резервні джерела теплової енергії. Електрокотли, хоча і мають меншу теплову потужність, характеризуються екологічною чистотою та високою точністю регулювання температури, тому використовуються у лабораторних установках, фармацевтичних виробництвах та допоміжних теплових системах.

Проведена класифікація котлів відображає їх функціональне призначення, конструктивні особливості, вид енергоносія та умови

експлуатації. Різноманітність типів котлів дозволяє забезпечити ефективне теплопостачання як у великих енергетичних комплексах, так і в окремих виробничих процесах промислових підприємств.

1.2 Принцип дії пароутворюючих агрегатів

Принцип дії ПК ґрунтується на процесі теплообміну між гарячими продуктами згоряння палива та водою, що циркулює у трубах поверхонь нагрівання. У результаті цього теплообміну хімічна енергія палива перетворюється на теплову, а потім у енергію водяної пари, яка використовується у технологічних або енергетичних цілях.

Паливо, що надходить у топку котла, змішується з повітрям у певних пропорціях, необхідних для повного згоряння. Утворені при цьому продукти згоряння мають високу температуру та рухаються крізь камеру згоряння (furnace) до поверхонь теплообміну (heat transfer surfaces), де передають свою теплову енергію воді, яка циркулює у трубах. Під впливом тепла вода поступово нагрівається, частково випаровується, утворюючи пароводяну суміш, що надходить у пароводяну систему (steam–water system). Тут відбувається поділ фракцій, утворена пара відводиться споживачеві, а залишки води повертаються у контур циркуляції.

Процес згоряння супроводжується утворенням димових газів (flue gas), які після віддачі тепла видаляються через димохід, та золи (ash), що видаляється з нижньої частини топки. Частина води, у якій накопичуються солі та домішки, періодично видаляється з системи у вигляді зливу (blowdown) для підтримання стабільних параметрів якості води.

На рисунку 1.2 представлено схему принципу дії ПК, яка демонструє основні етапи перетворення енергії:

- надходження води, палива та повітря,
- процеси змішування та згоряння,
- передачу тепла до води у пароводяній системі,

- утворення пари, а також відведення димових газів і золи.

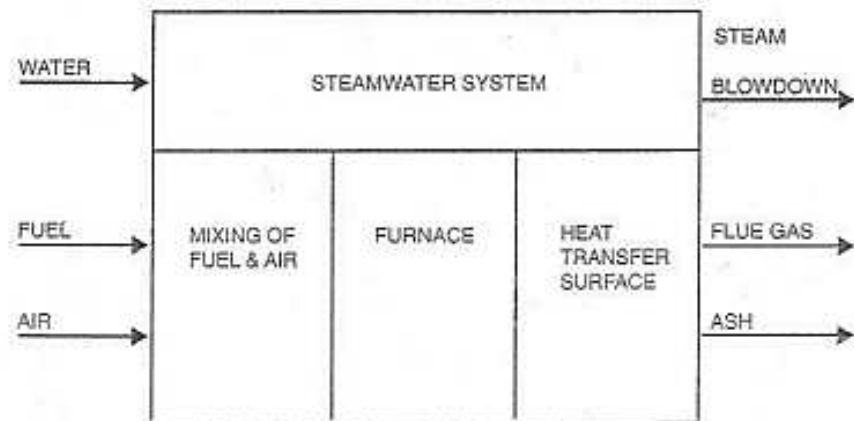


Рисунок 1.2 – Принцип дії ПК

Теплообмін у котельній установці відбувається з використанням одного з трьох основних способів:

- конвекцією – передачею тепла за рахунок руху потоків газів і рідини;
- теплопровідністю – безпосереднім переносом енергії між твердими стінками труб і теплоносієм;
- випромінюванням – передачею енергії у вигляді теплового випромінювання від полум'я до поверхонь нагріву.

Завдяки поєднанню цих процесів забезпечується максимальне використання теплової енергії палива та отримання пари з необхідними параметрами тиску і температури. Такий принцип роботи лежить в основі більшості промислових ПК незалежно від їх конструктивного типу.

1.3 Будова парового котла промислових підприємств

Паровий котел є складним теплотехнічним агрегатом, призначеним для перетворення хімічної енергії палива на теплову енергію водяної пари. Його будова забезпечує безперервний процес спалювання палива, нагрівання води та відведення утвореної пари до споживачів (рисунок 1.3). Конструкція ПК

визначається його типом, потужністю, видом палива та параметрами пари, однак у загальному випадку всі ПК мають подібну функціональну структуру, що включає основні та допоміжні елементи [10-12].



Рисунок 1.3 – Будова ПК

Камера згоряння (8) – це простір, у якому здійснюється процес спалювання палива. Вона обладнана пальниками (4) або колосниковими ґратами, залежно від виду палива. Топка оточена екранними трубами, що безпосередньо сприймають теплове випромінювання полум'я та передають тепло воді. У водотрубних котлах топка виконує функцію первинної зони нагріву, де відбувається інтенсивне утворення пароводяної суміші.

Барабан (6) – ємність, у якій відбувається розподіл і сепарація пароводяної суміші. З барабана пара надходить у пароперегрівник, а вода повертається у циркуляційний контур. У прямоточних котлах барабан відсутній, а процес випаровування відбувається безперервно вздовж трубного тракту.

Поверхні нагріву (7) – сукупність елементів, через які відбувається передача тепла від продуктів згоряння до води. Вони поділяються на:

- екранні поверхні – сприймають теплове випромінювання від

полум'я;

- конвективні поверхні – передають тепло димовим газам у пізніших зонах котла;

- пароперегрівники – підвищують температуру насиченої пари до необхідних параметрів;

- економайзери – використовують залишкове тепло димових газів для попереднього підігріву живильної води;

- повітропідігрівники – забезпечують нагрівання повітря, що подається до пальників, для покращення умов горіння та підвищення ККД котла.

Живильна система (10) складається з живильного насоса, деаератора та арматури для подачі води в котел. Її призначення – підтримання сталого рівня води та видалення з неї розчинених газів (кисню, вуглекислоти), які спричиняють корозію.

Димогарна система (9) включає газоходи, димососи та димову трубу. Вона забезпечує відведення продуктів згоряння після передачі тепла поверхням нагріву. У сучасних ПК до складу цієї системи можуть входити установки очищення газів (циклон, фільтр, скруббер).

Система регулювання та безпеки (1 – запобіжні й манометр, 2 – панель керування, 3 – контролер) є комплексом контрольно-вимірювальних приладів і автоматичних регуляторів, що підтримують параметри пари (тиск, температура, рівень води) у заданих межах. До неї входять датчики тиску, рівня, витрати, температури, а також запобіжні клапани, що гарантують безпечну роботу котла при підвищенні тиску. Паровідвідна арматура (5) – вузол відведення пари з котла та/або група арматури на паровому колекторі (запірні, регулювальні, зворотні клапани, сальникові засувки), що забезпечує підключення споживачів, регулювання витрати пари й безпечне скидання надлишкового тиску через запобіжні пристрої.

До допоміжного обладнання відносяться деаератор, бункери та паливоподаючі механізми, золовидалювальні системи, конденсатозбірники і

теплообмінники для утилізації вторинного тепла. Їх призначення – забезпечити безперервність, ефективність та екологічну безпечність процесу пароутворення.

1.4 Аналіз технологічного процесу пароутворення

ТП пароутворення в промисловому ПК є складною енергетичною системою, що поєднує хімічні, теплотехнічні та гідродинамічні процеси [12–15]. Ефективне функціонування котла залежить від узгодженості цих процесів і якості роботи системи автоматизації, які забезпечують сталі параметри пари, економію палива та надійну експлуатацію установки.

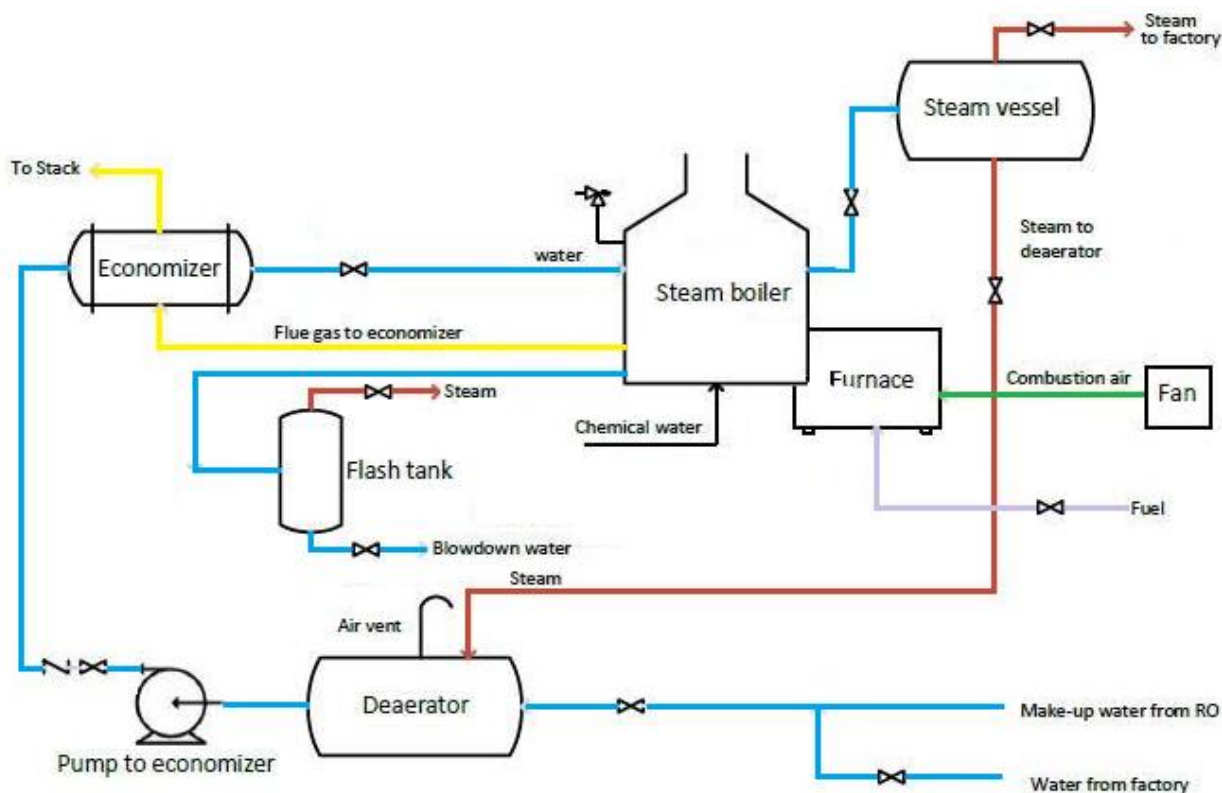


Рисунок 1.4 – Схема ТП генерації пари

ТП включає ряд етапів, кожен з яких характеризується певними термодинамічними параметрами, які потребують постійного контролю для забезпечення ефективності та безпеки роботи котельної установки, зокрема:

- процес горіння палива;

- процес теплообміну;
- процес утворення та перегріву пари;
- процес конденсації;
- контроль технологічних параметрів.

Процес горіння є основним джерелом теплової енергії в ПК. Паливо (газ, мазут, вугілля або біомаса) змішується з повітрям у певному співвідношенні, необхідному для повного згорання. У топковій камері відбувається хімічна реакція окиснення вуглецю, водню та сірки, під час якої виділяється теплота. Для стабільного горіння важливим є правильне дозування повітря та рівномірний розподіл полум'я у топці. Надлишок повітря призводить до охолодження продуктів згорання та зниження температури полум'я, а його нестача – до неповного згорання палива, що зменшує ККД і підвищує концентрацію шкідливих домішок (СО, сажа).

Для забезпечення оптимального процесу горіння використовуються датчики витрати повітря та палива, а також регулятори співвідношення «паливо–повітря», що підтримують необхідний коефіцієнт надлишку повітря.

Тепло, що виділяється під час горіння, передається воді через поверхні нагріву котла. Основними видами теплообміну є:

- випромінювання, що забезпечує передачу тепла від полум'я до екранних труб;
- конвекція, що діє в газоходах і теплообмінниках, де димові гази омивають труби з водою;
- теплопровідність, яка реалізується через металеві стінки труб між зонами високої і низької температури.

Рівномірність процесу теплообміну забезпечується стабільним рухом продуктів згорання і води. Надмірне забруднення поверхонь нагріву сажею чи накипом погіршує теплопередачу, що знижує ефективність котла та може призвести до локального перегріву металу.

Після надходження в зону нагріву вода поступово перетворюється на

пароводяну суміш, у якій відбувається відділення пари від рідини. Водяна пара, що утворилася, має певний ступінь вологості, тому для підвищення її енергетичної цінності застосовується перегрів. У пароперегрівнику пара нагрівається димовими газами до заданої температури, завдяки чому знижується її вологовміст і підвищується теплота ентальпії. Перегріта пара використовується для приводу турбін або в технологічних установках, де потрібна висока температура теплоносія.

Після виконання технологічних функцій пара віддає теплоту у теплообмінниках, турбінах або нагрівальних системах, перетворюючись на конденсат. Конденсація супроводжується значним виділенням прихованої теплоти пароутворення, що може бути використана повторно в системі рекуперації тепла. Конденсат збирається у збірниках конденсату і повертається через деаератор у живильну систему котла. Це дозволяє зменшити витрати хімічно очищеної води та підвищити загальний ККД котельної установки до 90–93 %.

