

Міністерство освіти і науки України  
Західноукраїнський національний університет  
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій  
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем

ЯКИМЕНКО Назар Ярославович

**АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ПРОМИСЛОВИМ  
ГАЗОВИМ КОТЛОМ/ AUTOMATED CONTROL SYSTEM FOR AN  
INDUSTRIAL GAS BOILER**

спеціальність: 151 – Автоматизація та комп'ютерно–інтегровані технології  
освітньо–професійна програма – Автоматизація та комп'ютерно–інтегровані  
технології

Випускна кваліфікаційна робота  
здобувача першого (бакалаврського) рівня освіти

Виконав: студент групи АКІТ–41  
Н. Я. Якименко

---

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

---

Випускну кваліфікаційну роботу  
допущено до захисту:  
" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

Завідувач кафедри СКС  
\_\_\_\_\_ А. І. Сегін

Тернопіль 2024

Факультет комп'ютерних інформаційних технологій  
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем  
Освітній ступінь "бакалавр"

спеціальність: 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології  
освітньо-професійна програма – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

**ЗАТВЕРДЖУЮ:**

зав. кафедри СКС

А. І. Сегін

" \_\_\_\_ ". \_\_\_\_\_ 2024 р.

**З А В Д А Н Н Я**  
**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**  
**ЯКИМЕНКО Назару Ярославовичу**

(прізвище, ім'я по-батькові)

**1. Тема кваліфікаційної роботи**

Автоматизована система керування промисловим газовим котлом/ Automated control system for an industrial gas boiler

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

затверджено наказом по університету від « 12 » грудня 2023 р. № 753

**2. Строк подання студентом закінченої кваліфікаційної роботи**

10 травня 2024р.

**3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи:**

1. Характеристика промислових котлоагрегатів

2. Задані технічні характеристики промислового газового котла.

3. Вимоги до системи автоматичного управління промисловим газовим котлом.

4. Вимоги до параметрів автоматичного регулювання.

**4. Основні питання, які потрібно розробити**

1. Обґунтувати систему автоматичного регулювання промисловим газовим котлом.

2. Розробити структуру та провести розрахунок параметрів системи автоматизованого управління промисловим газовим котлом.

3. Дослідити розроблену систему автоматизованого управління та при необхідності здійснити корекцію її динамічних властивостей.

4. Описати заходи по охороні праці.

## 5. Перелік графічного матеріалу у роботі

1. Взаємозв'язки вхідних і вихідних параметрів у барабанному котлі
2. Схема регулювання теплового навантаження барабанного котла.
3. Схема регулювання економічності горіння барабанного котла.
4. Функціональна схема барабанного котлоагрегату за типом «повітря-паливо».
5. Функціональна схема автоматизації газового тракту
6. АФЧХ розімкнутої системи.

## 6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1	Пітух І. Р.		
2	Пітух І. Р.		
3	Пітух І. Р.		

## 7. Дата видачі завдання 20 жовтня 2022р.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назви етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Опис роботи системи керування промислових котлоагрегатів	15.12.2023р. – 31.01.2024р.	виконано
2	Алгоритми керування барабанними котлами	01.02.2024р. – 15.03.2024р.	виконано
3	Система автоматизованого керування барабанним котлом	16.03.2024р. – 30.04.2024р.	виконано
4	Остаточне оформлення та подача кваліфікаційної роботи на перевірку щодо плагіату	1.05.2024р. – 10.05.2024	виконано

Студент

\_\_\_\_\_ (підпис)

Якименко Н. Я.

Керівник роботи

\_\_\_\_\_ (підпис)

Пітух І. Р.

## РЕФЕРАТ

Робота виконана на 72 сторінках та містить 32 рисунки, 3 таблиці, 24 джерела за переліком посилань.

**Мета роботи:** розробка автоматизованої системи керування промисловим газовим котлом для забезпечення ефективної та безпечної роботи з оптимізацією процесів спалювання палива, підтримання заданих параметрів теплоносія та контролю викидів.

**Методи дослідження.** При виконанні дипломного проекту використано методи теорії автоматичного управління, математичного та комп'ютерного моделювання, системного аналізу.

**Результати роботи:** розробка автоматизованої системи керування, що забезпечує ефективне регулювання процесу спалювання палива, підтримання заданих параметрів теплоносія, моніторинг основних вузлів котла, оптимізацію роботи для енергозбереження та контроль викидів відповідно до екологічних норм.

**Рекомендації по використанню результатів роботи:** Розроблена автоматизована система керування промисловим газовим котлом рекомендується до впровадження на підприємствах, які використовують газові котли для опалення чи технологічних процесів, для підвищення ефективності, безпеки та екологічності їх експлуатації. Система може бути адаптована для різних типів промислових котлів з метою оптимізації процесів спалювання палива та енергозбереження.

