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

ПАЛЬЦАН Роман Ігорович

Автоматизована система контролю та керування параметрами промислового газового котла/ Automated system of control and management of industrial gas boiler parameters

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

Кваліфікаційна робота

Виконав студент групи АКІТ – 42/1
Р.І. Пальцан

_____

Науковий керівник
к.т.н., доцент І.Р.Пітух

_____

Кваліфікаційну роботу допущено
до захисту:

«____» _____ ___2026 р.

Завідувач кафедри

_____ А.І.Сегін

ТЕРНОПІЛЬ – 2026

Західноукраїнський національний університет
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем
Освітній ступінь "бакалавр"
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
ПАЛЬЦАН Роман Ігорович
(прізвище, ім'я по-батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи
Автоматизована система контролю та керування параметрами промислового газового котла/ Automated system of control and management of industrial gas boiler parameters.
керівник роботи к.т.н., доцент І.Р. Пітух
затверджені наказом по університету від 01 грудня 2025 р. № 894

2. Строк подання студентом закінченої кваліфікаційної роботи
25 травня 2026р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи:
1. Будова та принцип дії промислових котлоагрегатів.
2. Технологічний процес теплогенерції.
3. Автоматизовані системи керування промисловим котельним обладнанням.
4. Параметри контролю та регулювання.

4. Основні питання, які потрібно розробити
1. Дослідження технологічного процесу та систем автоматизації промислових котлоагрегатів.
2. Проєктування структури та обгрунтування вибору компонентів проєктованої системи.
3. Синтез та дослідження системи автоматичного регулювання параметрів промислового газового котла.

5. Перелік графічного матеріалу у роботі
1. Структурна схема АСКК.
2. Схема підключення температурних датчиків.
3. Схема підключення датчиків тиску.
4. Схема підключення виконавчих механізмів.

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1	І.Р. Пітух к.т.н., доцент, доцент кафедри СКС		
2	І.Р. Пітух к.т.н., доцент, доцент кафедри СКС		
3	І.Р. Пітух к.т.н., доцент, доцент кафедри СКС		

7. Дата видачі завдання 01 грудня 2025р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назви етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Проведення дослідження технологічного процесу та систем автоматизації промислових котлоагрегатів	01.12.2025р. – 15.01.2026р.	
2	Проєктування структури та обгрунтування вибору компонентів проєктованої системи	16.01.2026р. – 15.03.2026р.	
3	Синтез та дослідження системи автоматичного регулювання параметрів промислового газового котла	16.03.2026р. – 30.04.2026р.	
4	Остаточне оформлення та подача кваліфікаційної роботи на перевірку щодо плагіату	01.05. 2026р. – 25.05.2026р.	

Студент _____ Р.І. Пальцан
(підпис)

Керівник роботи _____ к.т.н., доцент І.Р. Пітух
(підпис)

АНОТАЦІЯ

Пальцан Р.І. Автоматизована система контролю та керування параметрами промислового газового котла. – Рукопис.

Дослідження на здобуття освітнього ступеня «бакалавр» за спеціальністю 174 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка», освітньо-професійна програма. – Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, 2026.

У роботі досліджено технологічний процес роботи промислових котлоагрегатів як об'єкта автоматизації; проаналізовано існуючі системи автоматизації та їх компоненти; визначено основні параметри контролю і регулювання. Розроблено структурну та електричну принципову схеми проєктованої системи, обґрунтовано вибір технічних засобів автоматизації. Побудовано математичну модель об'єкта керування, синтезовано систему автоматичного керування та досліджено її динамічні властивості.

ANNOTATION

Paltsan, R.I. Automated system of control and management of industrial gas boiler parameters. - Manuscript.

Doctoral studies for the education level «Bachelor'» with the title 174 Automation and Computer-Integrated Technologies and Robotics. – West Ukrainian National University, Ternopil, 2026.

The work investigates the technological process of industrial boiler units as an object of automation; analyzes existing automation systems; and identifies the main parameters for control and regulation. The structural and electrical schematic diagrams of the designed system are developed, and the selection of automation instrumentation and equipment is substantiated. A mathematical model of the control object is constructed, an automatic control system is synthesized, and its dynamic characteristics are studied.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ……..…… 6
ВСТУП…….…..…. 7
1. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ТА СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОМИСЛОВИХ КОТЛОАГРЕГАТІВ…….……. 9
1.1 Класифікація та будова промислових теплогенераторів..…....…… 9
1.2 Аналіз технологічного процесу та визначення параметрів контролю.. 15
1.3 Аналіз автоматизованих систем керування промисловим котельним обладнанням…….…… 18
1.4 Постановка задачі та формулювання вимог до проєктованої системи.. 22
2. ПРОЄКТУВАННЯ СТРУКТУРИ ТА ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ КОМПОНЕНТІВ ПРОЄКТОВАНОЇ СИСТЕМИ……..….. 24
2.1 Розробка структурної схеми…….……..…. 24
2.2 Обґрунтування вибору компонентів системи…….. 27
2.3 Розробка електричної принципової схеми…… 32
2.3.1 Блок контролю температури…..……..……..… 32
2.3.2 Блок контролю тиску..……..……..……..… 34
2.3.3 Блок керування виконавчими механізмами…… 35
2.3.4 Блок індикації та керування…… 37
2.3.5 Тактовий генератор та живлення……..…….. 39
2.3.6 Інтерфейс зв’язку…….. 40
3. СИНТЕЗ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПРОМИСЛОВОГО ГАЗОВОГО КОТЛА……. 41
3.1 Розробка структурної схеми системи автоматичного керування……. 41
3.2 Синтез регулятора системи автоматичного регулювання……..… 43

3.3 Дослідження перехідних процесів системи……..…… 45
ВИСНОВКИ……. 53
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ…….……..… 54

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АСКК - автоматизована система контролю та керування;

БДТ - блок датчиків тиску;

БКВМ - блок керування виконавчими механізмами;

БМК - блок мікропроцесорного керування;

БТД - блок температурних датчиків;

КВПіА - контрольно-вимірювальні прилади і автоматика;

ОК - об’єкт керування;

ПГК - промисловий газовий котел;

ПЛК - програмований логічний контролер;

САК - система автоматичного керування;

ТП - технологічний процес.

ВСТУП

Актуальність теми. На сучасному етапі розвитку промисловості задача підвищення енергоефективності, надійності та безпеки функціонування теплотехнічного обладнання є особливо актуальною оскільки стрімке зростання вартості енергоносіїв та посилення екологічних стандартів вимагають принципово нових підходів до автоматизації теплогенеруючих установок.

Промислові газові котли (ПГК) є основними елементами систем теплопостачання підприємств, забезпечуючи виробничі процеси тепловою енергією. Водночас вони є складними об’єктами керування (ОК), безперебійна робота яких безпосередньо впливає на виробничі процеси та комунальну інфраструктуру. Їх експлуатація пов’язана з необхідністю точного контролю технологічних параметрів, таких як температура теплоносія, тиск у системі, режими роботи насосного обладнання та пальникових пристроїв.

Традиційні методи керування котельними установками часто базуються на застарілих або частково автоматизованих рішеннях, що не забезпечують необхідного рівня гнучкості, точності підтримки параметрів технологічного процесу (ТП) та оперативності реагування на їх зміну. Це може призводити до перевитрати палива, зниження коефіцієнта корисної дії та прискореного зносу обладнання, а також до виникнення аварійних ситуацій.

Створення та впровадження автоматизованих систем контролю та керування (АСКК) на основі мікропроцесорної техніки дозволить вирішити комплекс задач, від безперервного моніторингу параметрів роботи котла до автоматичного регулювання режимів його роботи. Використання цифрових датчиків, інтелектуальних модулів обробки сигналів та засобів індикації забезпечує можливімть інтеграції функцій вимірювання, обробки та передачі даних, що дозволяє не лише підвищити точність регулювання параметрів, але й реалізувати функції діагностики, сигналізації та взаємодії з оператором.

Мета кваліфікаційної роботи: розробка АСКК параметрами ПГК, яка забезпечить ефективне управління ТП, моніторинг основних параметрів та підвищення надійності роботи обладнання.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

- провести дослідження ТП роботи ПГК та визначити ключові параметри, що потребують контролю та регулювання;
- проаналізувати існуючі системи керування ПГК та їх компоненти;
- обґрунтувати вибір контрольно-вимірювальних приладів і автоматики (КВПіА) для реалізації проєктованої системи;
- розробити загальну архітектуру та структурну схему АСКК;
- дослідити динамічні характеристики АСКК за одним із основних параметрів.

Об’єкт дослідження - ТП виробництва теплової енергії в ПГК.

Предмет дослідження – АСКК параметрами котлоагрегату на базі сучасних мікропроцесорних засобів.

Методи дослідження – методи системного аналізу, теорії автоматичного керування, математичного моделювання, мікропроцесорної техніки та схемотехнічного проектування, цифрової обробки сигналів.

Практичне значення отриманих результатів полягає у підвищенні енергоефективності та надійності роботи ПГК за рахунок автоматизованого контролю й регулювання основних технологічних параметрів. Впровадження запропонованої системи дозволить зменшити витрати енергоресурсів, мінімізувати вплив людського фактору та підвищити рівень безпеки експлуатації обладнання.

Публікації. Пальцан Р., Яремчук В. Автоматизована система керування технологічнимми параметрами промислового котельного обладнання // Збірник матеріалів всеукраїнської науково-практичної конференції «Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології» (АКІТ - 2026), Тернопіль, 2026.

1. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ТА СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОМИСЛОВИХ КОТЛОАГРЕГАТІВ

1.1 Класифікація та будова промислових теплогенераторів

Промислові котли це потужні теплогенеруючі установки, призначені для вироблення пари або нагріву води під тиском за рахунок спалювання палива. На відміну від побутових приладів, ПГК характеризуються високою продуктивністю, підвищеною надійністю та складними системами автоматизації. Вони широко застосовуються в енергетиці, хімічній, харчовій промисловості, а також у системах централізованого теплопостачання. Промислові котли класифікують за рядом ознак (рисунок 1.1), наприклад видом палива, конструктивного виконання, типом теплоносія, принципом його циркуляції, призначенням, тощо [1-6].

Рисунок 1.1 – Класифікація промислових котлів

За типом конструкції теплообмінника котли поділяються на:

– жаротрубні (газотрубні) – гарячі продукти згоряння проходять всередині труб, які оточені водою (рисунок 1.2). Характеризуються великим об’ємом води та значною інерційністю, що важливо враховувати при синтезі регуляторів.

– водотрубні - вода рухається по трубах, а продукти згоряння, гарячі гази, омивають їх зовні. Такі котли швидше виходять на робочий режим, але

потребують високої якості водопідготовки.

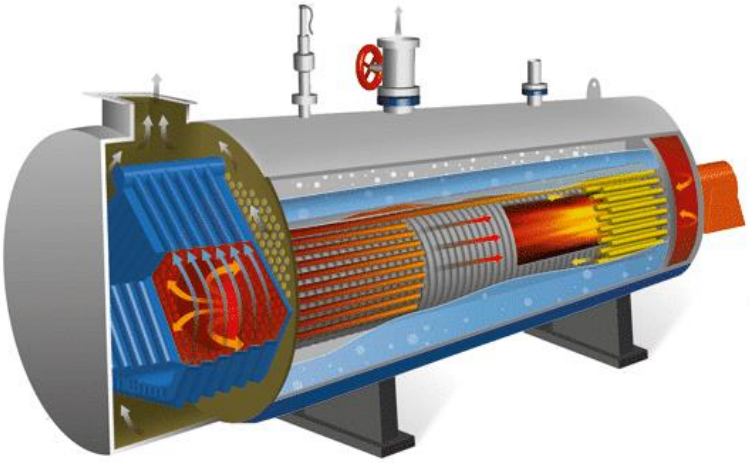


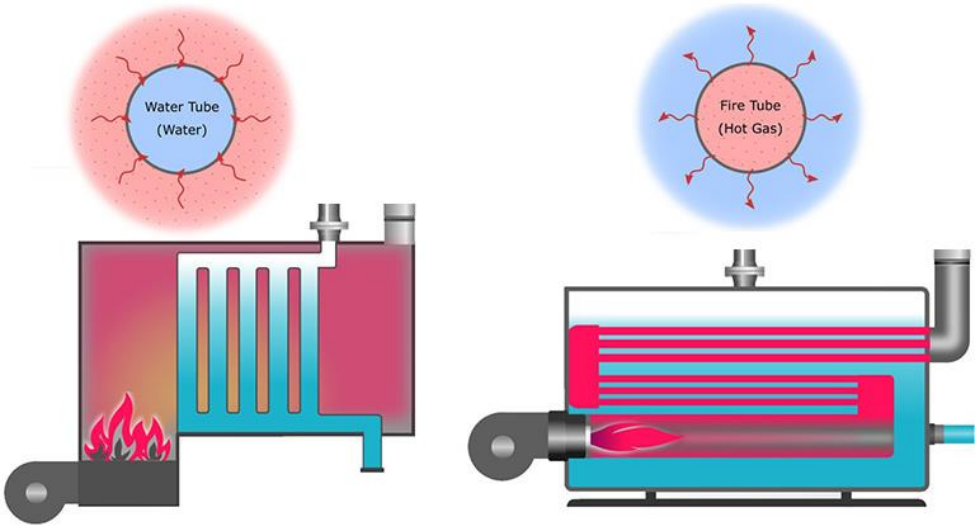
Рисунок 1.2 - Жаротрубний котел

Жаротрубні котли, такі як Bosch Universal UL-S [2], відзначаються простотою реалізації конструкції, що забезпечує надійність та зручність їх обслуговування. Вони широко застосовуються у системах середньої потужності та відзначаються стабільною роботою при відносно невисоких тисках.

Конструкція водотрубних котлів (рисунок 1.3) дозволяє їм працювати при значно вищих тисках і температурах, забезпечує більшу продуктивність, проте є складнішою з точки зору реалізації та експлуатації [3].

Рисунок 1.3 – Водотрубний котел

Основна відмінність між цими типами котлів полягає у способі теплообміну: у жаротрубних котлах (а) тепло передається від газів до води через стінки труб, а у водотрубних (б) – від газів до води, що циркулює всередині труб (рисунок 1.4) [4].

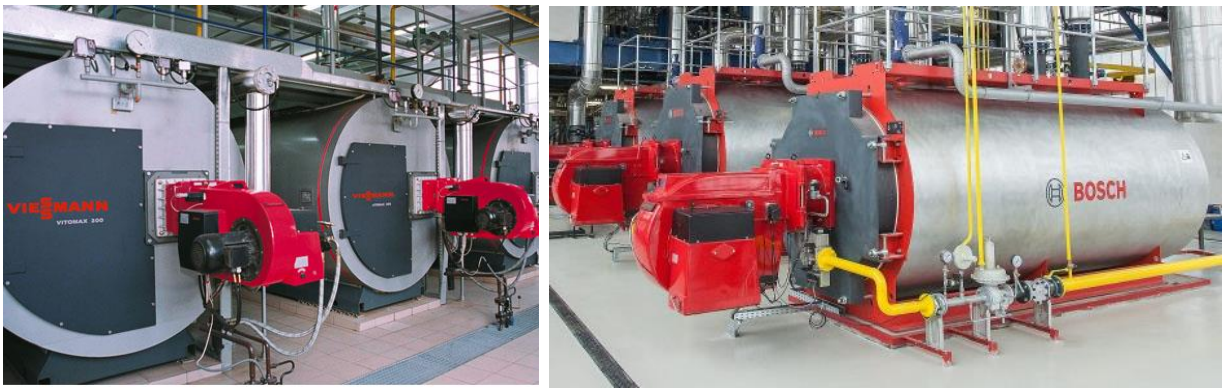


а) б)

Рисунок 1.4 – Приклад теплообміну котлів різних типів конструкції

Принцип теплообміну визначає експлуатаційні характеристики установок, так жаротрубні котли є більш інерційними, але простішими, тоді як водотрубні більш швидкодіючими, ефективними та придатними для високонавантажених промислових систем.