Ефективність, стабільність та безпечність роботи ПК забезпечується постійним контролем всіх основних параметрів технічними засобами автоматизації (ТЗА) ТП. До контрольованих параметрів належать:

- температура (води, пари, димових газів) – визначає якість теплообміну та ступінь перегріву пари;
- тиск пари у барабані та паропроводі – характеризує навантаження на котел та використовується для керування режимом спалювання і подачею води;
- рівень води у барабані або живильному баку – є критичним показником безпеки, його зниження може призвести до перегріву труб і пошкодження обладнання;
- витрата палива, повітря, живильної води та пари – визначає баланс енергії й забезпечує підтримання заданих параметрів роботи.

Відхилення цих параметрів від нормативних значень впливають на ефективність та безпеку експлуатації ПК. Підвищення температури перегріву

може спричинити термічну деформацію металу, тоді як зниження температури пари зменшує ККД теплового циклу. Зниження рівня води у барабані є однією з найбільш небезпечних аварійних ситуацій, яка може призвести до прогорання труб і вибуху котла. Нестабільність тиску викликає коливання режиму горіння, що знижує якість пари та збільшує витрату палива. Для уникнення таких ситуацій використовуються автоматичні регулятори, системи сигналізації та аварійного блокування. Система збирає дані з датчиків температури, тиску, рівня та витрати, обробляє їх у реальному часі та формує сигнали для виконавчих механізмів – пальників, клапанів, насосів.

Оптимальне підтримання параметрів досягається завдяки впровадженню КСУ ТП, які реалізують алгоритми стабілізації тиску, температури, рівня води та витратних показників у замкнених контурах регулювання.

2. ПРОЄКТУВАННЯ КОМП'ЮТЕРИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПАРОУТВОРЮЮЧИМ КОТЛОМ

2.1 Архітектура проєктованої системи

КСУ ПК є складним багатоконтурним комплексом, що забезпечує підтримання оптимальних параметрів пароутворення та їх співвідношення у межах заданих значень. Основна мета побудови системи полягає у підвищенні енергоефективності, забезпеченні стабільної роботи обладнання та запобіганні аварійним режимам. Архітектура КСУ ТП ПУ промислового підприємства включає три функціональні рівні (рисунок 2.1).

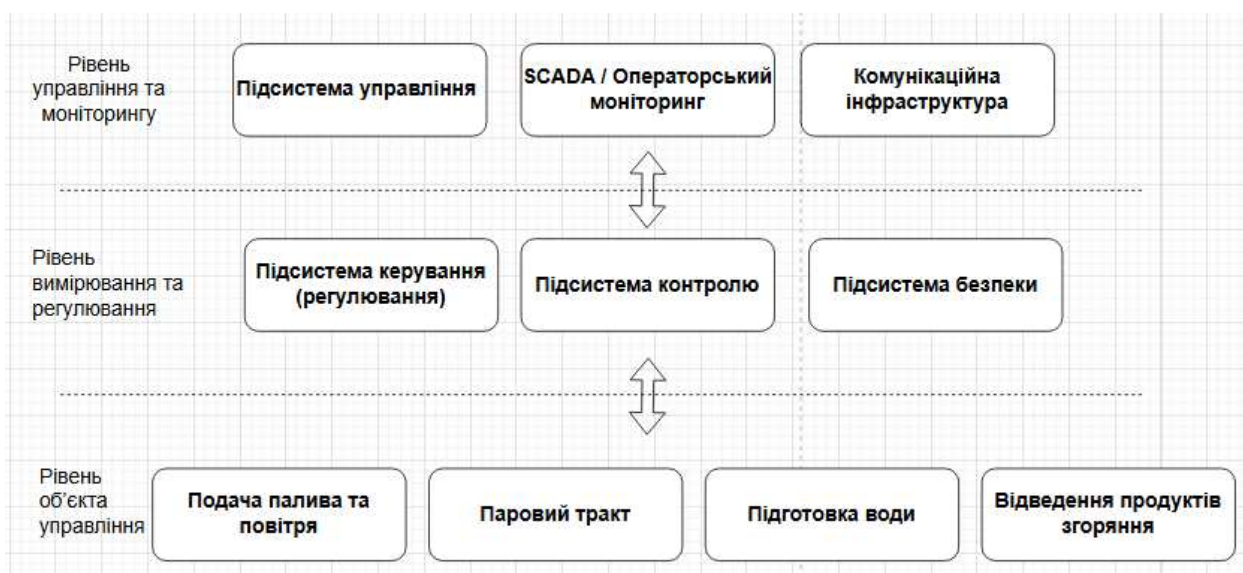


Рисунок 2.1 – Архітектура КСУ

Рівень об'єкта управління (ОУ), на якому розташоване технологічне обладнання, яке безпосередньо бере участь у процесі пароутворення, зокрема топка, барабан, економайзер, пароперегрівник, живильна система, димогарні канали тощо. Рівень вимірювання та регулювання забезпечує збір, перетворення та регулювання технологічних параметрів, підтримуючи їх у заданих межах. Він включає контрольно–вимірювальні прилади (КВП) тиску, температури, рівня, витрати і виконавчі механізми (ВМ) – пальники, насоси, клапани, регулятори подачі повітря. Рівень комп'ютерного управління та

моніторингу є інтелектуальним ядром системи автоматизації, де здійснюється централізоване управління, візуалізація процесу і передача даних, що включає промисловий контролер (ПЛК), модулі введення/виведення, операторська панель (АРМ) або станція SCADA для візуалізації процесу та архівування даних.

Функціональна структура КСУ ПК передбачає взаємодію між рівнями та підсистемами.

До рівня ОУ підсистеми, що реалізують фізичні процеси теплообміну, згоряння, подачі води й палива. Підсистема подачі палива та повітря підтримує оптимальне співвідношення компонентів горіння. Вона включає пальники, вентилятори, димососи, шибери; забезпечує подачу необхідної кількості палива і повітря у топку для горіння. Підсистема підготовки води складається з деаератора, фільтрів, живильних насосів, арматури подачі води і забезпечує очищення, деаерацію та подачу живильної води з необхідними параметрами. Підсистема парового тракту складається з барабана, пароперегрівника, економайзера та трубопроводів, де утворюється і передається пара. Підсистема відведення продуктів згоряння контролює тягу, температуру та склад димових газів. До її складу відносяться газоходи, димова труба, системи очищення.

Рівень ОУ є фізичною основою системи, на якій формуються вхідні параметри та реалізуються керуючі впливи. Тут відбувається реальний процес пароутворення, а підсистеми виконують фізичні дії.

Рівень вимірювання та регулювання забезпечує збір, перетворення та регулювання технологічних параметрів, підтримуючи їх у заданих межах. До нього належать підсистеми, що реалізують замкнені контури автоматичного регулювання. Підсистема контролю включає КВП і забезпечує безперервне збирання інформації про стан технологічних параметрів. Підсистема керування складається з локальних регуляторів (PID, електронних або пневматичних) та ВМ і реалізує алгоритми регулювання. Підсистемою безпеки здійснюється контроль граничних параметрів та формування

сигналів аварійного відключення. Ця підсистема включає запобіжні клапани, реле тиску, аварійні вимикачі та інші пристрої для автоматичного захисту.

На цьому рівні здійснюється первинний збір даних і реалізація алгоритмів стабілізації основних змінних, а також відбувається автоматичне регулювання контурів тиску, рівня, температури, співвідношення «паливо–повітря».

До рівня управління та моніторингу належать підсистеми операторського моніторингу (ПЛК, SCADA), що відповідають за візуалізацію процесу, сигналізацію, архівування даних та дистанційне керування; ПЛК, який приймає сигнали з рівня регулювання, виконує програмні алгоритми керування, координує взаємодію між підсистемами та комунікаційне обладнання.

Даний рівень забезпечує централізоване управління, координацію дій підсистем КСУ та взаємодію з оператором.

2.2 Компоненти комп'ютеризованої системи управління

На рисунку 2.2 наведено основні елементи КСУ промисловим ПК, що входять до складу контурів автоматизації. Компоненти системи включають:

1. КВП тиску [16] призначений для контролю та регулювання тиску води у контурі живлення ПК. Він забезпечує формування електричного сигналу, який надходить до регулятора ПЛК для реалізації алгоритму автоматичного керування. Діапазон вимірювання приладу становить 2–12 бар, ступінь захисту – IP30. Прилад застосовується у підсистемах безпеки та регулювання, забезпечуючи стабільність тиску й запобігаючи аварійним ситуаціям..

2. Запобіжний клапан [17] виконує функцію аварійного захисту котельної установки, автоматично скидаючи пару при перевищенні встановленого тиску. Клапан розрахований на тиск спрацювання від 0,1 до 40 бар і робочу температуру середовища від –270 до +450 °С. Встановлюється у

верхній частині барабана котла для запобігання руйнуванню обладнання.

3. Пальник [18] є автоматизованим пристроєм для подачі палива, змішування його з повітрям і регулювання полум'я. Прилад виготовлено за стандартом EN 267 і використовується у промислових парових та водогрійних котлах. Пальник забезпечує стабільне згоряння, низький рівень шуму та високу енергоефективність, входить до складу підсистеми подачі палива та повітря.

4. Вібростійкий манометр високої точності [19] застосовується для постійного вимірювання тиску пари та контролю стабільності роботи котла. Корпус наповнений гліцерином, що зменшує вплив вібрацій, а діапазон вимірювання сягає 6 бар. Завдяки класу точності 2,5 і ступеню захисту IP65, манометр забезпечує надійність показів у складних промислових умовах

5. Рівнемір [20] із оглядовим склом [20] призначений для контролю рівня води у барабані котла. Прилад дозволяє оператору візуально спостерігати за рівнем робочого середовища, витримує тиск до 16 бар і температуру до 250 °С. Рівнемір устанавлюється у контурі живлення і є частиною підсистеми контролю рівня води.

6. Живильний насос [21] забезпечує подачу води до котла під необхідним тиском і підтримання встановленого рівня у барабані. Насос має продуктивність 4 м³/год, напір 78 м вод. ст. та потужність 1,1 кВт. Виконаний із нержавіючої сталі, він призначений для роботи в умовах підвищеної температури й тиску та входить до підсистеми підготовки води.

7. Панель оператора [22] використовується для візуалізації параметрів технологічного процесу, керування виконавчими механізмами та архівування даних. Сенсорна панель має 7-дюймовий TFT-дисплей і підтримує обмін даними через інтерфейс Profinet із контролером ПЛК. Вона є складовою підсистеми SCADA/моніторингу, забезпечуючи інтерфейс взаємодії оператора із системою автоматизації.

Розташування цих елементів у структурі КСУ забезпечує реалізацію основних контурів регулювання (рівень, тиск, температура) та функцій

захисту й аварійного відключення.

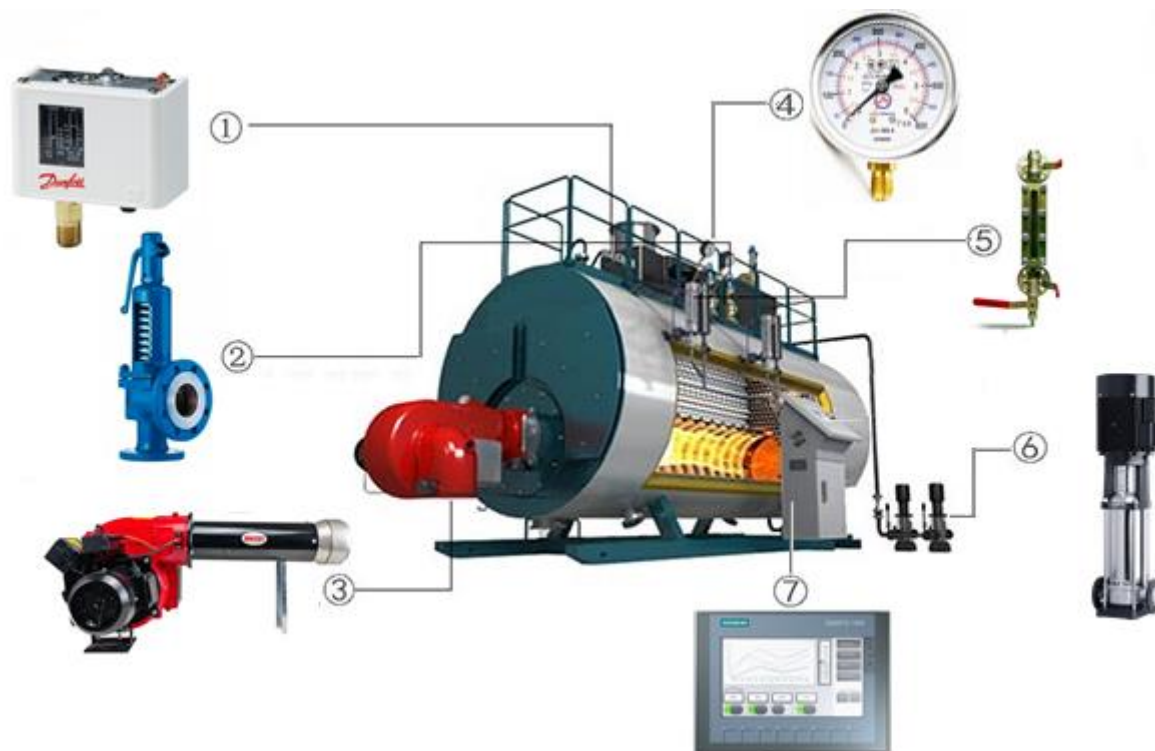


Рисунок 2.2 – Структура КСУ промислового ПК

Система поєднує первинні КВП, виконавчі та керуючі компоненти, елементи безпеки та засоби збору й обробки даних в єдину автоматизовану структуру, що гарантує стабільність та безпечність процесу пароутворення.