**Можливі напрямки розвитку:** інтеграція системи з хмарними сервісами для віддаленого моніторингу та керування, впровадження алгоритмів машинного навчання для прогнозної аналітики та самонавчання системи, а також розширення функціоналу для керування котлоагрегатами на альтернативних видах палива.

**Ключові слова:** АВТОМАТИЗОВАНЕ РЕГУЛЮВАННЯ ПОДАЧІ ПАЛИВА, КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРІВ ТЕПЛОНОСІЯ, МОНІТОРИНГ ПОВІТРЯНОГО ТРАКТУ КОТЛА, СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ПРОМИСЛОВИМ КОТЛОАГРЕГАТОМ.

## ABSTRACT

The work is made on 72 pages and contains 32 figures, 3 tables, 24 references.

**Purpose:** to develop an automated control system for an industrial gas boiler to ensure efficient and safe operation with optimization of fuel combustion processes, maintenance of specified parameters of the coolant and emission control.

**Research methods.** The methods of automatic control theory, mathematical and computer modeling, and system analysis were used in the course of the diploma project.

**Results of the work:** development of an automated control system that provides effective regulation of the fuel combustion process, maintenance of the set parameters of the coolant, monitoring of the main components of the boiler, optimization of operation for energy saving and emission control in accordance with environmental standards.

**Recommendations for the use of the results of the work:** The developed automated control system for an industrial gas boiler is recommended for implementation at enterprises that use gas boilers for heating or technological processes to improve the efficiency, safety, and environmental friendliness of their operation. The system can be adapted for different types of industrial boilers to optimize fuel combustion and energy saving.

**Possible areas of development** include integration of the system with cloud services for remote monitoring and control, implementation of machine learning algorithms for predictive analytics and system self-learning, and expansion of the functionality for controlling boiler units using alternative fuels.

**Keywords:** AUTOMATED FUEL SUPPLY CONTROL, CONTROL OF COOLANT PARAMETERS, MONITORING OF THE BOILER AIR PATH, INDUSTRIAL BOILER CONTROL SYSTEM.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	7
ВСТУП.....	9
1. ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА .....	12
1.1. Опис системи керування промислових котлоагрегатів .....	12
1.2. Система автоматичного регулювання барабанних котлів .....	16
1.3. Барабанний котел як об'єкт керування .....	21
1.4. Розроблення функціональної схеми автоматизації та обґрунтування вибору засобів автоматики .....	24
2 АЛГОРИТМИ КЕРУВАННЯ БАРАБАННИМИ КОТЛАМИ.....	29
2.1. Визначення передавальних функцій за каналами керування .....	29
2.2. Складання алгоритмів керування барабанного котла .....	31
2.3. Інтелектуальна система керування .....	36
3 СИСТЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ БАРАБАННИМ КОТЛОМ .....	44
3.1 Розробка системи автоматичного регулювання .....	44
3.2. Аналіз розімкнутої та замкнутої систем керування .....	49
3.3 Синтез інтелектуальної системи керування на основі переміщення бактерій.....	54
ВИСНОВКИ.....	64
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	66
Додаток А Скрипт M-file.....	69
Додаток Б Лістинг методу WFO.....	70
Додаток В Продовження лістингу методу WFO.....	71
Додаток Г Визначення матриці четвертого порядку.....	72

					ДП.АКІТ.8091517.00.00.000 ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Автоматизована система керування промисловим газовим котлом		
Розроб.		Якименко Н. Я.					
Перевір.		Пітух І. Р.					
Н. Контр.		Заставний О.М.					
Затверд.		Сегін А.І.					
					Літ.	Арк.	Акрушів
					6	72	ЗУНУ.ФКІТ.АКІТ-41

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АЗС - автомобільна заправна станція  
АРМ - автоматизоване робоче місце  
АСУ - автоматизована система управління  
ВДТ - відеодисплейний термінал  
ВКР - випускна кваліфікаційна робота  
ДСТУ - державний стандарт  
ГП - газовий простір  
ЖКГ - житлово-комунальне господарство  
ЗІП - запасні інструменти та приладдя  
ВМ - виконавчий механізм  
ВП - вимірювальний перетворювач  
ІПТ - інтелектуальний перетворювач температури  
КПО - коефіцієнт природної освітленості  
КВПіА - контрольно-вимірювальні прилади та автоматизація  
КТЗ - комплекс технічних засобів  
ЛАЧХ - логарифмічна амплітудно-частотна характеристика  
ЛФЧХ - логарифмічна фазово-частотна характеристика  
МЕК - міжнародна електротехнічна комісія  
НДР - науково-дослідна робота  
ПК - податковий кодекс  
НПЗ - нафтопереробний завод  
НУ - нормальні умови  
ОУ - об'єкт управління  
ПВЛІМ – пило-волого захищена люмінесцентна модернізована лампа  
ПВС - пароповітряна суміш  
ПК - персональний комп'ютер  
ПП - первинний перетворювач  
ПП РСЗ - підпрограма розрахунку середнього значення