За видом палива розрізняють газові, рідкопаливні, твердопаливні та комбіновані. Газові котли характеризуються високим коефіцієнтом корисної дії, екологічністю та можливістю точного регулювання процесу горіння. Прикладом сучасних ПГК є водогрійні котли високго тиску серії Viessmann Vitomax 200-HW [5] (а) та Bosch UniTherm UT-M [2] (б), що широко використовуються у промислових і комунальних системах теплопостачання (рисунок 1.5).



а) б)

Рисунок 1.5 – Приклади ПГК

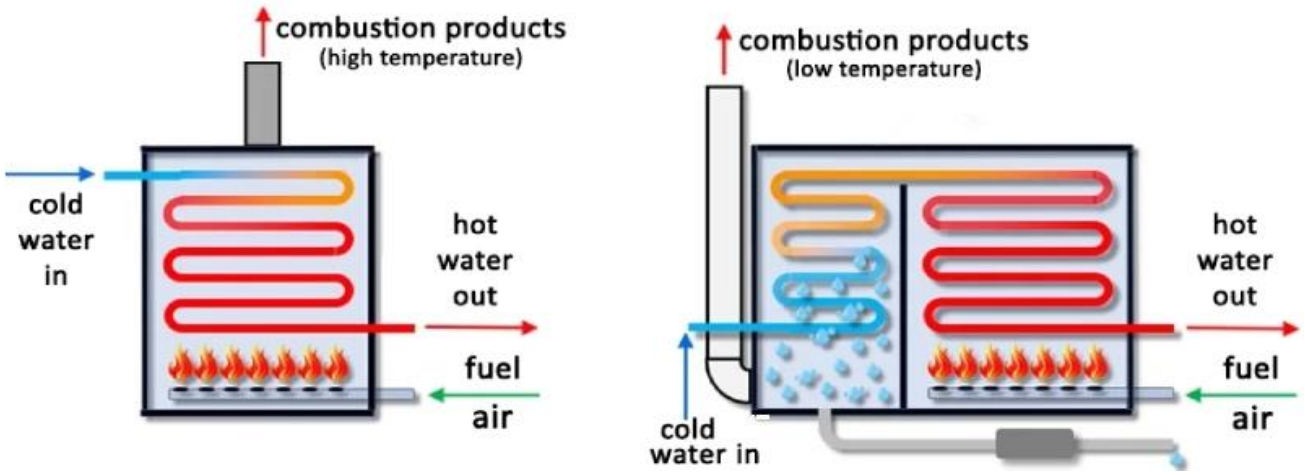
За типом теплоносія котли поділяють на:

– водогрійні - нагрівають воду до температури 95–150°С і відповідно поділяються на низько- та високотемпературні. Вони використовуються переважно для систем опалення та гарячого водопостачання.

– парові - виробляють насичену або перегріту пару для технологічних потреб промислових підприємств [7, 8].

Окремою ознакою класифікації водогрійних котлів є принцип використання теплоти продуктів згоряння, відповідно до якого розрізняють неконденсаційні (а) та конденсаційні котли (б) (рисунок 1.6).

Неконденсаційні котли є традиційним типом водогрійних котлів, у яких теплота продуктів згоряння використовується лише частково. У процесі роботи водяна пара, що утворюється під час згоряння палива, виводиться через димохід у пароподібному стані без використання її прихованої теплоти. Це обмежує коефіцієнт корисної дії таких установок.



а) б)

Рисунок 1.6 – Принцип роботи водогрійних котлів

Конденсаційні котли є вдосконаленим типом котлів, де реалізовано технологію рекуперації тепла продуктів згоряння. На відміну від традиційних рішень, у таких котлах водяна пара, що міститься у димових газах, охолоджується до температури точки роси та конденсується. При цьому виділяється прихована теплота пароутворення, яка додатково передається теплоносію. Завдяки цьому досягається підвищення коефіцієнта корисної дії,

до 100–108 % за нижчою теплотою згоряння палива [6].

Парові установки насиченої пари виробляють пару, температура якої відповідає температурі кипіння води при заданому тиску, яка може містити вологу. Котли цього типу застосовуються у ТП, де висока температура не вимагається, наприклад у харчовій, текстильній та хімічній промисловості.

Котли перегрітої пари додатково оснащуються перегрівниками, у яких насичена пара нагрівається до температури, вищої за температуру кипіння при даному тиску (рисунок 1.7) [8]. У результаті утворюється суха перегріта пара з підвищеною енергетичною здатністю. Такі установки використовуються в енергетиці, зокрема на теплових електростанціях, а також у ТП, де необхідна дуже висока температура та ефективність теплопередачі.

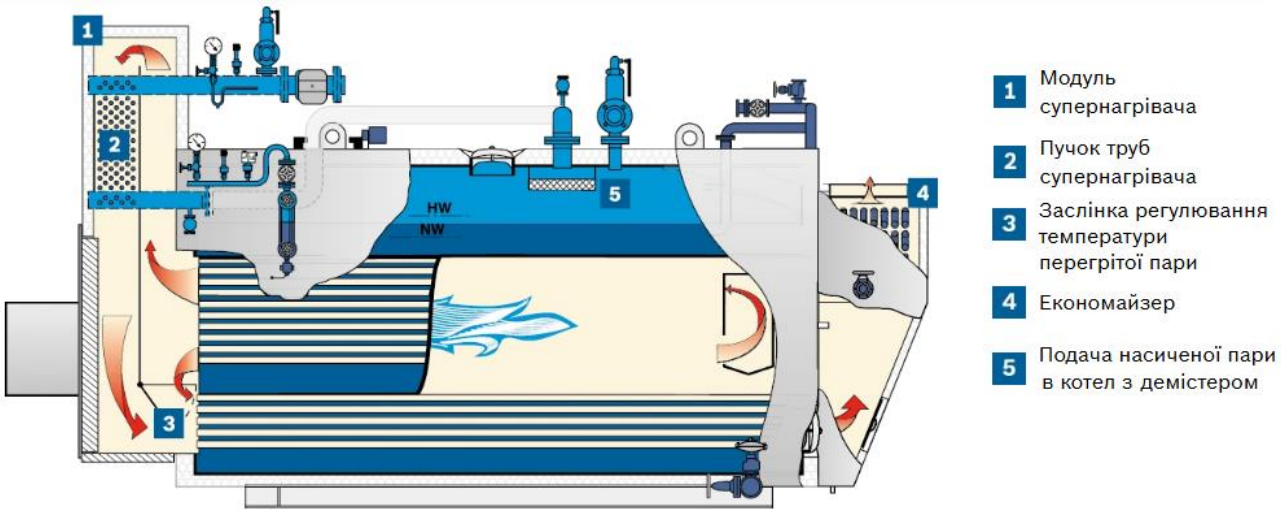


Рисунок 1.7 – Паровий котел перегрітої пари

Будова промислових котлів визначається їх призначенням та конструктивним виконанням, проте незалежно від типу більшість котлоагрегатів містять основні функціональні елементи, що забезпечують процес виробництва теплової енергії (рисунок 1.8) [4, 6, 9].

Основним елементом котла є камера згоряння, у якій відбувається процес згоряння палива. Для газових котлів характерним є використання пальникових пристроїв, що забезпечують змішування газу з повітрям і стабільне горіння. Важливу роль відіграють теплообмінні поверхні, що забезпечують передачу теплової енергії від продуктів згоряння до теплоносія.

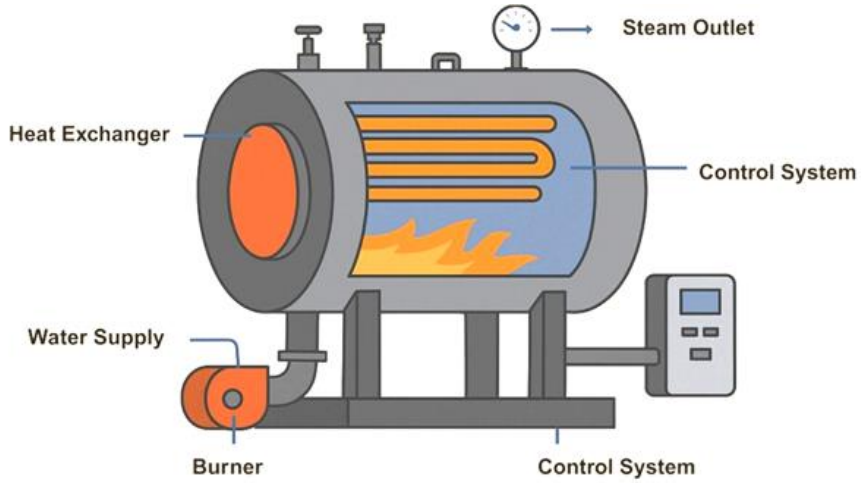


Рисунок 1.8 – Типова будова обладнання

До складу котла також входять системи подачі палива та повітря, димовідвідні канали, насосне обладнання для циркуляції теплоносія, , а також контрольно-вимірювальні та захисні пристрої. Сучасні промислові котли також оснащуються системами безпеки, які контролюють перевищення допустимих значень температури та тиску, забезпечують аварійне відключення обладнання та сигналізацію про несправності. Це дозволяє значно підвищити рівень надійності та безпеки експлуатації.

Для водогрійних газових котлів, характерна наявність таких основних компонентів як пальник, теплообмінник, димохід, система автоматичного керування, запобіжні клапани, датчики температури і тиску, циркуляційний насос, розширювальний бак та система водопідготовки. Кожен із зазначених елементів відіграє важливу роль у забезпеченні ефективної, стабільної та безпечної роботи котельної установки.

На основі проведеного аналізу та класифікації промислових котлоагрегатів у даній роботі ОК обрано водогрійний ПГК жаротрубного типу. Вибір зумовлений його широким застосуванням котлів даного типу у системах теплопостачання та доцільністю реалізації АСКК спрямована на підвищення енергоефективності, надійності та безпеки їх роботи шляхом забезпечення стабільного контролю та регулювання основних технологічних параметрів.

1.2 Аналіз технологічного процесу та визначення параметрів контролю

ПГК є складним теплотехнічним об'єктом, функціонування якого базується на перетворенні хімічної енергії природного газу в теплову енергію теплоносія (води). ТП у котлоагрегаті характеризується високою динамічністю, взаємозв’язком параметрів та суворими вимогами до безпеки експлуатації [10].

ТП виробництва тепла у ПГК (рисунок 1.9) включає кілька основних етапів: подачу палива та повітря до пальникового пристрою, спалювання суміші в топці, передачу тепла через поверхні нагріву до теплоносія та циркуляцію води в системі за допомогою насосних агрегатів [11-14].

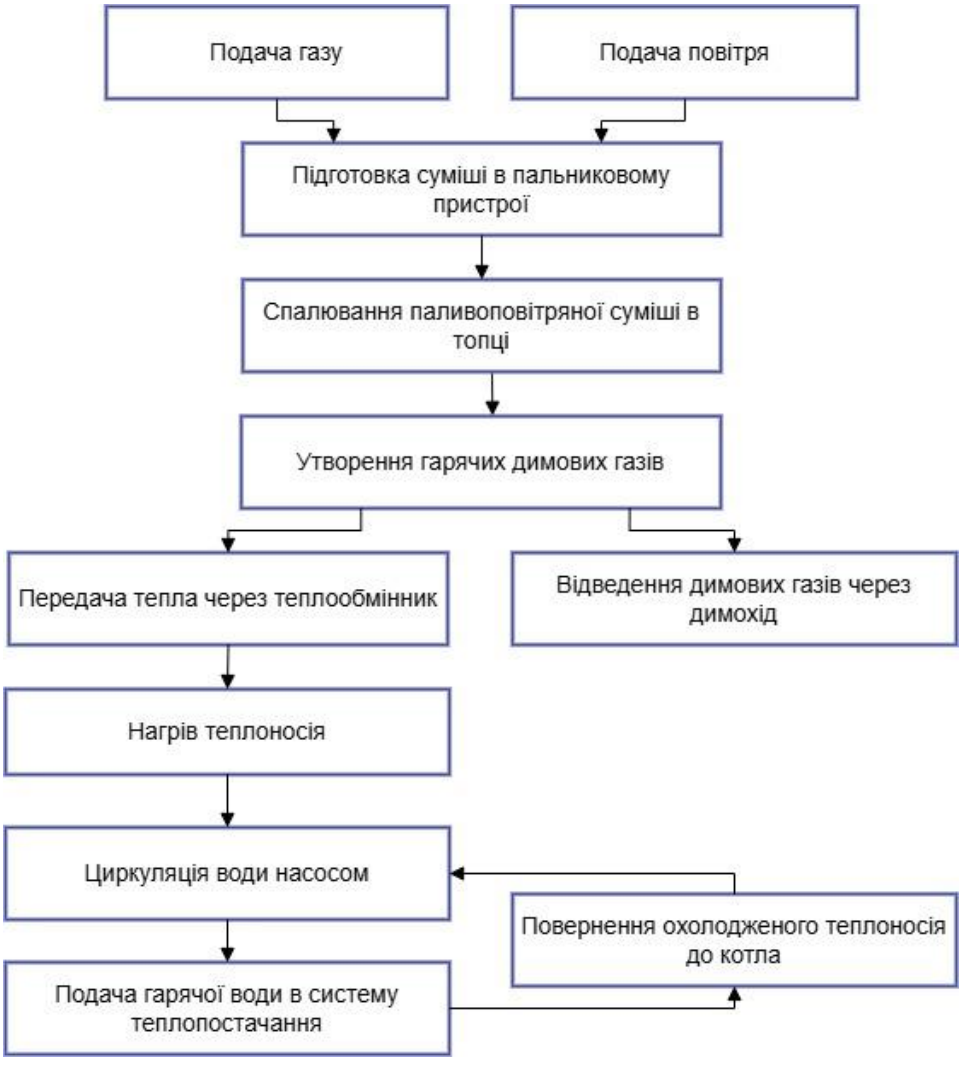


Рисунок 1.9 - Технологічна схема процесу виробництва тепла

Ефективність ТП безпосередньо залежить від точності підтримання теплового балансу та гідравлічного режиму [13].

Для забезпечення енергоефективності та безаварійної роботи системи автоматизації необхідно здійснювати безперервний моніторинг та регулювання ряду технологічних параметрів. Виходячи з аналізу ТП, ключовими параметрами контролю є температура теплоносія на вході та виході котла, а також зовнішнього повітря, тиск у системі, а також режими роботи пальника і циркуляційного насоса, що безпосередньо впливають на стабільність і ефективність теплогенерації

Температура теплоносія на вході та виході котла є основним показником ефективності теплообміну. АСКК повинна автоматично вмикати пальник, якщо температура падає нижче мінімально заданої межі, та вимикати його при досягненні максимально допустимого значення для запобігання перегріву обладнання.

Контроль тиску у циркуляційному та рециркуляційному насосах є важливим для забезпечення стабільного руху теплоносія та запобігання кавітації або поривам трубопроводів. Використання аналогових сенсорів тиску дозволяє системі оперативно реагувати на гідравлічні удари або падіння тиску в системі.