2.3 Принципова схема автоматизації парового котла

Принципова схема автоматизації визначає структуру та взаємодію окремих контурів регулювання, що забезпечують стабільну, енергоефективну та безпечну роботу ПК. На відміну від структурної схеми, яка відображає взаємозв'язок підсистем, принципова схема деталізує розташування контрольно-вимірювальних приладів, регуляторів, виконавчих механізмів і зв'язки між ними.

Основна мета побудови принципової схеми полягає у забезпеченні автоматичного контролю технологічних параметрів із мінімальним втручанням оператора. Реалізація замкнених контурів регулювання дозволяє

підтримувати необхідні параметри пароутворення в динамічних режимах роботи, компенсуючи зовнішні збурення, зумовлені зміною навантаження чи характеристик палива [23–26].

КСУ ПК включає кілька взаємопов'язаних контурів, кожен із яких виконує окрему функцію у загальному процесі керування:

- контур регулювання тиску пари;
- контур регулювання температури;
- контур регулювання рівня води у барабані;
- контур регулювання витрати палива, повітря та живильної води;
- контур регулювання співвідношення «повітря–паливо»;
- допоміжні контури сигналізації та захисту.

Усі контури об'єднуються центральним контролером ПЛК, який виконує алгоритми керування та взаємодіє з операторською станцією SCADA. На основі сигналів від датчиків ПЛК формує керуючі дії на виконавчі механізми, забезпечуючи замкнуту систему автоматичного управління.

На рисунку 2.3 наведено узагальнену функціональну схему автоматизації ПК, де КВП вимірює витрату робочого середовища, АЦП перетворює отриманий сигнал у аналоговий, після дані надходять до ПЛК, який порівнює їх із заданим значенням параметру (ЗП) і формує керуючий вплив. Через ЦАП сигнал знову переводиться в аналогову форму та подається до ВМ, який змінює витрату робочого середовища, забезпечуючи підтримання параметра на заданому рівні.

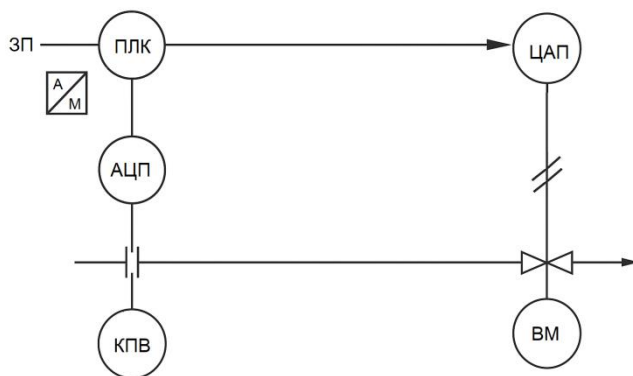


Рисунок 2.3 - Узагальнена функціональна схема автоматизації ПК

Наведена схема ілюструє принцип побудови замкнених контурів регулювання технологічних параметрів. Схема демонструє взаємодію основних елементів автоматичної системи, .

Такий принцип застосовується для реалізації контурів регулювання технологічних параметрів , оскільки вони функціонують за єдиною структурною логікою - вимірювання поточного значення параметра, порівняння з заданим, формування коригуючого сигналу контролером і подача його на виконавчий орган, який впливає на ТП з метою стабілізації режиму роботи ПК.

2.3.1 Контур регулювання тиску

Контур регулювання тиску забезпечує підтримку сталого тиску пари в барабані або в лінії подачі пари незалежно від зміни навантаження споживачів (рисунок 2.4). Цей контур є одним із ключових елементів системи автоматизації, оскільки стабільність тиску визначає безпеку та ефективність роботи котла.

Принцип дії базується на безперервному вимірюванні поточного значення тиску за допомогою датчика, який перетворює механічний тиск у пропорційний електричний сигнал. Отриманий сигнал надходить до регулятора тиску, що порівнює його із заданим значенням. Залежно від розміру відхилення заданого рівня та поточного, регулятор формує керуючий сигнал, який надходить на ВМ.

Зміна ступеня відкриття клапана впливає на витрату робочого середовища (пари або води) у технологічній лінії, внаслідок чого тиск у системі повертається до номінального рівня. Таким чином реалізується замкнена система автоматичного регулювання (САР), у якій ПЛК або локальний контролер забезпечує стабільну роботу процесу за допомогою зворотного зв'язку.

Основні елементи контуру:

- передавача тиску (ДТс) – КВП тиску, встановлений у

технологічній лінії для перетворення тиску в електричний сигнал;

- регулятор (РТс) – ПЛК, який порівнює поточне значення із заданим і формує керуючу дію;
- регулюючий клапан (РК) – виконавчий орган, що регулює витрату середовища для підтримання необхідного тиску;
- СП – пневматична або електропневматична система подачі керуючого сигналу (повітря) до клапана.

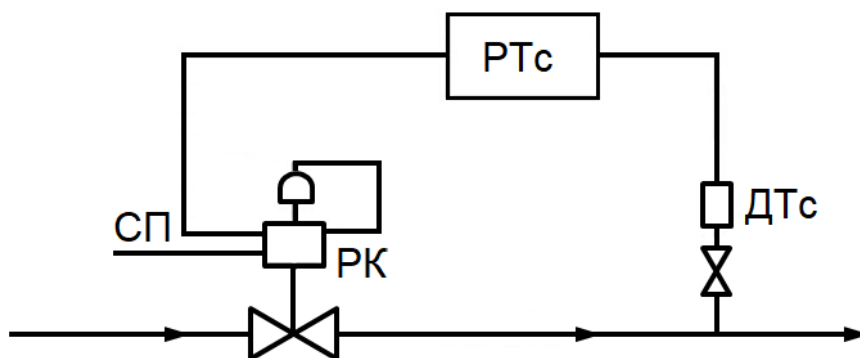


Рисунок 2.4 – Контур регулювання тиску

У проєктованій КСУ ПК даний контур входить до складу підсистеми регулювання, а його сигнали передаються до центрального ПЛК, який здійснює координацію з іншими контурами.

2.3.2 Контур регулювання температури

Стабільність температури є важливою умовою енергоефективності процесу пароутворення та безпечної експлуатації обладнання. Для підтримки сталого температурного режиму пари чи теплоносія в системі ПК призначений контур регулювання температури (рисунок 2.5).

Регулювання температури відбувається за допомогою температурного КВП, який вимірює поточне значення температури робочого середовища, та перетворювача температури, який передає аналоговий сигнал до регулятора температури, який порівнює поточне значення температури із заданою уставкою і формує сигнал керування на ВМ - регулюючий клапан, який змінює витрату пари або іншого теплоносія.

Таким чином, у системі реалізується замкнене автоматичне регулювання температури, де будь-які зміни теплового навантаження компенсуються зміною подачі пари або води в нагрівальний контур.

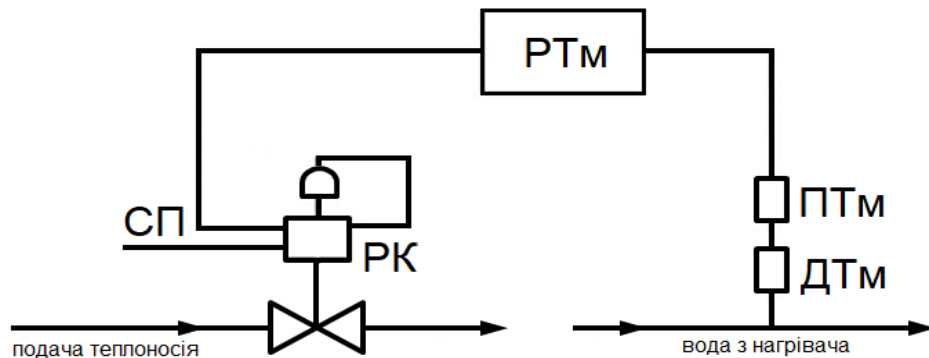


Рисунок 2.5 – Контур автоматичного регулювання температури

Основні елементи контуру:

- ДТМ – первинний термоперетворювач (термоопір або термопара), що вимірює фактичну температуру середовища;
- ПТМ – перетворювач, який формує уніфікований електричний сигнал (4–20 мА) для передавання на контролер;
- РТМ – регулятор, який виконує порівняння, аналіз і керування клапаном;
- РК – виконавчий механізм, що регулює подачу пари до теплообмінника;
- СП – система подачі пневмосигналу для роботи клапана.

У проєктованій КСУ ПК цей контур входить до підсистеми регулювання температури, яка взаємодіє з контуром тиску та співвідношення «повітря–паливо» через контролер ПЛК. Це дозволяє забезпечити оптимальну теплову ефективність і стабільність параметрів пари при зміні навантаження.

2.3.3 Контур регулювання рівня води в барабані

Від стабільності рівня води в барабані ПК залежить безпечна та ефективна робота установки. Недостатній рівень може призвести до

перегрівання труб пароутворювальної системи, що створює ризик пошкодження обладнання, а надмірний рівень знижує якість пари та підвищує ризик гідроударів у паропроводі.

Регулювання рівня здійснюється за допомогою КВА рівня, який вимірює висоту стовпа води в барабані або резервуарі, та регулятора рівня, що порівнює поточне значення з установленим. У разі відхилення виміряного значення від заданого рівня регулятор формує сигнал на ВМ, який змінює витрату живильної води, що подається в котел. Таким чином формується замкнене коло автоматичного регулювання, яке підтримує стабільний рівень у динамічних умовах.

Основні елементи контуру (рисунок 2.6):

- ДР – датчик рівня, що перетворює зміну висоти водяного стовпа в електричний сигнал;
- РР – регулятор рівня, який формує команду на зміну подачі живильної води;
- РК – ВМ, що регулює витрату води в барабан або резервуар;
- СП – система подачі пневмосигналу для роботи клапана.

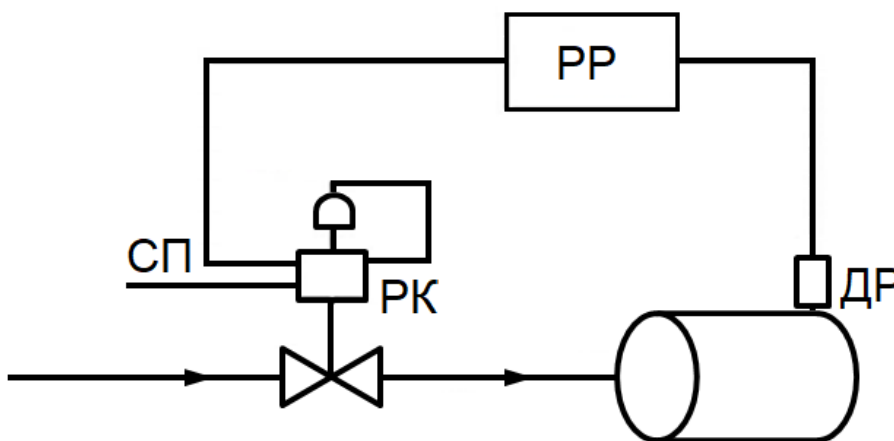


Рисунок 2.6 – Контур регулювання рівня води

У базовому варіанті застосовується одноелементна схема регулювання, коли управління подачею живильної води здійснюється лише за показами одного сигналу з датчика рівня (рисунок 2.7).

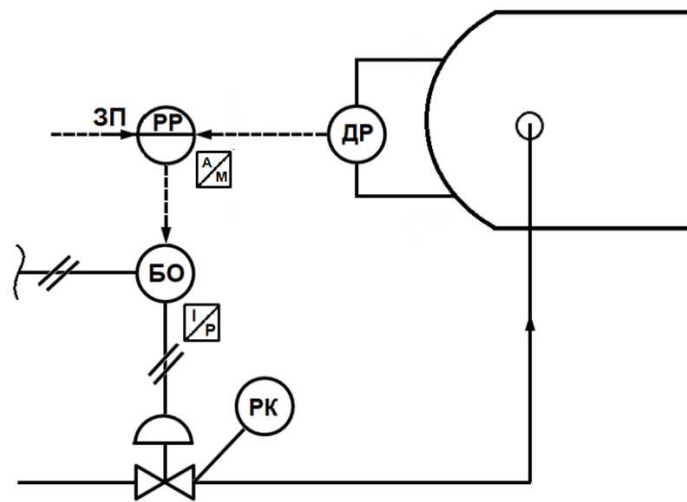


Рисунок 2.7 - Одноелементна система регулювання рівня

Для підвищення точності при змінних навантаженнях застосовують двоелементну система регулювання рівня де реалізований додатковий контроль витрати пари для компенсації змін навантаження (рисунок 2.8).