Моніторинг показників температури внутрішнього та зовнішнього повітря необхідний для реалізації алгоритмів погодозалежного керування, що дозволяє оптимізувати витрати газу залежно від реальних потреб будівлі у теплі.

З точки зору ТАК ТП роботи ПГК можна розглядати як ОК, для якого характерні вхідні, вихідні, керуючі та збурюючі впливи.

До вхідних параметрів належать витрата палива та повітря, що подаються до пальникового пристрою, а також температура зворотного теплоносія. До вихідних параметрів відносяться температура теплоносія на виході котла та тиск у системі, які характеризують ефективність функціонування котлоагрегату. Збурюючими впливами виступають зміни температури зовнішнього середовища, коливання навантаження теплової мережі, а також нестабільність параметрів палива. Керуючими впливами є сигнали, що формуються системою автоматизації для зміни режимів роботи пальника та циркуляційного насоса з метою підтримання заданих значень параметрів.

В таблиці 1.1 наведено основні параметри та їх роль в ТП.

Таблиця 1.1 – Параметри роботи ПГК

Тип	Параметр	Фізичний зміст	Роль у системі
Вхідні	Витрата газу	Кількість палива, що подається до пальника	Визначає теплову потужність
	Витрата повітря	Кількість повітря для горіння	Забезпечує повноту згоряння
	Температура зворотної води	Температура теплоносія на вході	Впливає на тепловий баланс
Керуючі	Подача газу (регулювання пальника)	Зміна інтенсивності горіння	Основний канал керування температурою
	Режим роботи насоса	Регулювання циркуляції води	Впливає на стабільність системи
Вихідні	Температура води на виході	Основний контрольований параметр	Характеризує ефективність нагріву
	Тиск у системі	Гідравлічний стан системи	Показник безпечної роботи
Збурюючі	Температура зовнішнього повітря	Вплив навколишнього середовища	Змінює теплове навантаження
	Теплове навантаження	Споживання тепла системою	Викликає зміну режимів роботи
	Коливання параметрів газу	Зміна складу/тиску палива	Впливає на процес горіння

Контроль і керування зазначеними параметрами є необхідною умовою безпечної експлуатації [12] та реалізується за допомогою автоматизованих систем, що забезпечують стабільну та енергоефективну роботу ПГК.

1.3 Аналіз автоматизованих систем керування промисловим котельним обладнанням

Системи автоматизації ПГК призначені для керування роботою котлоагрегатів та забезпечення стабільного та безпечного протікання ТП шляхом підтримання заданих технологічних параметрів. Основними функціями таких систем є безперервний моніторинг температури та тиску теплоносія, керування подачею палива та повітря, регулювання роботи насосного обладнання, а також реалізація аварійного захисту.

На рисунку 1.10 наведено функціональну схему АСКК промисловим котлом, яка включає основні контури регулювання ТП. Зокрема, реалізовано контури керування тиском пари, рівнем води в барабані, подачею палива та повітря, а також контроль складу димових газів [15].

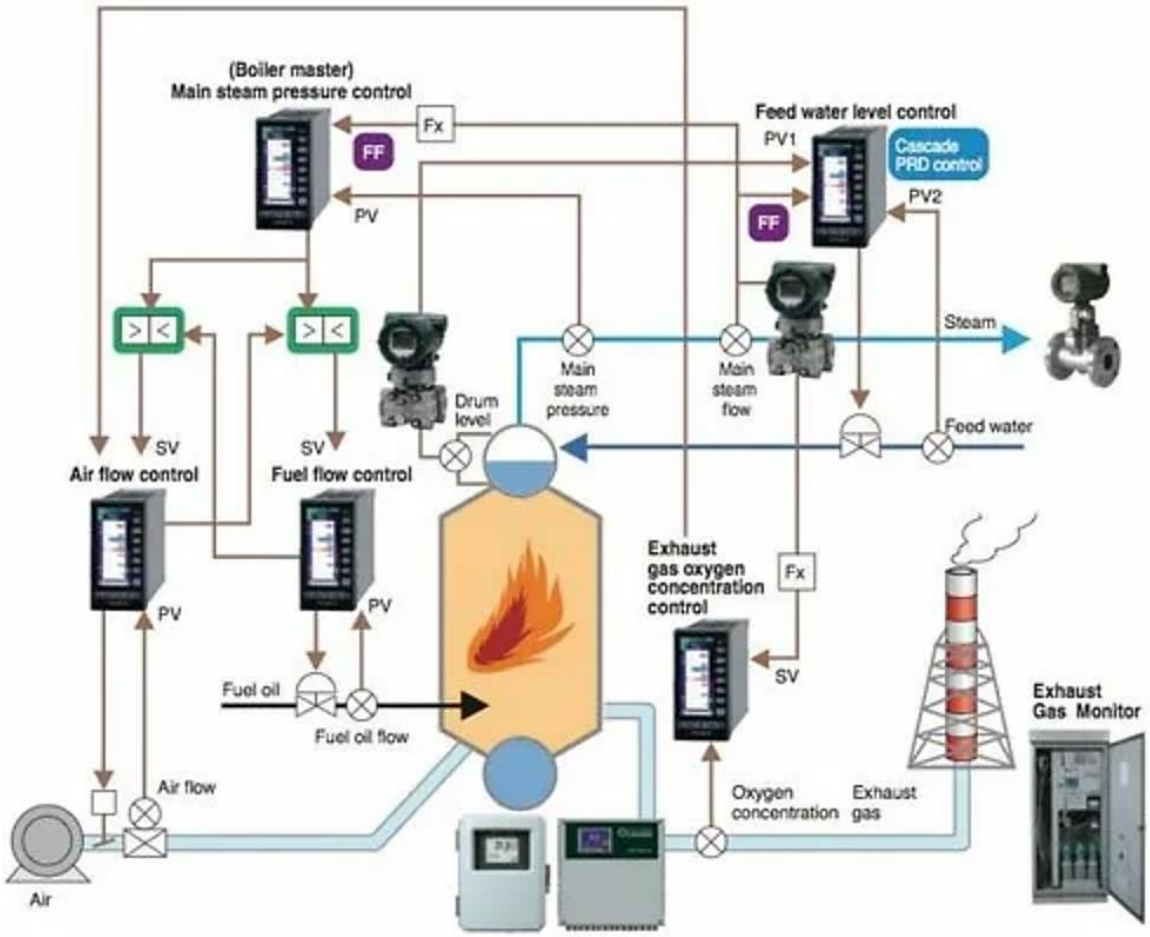


Рисунок 1.10 – Функціональна схема АСКК промисловим котельним обладнанням

Сигнали від датчиків (PV) надходять до регуляторів, які формують керуючі впливи на виконавчі механізми (SV), забезпечуючи підтримання заданих параметрів роботи котла. Така структура дозволяє реалізувати багатоконтурне автоматичне керування та забезпечити стабільність і безпечність технологічного процесу.

Сучасні АСКК будуються на базі мікропроцесорних пристроїв, програмованих логічних контролерів (ПЛК) та спеціалізованих регуляторів, що дозволяє реалізувати складні алгоритми керування. Використання таких систем забезпечує підвищення ефективності роботи котельних установок, зниження витрат палива та підвищення рівня безпеки експлуатації [16-20].

Одним із поширених підходів є використання систем керування на базі ПЛК, зокрема рішень компанії Siemens, які забезпечують комплексне керування котельними установками, включаючи регулювання температури, тиску та взаємодію з системами верхнього рівня (SCADA). Такі системи дозволяють реалізувати гнучке програмне керування та інтеграцію в промислові мережі .

Широко застосовуються також системи автоматизації компанії Honeywell, які включають контролери, датчики та виконавчі механізми для управління процесами горіння та теплообміну. Зокрема, контролери Honeywell забезпечують керування подачею газу, регулювання тяги, захист обладнання та підтримання оптимальних режимів роботи котлів [17]. Прикладом є регулятор типу Honeywell Smile, який реалізує керування пальником та насосами в системах опалення [18].

Окрім цього, існують локальні автоматизовані системи керування котельнями, що реалізуються на базі мікроконтролерів або вбудованих систем. Вони забезпечують базові функції контролю параметрів та керування обладнанням, а також дозволяють оптимізувати споживання енергоресурсів і підвищити ефективність роботи котельних установок [19].

До переваг сучасних автоматизованих систем керування слід віднести високу точність регулювання параметрів, можливість безперервного моніторингу, підвищення рівня безпеки та зниження впливу людського фактора. Водночас такі системи мають і ряд недоліків, серед яких складність

налаштування, висока вартість впровадження, а також обмежена адаптивність до змінних умов експлуатації.

В таблиці 1.2 наведено порівняльні характеристики існуючиз АСКК котлами [16-20].

Таблиця 1.2 - Порівняльний АСКК котлами

Система	Тип	Переваги	Недоліки
Siemens (ПЛК-рішення для котелень)	ПЛК/SCADA	Висока надійність, гнучкість налаштування, інтеграція з SCADA, підтримка складних алгоритмів	Висока вартість, складність програмування та обслуговування
Honeywell (контролери котлів)	Спеціалізовані контролери	Комплексне керування горінням, висока точність, наявність вбудованих захистів	Висока вартість, обмежена гнучкість у модифікації алгоритмів
Danfoss (регулятори температури та тиску)	Регулятори	Простота впровадження, енергоефективність, надійність	Обмежений функціонал, локальне керування без глибокої інтеграції
Локальні мікроконтролерні системи	Вбудовані системи	Низька вартість, можливість адаптації під задачу, простота реалізації	Обмежена продуктивність, менша надійність, відсутність стандартизації

Типова АСКК включає ряд функціональних елементів, що забезпечують реалізацію процесів вимірювання, керування та захисту. До їх складу входять технологічні вузли і КВПіА, що виконують різні функції у процесі керування.

Основні компоненти АСКК та їх роль у процесі автоматизації наведено у таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Компоненти системи автоматизації ПГК.

Компонент	Тип елемента	Функція	Роль у системі
Газовий клапан	ВМ	Регулювання подачі газу	Основний канал керування тепловою потужністю
Камера згоряння	ОК	Процес горіння	Основний теплотехнічний процес
Теплообмінник	ОК	Передача тепла	Формує температуру теплоносія
Регулюючий клапан теплоносія	ВМ	Регулювання витрати води	Впливає на тепловий режим
Циркуляційний насос	ВМ	Забезпечення циркуляції	Стабілізує тепловий режим системи
Блок керування	Блок керування	Обробка сигналів та керування	Формує керуючі впливи
Датчик температури	Сенсор	Вимірювання температури	Основний канал контролю
Датчик тиску	Сенсор	Вимірювання тиску	Контроль та захист системи
Запобіжний клапан	Захисний елемент	Скидання надлишкового тиску	Забезпечує безпеку
Система димовидалення	ВМ	Відведення продуктів згоряння	Впливає на процес горіння

Аналіз існуючих АСКК показує, що, незважаючи на їх високу ефективність, існує потреба у розробці більш гнучких та оптимізованих рішень, орієнтованих на конкретні умови експлуатації ПГК.

1.4 Постановка задачі та формулювання вимог до проєктованої системи

На основі проведеного аналізу ТП роботи ПГК встановлено, що ефективність і безпечність функціонування котельних установок значною мірою залежать від точності контролю та своєчасності регулювання основних технологічних параметрів. Разом з тим, сучасні системи автоматизації характеризуються високою вартістю, складністю реалізації та обмеженою адаптивністю до конкретних умов експлуатації.

У зв’язку з цим постає задача розробки аАСКК параметрами ПГК, яка дозволить забезпечити ефективне функціонування обладнання при мінімальних витратах ресурсів та високому рівні надійності.

Виходячи з особливостей ОК та результатів аналізу, до проєктованої системи висуваються наступні вимоги:

- забезпечення безперервного моніторингу температури та тиску з достатньою точністю;
- стабільне підтримання заданих температурних режимів;
- наявність захисту від аварійних режимів (перегрів, перевищення тиску, відмова датчиків);
- висока надійність і відмовостійкість системи;
- простота реалізації та налаштування;
- можливість розширення та модернізації;
- мінімізація вартості реалізації при збереженні необхідної функціональності.

Також у проєктованій системі має бути передбачений контроль стану функціонування сенсорів та ВМ. Для забезпечення високого рівня надійності необхідно здійснювати контроль цілісності каналів зв’язку з датчиками, а також реалізувати механізми виявлення та сигналізації помилок у разі втрати або

некоректності вимірювальних даних.

Важливою складовою роботи АСКК є забезпечення часової синхронізації процесів керування та реєстрації даних. Оскільки ТП має безперервний та квазіциклічний характер, необхідно забезпечити прив’язку подій до реального часу для фіксації режимів роботи, аналізу ефективності та реєстрації аварійних ситуацій.

Регулювання технологічних параметрів здійснюється шляхом впливу на ВМ, зокрема електромагнітні газові клапани та насосне обладнання, через відповідні блоки керування. Реалізація автоматизованого керування дозволяє мінімізувати вплив людського фактора, забезпечити стабільність теплопостачання та підвищити надійність і довговічність котельного обладнання.

2. ПРОЄКТУВАННЯ СТРУКТУРИ ТА ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ КОМПОНЕНТІВ ПРОЄКТОВАНОЇ СИСТЕМИ

2.1 Розробка структурної схеми

Розробка структурної схеми АСКК водогрійним ПГК є одним із етапів проєктування системи, що дозволяє визначити склад основних функціональних блоків, їх взаємозв'язки та принципи обміну інформацією між ними.

На рисунку 2.1 наведено розроблену структурну схему проєктованої системи.

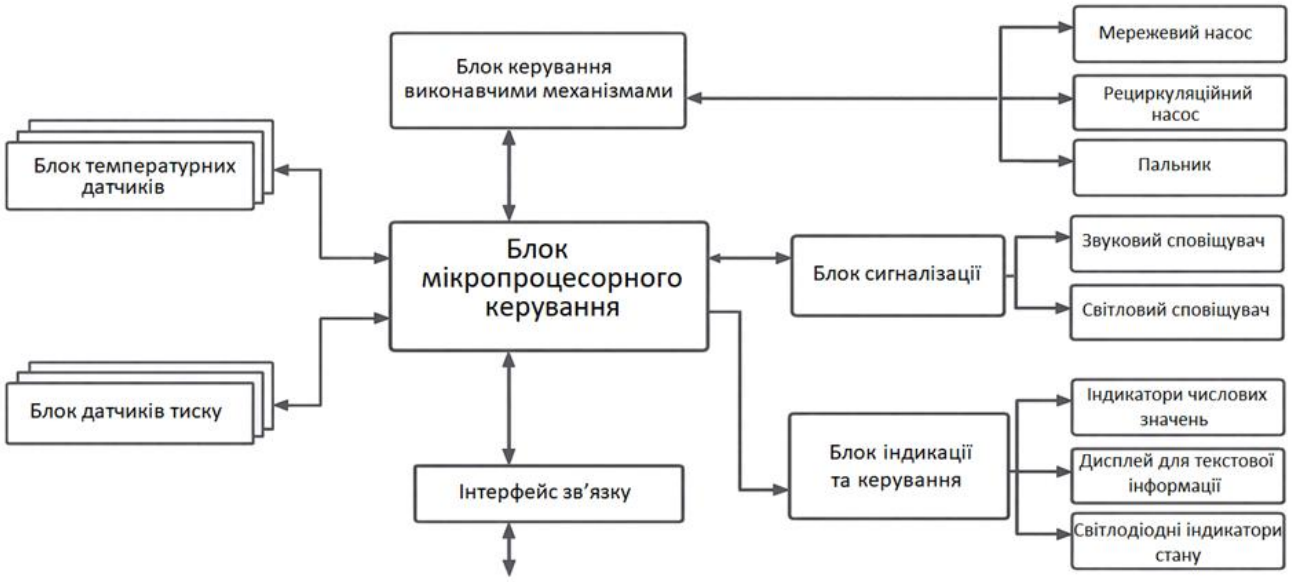


Рисунок 2.1 – Структурна схема АСКК

Структура АСКК реалізована за ієрархічним принципом і включає наступні основні функціональні блоки:

- блок мікропроцесорного керування (БМК) - центральний обчислювальний модуль;
- блок температурних датчиків (БТД) - первинні перетворювачі теплових параметрів;
- блок датчиків тиску (БДТ) - вузол контролю гідравлічних параметрів;

- блок керування виконавчими механізмами (БКВМ) - силова частина системи;
- блок індикації та візуалізації - інтерфейс користувача;
- блок сигналізації - підсистема оповіщення про аварійні стани;
- інтерфейс зв’язку - вузол передачі даних на верхній рівень керування та комунікації із зовнішніми пристроями;
- блок ВМ - об'єкти безпосереднього впливу на ТП.

Центральним елементом системи є БМК, який виконує функції збору, цифрової обробки та аналізу інформації, а також формує керуючі сигнали для виконавчих пристроїв. Він є ядром АСКК та забезпечує реалізацію алгоритму функціонування ПГК в реальному масштабі часу. До основних функцій БМК належать:

- циклічне опитування сенсорів БТД та БДТ;
- обробку виміряної інформації;
- порівняння виміряних параметрів із заданими технологічними уставками;
- формування керуючих сигналів;
- управління ВМ через релейні ключі та гальванічну розв'язку;
- взаємодію з інтерфейсом користувача та системою сигналізації;
- збереження параметрів у енергонезалежній пам’яті.

БТД призначений для моніторингу та контролю теплового температурних параметрів ОК. До його складу входять входять КВПіА, що вимірюють:

- температуру води на вході котла;
- температуру води на виході;
- температуру навколишнього середовища.

Отримані дані від БТД надходять до БМК через послідовні інтерфейси, що мінімізує кількість з'єднувальних ліній у структурі. Це забезпечує оперативне оновлення інформації про стан ОК, на основі якої БМК формує відповідні команди керування для БКВМ.

БДТ призначений для контролю гідравлічних параметрів ПГК. Він реалізує вимірювання тиску у циркуляційних та рециркуляційних контурах.

Аналогові сигнали від сенсорів перетворюються у цифрову форму через АЦП мікропроцесора, що дозволяє системі миттєво реагувати на критичні зміни гідравлічного опору.

БКВМ реалізований на основі релейних модулів бо силових ключів. Він забезпечує безпосереднє управління:

- газовим пальником (ввімкнення/вимкнення горіння);
- мережевим насосом;
- рециркуляційним насосом;
- додатковими пристроями (за необхідності).

Ці елементи безпосередньо впливають на ТП та забезпечують підтримання необхідних режимів роботи ПГК. БМК формує сигнали керування, які через силові ключі активують відповідні ВМ.

Блок індикації призначений для відображення поточних значень параметрів і стану системи. Він включає індикатори для відображення числових значень температури та тиску, дисплей для текстової інформації та світлодіодні індикатори стану, наприклад, котел увімкнений, аварія, тощо. Це забезпечує зручну взаємодію оператора з системою та оперативний контроль її роботи.

Для підвищення безпеки експлуатації ПГК передбачена звукова та світлова сигналізація. Вона активується у випадках перевищення допустимих значень температури або тиску, відмови сенсорів чи виникнення аварійних режимів. Сигналізація дозволяє своєчасно реагувати на нештатні ситуації.

Для інтеграції системи з зовнішніми пристроями використовується інтерфейс зв’язку, наприклад, RS-485, що забезпечує:

- передачу даних на персональний комп’ютер;
- налаштування параметрів системи;
- діагностику та оновлення програмного забезпечення.

Розроблена структурна схема АСКК ПГК забезпечує комплексну автоматизацію ТП, включаючи вимірювання, обробку, регулювання та індикацію параметрів. Використання мікропроцесорного підходу дозволяє реалізувати гнучкі алгоритми керування, підвищити надійність системи та забезпечити її адаптивність до змінних умов експлуатації.

2.2 Обґрунтування вибору компонентів системи

Вибір контрольно-вимірювальних приладів і автоматики (КВПіА) для проєктованої АСКК здійснюється з урахуванням технологічних особливостей об’єкта, вимог до точності вимірювань, надійності функціонування та умов експлуатації.

У якості центрального елемента системи МБК обрано мікроконтролер типу DSP56800E, що зумовлено необхідністю забезпечення обробки сигналів у реальному масштабі часу, підтримки аналогових і цифрових інтерфейсів, а також достатньої обчислювальної потужності для реалізації алгоритмів автоматичного керування. Даний мікроконтролер має розвинену архітектуру, що поєднує функції цифрової обробки сигналів і класичного мікроконтролера, що дозволяє ефективно обробляти вимірювальні дані та формувати керуючі сигнали. В його основі знаходиться обчислювальне ядро DSC Core, яке забезпечує виконання арифметичних і логічних операцій, а також обробку сигналів у реальному часу [21].

Архітектура (рисунок 2.2) побудована за принципом Harvard, що передбачає розділення пам’яті програм (Program Memory) та даних (Data Memory), що дозволяє здійснювати паралельний доступ до них і підвищує швидкодію системи.

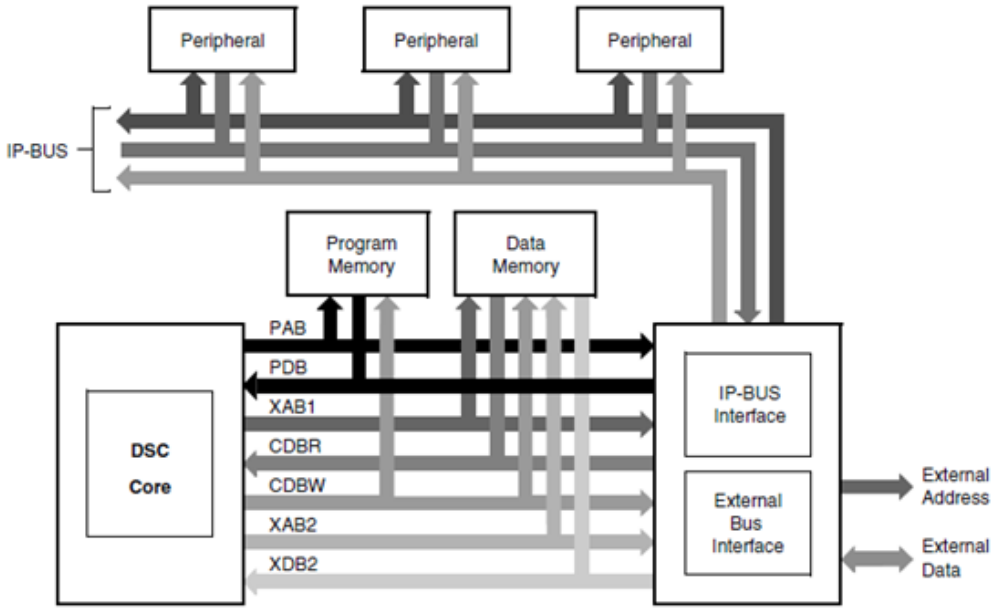


Рисунок 2.2 - Схема архітектури мікроконтролера сімейства DSP56800E

Обмін даними між функціональними блоками здійснюється через систему внутрішніх шин, шини адрес і даних програм (PAB, PDB), а також шини даних (XAB, XDB, CDBR, CDBW), що забезпечує високу швидкість обміну інформації та можливість виконання кількох одночасних операцій. Взаємодія з периферією пристроями реалізується через інтерфейс IP-BUS, який забезпечує підключення модулів вводу/виводу та інших функціональних блоків.

Наявність вбудованого АЦП забезпечує можливість безпосереднього підключення аналогових датчиків тиску, що спрощує схемотехнічну реалізацію АСКК. Мікроконтролер оснащений достатньою кількістю портів вводу/виводу (P1.0-P1.7, P3.x), що дозволяє реалізувати підключення КВПіА, блоку індикації та органів керування без використання додаткових розширювачів.

Наявність апаратних інтерфейсів обміну даними забезпечує можливість підключення зовнішніх пристроїв через відповідні інтерфейси та організації зв'язку з використанням промислових протоколів. Крім того, передбачено можливість підключення зовнішньої пам'яті через відповідний інтерфейс, що розширює функціональні можливості системи.

Використання кварцового генератора забезпечує стабільність тактової частоти та синхронізацію роботи всіх функціональних блоків системи. Крім того, пристрій характеризується низьким енергоспоживанням і високою надійністю, що є важливим для безперервної роботи в умовах промислової експлуатації.

Оскільки процес роботи ПГК пов'язаний із контролем температурних і тискових параметрів, основна увага приділяється вибору відповідних датчиків, які забезпечують достовірність і оперативність отримання інформації.

Для вимірювання температури теплоносія в системі обрано цифрові давачі типу DS18B20 (рисунок 2.3), що зумовлено їх високою точністю, достатнім діапазоном вимірювання та простотою інтеграції в мікропроцесорні системи.

Даний датчик забезпечує вимірювання температури в широкому діапазоні абезпечує вимірювання температури у широкому діапазоні від –55 °C до +125 °C при цьому в робочому діапазоні похибка не перевищує 0,5 градуса, що повністю відповідає вимогам до систем теплопостачання.

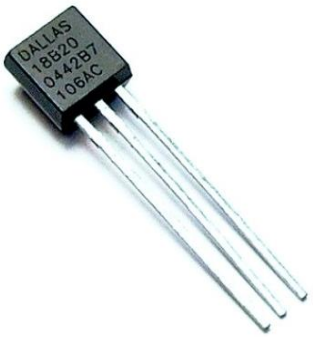


Рисунок 2.3 – Цифровий температурний датчик DS18B20

Наявність однопровідного інтерфейсу 1-Wire дозволяє підключати декілька датчиків до однієї лінії зв’язку, що зменшує кількість з’єднувальних провідників і підвищує надійність системи. Крім того, вбудована можливість цифрової обробки сигналу усуває необхідність використання зовнішніх АЦП, що знижує складність і вартість пристрою [22].

Додатковою перевагою давача DS18B20 є можливість програмного вибору роздільної здатності перетворення в межах від 9 до 12 біт, що забезпечує точність вимірювання до 0,0625 °C. Кожен сенсор має унікальний 64-бітний серійний код, що дозволяє організувати роботу декількох давачів на одній інформаційній лінії без конфліктів адресації. Крім того, давач підтримує режим паразитного живлення, що спрощує схемотехнічну реалізацію та зменшує кількість з’єднувальних провідників. Низьке енергоспоживання сенсора робить його ефективним для використання у вбудованих системах автоматизації.

Для контролю параметрів зовнішнього середовища використано цифровий давач температури та вологості типу DHT22 (рисунок 2.4), який характеризується розширеним діапазоном вимірювання температури від –40 °C до +125 °C та підвищеною точністю вимірювання [22].

Рисунок 2.4 – Датчик температури та вологості DHT22

Наявність цифрового виходу значно спрощує підключення до БМК та зменшує вплив перешкод на результати вимірювання. Простота реалізації, достатня точність і низька вартість роблять даний сенсор доцільним для використання в системі керування ПГК.

Контроль тиску в АСКК здійснюється за допомогою датчиків серії Honeywell HSC (рисунок 2.5), які характеризуються високою точністю, стабільністю та швидкодією [23].

Рисунок 2.5 – Датчик тиску

Вони дозволяють вимірювати абсолютний, диференціальний та надлишковий тиск у відповідних діапазонах, що відповідають умовам роботи котельного обладнання. Використання таких датчиків тиску обумовлено високою точністю вимірювання 0…±5; 0…10; 0…±10 д.вод.ст. та стабільністю характеристик у широкому діапазоні робочих умов. Датчики мають 12-бітний цифровий вихід із використанням інтерфейсу I2C та оснащені вбудованими схемами температурної компенсації і калібрування, що забезпечує високу точність вимірювання без необхідності додаткової обробки сигналу. Час відгуку близько 8 мс дозволяє оперативно реагувати на зміни параметрів системи. Використання цифрових сенсорів тиску дозволяє підвищити завадостійкість системи та спростити її електричну схему.

Для відображення інформації про стан системи використано комбіновану систему індикації, що включає семисегментні індикатори та рідиннокристалічний дисплей типу LCD1602A (рисунок 2.6) [24].

Семисегментні індикатори забезпечують швидке та наочне відображення числових значень температури та тиску, тоді як рідиннокристалічний дисплей дозволяє виводити текстову інформацію, повідомлення про стан системи та

реалізовувати діалоговий режим взаємодії з оператором. Такий підхід дозволяє поєднати простоту сприйняття інформації з розширеними функціональними можливостями системи керування.

Рисунок 2.6 - Дисплей LCD1602A

Для підвищення рівня безпеки передбачено використання світлової та звукової сигналізації, яка забезпечує своєчасне інформування оператора про виникнення аварійних ситуацій або відхилення параметрів від заданих значень. Застосування звукових сигналів дозволяє привернути увагу обслуговуючого персоналу навіть у випадку відсутності візуального контролю за системою, що підвищує рівень безпеки експлуатації ПГК.

Як ВМ використано електромагнітні реле, за допомогою яких здійснюється керування пальником, мережевим та рециркуляційним насосами. Використання релейних елементів обумовлене необхідністю забезпечення електричної розв’язки між БМК та силовими колами, а також можливістю комутації навантажень значної потужності. Надійність, простота конструкції та довговічність реле роблять їх доцільними для застосування у промислових системах автоматизації.

Для організації обміну даними між системою керування та зовнішніми пристроями обрано інтерфейс RS-485, який широко застосовується в промислових умовах. Його використання обумовлено високою завадостійкістю, можливістю передачі сигналів зі швидкістю до 2,5 Мбіт/с на відстані до 1 км, підключення до 32 пристроїв та підтримкою багатовузлової мережевої структури. Це дозволяє інтегрувати систему керування котлом у загальну

систему диспетчеризації та здійснювати віддалений моніторинг і налаштування.

Обрані КВПіА відповідають вимогам до систем керування ПГК. Вони забезпечують необхідну точність вимірювань, надійність роботи, стійкість до зовнішніх впливів та ефективну взаємодію з мікропроцесорною системою, що дозволяє реалізувати оптимальні алгоритми керування та підвищити ефективність роботи котельної установки.

2.3 Розробка електричної принципової схеми

Електрична принципова схема АСКК ПГК розроблена на основі структурної схеми та обраних КВПіА. Вона визначає спосіб електричного з’єднання всіх функціональних блоків системи, забезпечує їх узгоджену роботу та реалізацію алгоритмів автоматичного керування ТП.

Основний принцип роботи полягає у безперервному зчитуванні інформації з давачів, її обробці та формуванні керуючих сигналів для ВМ. АСКК працює в реальному масштабі часу, забезпечуючи підтримання заданих параметрів роботи ПГК та реагування на відхилення від них.