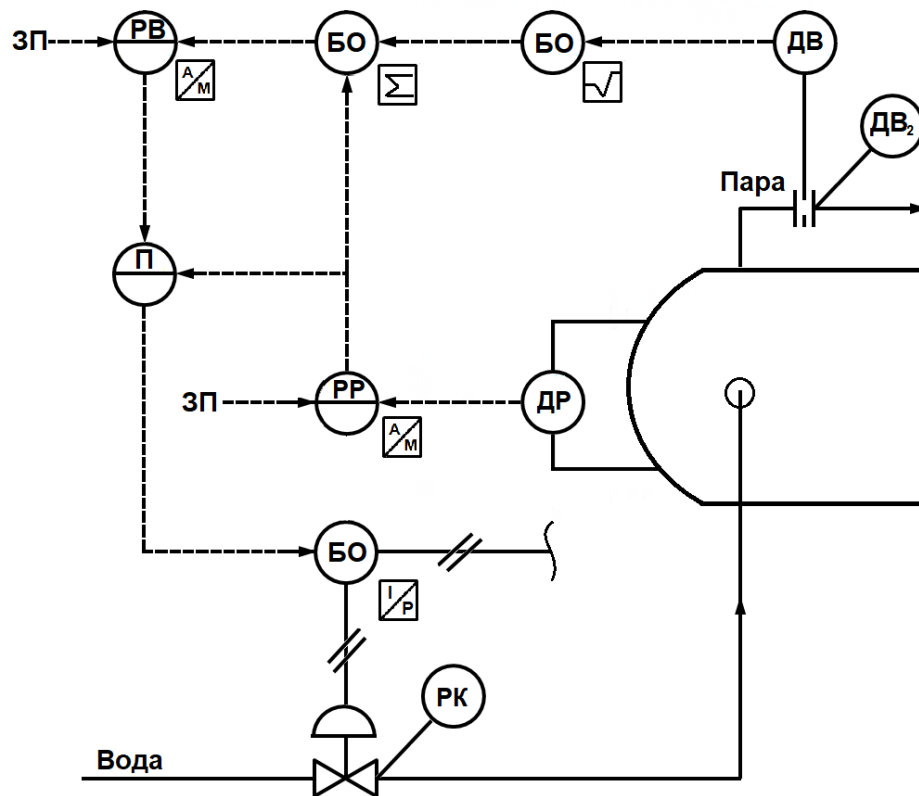


Рисунок 2.8– Двоелементна система регулювання рівня

КВП рівня (ДР) передає фактичне значення рівня води в барабані котла. КВП витрати пари (ДВ) вимірює кількість пари, що виходить із

барабана (тобто фактичне навантаження котла), сигнал від якого поступає на регулятор витрати (РВ). Формується сигнал, пропорційний зміні навантаження, який через блок обчислень (БО) і ручний коректор (П) передається як заданий параметр (ЗП) у регулятор рівня (РР). Відбувається порівняння виміряноо рівня з ЗП і видає керуючий сигнал, який через підсилювач і перетворювач сигналу у пневматичний поступає на регулюючий клапан (РК) і змінює подачу живильної води до барабана котла.

Якщо зростає споживання пари ДВ передає сигнал РВ для збільшення подачі води, ще до того, як рівень реально почне знижуватися. Якщо споживання пари зменшується то РВ формує сигнал для зменшення подачі води. Таким чином система запобігає інерційному коливанню рівня, типового для одноелементного регулювання.

У сучасних ПК використовують триелементну схему регулювання рівня води у паровому барабані котла(рисунок 2.9). Ця схема враховує сигнали з ВКП трьох змінних параметрів:

- рівень води у барабані,
- витрату пари,
- витрату живильної води.

Відбувається вимірювання параметрів за допомогою КВП, які забезпечують отримання відповідних сигналів: рівня води в паровому барабані, витрати пари та витрати живильної води. Сигнал рівня формується датчиком рівня (ДР) і надходить до регулятора (РР), який порівнює поточне значення з уставкою ЗП та визначає відхилення. Дані з обох витратомірів (ДВ), пари та води, надходять до контролера витрати (РВ), який виконує балансування між кількістю пари, що виробляється, та об'ємом води, що подається. Отримані сигнали з регуляторів РР та РВ об'єднуються у блоці підсумовування БО, який формує узагальнений сигнал керування для регулювання подачі живильної води.

Сформований керуючий сигнал через перетворювач I/P подається на регулюючий клапан (РК), що змінює витрату води, яка надходить у барабан

котла. Таким чином, коли збільшується навантаження котла (зростає витрата пари), регулятор РВ оперативно підвищує подачу живильної води. Якщо навантаження знижується, система відповідно зменшує витрату води, щоб запобігти переповненню барабана. Контролер РР забезпечує довгострокову стабільність рівня, коригуючи повільні зміни у процесі. Завдяки такій взаємодії контурів система реагує як на швидкі зміни витрати пари, так і на поступові зміни рівня води.

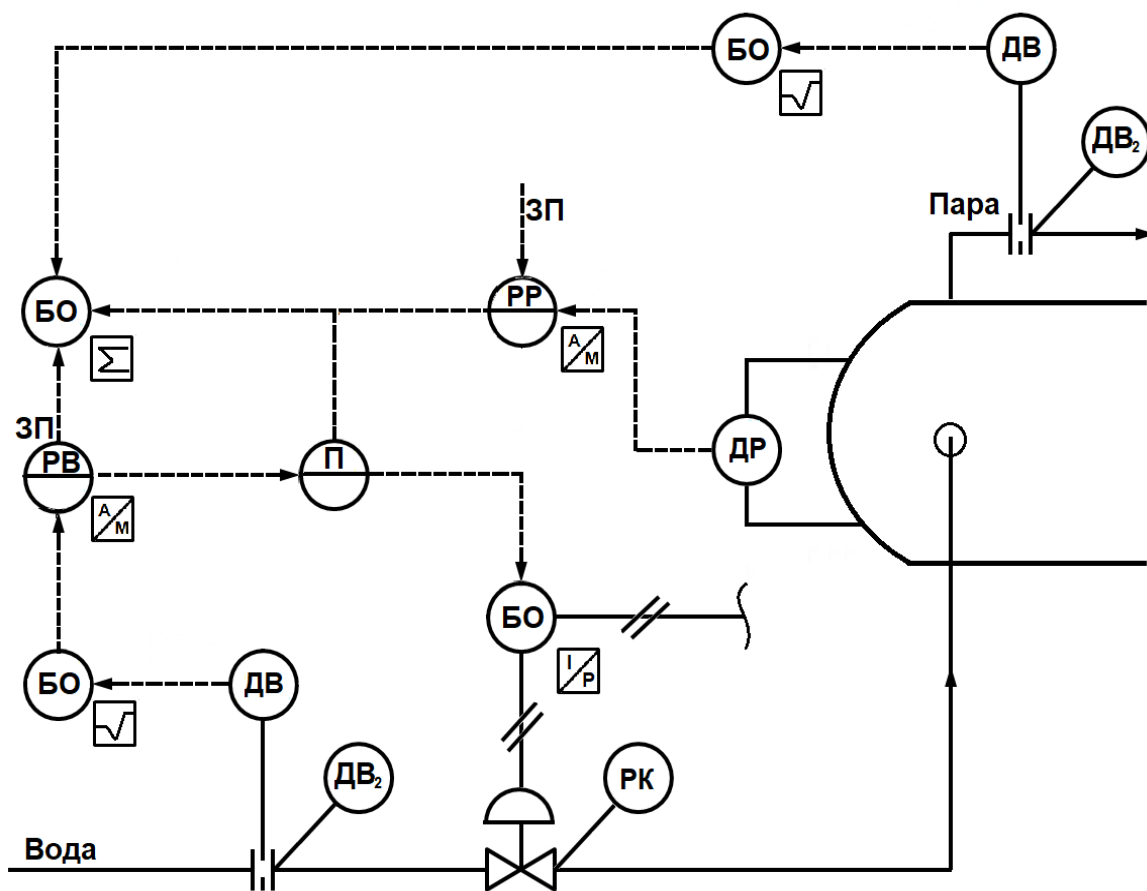


Рисунок 2.9 – Триелементна система регулювання рівня

Така система регулювання забезпечує високоточне підтримання рівня води у барабані ПК, компенсуючи збурення, спричинені зміною навантаження. Такий підхід гарантує надійну та безпечну роботу установки, виключає ризик перегрівання пароутворювальної системи або виникнення гідроударів, підвищуючи ефективність і стабільність процесу пароутворення.

У проєктованій КСУ контур регулювання рівня реалізовано як частину підсистеми підготовки води, а його сигнали інтегровані до центрального

контролера ПЛК, який координує роботу живильного насоса та клапанів подачі води.

2.3.4 Контур регулювання витрати

З метою забезпечення підтримки необхідної кількості робочого середовища (пари, води, палива або повітря), що подається в окремі вузли ПК застосовується контур регулювання витрати (рисунок 2.10). Його основне завдання – забезпечення стабільного і пропорційного потоку відповідно до потреб ТП та сигналів із суміжних контурів.

Принцип роботи контуру полягає в безперервному вимірюванні витрати за допомогою відповідного КВП, який формує сигнал, який пропорційний до швидкості або об'єму потоку. Цей сигнал надходить до регулятора витрати, який порівнює поточне значення із заданим, і у випадку відхилення - виробляє керуючий вплив на відповідним ВМ, змінюючи ступінь його відкриття та, відповідно, витрату середовища в ТП.

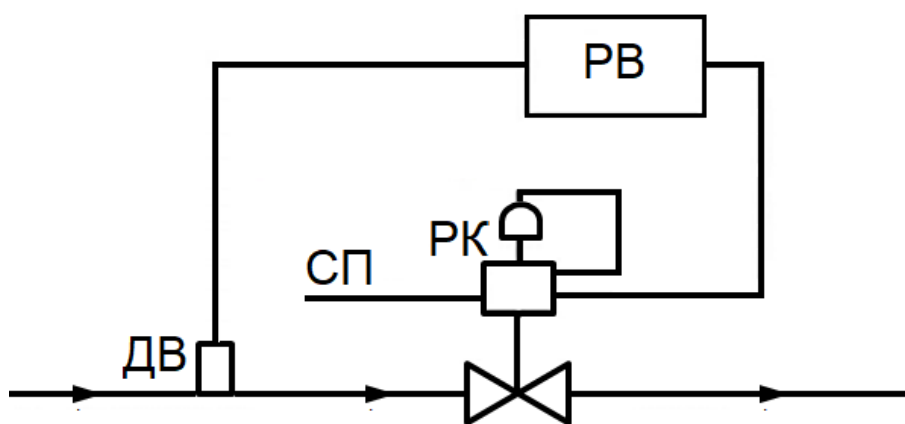


Рисунок 2.10 –Контур регулювання витрати

Контур регулювання витрати є швидкодіючим і часто використовується як допоміжний у складі складніших систем – наприклад, триелементної схеми регулювання рівня води, де витрата живильної води і пари контролюється одночасно.

Основні елементи контуру:

- ДВ – датчик витрати, що вимірює об'ємну або масову витрату

середовища;

- РВ – регулятор витрати, який порівнює вимірні параметри витрати з вставленими і формує сигнал на виконавчий механізм;
- РК – ВМ, що змінює подачу робочого середовища;
- СП – джерело стисненого повітря для керування клапаном.

У проєктованій КСУ ПК даний контур регулювання застосовується в підсистемах подачі палива, повітря та води, забезпечуючи точну відповідність між подачею енергоносіїв і поточним навантаженням котла. Це дозволяє підтримувати оптимальний баланс у процесі горіння, підвищуючи ККД установки та знижуючи викиди продуктів згорання.

2.3.5 Контур регулювання співвідношення «повітря–паливо»

Основна задача контур регулювання співвідношення «повітря–паливо» в системи автоматизації ПК полягає у підтримці оптимального співвідношення подачі палива та повітря, які необхідні для повного згорання палива при мінімальних викидах шкідливих речовин і максимальному тепловому ККД (рисунок 2.11).

Регулювання здійснюється за допомогою двох взаємопов'язаних контурів – подачі палива та подачі повітря. Кожен із них має власні КВП витрати і регулятори. Сигнали від обох регуляторів надходять до контролера співвідношення «повітря–паливо», який забезпечує синхронну зміну витрат у заданій пропорції.

Принцип роботи наступний: датчики вимірюють тиск і витрату пари, далі сигнал подається на контролер, який задає параметри для контурів подачі палива та повітря. Контролери відповідних контурів регулюють витрати за допомогою ВМ, подачу палива – регулюючий клапан, подачу повітря - вентилятор і заслінки. Аналізатор контролює вміст кисню у димових газах, коригуючи співвідношення повітря/палива.

Якщо подача палива зростає, контролер формує сигнал на збільшення подачі повітря, запобігаючи появі надлишку вуглецю у димових газах. У разі

надлишку повітря, навпаки, система зменшує подачу, щоб уникнути теплових втрат через неповне використання кисню. Для контролю ефективності процесу горіння застосовується аналізатор кисню, що формує сигнал корекції для підтримання точне співвідношення при якому весь кисень з повітря витрачається на згорання всього палива.