2.3.1 Блок контролю температури

У АСКК використано цифрові датчики температури, які підключаються до МБК за допомогою послідовної шини. Передача даних реалізується у два етапи:

- ініціалізація та передача керуючих команд;
- зчитування результатів вимірювання температури.

БТД забезпечує вимірювання температури води на вході та виході котла, а також температури повітря зовнішні. Особливістю є можливість роботи в режимі термостатування за рахунок використання порогових регістрів TH, TL, що дозволяє формувати сигнали перевищення або зниження температури.

На рисунку 2.7 наведено схему підключення температурних датчиів Term1 - Term3 з виходами DQ, CLK, RST що використовуються для організації обміну даними з мікропроцесором.

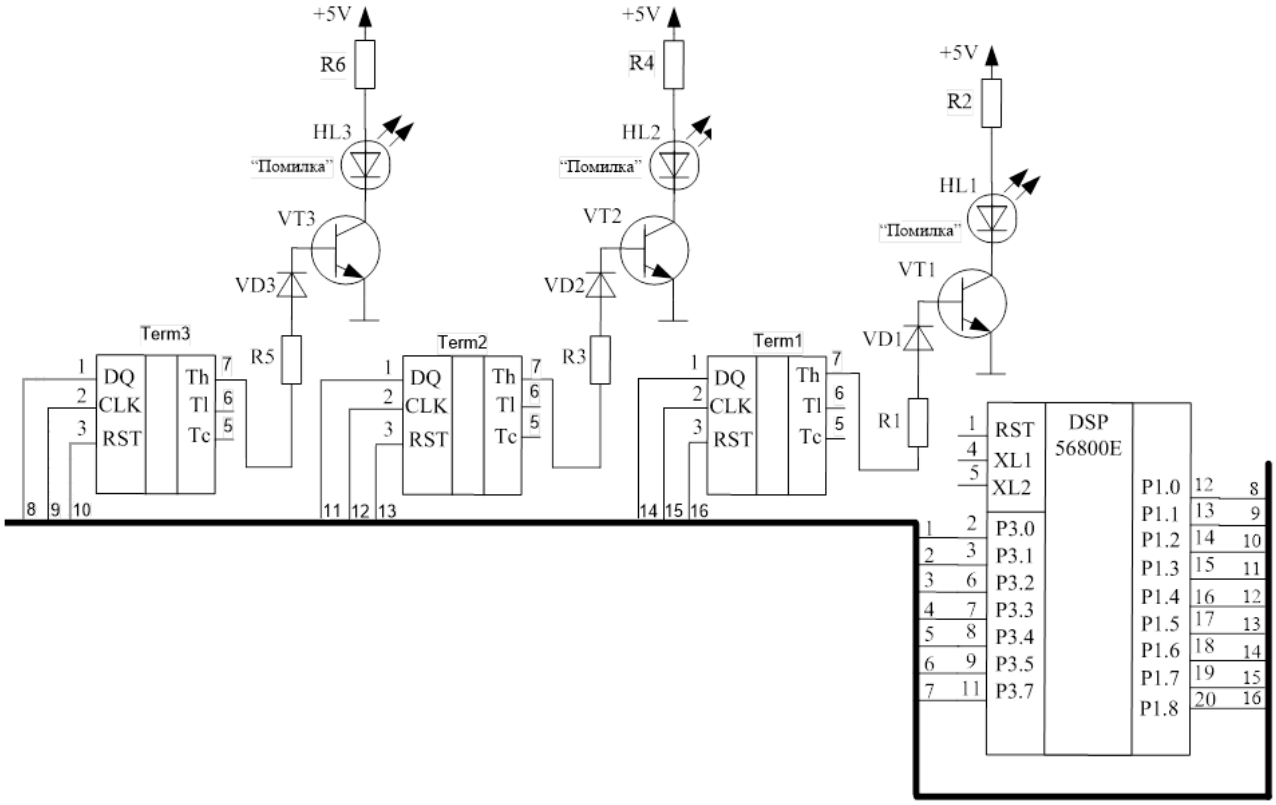


Рисунок 2.7 – Схема підключення температурних датчиків

Цифрові давачі температури DS18B20 підключаються до МБК за допомогою однопровідного інтерфейсу. Такий підхід дозволяє використовувати спільну інформаційну лінію для декількох сенсорів, що спрощує електричну схему та зменшує кількість з’єднань.

Передача даних реалізується шляхом послідовного обміну командами та результатами вимірювання. МБК ініціює процес вимірювання, після чого зчитує значення температури з внутрішніх регістрів сенсора. Завдяки цифровому формату сигналу забезпечується висока завадостійкість та точність передачі інформації.

У схемі також передбачено підключення світлодіодних індикаторів аварійного стану HL1–HL3, які активуються при перевищенні допустимого температурного порогу. Керування індикаторами здійснюється через транзисторні ключі VT1–VT3, що дозволяє узгодити рівні сигналів мікропроцесора з параметрами світлодіодів. Для обмеження струму світлодіодів використовуються резистори R2, R4, R6, а резистори R1, R3, R5 забезпечують формування керуючих сигналів у базових колах транзисторів. Додатково у схемі

застосовано захисні діоди VD1–VD3, які запобігають впливу зворотних струмів і підвищують надійність роботи елементів.

2.3.2 Блок контролю тиску

БДТ реалізується за допомогою аналогових датчиків тиску, які підключаються до входів АЦП мікропроцесора. Сигнал від кожного датчика проходить проходить багатоступеневу обробку, яка включає наступні етапи:

- мультиплексування (AMUX) - вибір каналу вимірювання;
- буферизація (IBUF) - узгодження імпедансів;
- підсилення (APGA) - масштабування сигналу за допомогою підсилювача з програмованим коефіцієнтом;
- квантування сигналу - АЦП;
- цифрова фільтрація - усунення шумів та завад для підвищення точності.

На рисунку 2.8 наведено схему підключення датчиків DD5 та DD6 типу ASDXDO, які мають виходи Vsup (1) призначений для підключення джерела живлення, GND (3) - для підключення до загальної шини (землі) та Vout (2) для формування вихідного аналогового сигналу, який пропорційний до вимірюваного тиску.

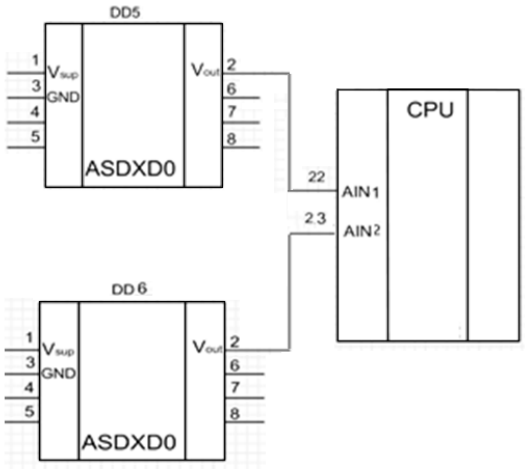


Рисунок 2.8 – Схема підключення датчиків тиску

Аналогові виходи Vout датчиків підключаються відповідно до входів мікропроцесора AIN1 та AIN2, що дозволяє здійснювати паралельний контроль

тиску у двох контурах системи. Залежність вихідної напруги від тиску є лінійною, що спрощує математичну обробку та забезпечує високу точність визначення параметрів. Перетворення виміряної напруги у значення тиску виконується за лінійною залежністю:

$$P = P_{min} + \frac{(V_{out} - V_{min})}{(V_{out} - V_{max})}(P_{max} - V_{min}),$$

де V_{out} - поточна виміряна напруга на виході датчика;

V_{min}, V_{max} - мінімальне та максимальне значення вихідної напруги;

P_{min}, P_{max} - діапазон вимірюваного тиску.

Зазвичай для давачів такого типу вихідна напруга знаходиться в межах приблизно 0,1·Vsup … 0,9·Vsup, що дозволяє уникнути "мертвих зон" біля меж живлення, мінімізувати крайові похибки та підвищити надійність вимірювань.

МБК здійснює зчитування аналогових сигналів через АЦП, після чого виконується обробка отриманих значень та їх порівняння із заданими уставками. Це дозволяє своєчасно виявляти відхилення тиску від допустимих значень та формувати відповідні керуючі сигнали.

Застосування цифрових або умовно-цифрових методів обробки сигналу дозволяє підвищити точність вимірювань і зменшити вплив шумів та перешкод.

2.3.3 Блок керування виконавчими механізмами

Керування ВМ здійснюється за допомогою електромагнітних реле К, які підключаються до МБК через БКВМ та транзисторні ключі (рисунок 2.9).

Сигнали керування надходять із БКВМ на базі транзисторів VT через обмежувальні резистори R, що забезпечують формування необхідного базового струму. Транзистори виконують функцію підсилення струму та забезпечують узгодження рівнів сигналів між МБК і релейними елементами. При подачі керуючого сигналу транзистор відкривається, що призводить до протікання струму через котушку реле К та його спрацювання.

Для захисту транзисторів від перенапруги, що виникає при вимиканні котушки реле, у схемі передбачено використання захисних діодів VD, підключених паралельно до обмоток реле. Ці діоди гасять електрорушійну силу

самоіндукції та підвищують надійність роботи схеми. У колах керування також застосовано додаткові захисні діоди VD у базових ланцюгах транзисторів, які запобігають впливу зворотних струмів і стабілізують роботу ключових елементів.

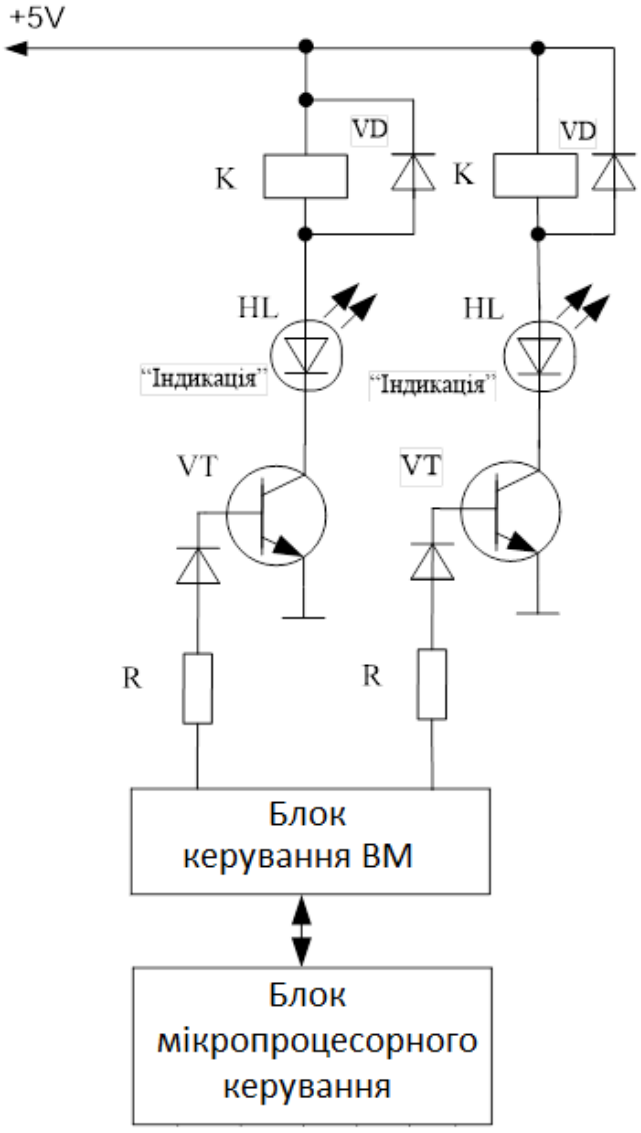


Рисунок 2.9 - Схема підключення ВМ

Для візуального контролю стану ВМ у схемі передбачено світлодіодні індикатори HL, які підключені до кола керування реле. Світлодіоди забезпечують індикацію режиму роботи та сигналізують про ввімкнення відповідного виконавчого пристрою.

Живлення виконавчої частини здійснюється від джерела постійної напруги +5 В, що подається на релейні елементи та індикатори.

Реле забезпечують керування основними ВМ системи, зокрема пальником,

мережевим і рециркуляційним насосами, що дозволяє реалізувати автоматичне регулювання режимів роботи ПГК.

2.3.4 Блок індикації та керування

Для візуалізації параметрів роботи АСКК використано семисегментні індикатори, які підключаються до МБК через спеціалізований драйвер(регістр) RG. На рисунку 2.10 наведено схему підключення блоку індикації, у якій виходи портів мікропроцесора P1.0-P1.7 підключаються до входів драйвера D0-D7. Ці входи призначені для прийому паралельного двійкового коду, що відповідає відображуваному значенню.

Керування роботою драйвера здійснюється за допомогою сигналів STB (стробування) та OE (дозвіл виходу), які формуються мікропроцесором. Сигнал STB забезпечує запис даних у внутрішній регістр драйвера, а сигнал OE дозволяє виведення даних на виходи.

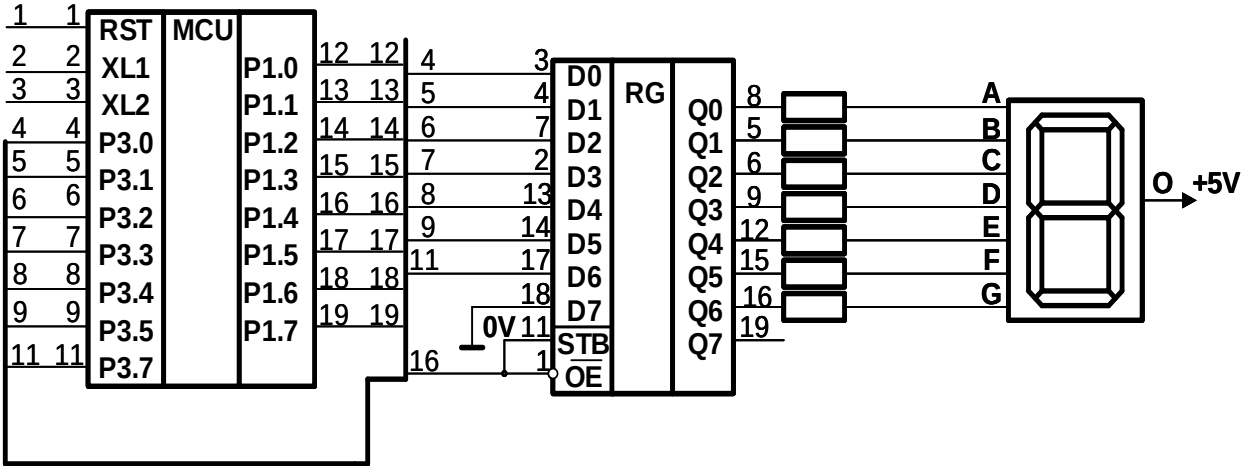


Рисунок 2.10 - Схема підключення індикатора

Виходи драйвера Q0-Q7 підключаються до сегментів індикатора A-G, що дозволяє формувати відповідні символи шляхом керування окремими сегментами індикатора. Таким чином, забезпечується відображення числових значень температури та тиску у зручному для оператора вигляді.

Живлення індикатора здійснюється від джерела постійної напруги +5 В, що забезпечує стабільну роботу елементів індикації.

Дані передаються від МБК до регістра драйвера, який забезпечує їх

фіксацію та безперервне відображення на індикаторі без необхідності постійного оновлення сигналів з боку МБК, що дозволяє зменшити навантаження на мікропроцесор та підвищити ефективність роботи АСКК.

Для розширення можливостей відображення інформації у системі також використано РК-дисплей, який підключається до мікропроцесора через відповідний інтерфейс і дозволяє відображати текстові повідомлення, параметри системи та діалогове меню керування.

Взаємодія оператора з системою реалізується за допомогою кнопок керування «ПУСК» (S1), «СТОП» (S2) та блоку керування меню, що підключаються до мікропроцесорного блоку керування (МБК).

На рисунку 2.11 наведено схему підключення блоку керування, у якій виходи портів мікропроцесора P1.0-P1.7 підключаються до входів шинного формувача BD (D0-D7), який виконує функцію узгодження сигналів та забезпечує коректний обмін даними між МБК та органами керування.

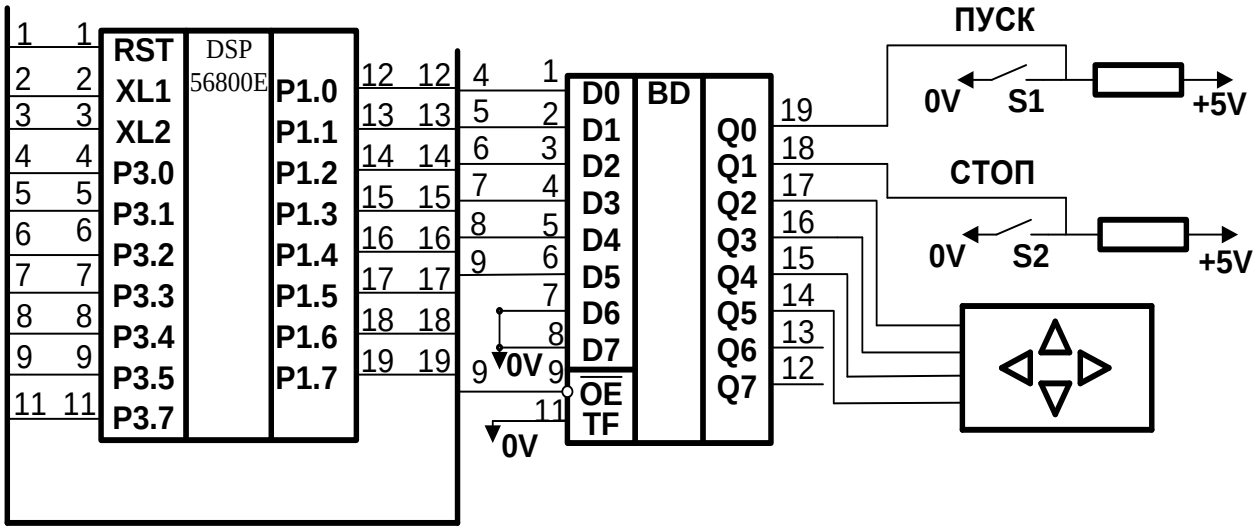


Рисунок 2.11 – Схема підключення блоку кервення АСКК

Керування роботою шинного формувача здійснюється за допомогою сигналів OE (дозвіл виходу) та TF (напрям передачі даних). Це дозволяє організувати передачу інформації від блоку керування до мікропроцесора та забезпечити правильну обробку сигналів.

Виходи Q0-Q7 підключаються до кнопок керування та блоку меню. Кнопки S1 та S2 підключені до джерела живлення +5 В через резистивні

підтягуючі ланцюги, що забезпечують формування стабільного логічного рівня.

У нормальному стані на входах формується логічна «1», а при натисканні кнопки логічний «0», що дозволяє однозначно визначити стан органів керування. Для оптимізації обробки сигналів застосовується шинний формувач, який забезпечує коректний обмін даними між клавіатурою та МБК.

2.3.5 Тактовий генератор та живлення

Для забезпечення стабільної роботи мікропроцесорного блоку керування (МБК) використовується тактовий генератор на основі кварцового резонатора Z1, який підключається до виводів мікропроцесора XL1 (7) та XL2 (6).

На рисунку 2.12 наведено схему підключення кварцового резонатора Z1, який разом із конденсаторами C1 та C2 формує генератор тактових імпульсів. Конденсатори C1 і C2 підключені до загальної шини (землі) та забезпечують стабілізацію генерації, а також необхідні умови запуску та роботи генератора. Використання кварцового резонатора дозволяє отримати стабільну та точну частоту тактового сигналу, що є необхідною умовою синхронізації всіх процесів обробки даних у мікропроцесорі.

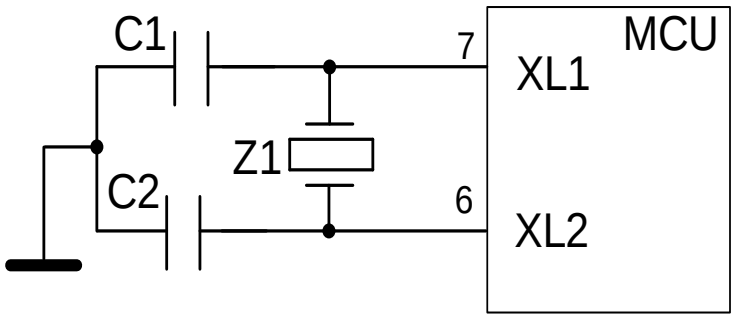


Рисунок 2.12 - Схема підключення кварцового резонатора

Живлення системи здійснюється від стабілізованого джерела постійної напруги +5 В, яке подається через роз’єм X1, де вивід 1 відповідає напрузі живлення, а вивід 2 - загальній шині (0 В).

На рисунку 2.13 наведено схему фільтрації живлення, яка реалізована за допомогою конденсаторів C3-C10, підключених між лініями живлення та заземлення.

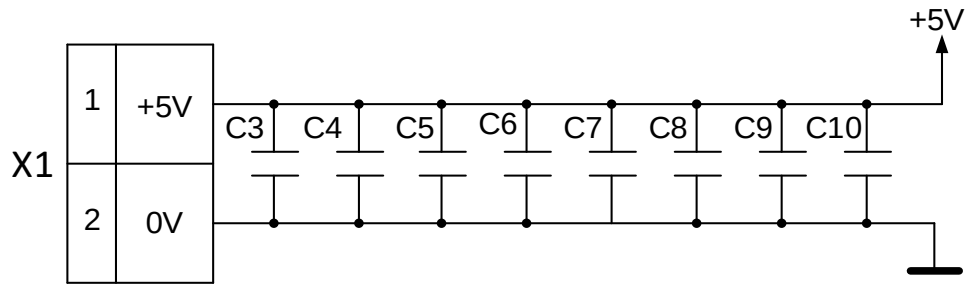


Рисунок 2.13 - Схема фільтрації живлення

Дані конденсатори виконують функцію згладжування пульсацій напруги та пригнічення високочастотних електромагнітних завад, що можуть виникати під час роботи електронних компонентів. Застосування декількох конденсаторів дозволяє забезпечити ефективну фільтрацію в широкому діапазоні частот, що підвищує стабільність роботи мікропроцесора та всієї системи в цілому.

Ввикористання кварцового генератора та системи фільтрації живлення забезпечує надійну, роботу мікропроцесорної системи керування промисловим котлом.

2.3.6 Інтерфейс зв’язку

Обмін даними між АСКК та зовнішніми пристроями реалізовано за допомогою інтерфейсу RS-485. Для цього використовується спеціалізований приймально-передавальний модуль, який забезпечує перетворення рівнів сигналів.

Інтерфейс дозволяє передавати дані на значні відстані з високою завадостійкістю, а також підключати декілька пристроїв до однієї шини. Це дозволяє інтегрувати систему у складні автоматизовані комплекси та здійснювати дистанційний моніторинг і налаштування.

Розроблена електрична принципова схема забезпечує повну реалізацію функціональних можливостей системи керування ПГК. Вона дозволяє здійснювати точне вимірювання параметрів, їх обробку, формування керуючих впливів та взаємодію з оператором, що забезпечує ефективну, надійну, стабільну та безпечну роботу обладнання..

3. СИНТЕЗ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПРОМИСЛОВОГО КОТЛА

3.1 Розробка структурної схеми системи автоматичного керування

У проєктованій АСКК ПГК регулювання параметрів доцільно подати у вигляді структурної схеми системи автоматичного керування (САК), побудованої відповідно до принципів теорії автоматичного керування. Основним регульованим параметром системи є температура теплоносія на виході котла, оскільки саме вона найбільш повно характеризує ефективність процесу теплогенерації та якість роботи котлоагрегату. Додатково в системі здійснюється контроль тиску теплоносія, що виконує функції обмеження, захисту та формування аварійних сигналів.

Узагальнена схема САК (рисунок 3.1) містить:

- $r(t)$ - задана температура теплоносія;
- $W_{\text{Р}}(s)$ - МБК, який реалізує алгоритм обробки виміряних даних, порівняння їх із заданими уставками та формування керуючого сигналу.;
- $W_{\text{ВМ}}(s)$ - блок реле, пальник, мережевий і рециркуляційний насоси;
- $W_{\text{ОК}}(s)$ - ПГК разом із гідравлічною частиною теплового контуру;
- $W_{\text{Д}}(s)$ - температурний датчик;
- $y(t)$ - температура води на виході котла;
- $f(t)$ - збурюючі впливи, температура зовнішнього повітря, температура зворотної води, зміна теплового навантаження, коливання параметрів газу.

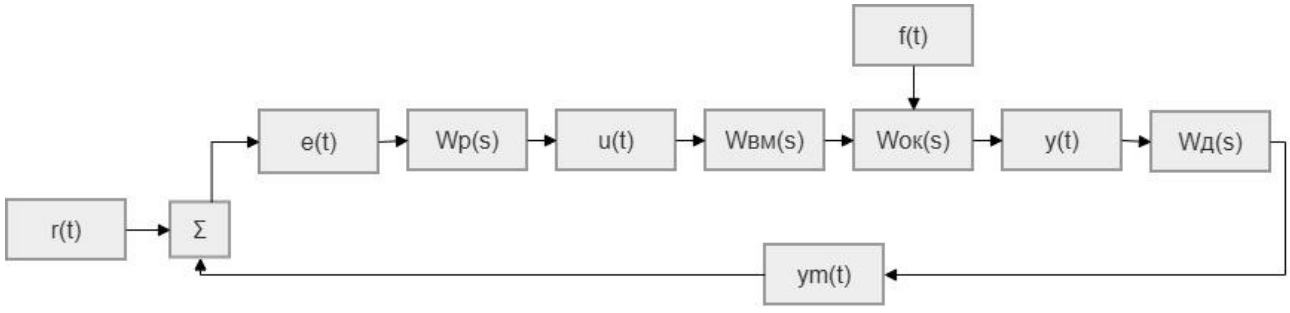


Рисунок 3.1 - Структурна схема САК температури теплоносія на виході ПГК

Узагальнену структуру САК можна подати у вигляді аналітичного запису, що відображає послідовне з'єднання функціональних елементів системи у вигляді передавальних функцій. У такому вигляді система описується як:

$$r(t) \rightarrow \sum \quad \rightarrow W_{\text{р}}(s) \rightarrow W_{\text{вм}}(s) \rightarrow W_{\text{ок}}(s) \rightarrow y(t).$$

Сигнал задавального впливу $r(t)$ надходить на суматор, де порівнюється із сигналом зворотного зв'язку $y_m(t)$, що формується температурним давачем на виході котла. У результаті утворюється сигнал похибки $e(t) = r(t) - y_m(t)$, який подається на регулятор. На основі цієї похибки регулятор формує керуючий вплив $u(t)$, що надходить до ВМ та змінює режим горіння пальника і роботу насосного обладнання. Під дією керуючого сигналу змінюється стан ОК, внаслідок чого формується вихідний параметр $y(t)$ - температура теплоносія на виході котла.

На роботу ОК впливають збурюючі впливи $f(t)$, основними з яких є зміна температури зовнішнього повітря, коливання теплового навантаження, зміна температури зворотної води, а також нестабільність тиску або витрати газу. Наявність від'ємного зворотного зв'язку дозволяє компенсувати вплив цих збурень та підтримувати температуру на заданому рівні.

Контур контролю тиску в системі не є основним каналом регулювання температури, однак виконує важливу захисну та допоміжну функцію. Сигнали від давачів тиску надходять до мікропроцесорного регулятора, де порівнюються з допустимими межами. У разі перевищення або зниження тиску нижче допустимого значення формується коригувальний або аварійний вплив: вмикається сигналізація, змінюється режим роботи насосів або здійснюється блокування пальника. Таким чином, тиск у системі розглядається як параметр обмеження, що впливає на безпечність функціонування котлоагрегату.

Проєктована система є замкненою багатоконтурною системою автоматичного керування з основним контуром регулювання температури та додатковим контуром контролю тиску. Така структура забезпечує стабільність роботи котла, підвищує точність підтримання технологічних параметрів і дозволяє зменшити вплив зовнішніх збурень на процес теплогенерації.

3.2 Синтез регулятора системи автоматичного регулювання

З фізичної точки зору процес нагріву теплоносіяв ПГК характеризується значною тепловою інерційністю, що зумовлено теплоємністю води, масою теплообмінника та затримками теплопередачі. Це дозволяє розглядати ОК як аперіодичну ланку першого порядку.

Математична модель такого ОК може бути представлена у вигляді передавальної функції:

$$W_{\text{ОК}}(s) = \frac{K}{Ts + 1},$$

де K - коефіцієнт підсилення об'єкта, що характеризує зміну температури при зміні керуючого впливу;

T - стала часу об'єкта, яка визначає його інерційність.

Для теплотехнічних об'єктів значення сталої часу є достатньо великим і зазвичай знаходиться в межах 50-200с. Ддля подальших розрахунків приймаємо:

$$T = 100\text{с},$$

$$K = 1.$$

Тоді передавальна функція об'єкта набуває вигляду:

$$W_{\text{ОК}}(s) = \frac{1}{100s + 1}.$$

Отримана модель адекватно описує динамічні властивості системи нагріву та може бути використана для синтезу регулятора і дослідження перехідних процесів.

Синтез регулятора виконується на основі отриманої моделі ОК з метою забезпечення заданих показників якості регулювання, таких як швидкодія, відсутність статичної похибки та стійкість системи до збурюючих впливів.

З урахуванням того, що ОК описується аперіодичною ланкою першого порядку з передавальною функцією доцільним є використання пропорційно-інтегрального (ПІ) регулятора. Такий вибір обумовлений тим, що пропорційний регулятор не забезпечує усунення статичної похибки, а застосування повного ПІД-регулятора для теплових процесів часто є надлишковим через значну

інерційність об’єкта. Інтегральна складова дозволяє повністю усунути статичну похибку, а пропорційна забезпечує необхідну швидкодію системи.

Передавальна функція ПІ-регулятора має вигляд:

$$W_{\text{P}}(s) = K_{\text{P}}\left(1 + \frac{1}{T_{\text{i}}s}\right),$$

де K_{P} - коефіцієнт підсилення регулятора;

T_{i} - інтегральна стала часу.

Для визначення параметрів ПІ-регулятора використаємо спрощений інженерний метод налаштування, що базується на параметрах ОК. Для аперіодичної ланки першого порядку параметри регулятора можуть бути визначені за співвідношеннями:

$$K_{\text{P}} = 0{,}9\frac{T}{K},$$

$$T_{\text{i}} = 3T,$$

де T - стала часу об’єкта;

K - оефіцієнт підсилення об’єкта.