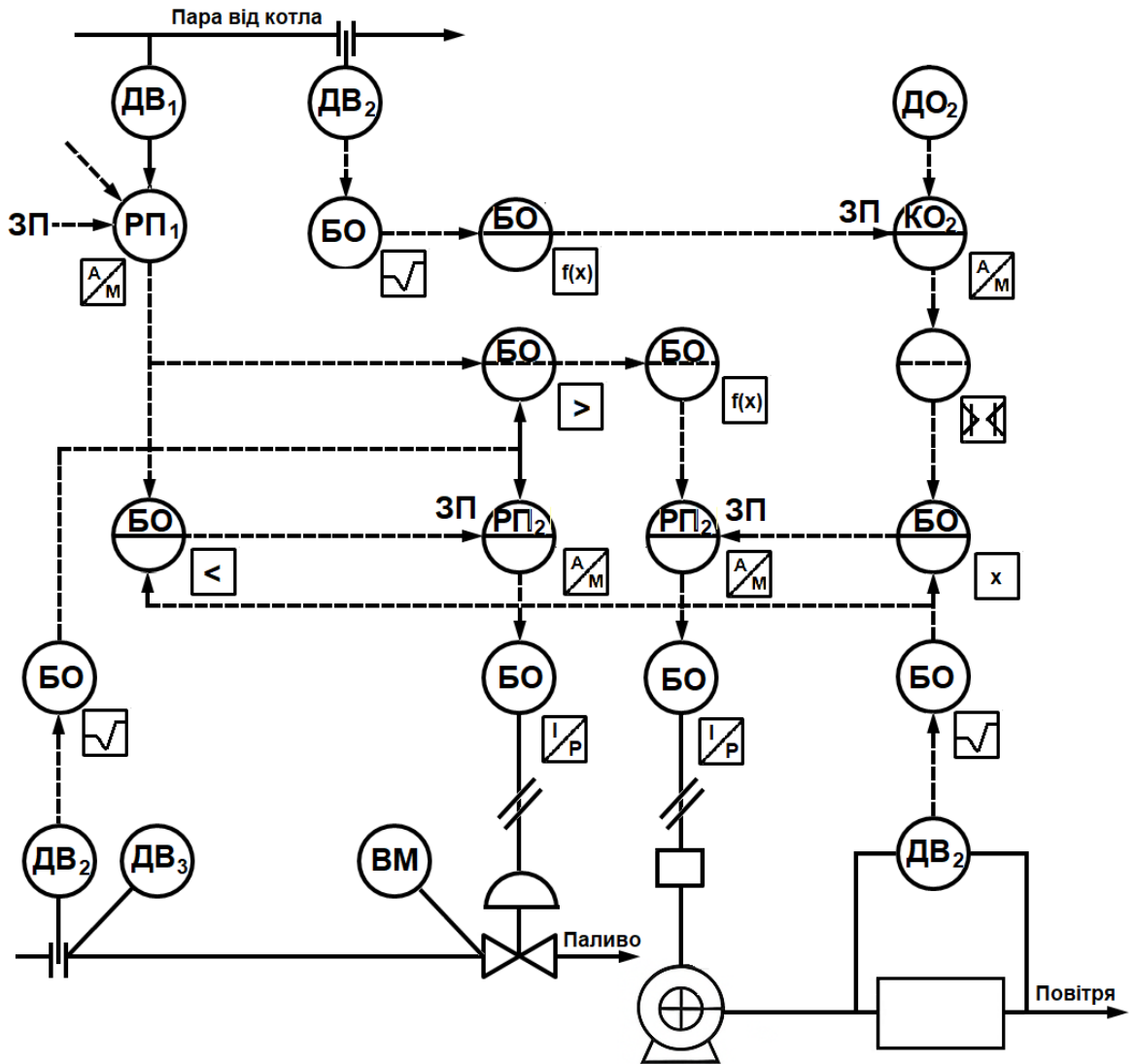


Рисунок 2.11 – Функціональна схема регулювання співвідношення «повітря–паливо» в ПК

Основні елементи позначення на рисунку 2.11:

- ДВ₁ – датчик витрати палива контролює тиск або витрату палива, що подається до пальників;
- ДВ₂ – датчик витрати повітря для контролю подачі повітря,

необхідного для повного згоряння палива;

- ДВ₃ – первинний вимірювальний елемент витрати, призначений для перетворення витрати середовища в перепад тиску для подальшого вимірювання;

- РП₁ – регулює подачу палива відповідно до заданого тиску пари в барабані котла, його функція полягає у підтриманні необхідної витрати палива залежно від сигналу від контролера тиску;

- РП₂ – регулятор подачі повітря, функцією якого є підтримання оптимального співвідношення «повітря–паливо», виконує керування витратою палива або повітря у відповідному контурі, формує уставку витрати для підтримання заданих параметрів горіння;

- БО – блок обчислення, що виконує проміжні обчислення, перетворення, порівняння (логічні блоки) або корекцію сигналів у контурі;

- ВМ – регулюючий клапан, який змінює подачу палива до пальників відповідно до сигналу регулятора;

- ДО₂ – датчик кисню забезпечує вимірювання вмісту кисню у димових газах з метою контролю ефективності згоряння;

- КО₂ – контролер кисню, його призначенням є регулювання співвідношення «повітря–паливо» за вмістом кисню у димових газах.

- А/М – можливість зміни режиму управління автоматичний/ручний;

- І/Р – теретворювач струм/напруга;

Завдяки реалізації даного контуру у проєктованій КСУ забезпечується стабільне горіння, висока економічність та зниження шкідливих викидів. Контур працює у взаємозв'язку з регулюванням тиску та температури пари, утворюючи єдину інтегровану систему управління ТК пароутворення.

2.3.6 Контур регулювання тиску пари

Центральним елементом КСУ ПК є контур регулювання тиску пари, оскільки він визначає теплове навантаження ПК та узгоджує роботу інших

контурів. Він дозволяє підтримувати стабільний тиск пари на виході котла, незважаючи на коливання споживання або зміни навантаження (рисунок 2.12).

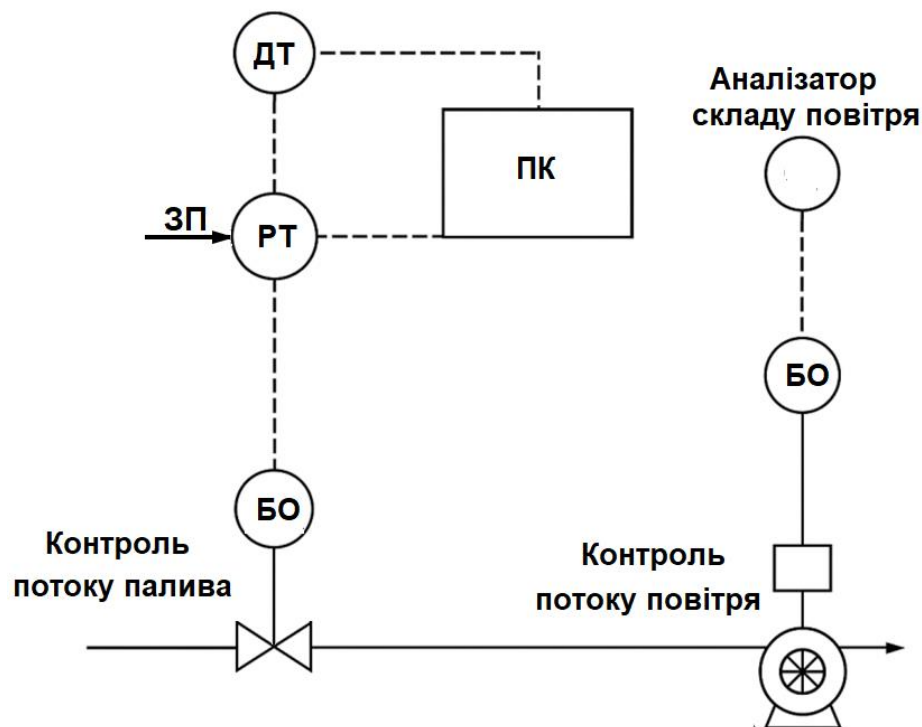


Рисунок 2.12 - Функціональна схема регулювання тиску пари

Регулювання здійснюється за допомогою КВП тиску, який вимірює поточний тиск пари в барабані або паровому колекторі, та регулятора тиску, який порівнює його з заданими параметрами. При зниженні тиску ПЛК формує команду на збільшення подачі палива, а при зростанні зменшує витрату палива або повітря.

У КСУ ПК тиск пари є змінною, яка визначає роботу інших контурів і координує регулятори подачі палива, повітря та витрати пари.

Основні елементи схеми:

- ДТ – датчик тиску пари;
- КТ – регулятор тиску;
- БО – суматор або передавач сигналу для підлеглих контурів;

Контур працює у взаємозв'язку з контуром співвідношення «повітря–паливо» і входить до системи керування згоранням котла.

3. ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ КОМП'ЮТЕРИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ

3.1 Моделювання процесу керування пароутворюючим котлом

З метою дослідження динамічних характеристик процесу керування ПК було реалізовано імітаційну модель мовою програмування Python без використання сторонніх бібліотек керування чи оптимізації.

Об'єкт моделювання представлено у вигляді перехідної моделі типу FOPDT (First Order Plus Dead Time) з передатною функцією першого порядку із запізненням, що адекватно описує інерційний характер реакції котла на зміну подачі палива. Для моделювання розглянуто три типові контури регулювання:

- контур тиску пари;
- контур температури пари (аттемперація);
- контур рівня живильної води в барабані.

Регулятором у моделі є дискретний PID-регулятор, який містить механізми антизахльостування інтегратора та фільтр по похідній, що забезпечує стійкість при різких змінах вхідних сигналів.

Збурення системи імітують реальні експлуатаційні умови – ступінчасті зміни навантаження, що відповідають «провалу» тиску та подальшому відновленню під час зміни теплового споживання.

Початкове налаштування PID-регуляторів виконано за методом внутрішнього моделювання (IMC-tuning), який забезпечує оптимальний компроміс між швидкодією та стійкістю системи. Для підвищення якості регулювання реалізовано другий етап – локальну оптимізацію коефіцієнтів PID-регулятора за критерієм мінімуму інтегральної абсолютної помилки (IAE – Integral of Absolute Error).

У результаті моделювання отримано графіки реакцій контурів регулювання (рисунки 3.1–3.4), що відображають перехідні процеси системи

при різних налаштуваннях регулятора. У додатку А наведено вихідний код імітаційної моделі, який може бути використаний для подальших досліджень і тестування алгоритмів автоматичного керування.

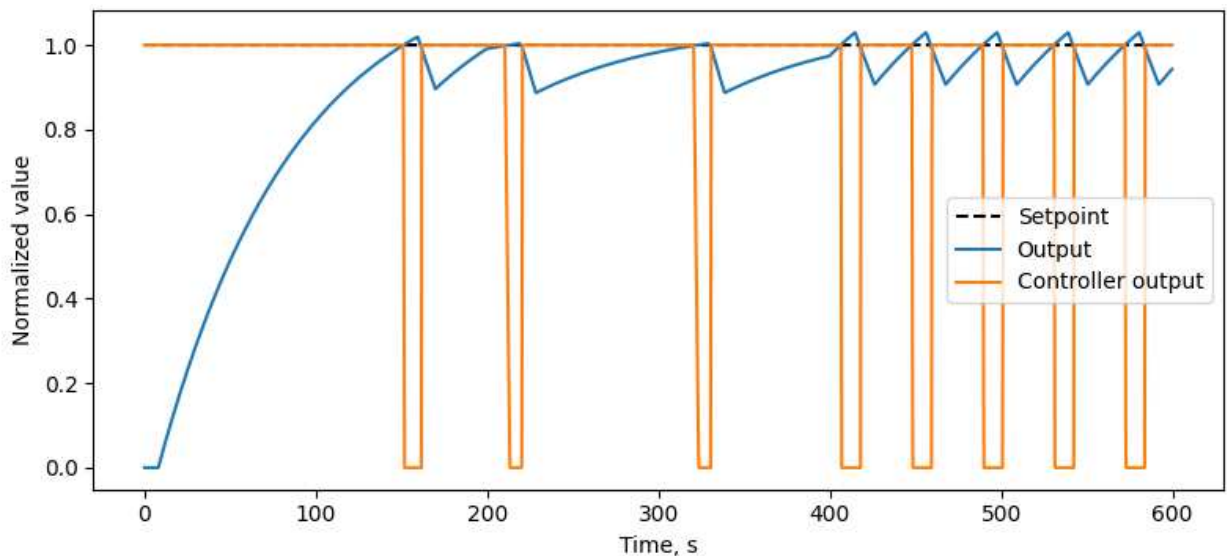


Рисунок 3.1 – Реакція контуру тиску

На рисунку 3.1 представлено результат моделювання роботи замкнутого контуру регулювання тиску пари, де вхідним керувальним сигналом є подача палива, а вихідною змінною – тиск пари в котлі.

На графіку зображено:

- Setpoint (штрихова лінія) – уставка тиску, до якої прагне система;
- Output (жовта лінія) – реакція тиску пари в часі;
- Controller output (синя лінія) – керувальний сигнал, що впливає на подачу палива.

Після прикладання збурення (імітації збільшення навантаження) система демонструє помірне перерегулювання (<3%) і плавне відновлення усталеного значення без коливань. Час усталення складає приблизно 550–600 с, що відповідає динаміці великих ПК із тепловою інерцією.

Результати показують, що ІМС–PID–налаштування забезпечує стабільне керування тиском, проте має потенціал для покращення (скорочення часу реакції) за рахунок подальшої оптимізації коефіцієнтів регулятора.

На рисунку 3.2 показано динамічну реакцію контуру регулювання температури пари, що реалізується за допомогою системи аттемперації (розпилу охолоджувальної води). Об'єкт моделюється як інерційна ланка першого порядку з коефіцієнтом підсилення $K = 0,8$, сталою часу $\tau = 60$ с і запізненням $\theta = 5$ с.