Підставивши значення $T = 100$ с та $K = 1$, отримаємо:

$$K_{\text{P}} = 0{,}9\frac{100}{1} = 0{,}9 \cdot 100 = 90,$$

$$T_{\text{i}} = 3 \cdot 100 = 300\text{с}.$$

Підставивши знайдені параметри у вираз для ПІ-регулятора, отримаємо:

$$W_{\text{P}}(s) = 90\left(1 + \frac{1}{300s}\right),$$

або у розгорнутому вигляді:

$$W_{\text{P}}(s) = 90 + \frac{1}{300s} = 90 + \frac{0{,}3}{s}.$$

Передавальна функція розімкненої системи має вигляд:

$$W_{\text{роз}}(s) = W_{\text{P}}(s) \cdot W_{\text{ОК}}(s).$$

Підставивши отримані значення отримаємо:

$$W_{\text{роз}}(s) = 90 + \frac{0{,}3}{s} \cdot \frac{1}{100s + 1}.$$

Передавальна функція замкненої системи визначається як:

$$W_{\text{зам}}(s) = \frac{W_{\text{роз}}(s)}{1 + W_{\text{роз}}(s)}.$$

Таким чином, у результаті синтезу регулятора отримано ПІ-регулятор із параметрами $K_{\text{Р}} = 90$ та $T_{\text{і}} = 300\text{с}$, який забезпечує відсутність статичної похибки та достатню швидкодію системи. Отримана математична модель замкненої системи може бути використана для подальшого дослідження перехідних процесів та оцінки якості регулювання.

3.3 Дослідження перехідних процесів системи

Дослідження перехідних процесів замкненої САР дозволяють оцінити якість роботи системи в динамічному режимі та підтвердити коректність вибору параметрів регулятора.

Метою дослідження є визначення реакції системи на ступінчастий задавальний вплив, що відповідає зміні заданого значення температури теплоносія. У процесі аналізу оцінюються основні показники якості регулювання, а саме:

- час наростання t_n - час, за який вихідна величина вперше досягає заданого рівня;
- час регулювання t_p - ас, після якого відхилення вихідної величини від усталеного значення не перевищує допустиму межу;
- величина перерегулювання σ - максимальне перевищення усталеного значення у відсотках;
- статична похибка $\varepsilon_{\text{ст}}$ - різниця між заданим і усталеним значеннями.

Для ОК було прийнято математичну модель аперіодичної ланки першого порядку з передавальною функцією та використано ПІ-регулятор. Дослідження перехідного процесу проводилося при подачі на вхід системи одиничного ступінчастого впливу. Отримана перехідна характеристика дозволяє оцінити динамічні властивості системи. Якщо вихідна координата системи плавно досягає усталеного значення без значного перерегулювання, а статична похибка прямує до нуля, то це свідчить про правильність вибору типу і параметрів

регулятора.

Для ПІ-регулятора характерною є відсутність статичної похибки, що пояснюється наявністю інтегральної складової. Саме тому дослідження перехідного процесу дозволяє підтвердити, що синтезований регулятор забезпечує не лише стійкість системи, але й необхідну точність регулювання.

За результатами моделювання побудовано графіки перехідної характеристики, похибки регулювання та, за необхідності, керуючого впливу. На основі цих графіків визначено числові значення показників якості та формується висновок щодо придатності синтезованого регулятора до використання в проєктованій системі.

На рисунку 3.2 наведено перехідну характеристику замкненої САК температури теплоносія при подачі одиничного ступінчастого впливу на вхід системи. По осі абсцис відкладено час t, с, а по осі ординат - нормоване значення вихідної величини $y(t)$, що відповідає температурі теплоносія. Суцільною лінією зображено зміну вихідної величини системи $y(t)$ у часі. Пунктирною лінією позначено усталене значення, до якого прямує система, а також межі допустимого відхилення ±5%, що використовуються для визначення часу регулювання.

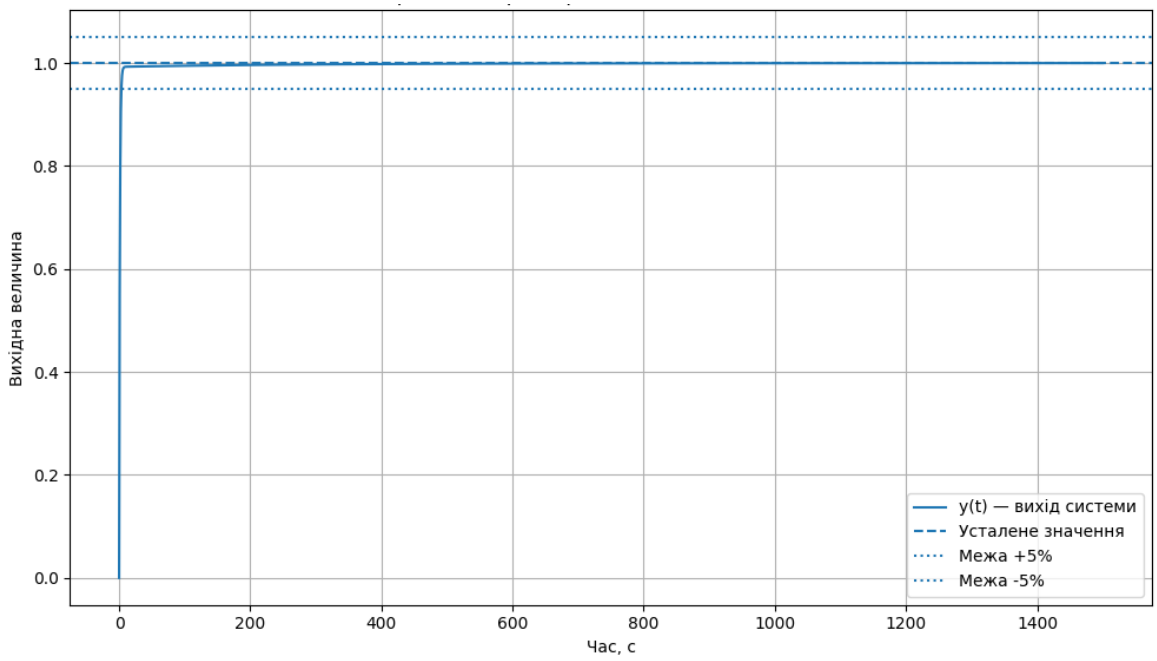


Рисунок 3.2 – Перехідний процес САК температури теплоносія

З графіка видно, що після подачі ступінчастого впливу система швидко реагує на зміну вхідного сигналу та виходить на усталене значення. Перехідний процес має аперіодичний характер, без коливань та значного перерегулювання. Вихідна величина плавно наближається до заданого значення і надалі утримується в межах допустимого відхилення.

Час досягнення усталеного режиму є відносно невеликим, що свідчить про достатню швидкодію системи. Також спостерігається відсутність статичної похибки, оскільки усталене значення вихідної величини співпадає із заданим.

Отримана перехідна характеристика свідчить про те, що замкнена САК з ПІ-регулятором є стійкою та забезпечує якісне регулювання температури теплоносія. Відсутність статичної похибки, незначне або відсутнє перерегулювання та прийнятний час регулювання підтверджують правильність синтезу регулятора та доцільність його використання у проєктованій системі.

На рисунку 3.3 наведено графік похибки регулювання $e(t)$ замкненої САК при подачі одиничного ступінчастого впливу.

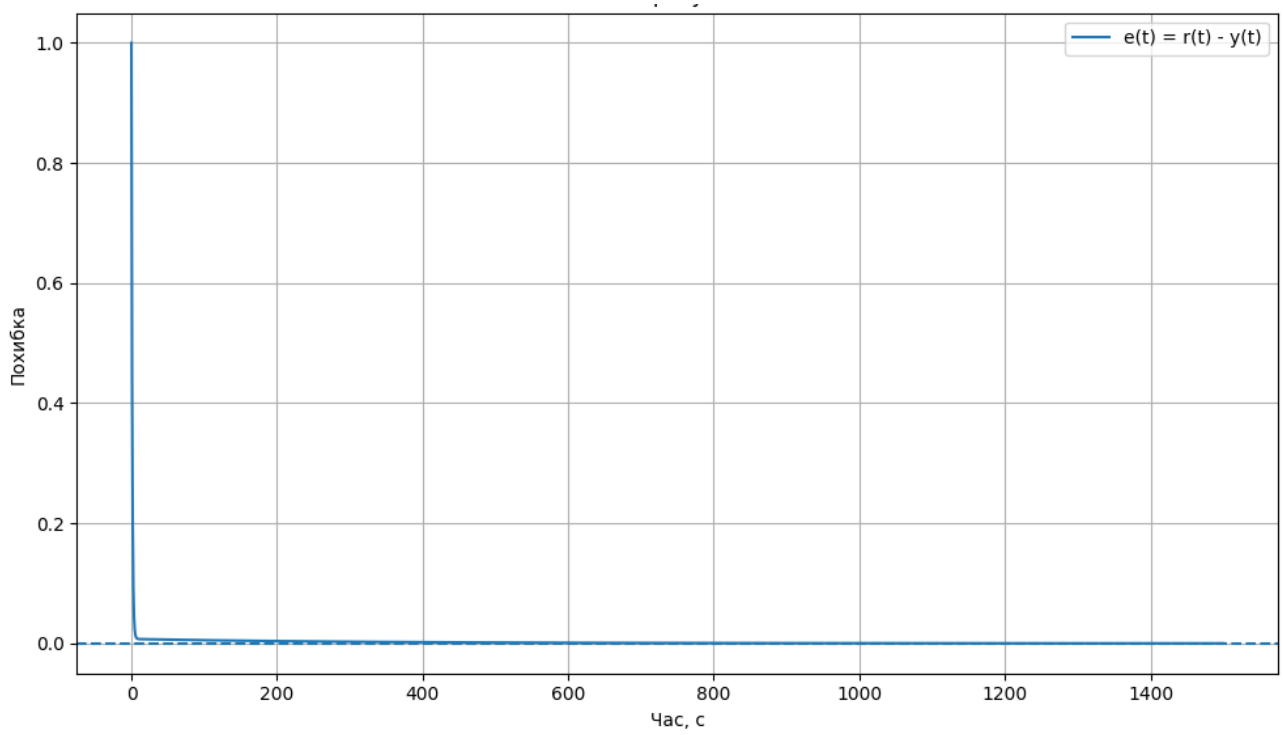


Рисунок 3.3 - Графік похибки регулювання

З графіка видно, що в початковий момент часу похибка має максимальне значення, що відповідає різкій зміні задавального впливу. Після цього похибка

швидко зменшується та прямує до нуля.

Характер зміни похибки є аперіодичним, без коливань і перерегулювання, що свідчить про відсутність коливальних процесів у системі. Через певний проміжок часу похибка стає практично рівною нулю і залишається на цьому рівні.

Аналіз графіка похибки регулювання показує, що система автоматичного керування забезпечує швидке зменшення похибки до нуля без коливань та перерегулювання. Це підтверджує наявність інтегральної складової в регуляторі та відсутність статичної похибки. Таким чином, синтезований ПІ-регулятор забезпечує необхідну точність і стійкість системи, що підтверджує правильність його вибору для проєктованої системи керування.

На рисунку 3.4 наведено графік керуючого впливу $u(t)$, який формується ПІ-регулятором у процесі роботи САК.

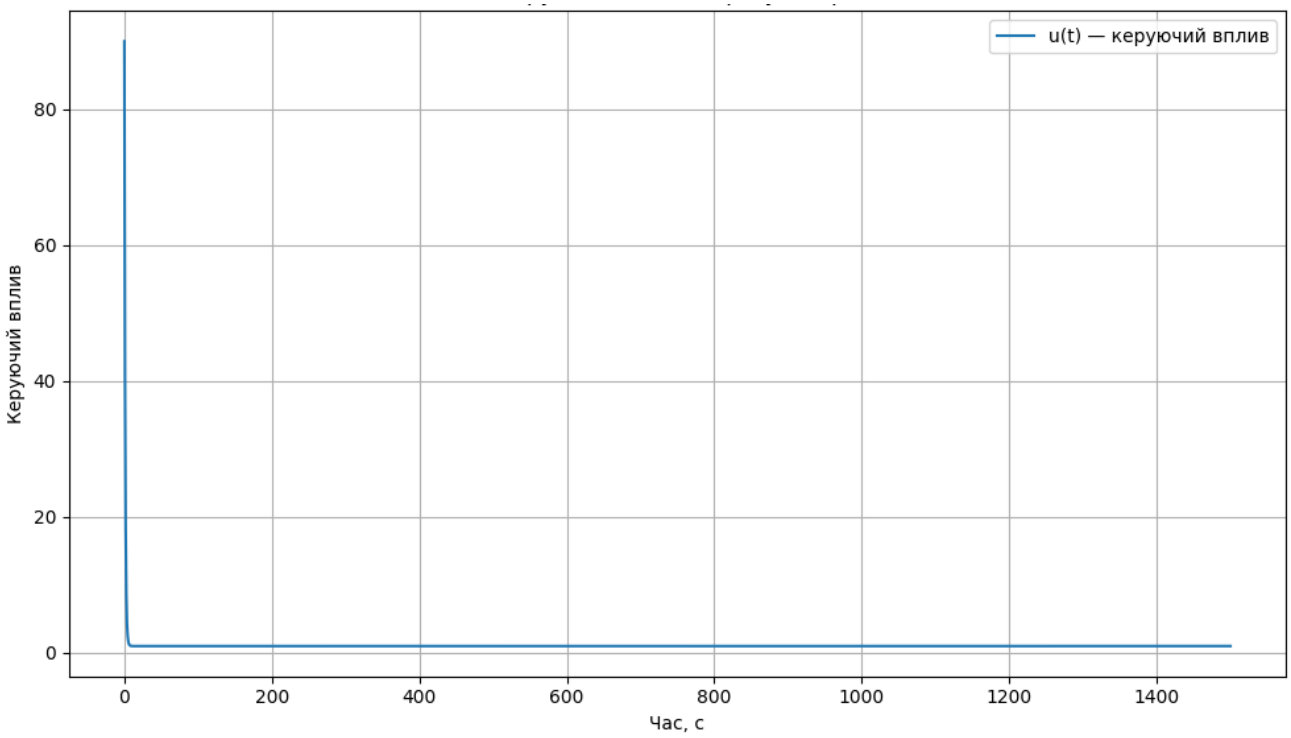


Рисунок 3.4 – Графік керуючого впливу

З графіка видно, що в початковий момент часу керуючий вплив має значне значення. Це пояснюється тим, що у момент подачі ступінчастого сигналу похибка регулювання є максимальною, тому регулятор формує інтенсивний керуючий сигнал для швидкого досягнення заданого режиму.

Надалі керуючий вплив швидко зменшується та переходить у сталий режим, що відповідає підтриманню температури на заданому рівні. Усталене значення керуючого сигналу є відносно невеликим, що свідчить про ефективність системи та відсутність необхідності у значних коригуючих впливах у сталому режимі.

Характер зміни керуючого сигналу є плавним і не містить коливань, що свідчить про стабільну роботу регулятора та відсутність перерегулювання.

Аналіз графіка показує, що регулятор формує інтенсивний сигнал лише на початковому етапі, після чого система переходить у сталий режим із незначним керуючим впливом. Відсутність коливань та різких змін сигналу підтверджує стабільність роботи системи та правильність налаштування параметрів ПІ-регулятора. Отже, синтезований регулятор забезпечує ефективне керування виконавчими механізмами та підтримання заданого температурного режиму.

На рисунку 3.5 наведено імпульсну характеристику $h(t)$ замкненої САК. Імпульсна характеристика відображає реакцію системи на короткочасний імпульсний вплив (ідеалізований δ-імпульс) і характеризує внутрішні динамічні властивості системи.

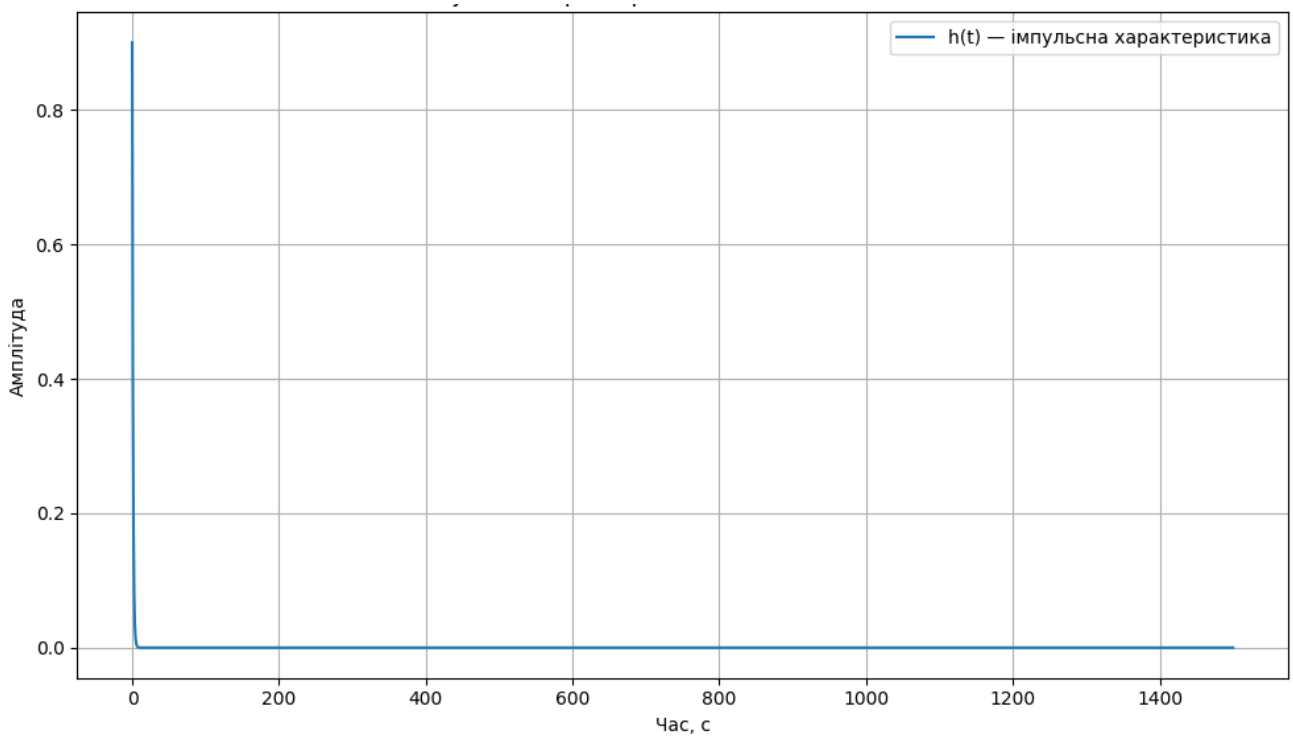


Рисунок 3.5 – Імпульсна характеристика замкненої САК

З графіка видно, що в початковий момент часу система має різкий імпульсний відгук, після чого сигнал швидко затухає та прямує до нуля. Такий характер зміни свідчить про аперіодичну поведінку системи, відсутність коливань і швидке затухання перехідних процесів.

Реакція системи є короткочасною і не містить повторних піків або коливань, що означає достатній рівень демпфування та відсутність коливального режиму.

Для підтвердження ефективності синтезованого регулятора виконано порівняння перехідних процесів ОК без регулятора та замкненої системи з ПІ-регулятором (рисунок 3.6), що дозволяє оцінити вплив регулятора на динамічні властивості системи, зокрема на швидкодію, точність та характер перехідного процесу.

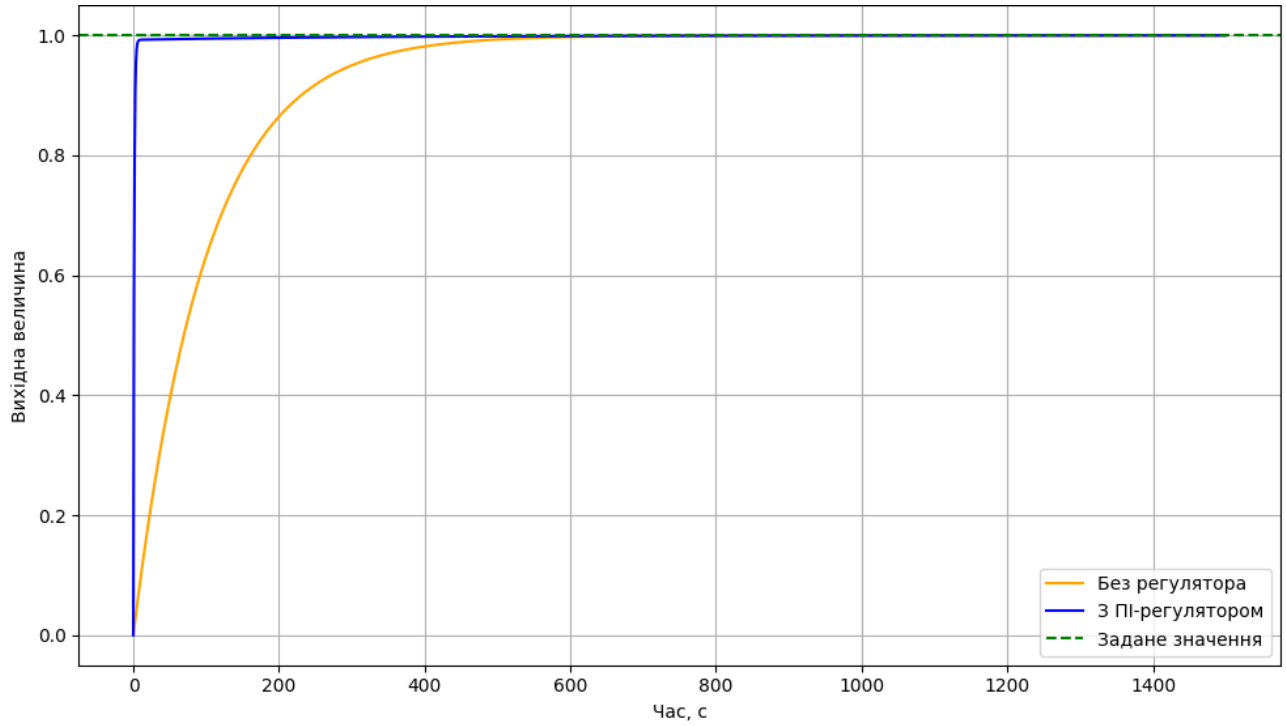


Рисунок 3.6 - Порівняння перехідних характеристик ОК

У системі без регулятора динаміка визначається лише власними властивостями ОК, тому перехідний процес відбувається повільніше та не забезпечує необхідної якості регулювання. Після введення ПІ-регулятора система набуває кращих динамічних характеристик, зокрема швидше досягає усталеного значення, не має статичної похибки та забезпечує більш точне

підтримання заданого параметра.Отримані графіки підтверджують доцільність використання синтезованого ПІ-регулятора в проєктованій системі.

Результати дослідження перехідного процесу замкненої системи автоматичного регулювання наведено у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Показники якості перехідного процесу

Показник	Позначення	Значення
Усталене значення	$y(\infty)$	0,999948
Статична похибка	$\varepsilon_{\text{ст}}$	0,000052
Максимальне значення	y_{max}	0,999948
Перерегулювання	σ	0 %
Час наростання	t_n	2,40 с
Час регулювання (±5%)	t_p	3,60 с
Час досягнення максимуму	t_{max}	1500 с

Аналіз отриманих показників свідчить, що система автоматичного регулювання характеризується високою якістю перехідного процесу. Усталене значення вихідної величини практично дорівнює заданому, що підтверджується дуже малим значенням статичної похибки $\varepsilon_{\text{ст}}$, що свідчить про ефективну роботу інтегральної складової ПІ-регулятора.

Перерегулювання в системі відсутнє ($\sigma = 0\%$), що є характерним для добре демпфованих систем та підтверджує аперіодичний характер перехідного процесу.

Час наростання становить 2,40с, що свідчить про достатньо швидку реакцію системи на зміну задавального впливу. Час регулювання, який дорівнює 3,60с, є малим порівняно з інерційністю об’єкта (100с), що підтверджує ефективність синтезованого регулятора.

Час досягнення максимуму співпадає з кінцем інтервалу моделювання, що пояснюється відсутністю перерегулювання, тобто система монотонно

наближається до усталеного значення без перевищення.

Отримані результати підтверджують, що замкнена САК з ПІ-регулятором є стійкою, швидкодійною та забезпечує високу точність регулювання. Відсутність статичної похибки, нульове перерегулювання та малий час регулювання свідчать про правильність вибору структури системи та параметрів регулятора. Таким чином, синтезований ПІ-регулятор повністю відповідає вимогам до проєктованої АСКК ПГК.

ВИСНОВКИ

Розроблена АСКК, що забезпечує ефективне управління ТП, моніторинг основних параметрів та підвищення надійності роботи ПГК.

Проведено дослідження ТП роботи промислових теплогенераторів та визначено параметри, що мають найбільший вплив на ефективність та безпеку експлуатації котельного обладнання.

Виконано аналіз існуючих автоматизованих систем керування котлоагрегатами та їх компонентної бази, що дозволило визначити сучасні підходи до побудови систем автоматизації.

Розроблено структурну схему АСКК та здійснено вибір КВПіА, що забезпечують необхідну точність, надійність та функціональність системи.

Розроблено електричну принципову схему, яка відображає взаємозв’язок усіх елементів системи та забезпечує її реалізацію.

Виконано синтез АСК температури теплоносія. Побудовано узагальнену структурну схему системи, розроблено математичну модель ОК у вигляді аперіодичної ланки першого порядку та здійснено синтез ПІ-регулятора. Визначено параметри регулятора, що забезпечують необхідні показники якості регулювання.

Проведено дослідження перехідних процесів системи, у результаті якого встановлено, що система є стійкою, має аперіодичний характер перехідного процесу, відсутню статичну похибку та прийнятний час регулювання. Отримані результати підтверджують правильність вибору структури системи та параметрів регулятора.

Результати роботи можуть бути використані при проєктуванні сучасних систем автоматизації теплотехнічних установок.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Types of Boilers in Industrial Water Treatment. [Електроннний ресурс].- Режим доступу: https://www.chemaqua.com/en-us/blog/2020/05/05/types-of-boilers-in-industrial-water-treatment/

2. Водогрійні котли Bosch. [Електроннний ресурс].- Режим доступу: https://www.bosch-industrial.com/global/en/ocs/commercial-industrial/hot-water-boilers-669462-c/

3. Основні відмінності між водотрубними та жаротрубними котлами. [Електроннний ресурс].- Режим доступу: https://energo.design/comparison-of-boiler-technologies

4. Water Tube Boiler vs Fire Tube Boiler: Which One Should You Choose? [Електроннний ресурс].- Режим доступу: https://www.makeboiler.com/water-tube-boiler-vs-fire-tube-boiler-which-one-should-you-choose/

5. Водогрійні котли високго тиску серії Viessmann Vitomax 200-HW. [Електроннний ресурс].- Режим доступу: https://www.viessmann.ua/uk/produkt/velyki-kotly/vitomax-hw.html

6. Overview of Hot Water Boiler: Types, Components and Applications. [Електроннний ресурс].- Режим доступу: https://raadmanburner.com/blog/hot-water-boiler/

7. What is superheated steam boilers? [Електроннний ресурс].- Режим доступу: https://www.lordfintube.com/superheated-steam-boilers_896.html

8. Super heater [Електроннний ресурс].- Режим доступу: https://www.boiler-planning.com/en/technology/components/super-heater.html

9. What Is an Industrial Boiler? Mechanism & Applications. [Електроннний ресурс].- Режим доступу: https://www.marusevn-boiler.com/en/column/what-is-an-industrial-boiler-mechanism-applications/

10. What are the basic parameters of the boiler? [Електроннний ресурс].- Режим доступу: https://en.zozen.com/faq/what-are-the-basic-parameters-of-the-boiler.html

11. What Are the Essential Parameters for Selecting an Industrial Gas-Fired

Boiler? [Електроннний ресурс].- Режим доступу: https://coalbiomassboiler.com/industrial-gas-fired-boiler-selection-parameters/

12. Boiler Technical Guide|General Guidance on Industrial Boiler's Operation. [Електроннний ресурс].- Режим доступу: https://www.epcbboiler.com/general-guide-on-industrial-boiler-operation.html

13. Understanding How Gas-Fired Steam Boilers Deliver Powerful Heating. [Електроннний ресурс].- Режим доступу: https://flairfacilities.co.uk/gas-fired-steam-boiler-operation-and-efficiency-explained

14. Introduction to Industrial Boilers and Steam Generation Systems**.** Електроннний ресурс].- Режим доступу: https://www.chemtreat.com/resources/water-essentials-handbook/fundamentals-of-industrial-boilers-and-steam-generation-systems

15. Boiler automation and monitoring system. [Електроннний ресурс].- Режим доступу: https://www.indiamart.com/proddetail/boiler-automation-and-monitoring-system-22383219262.html?srsltid=AfmBOopTyht6ZAvc_I7DBNfVhX8vS3mnlJeWl2r-IDe_jtJ3osNE8ojv

16. Boiler solutions. [Електроннний ресурс].- Режим доступу: https://www.siemens.com/en-gb/solutions/industrial-plant-engineering/

17. Honeywell. [Електроннний ресурс].- Режим доступу: https://artiss.ua/brand/honeywell?srsltid=AfmBOorUq_Yug24ZEv21TUvJAy6iWpFaIOHYu_vJU51IsXy9RUNNprnP

18. Комплект автоматики систем опалення з контролером Honeywell Smile SDC7-21N. [Електроннний ресурс].- Режим доступу: https://www.teploterm.ua/ua/komplekt-avtomatiki-sistem-otoplenija-s-kontrollerom-honeywell-smile-sdc7-21n.html

19. Управління котельної. локальні системи. https://www.art-serv.com.ua/control-systems/local-management-system/boiler-control

20. Локальні системи Danfoss. [Електроннний ресурс].- Режим доступу: https://www.danfoss.com/en/industries/buildings-residential/#tab-applications

21. Freescale: DSP56800E Family Overview. [Електроннний ресурс].- Режим доступу: https://community.element14.com/products/devtools/technicallibrary/w/documents/9937/freescale-dsp56800e-family-overview

22. Датчики температури. [Електроннний ресурс].- Режим доступу: https://ardushop.in.ua/

23. Honeywell Gauge Pressure SensorSurface 8 SMT. [Електроннний ресурс].- Режим доступу: https://no.rs-online.com/web/p/pressure-sensor-ics/2141465

24. Дисплей LCD 1602 + модуль I2C/IIC. [Електроннний ресурс].- Режим доступу: https://arduinokit.com.ua/ua/p1433688907-displej-lcd-1602.html?srsltid=AfmBOooVpG4au6UPNFHrkD7WAxyaxeaiSkISABcMeE5VhxuLCdSQ7HkF