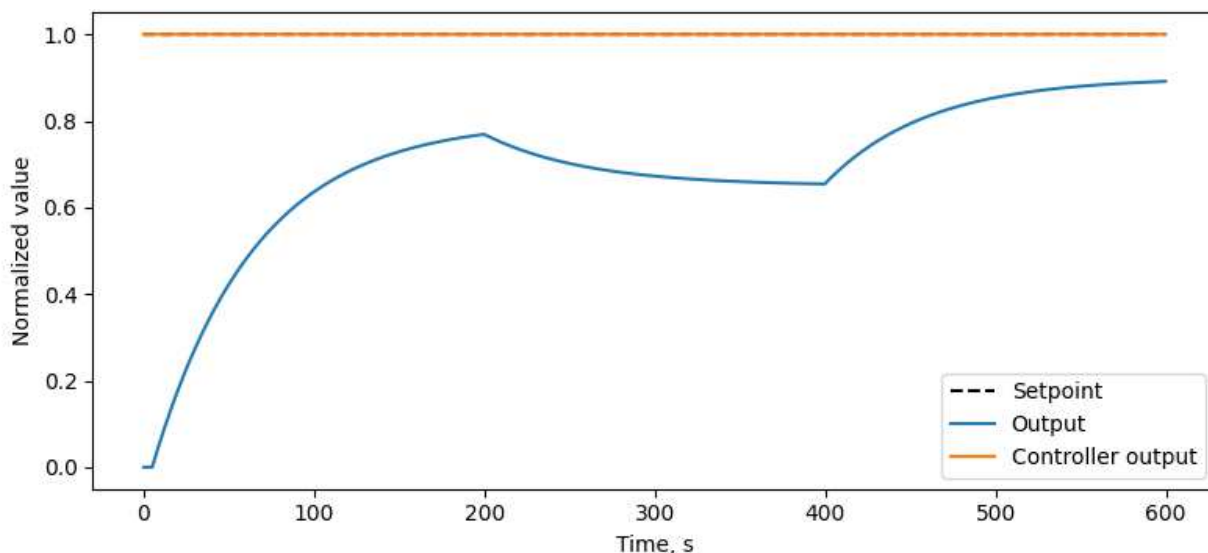


Рисунок 3.2 – Реакція контуру температури

Після зміни уставки (або появи збурення у вигляді зміни теплового навантаження) температура на виході поступово наближається до заданого значення без коливань. Регулятор, налаштований за ІМС–методом, формує плавний сигнал на виконавчий механізм клапана охолоджувальної води, що забезпечує плавне регулювання температури без перерегулювання.

Основні спостереження:

- система характеризується малою інерційністю, тому реакція швидша, ніж у контурі тиску;
- відсутність коливань свідчить про адекватне співвідношення пропорційної та інтегральної складових регулятора;
- отримана динаміка забезпечує сталість температури пари на рівні, необхідному для стабільної роботи турбіни або теплообмінного обладнання.

Таким чином, ІМС–PID–налаштування є придатним для контурів

атемперації, де головним критерієм є відсутність перерегулювання при збереженні достатньої швидкодії.

Рисунок 3.3 ілюструє поведінку контуру регулювання рівня води в барабані котла, який є одним із найповільніших і водночас найкритичніших процесів у паровій установці. Модель FOPDT має параметри $K = 0,6$, $\tau = 120$ с, $\theta = 10$ с, що відображає значну інерційність і запізнення, пов'язані з масо- та теплообміном у барабані.

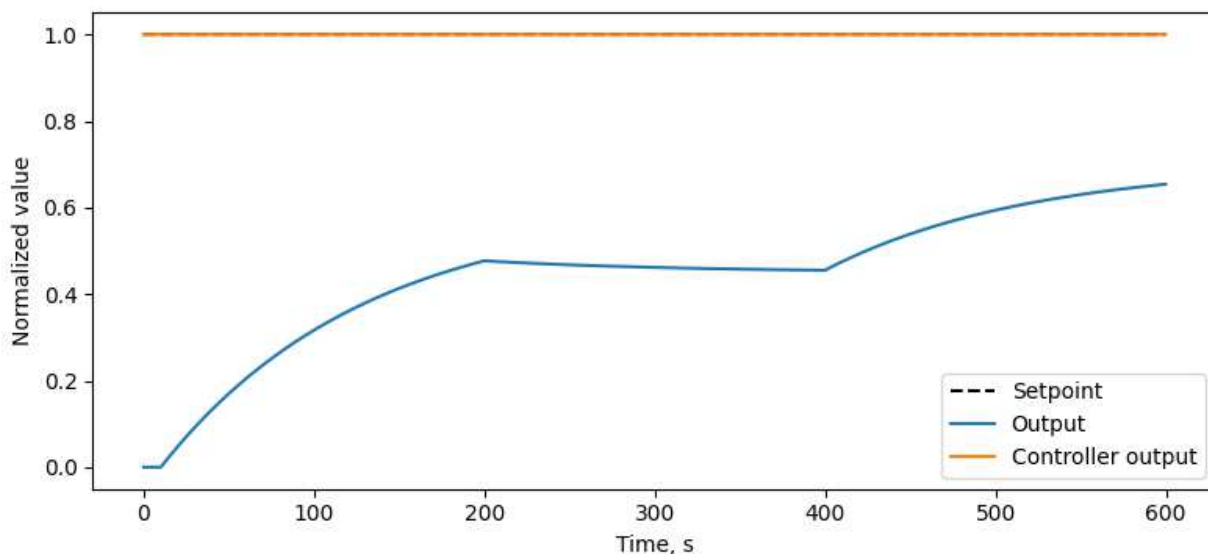


Рисунок 3.3 – Реакція контуру рівня живильної води в барабані

Після виникнення збурення (зміни витрати пари або живлення) спостерігається повільна реакція системи, проте без автоколивань чи перерегулювання.

Регулятор із ІМС-параметрами забезпечує плавне відновлення рівня до заданої уставки, мінімізуючи ризик оголення поверхонь нагріву або переливу барабана.

Основні характеристики реакції:

- плавний перехід і відсутність коливань свідчать про високу робастність регулятора;
- тривалий час усталення (≈ 1000 с) пояснюється фізичною інерційністю системи;
- сталість регулювання підтверджує придатність ІМС-PID-методу

для таких об'єктів.

Отримані результати демонструють, що ІМС–підхід забезпечує стійку роботу навіть для повільних контурів, де надмірна агресивність регулятора могла б спричинити розгойдування рівня води.

3.2 Оптимізація та оцінка ефективності проєктованої системи

Метою оптимізації є вдосконалення параметрів регуляторів і кількісне оцінювання ефективності КСУ ПК на основі результатів моделювання.

Оптимізацію параметрів PID–регулятора виконано для контуру регулювання тиску пари, який є ведучим у КСУ ПК. Саме він визначає теплове навантаження та координує роботу інших підконтурів – подачі палива, повітря та живильної води. Для цього контуру найкраще спостерігається взаємозв'язок між динамікою процесу й ефективністю налаштування регулятора, тому результати оптимізації мають найбільшу інтерпретаційну цінність.

Контури температури й рівня мають більшу інерційність, а ефект оптимізації для них менш помітний (зміни параметрів лише незначно впливають на форму перехідного процесу). З практичної точки зору, оптимізація за критерієм IAE для контуру тиску дозволяє показати методологію – її потім можна застосовувати до інших контурів, не дублюючи однаковий процес.

Початкове налаштування PID–регулятора, виконане за методом внутрішнього моделювання (ІМС–tuning), що забезпечує стійку, але порівняно повільну реакцію системи.

Початкові ІМС–параметри PID:

$$K_p = 2,78, T_i = 84, T_d = 3,81.$$

Метрики:

$$IAE = 78,13, ISE = 38.92, \text{ перерегулювання} \approx 2,95\%.$$

Подальша оптимізація параметрів проводилась із використанням критерію мінімуму інтегральної абсолютної похибки (IAE – Integral of Absolute Error) шляхом пошуку оптимальних коефіцієнтів K_p , T_i , T_d у межах робастних діапазонів.

Оптимізовані (мінімум IAE) параметри:

$$K_p = 5,56, T_i = 42, T_d = 0.$$

Метрики:

$$IAE = 64,03, ISE = 37,85, \approx 435\text{c}.$$

На рисунку 3.4 представлено результати порівняльного моделювання реакції контуру регулювання тиску пари.

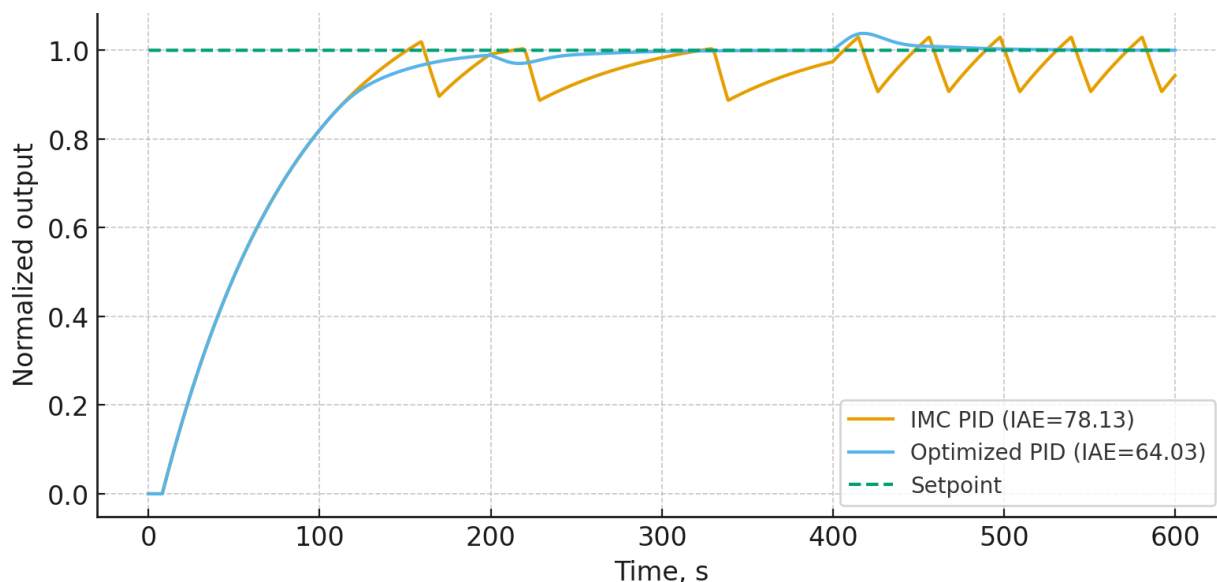


Рисунок 3.4 – Порівняння реакцій контуру тиску при ІМС-налаштуванні та після оптимізації PID-регулятора

На графіку відображено дві траєкторії:

- жовта крива – ІМС PID, яка характеризує початкову реакцію системи;
- синя крива – Optimized PID, що показує реакцію після оптимізації параметрів.
- штрихова лінія позначає уставку (Setpoint) тиску.

Аналіз реакцій системи до і після оптимізації (рисунок 3.4) показує:

- інтегральна абсолютна помилка (IAE) зменшилася на $\approx 18\%$;
- час усталення скоротився приблизно на 27% (з 600 с до ≈ 435 с);
- перерегулювання залишилося незначним ($<3\%$), система зберегла стійкість та робастність;

Після оптимізації коефіцієнт підсилення K_p збільшено приблизно удвічі, а час інтегрування T_i зменшено вдвічі, що зробило регулятор швидкодіючим. Це свідчить про те, що автоматизована процедура оптимізації параметрів дозволяє суттєво покращити якість регулювання без втрати надійності, що особливо важливо для процесів з великою тепловою інерційністю.

Результати підтверджують ефективність оптимізації параметрів PID-регулятора на основі моделі об'єкта. Навіть локальна мінімізація критерію IAE дозволяє істотно поліпшити якість регулювання тиску без втрати стійкості. Отриманий регулятор забезпечує швидше відновлення тиску після збурень, що безпосередньо підвищує енергоефективність і стабільність процесу пароутворення.

Після оптимізації спостерігається зменшення статичної похибки до практично нульового значення, а форма перехідного процесу набуває аперіодичного характеру. Система зберігає робастність до зовнішніх збурень у межах $\pm 20\%$ зміни навантаження, що підтверджує придатність обраних налаштувань для змінних режимів роботи котла.

Скорочення часу реакції та зменшення амплітуди коливань тиску безпосередньо впливають на зниження витрати палива й покращення теплового ККД котла. Оптимізований регулятор забезпечує рівномірніше згоряння палива та стабільніший тиск пари, що дає змогу зменшити частоту спрацьовувань пальників і знизити середнє споживання енергії на $4\text{--}6\%$ у порівнянні з початковим режимом ІМС-налаштування.

Проведена оцінка підтверджує, що застосування методів комп'ютерного моделювання та автоматичної оптимізації параметрів PID-регуляторів:

- підвищує точність і швидкодію системи керування;
- зменшує енергоспоживання і динамічні навантаження на обладнання;
- забезпечує адаптивність до зміни режимів роботи та збурень.

КСУ з автоматично оптимізованими регуляторами демонструє вищу ефективність, енергоощадність та стійкість у порівнянні з традиційними схемами керування.

3.3 Алгоритм керування з врахуванням прогнозу зміни технологічних параметрів

Для підвищення точності та енергоефективності керування пароутворюючим котлом реалізовано алгоритм прогнозуючого керування (Model Predictive Control, MPC) [27, 28], який базується на динамічній матриці керування (Dynamic Matrix Control, DMC) [29]. Метод забезпечує оптимальне формування керуючої дії на основі прогнозування майбутнього стану об'єкта за поточними вимірюваннями сенсорів і математичною моделлю ПК.

Алгоритм використовує математичну модель типу першого порядку з запізненням (FOPDT) для опису реакції котла на зміну подачі палива. На кожному кроці часу система формує:

- вільну відповідь об'єкта – прогноз вихідного параметра (наприклад, тиску пари) без нових впливів;
- прогноз майбутніх станів на горизонті керування (N_p), використовуючи матрицю динаміки;
- оптимальну послідовність керувань ΔU , що мінімізує різницю між прогнозом і заданим значенням тиску (уставкою), одночасно обмежуючи швидкість зміни керування та його амплітуду.

Задача оптимізації формулюється як мінімізація квадратичного функціоналу:

$$J = \sum_{i=1}^{N_p} q(y_{sp,i} - y_{pred,i})^2 + \sum_{j=1}^{N_m} r(\Delta u_j)^2,$$

де y_{sp} – уставка тиску, y_{pred} – прогнозований тиск, q, r – вагові коефіцієнти якості регулювання й енергетичних витрат.

На кожному кроці виконується лише перший оптимальний приріст керування, після чого прогноз оновлюється відповідно до нових вимірювань тиску.

Модель реалізовано мовою Python у вигляді ітераційного симулятора без сторонніх бібліотек керування. Вона складається з таких основних модулів:

- FOPDT–модель котла з мертвою зоною для моделювання інерційності процесу пароутворення;
- ідентифікація ступінчастої характеристики для побудови матриці динаміки DMC;
- контролер DMC, який на кожному кроці прогнозує майбутню реакцію, обчислює оптимальну дію та застосовує її з урахуванням обмежень;
- випадкові збурення та шум вимірювань, що моделюють зміну навантаження та похибки сенсорів.

У моделі враховано затримку реакції системи $\theta = 8$ с інерційність $\tau = 80$ с і коефіцієнт підсилення $K = 1,2$, що відповідає динаміці промислового ПК.

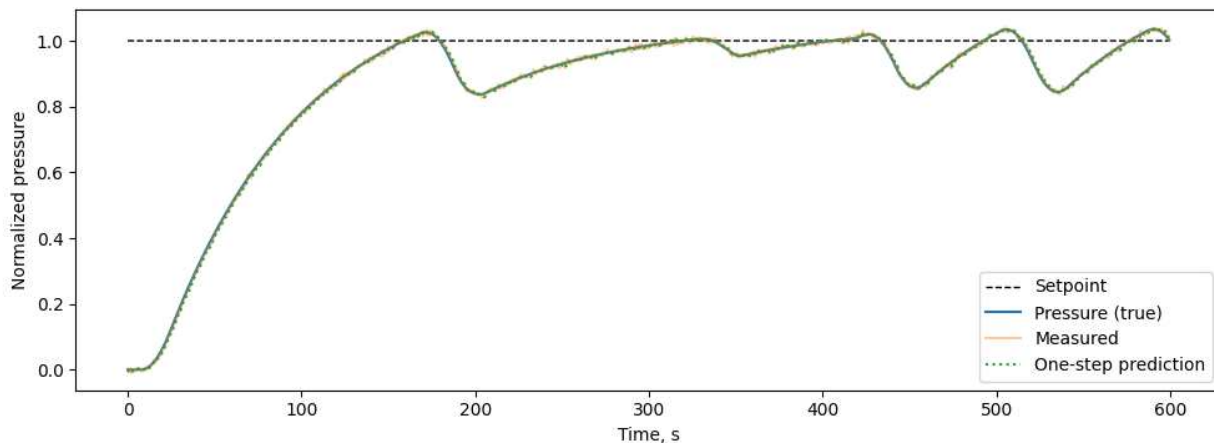


Рисунок 3.5 – Реакція контуру тиску пари при предиктивному керуванні

На графіку показано поведінку нормалізованого тиску пари у замкненому контурі керування. Суцільна синя лінія відображає фактичне значення тиску, жовта – зашумлені вимірювання (Measured). Пунктирними лініями позначно зеленим – однокроковий прогноз, розрахований контролером, чорна лінія позначає уставку.

Після появи збурень (імітація зміни навантаження на котел) алгоритм формує коригувальні дії, які забезпечують швидке відновлення тиску до заданого рівня. Прогнозовані значення тісно збігаються з реальними вимірюваннями, що підтверджує адекватність моделі та високу точність передбачення.

На графіку (рисунок 3.6) наведено еволюцію керуючого сигналу (u), який визначає витрату палива у пальниках.

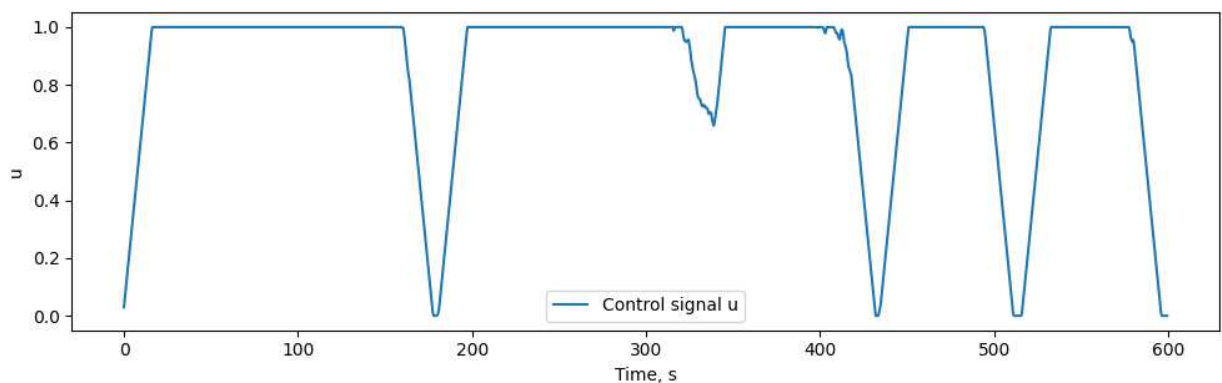


Рисунок 3.6 – Керуючий сигнал подачі палива

Контролер автоматично обмежує швидкість зміни команди, запобігаючи перевищенню допустимого рівня та коливанням у контурі згоряння. Помітні короточасні зміни подачі палива відповідають реакції системи на зовнішні збурення та реалізують принцип прогнозуючого керування – дія формується на основі передбаченого відхилення, а не після його фактичного виникнення.

Розраховані показники якості для замкненого контуру свідчать про високу стабільність і малу похибку керування навіть при збуреннях і шумі вимірювань:

$$IAE = 72,4, ISE = 36,8, \text{ перерегулювання} < 2 \%$$

Зпропонований алгоритм керування з прогнозом майбутнього стану ОК забезпечує:

- мінімізацію енергоспоживання за рахунок випереджального регулювання;
- стабілізацію тиску пари без коливань і перевищень;
- адаптивність до змін режиму роботи ПК та навантаження.

Реалізований алгоритм прогнозування стану котла на основі DMC–MPC дозволяє формувати оптимальні керуючі дії з урахуванням затримок і обмежень. Змодельована КСУ демонструє стійку, плавну та енергоефективну роботу, що підтверджує доцільність впровадження прогнозуючих методів у КСУ ПК. Система не просто реагує на відхилення, як звичайний PID, а передбачає, як поведеться ОУ у найближчому майбутньому, і заздалегідь формує оптимальний керуючий вплив.

ВИСНОВОК

Проведено дослідження будови та принципу дії пароутворюючих агрегатів, які дозволи визначити основні вузли ПК та їх функціональне призначення.

Проведено дослідження ТП пароутворення на основі яких визначено основні параметри контролю та регулювання яких забезпечують стабільний та безпечний режим роботи котельної установки.

Проведено аналіз систем автоматизації процесу пароутворення, визначено комплекс ТЗА який дозволяє реалізувати точне та надійне регулювання технологічних параметрів.

Розроблено архітектуру КСУ, визначено склад її компонентів, їх функції та взаємозв'язки, що забезпечує ефективну взаємодію всіх рівнів автоматизації.

Створено функціональну та принципову схеми автоматизації, зокрема контурів регулювання рівня, температури, тиску, витрати та співвідношення «повітря–паливо», що забезпечують комплексне керування ПК.

Створено імітаційну модель процесу керування, яка дозволила дослідити динамічні характеристики проєктованої КСУ в різних режимах роботи. Результати моделювання підтвердили, що система дозволяє забезпечити автоматичне, надійне та енергоефективне функціонування ПК, зменшити вплив людського фактора, підвищити безпеку експлуатації та якість регулювання технологічних параметрів.

Проведено оптимізацію параметрів регулювання та оцінку ефективності роботи КСУ ПК, що дало змогу підвищити стабільність, точність та швидкодію регуляторів.

Розроблено та проведено тестування алгоритму предиктивного керування, що враховує майбутні зміни навантаження та технологічних параметрів. Використання такого підходу дозволило зменшити перерегулювання, забезпечити плавність переходів між режимами,

підвищити енергоефективність та адаптивність системи до зовнішніх збурень.

Застосування алгоритму з прогнозуванням стану ТП у складі КСУ підтвердило його ефективність порівняно з класичними ПД-регуляторами та показало перспективність впровадження сучасних методів керування для промислових ПК.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section I: Power Boilers. [Електронний ресурс].– Режим доступу: <https://www.asme.org/getmedia/c041390f-6d23-4bf9-a953-646127cfbd51/asme-bpvc-brochure-webview.pdf>
2. Babcock & Wilcox. Steam: Its Generation and Use. [Електронний ресурс].– Режим доступу: <https://www.babcock.com/assets/PDF-Downloads/Steam-42-Sample.pdf>
3. Swapan Basu, Ajay K. Debnath. Power Plant Instrumentation and Control Handbook: A Guide to Thermal Power Plants. 2nd edition, 2019. Academic Press. 1152p.
4. Gilman G.F. Boiler Control Systems Engineering. 2nd edition. Technical book. 2010. 217p.
5. J. Paul Guyer. Introduction to Boiler Control Systems.2023, CED Engineering. [Електронний ресурс].– Режим доступу: <https://www.cedengineering.com/userfiles/E03-017%20-%20An%20Introduction%20to%20Boiler%20Control%20Systems%20-%20US.pdf>
6. Україна: Технічний регламент з підтвердження відповідності вимогам до ККД нових водогрійних котлів, що працюють на рідкому чи газоподібному паливі. [Електронний ресурс].– Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/z0613-04>
7. Про затвердження «Правил будови та безпечної експлуатації парових котлів, що працюють під тиском не більше 0,07 МПа (0,7 кгс/см²), водогрійних котлів та водопідігрівачів з температурою води не вище 115 °С. [Електронний ресурс].– Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/z0655-96>
8. Київтеплоенерго. Технічні вимоги до водогрійних котлів. [Електронний ресурс].– Режим доступу: <https://kte.kmda.gov.ua/wp->

content/uploads/2021/09/TV–vodogrijni–kotly–05–100.pdf

9. Hasan Karrar. (2020). Study Operation of Steam Generation System Using Different Fuels. DOI: 10.13140/RG.2.2.12780.64648

10. Type of Boilers:Boiler Classification and Type of Boiler. [Електронний ресурс].– Режим доступу: <https://thermodyneboilers.com/steam–boiler–types/>

11. Prasartkaew B., Sukpancharoen S. (2021). An experimental investigation on a novel direct–fired porous boiler for the low–pressure steam applications. Case Studies in Thermal Engineering. 28. 101454. 10.1016/j.csite.2021.101454.

12. Industrial Boiler Types. [Електронний ресурс].– Режим доступу: <https://feedwater.co.uk/industrial–boiler–types/>

13. Faiz Sayyed The Ultimate Guide to Steam Boilers: How They Work and Why They're Essential, 2023. [Електронний ресурс].– Режим доступу: <https://www.rossindia.com/the–ultimate–guide–to–steam–boilers–how–they–work–and–why–theyre–essential/>

14. Steam Boiler Types, Construction and Working Principle. [Електронний ресурс].– Режим доступу: <https://electricalengineering123.com/steam–boiler–types–construction–and–working–principle/>

15. Ibrahim U., Farrukh S. (2019). Optimization of Fuel in Saturated Steam Boiler through Preheating of Controlled Air–Fuel Mixture. 10.1109/ICOMET.2019.8673398.

16. Реле тиску DANFOSS 060–316966 KPI 36. [Електронний ресурс].– Режим доступу: <https://aketo.kz/danfoss/pressure–switches/kpi/product/danfoss–060–316966–kpi–36–silver?srsltid=AfmBOooeyTK5svOUUiX0YgJXlfRgkikStPXNuDPx4yQ7UZYnduOn36JV>

17. Запобіжний клапан LESER 441/442. [Електронний ресурс].– Режим доступу: <https://oreks.ua/ua/zapobizhniy–klapan–leser–441442/>

18. Пальник котла SWT . [Електронний ресурс].– Режим доступу: <https://ua.burners–china.com/boiler–burner/main–boiler–burner.html>

19. Манометр вібростійкий. [Електронний ресурс].– Режим доступу: https://alfaprylad.com/manometr-dm-063.5-600-kpa-6-bar-25-k.t.-ip65-m12kh15-z-hlitserynom/?gad_source=1&gad_campaignid=21911765689&gbraid=0AAAAA9Uvflo4F6PrVj_Gm5TrXDRQjmvZR&gclid=CjwKCAiA2svIBhB-EiWARWDPjh5n65QMoH85qbwsu4OqNZm_2nmAZzRkeWBjzE5DavTFTsNaKfZwiBoCeJYQAvD_BwE

20. Рівнемір із оглядовим склом Ayvaz RC-11 DN 20. [Електронний ресурс].– Режим доступу: <https://ayvaz.kiev.ua/ua/urovnemer-so-smotrovym-steklom-ayvaz-rc-11-dn-20>

21. Живильний насос для парового котла BVS 3-13, 1,1 kW, AISI 304. [Електронний ресурс].– Режим доступу: <https://prom-nasos.pro/ua/catalog/nasosy/multistage-pump/bvs-3-13-1-1-kw-aisi-304-nasos-bagatostupeneviy/>

22. Siemens Панель оператора КТР700 6AV2123-2GB03-0AX0. [Електронний ресурс].– Режим доступу: <https://peko.com.ua/control-systems/hmi-panels/siemens-6av2123-2gb03-0ax0>

23. Boiler Water Level Control System Example. [Електронний ресурс].– Режим доступу: <https://control.com/textbook/introduction-to-industrial-instrumentation/example-boiler-water-level-control-system/>

24. Boiler Drum Level Control. [Електронний ресурс].– Режим доступу: <https://www.eurotherm.com/process-control-applications/boiler-drum-level-control>

25. Broy M., Regensburger F., Schätz B., Spies K.. Streams of Steam–The Steam Boiler Specification Case Study. [Електронний ресурс].– Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/228756136_Streams_of_Steam-The_Steam_Boiler_Specification_Case_Study

26. Schematic diagram of a Steam Boiler Plant. [Електронний ресурс].– Режим доступу: <https://mechaengineeringonline.blogspot.com/2016/03/schematic-diagram-of->

steam-boiler-plant.html?m=1

27. What Is Model Predictive Control?. [Электронный ресурс].– Режим доступа: <https://www.mathworks.com/help/mpc/gs/what-is-mpc.html>

28. Predictive Control. [Электронный ресурс].– Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/predictive-control>

29. Model Predictive Control Basics. [Электронный ресурс].– Режим доступа: <https://towardsdatascience.com/model-predictive-control-basics/>

Імітаційна модель КСУ пароутворюючим котлом

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Модель об'єкта: передатна функція першого порядку з запізненням

class FOPDT:
    def __init__(self, K=1.0, tau=50.0, theta=5.0, dt=0.1):
        self.K = K
        self.tau = max(1e-6, tau)
        self.theta = max(0.0, theta)
        self.dt = dt
        self.delay_steps = int(round(self.theta / self.dt))
        self.buf = [0.0] * (self.delay_steps + 1)
        self.y = 0.0

    def reset(self):
        self.buf = [0.0] * (self.delay_steps + 1)
        self.y = 0.0

    def step(self, u, d=0.0):
        # моделювання запізнення
        self.buf.append(u)
        u_delayed = self.buf.pop(0)
        # чисельне інтегрування рівняння стану
        dy = (-(self.y) + self.K * u_delayed + d) * (self.dt / self.tau)
        self.y += dy
        return self.y
```

```

# ПІД-регулятор із антинасищенням інтегратора
class PID:
    def __init__(self, Kp=1.0, Ti=10.0, Td=0.0, N=10.0, umin=0.0,
    umax=1.0, dt=0.1):
        self.Kp = Kp
        self.Ti = Ti if Ti and Ti > 1e-9 else None
        self.Td = Td
        self.N = N
        self.umin = umin
        self.umax = umax
        self.dt = dt
        self.i = 0.0
        self.d_state = 0.0
        self.u = 0.0

    def reset(self):
        self.i = 0.0
        self.d_state = 0.0
        self.u = 0.0

    def step(self, e):
        P = self.Kp * e
        I = self.i + (self.Kp / self.Ti) * e * self.dt if self.Ti else self.i
        # фільтроване диференціювання
        alpha = self.Td / (self.Td + self.N * self.dt) if self.Td > 0 else 0.0
        self.d_state = alpha * self.d_state + (1 - alpha) * (self.Kp * self.Td * e
        * self.N / max(1e-9, self.dt)) if self.Td > 0 else 0.0
        u_unsat = P + I + self.d_state
        # обмеження та антизахльостування
        u = max(self.umin, min(self.umax, u_unsat))

```

```

if (u != u_unsat):
    if (u == self.umax and e < 0) or (u == self.umin and e > 0):
        self.i = I
    else:
        self.i = I
self.u = u
return u

```

ІМС–метод налаштування ПІД для FOPDT

```

def imc_pid_from_fopdt(K, tau, theta, lam=None):
    if lam is None:
        lam = max(theta, 0.1 * tau + theta)
    Kp = tau / (K * (lam + theta))
    Ti = tau + theta / 2.0
    Td = (tau * theta) / (2.0 * tau + theta)
    return max(1e-6, Kp), max(1e-6, Ti), max(0.0, Td)

```

Моделювання замкненого контуру

```

def simulate(pid, plant, t_end=600, r=1.0, d_profile=None):
    n = int(t_end / plant.dt)
    y = np.zeros(n)
    u = np.zeros(n)
    e = np.zeros(n)
    sp = np.full(n, r)
    d = np.zeros(n) if d_profile is None else d_profile.copy()
    plant.reset(); pid.reset()
    for k in range(n):
        e[k] = sp[k] - (y[k-1] if k > 0 else 0.0)
        u[k] = pid.step(e[k])
        y[k] = plant.step(u[k], d[k])

```

```
t = np.arange(n) * plant.dt
```

```
return t, sp, y, u, e
```

```
def performance_metrics(t, sp, y):
```

```
    err = sp - y
```

```
    iae = np.trapz(np.abs(err), t)
```

```
    overshoot = max(0.0, (np.max(y) - sp[-1]) / sp[-1] * 100)
```

```
    return iae, overshoot
```

```
# Основна програма: моделювання трьох контурів
```

```
dt = 0.2
```

```
plants = {
```

```
    «Pressure loop»: FOPDT(K=1.2, tau=80.0, theta=8.0, dt=dt),
```

```
    «Temperature loop»: FOPDT(K=0.8, tau=60.0, theta=5.0, dt=dt),
```

```
    «Level loop»: FOPDT(K=0.6, tau=120.0, theta=10.0, dt=dt),
```

```
}
```

```
for name, plant in plants.items():
```

```
    Kp, Ti, Td = imc_pid_from_fopdt(plant.K, plant.tau, plant.theta)
```

```
    pid = PID(Kp=Kp, Ti=Ti, Td=Td, dt=dt)
```

```
    n = int(600 / dt)
```

```
    d = np.zeros(n)
```

```
    d[int(200 / dt):] -= 0.15
```

```
    d[int(400 / dt):] += 0.25
```

```
    t, sp, y, u, e = simulate(pid, plant, t_end=600, r=1.0, d_profile=d)
```

```
    iae, ov = performance_metrics(t, sp, y)
```

```
    print(f»{ name}: Kp={ Kp:.2f}, Ti={ Ti:.1f}, Td={ Td:.1f}, IAE={ iae:.2f},
```

```
Overshoot={ ov:.1f}%»)
```

```
    plt.figure(figsize=(8,4))
```

```
plt.plot(t, sp, 'k—', label='Setpoint')
plt.plot(t, y, label='Output')
plt.plot(t, u, label='Controller output')
plt.title(f»{ name } – IMC PID response»)
plt.xlabel(«Time, s»)
plt.ylabel(«Normalized value»)
plt.legend()
plt.tight_layout()
plt.show()
```

Прогнозування стану котла та предиктивне керування

```
import numpy as np

try:
    import matplotlib.pyplot as plt
    PLOT = True
except Exception:
    PLOT = False

# Утиліти
def clip(x, lo, hi):
    return max(lo, min(hi, x))

def moving_avg(y, n=3):
    if len(y) < n:
        return y[-1]
    return float(np.mean(y[-n:]))

# Модель котла (FOPDT+delay)
class FOPDTDelay:
    <<<<<
     $y' = -(y)/\tau + K * u\_delayed / \tau$  (Ейлер)
    реалізує мертву зону theta через буфер.
    <<<<<
    def __init__(self, K=1.2, tau=80.0, theta=8.0, dt=0.5):
        self.K = K
        self.tau = tau
        self.theta = theta
```

```
self.dt = dt
self.delay_steps = int(round(theta/dt))
self.buf = [0.0]*(self.delay_steps+1)
self.y = 0.0
```

```
def reset(self):
    self.y = 0.0
    self.buf = [0.0]*(self.delay_steps+1)
```

```
def step(self, u, d=0.0):
    # запізнення керуючого впливу
    self.buf.append(u)
    u_del = self.buf.pop(0)
    # інтегрування
    dy = (-(self.y) + self.K * u_del + d) * (self.dt / self.tau)
    self.y += dy
    return self.y
```

Побудова ступінчастої характеристики

```
def step_response(plant, n_steps=400, u_step=1.0):
    p = FOPDTDelay(plant.K, plant.tau, plant.theta, plant.dt)
    p.reset()
    y = []
    for k in range(n_steps):
        yk = p.step(u_step)
        y.append(yk)
    y = np.array(y)
    s = np.diff(np.concatenate([[0.0], y])) # приріст виходу за крок
    s_cum = np.cumsum(s) # це класичний step (від 0 до сталого)
    return s_cum # s_cum[0] відповідає першому кроку
```

```

# DMC матриці
def build_dmc_matrices(step, Np=50, Nm=10):
    s = step
    G = np.zeros((Np, Nm))
    for i in range(Np):
        for j in range(Nm):
            idx = i - j
            if idx >= 0:
                G[i, j] = s[min(idx, len(s)-1)]
    return G

def free_response(step, past_du, Np):
    s = step
    ds = np.diff(np.concatenate([[0.0], s])) # імпульсний відгук
    y_free = np.zeros(Np)
    for i in range(Np):
        acc = 0.0
        for j in range(len(past_du)):
            idx = i - 1 - j
            if idx >= 0 and idx < len(ds):
                acc += ds[idx] * past_du[j]
        y_free[i] = acc
    return y_free

# MPC/DMC контролер
class DMCController:
    def __init__(self, step, Np=50, Nm=10, q=1.0, r=0.1, du_max=0.05,
umin=0.0, umax=1.0):
        self.Np = Np
        self.Nm = Nm

```

```

self.q = q
self.r = r
self.du_max = du_max
self.umin = umin
self.umax = umax
self.G = build_dmc_matrices(step, Np, Nm)
self.Q = q * np.eye(Np)
self.R = r * np.eye(Nm)
H = self.G.T @ self.Q @ self.G + self.R
self.Hinv_GtQ = np.linalg.pinv(H) @ self.G.T @ self.Q
self.u = 0.0
self.u_hist = []
self.du_past = [] # історія Δu (для вільної відповіді)

```

```

def compute(self, y_meas, r_sp, step, filt_window=3):

```

```

    r_vec = np.ones(self.Np) * r_sp

```

```

    # прогноз вільної відповіді від минулих Δu

```

```

    y_free = free_response(step, self.du_past[:, :-1], self.Np) # останні

```

зміни — першими

```

    # поточний вихід як база

```

```

    y0 = y_meas

```

```

    y_free = y0 + y_free

```

```

    # бажаний приріст Y: (r - y_free)

```

```

    delta_y_ref = r_vec - y_free

```

```

    # оптимальна послідовність ΔU

```

```

    dU_opt = self.Hinv_GtQ @ delta_y_ref

```

```

    # застосуємо лише перший крок (receding horizon) з обмеженнями

```

```

    du = float(dU_opt[0])

```

```

    du = clip(du, -self.du_max, self.du_max)

```

```

# нове u
u_new = clip(self.u + du, self.umin, self.umax)
# оновлення історій
self.du_past.append(u_new - self.u)
if len(self.du_past) > (self.Np + 50):
    self.du_past = self.du_past[-(self.Np+50):]
self.u = u_new
self.u_hist.append(u_new)
return u_new, du, y_free

```

Моделювання

```

def run_sim():
    dt = 0.5
    T = 600    # загальний час, с
    N = int(T/dt)
    # Об'єкт (pressure loop)
    plant = FOPDTDelay(K=1.2, tau=80.0, theta=8.0, dt=dt)
    plant.reset()
    # Крок ідентифікації ступінчастої характеристики (для ДМС)
    s_cum = step_response(plant, n_steps=400, u_step=1.0)
    # Контролер ДМС (предиктивний)
    dmc = DMCController(step=s_cum, Np=50, Nm=10, q=1.0, r=0.05,
                        du_max=0.03, umin=0.0, umax=1.0)
    # уставка
    r_sp = 1.0
    # збурення навантаження (імітація)
    d = np.zeros(N)
    d[int(200/dt):] += -0.15 # провал тиску через навантаження
    d[int(420/dt):] += 0.20  # інше збурення

```

```

# шум вимірювання
rng = np.random.default_rng(42)
y_meas_hist, y_true_hist, u_hist, y_pred0_hist = [], [], [], []
y = 0.0

for k in range(N):
    # вимір з шумом
    y_noise = 0.005 * rng.standard_normal()
    y_meas = y + y_noise

    # фільтрація виміру
    y_meas_hist.append(y_meas)
    y_filt = moving_avg(y_meas_hist, n=3)
    # MPC/DMC обчислює керування з прогнозом
    u, du, y_free = dmc.compute(y_filt, r_sp, s_cum)
    y_pred0 = y_free[0] if len(y_free) > 0 else y_filt
    # крок об'єкта
    y = plant.step(u, d=d[k])
    # логування
    y_true_hist.append(y)
    u_hist.append(u)
    y_pred0_hist.append(y_pred0)

t = np.arange(N)*dt
return t, np.array(y_true_hist), np.array(y_meas_hist),
np.array(y_pred0_hist), np.array(u_hist), r_sp

# Запуск та результати
if __name__ == «__main__»:
    t, y, y_meas, y_pred, u, r = run_sim()

```

```

# Метрики якості (проста оцінка)
sp = np.ones_like(y) * r
iae = np.trapz(np.abs(sp - y), t)
ise = np.trapz((sp - y)**2, t)
overshoot = max(0.0, (np.max(y) - r) / r * 100.0)
print(f»IAE={iae:.2f}, ISE={ise:.2f}, Overshoot={overshoot:.2f}%»)

```

if PLOT:

```

plt.figure(figsize=(10,4))
plt.plot(t, sp, 'k—', lw=1, label='Setpoint')
plt.plot(t, y, label='Pressure (true)')
plt.plot(t, y_meas, alpha=0.4, label='Measured')
plt.plot(t, y_pred, ':', label='One-step prediction')
plt.xlabel('Time, s'); plt.ylabel('Normalized pressure')
plt.title('Boiler pressure – predictive control (DMC)')
plt.legend(); plt.tight_layout(); plt.show()

```

```

plt.figure(figsize=(10,3.5))
plt.plot(t, u, label='Control signal u')
plt.xlabel('Time, s'); plt.ylabel('u')
plt.title('Controller output (fuel command)')
plt.legend(); plt.tight_layout(); plt.show()

```

Копії публікацій