					ДП.АКІТ.8091517.00.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

ПТ - перетворювач температури

ПЕОМ - персональна електронно-обчислювальна машина

РВС - резервуар вертикальний сталевий

РО - регулювальний орган

РОЗ - розширена область значень

САР - система автоматичного регулювання

СНП - будівельні норми і правила

ТЗ - технічне завдання

ТП - технологічний процес

ТВ - транспортні витрати

ТОП - термоперетворювач опорів платиновий

УЛФ - уловлювання легких фракцій

FSK - frequency shift keying – частотний зсув

HART - highway addressable remote transducer – магістральний адресний  
дистанційний перетворювач

SCADA - supervisory control and data acquisition (наглядовий контроль і збір  
даних)

STL - statement list – перелік

SWOT - strengths weaknesses opportunities threats - сильні сторони, слабкості,  
можливості, загрози

					ДП.АКІТ.8091517.00.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		



## ВСТУП

**Актуальність теми.** Сьогодні актуальним є використання автоматизації технологічних процесів. У наш час основною проблемою або завданням автоматизації є покращення продуктивності об'єкта керування, необхідність швидкого регулювання різними процесами автоматики, обробка необхідної інформації та можливість її відправлення на підприємство. Із цього випливає, що розробка автоматичної системи технологічного процесу є трудомісткою і водночас важливою роботою.

Автоматизація відіграє ключову роль для подальшого розвитку промисловості в Україні. Одним із складних завдань є автоматизація парових барабанних котлів, оскільки в них задіяно багато технологічних процесів, а логіка їх регулювання є непростю. Барабанний котел як об'єкт регулювання є складною динамічною системою з великою кількістю взаємопов'язаних входів і виходів.

Для розробки ефективних алгоритмів управління таким обладнанням необхідно створити відповідні математичні моделі на основі каналів регулювання та даних, отриманих безпосередньо з реальних об'єктів. Ці моделі дозволяють точніше відтворити поведінку системи та вибрати оптимальні стратегії керування.

В Україні багато уваги приділяється автоматизації технологічних процесів на теплових електростанціях, в тому числі парових котлів. Впроваджуються сучасні автоматизовані системи управління, які забезпечують контроль та регулювання ключових параметрів, таких як тиск пари, витрата палива та повітря, рівень води тощо.

Крім енергетики, автоматизація активно розвивається в інших галузях промисловості України, зокрема в металургії, хімічній промисловості тощо. Створюються різноманітні системи автоматичного керування, контролю та збору даних для підвищення ефективності та безпеки виробничих процесів.

					ДП.АКІТ.8091517.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

У першому розділі роботи буде опис системи керування промислових котлоагрегатів, САР барабанних котлів, розроблено функціональну схему автоматизації та обґрунтування вибору засобів автоматизації.

У другому розділі, буде досліджено інтелектуальну систему управління, а саме метод оптимізації на основі переміщення бактерій.

Також буде проведено аналіз системи управління, тобто визначення стійкості системи, буде розраховано запаси стійкості та оцінки якості системи, так само і синтез регулятора.

Новизною обраної теми є синтез регулятора методом оптимізації на основі моделювання переміщення бактерій.

Метою кваліфікаційної роботи є дослідження інтелектуальної системи керування методом оптимізації на основі переміщення бактерій.

У розробці алгоритмів управління технологічних процесів барабанного можна виділити такі основні завдання:

- описати аналіз існуючих систем автоматичного регулювання барабанних котлів;
- розробити функціональну схему автоматизації різних трактів котла;
- синтезувати інтелектуальний регулятор;
- розробити математичну модель динаміки котла, САР процесів регулювання, вибрати найефективніший регулятор, регулювання та моделювання в середовищі MatLab Simulink.

**Метою роботи** є: розробка автоматизованої системи керування промисловим газовим котлом для забезпечення ефективної та безпечної роботи з оптимізацією процесів спалювання палива, підтримання заданих параметрів теплоносія та контролю викидів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання.

1. Проаналізувати принципи роботи та конструктивні особливості промислових газових котлів.

					ДП.АКІТ.8091517.00.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

2. Вивчити сучасні методи та засоби автоматизованого керування процесами спалювання палива та регулювання параметрів теплоносія.

3. Обрати та обґрунтувати структуру автоматизованої системи керування промисловим газовим котлом з урахуванням вимог до ефективності, безпеки та екологічності.

4. Розробити математичну модель об'єкта керування (газового котла) та алгоритми регулювання основних технологічних параметрів.

5. Спроекувати схему автоматизації та визначити склад обладнання автоматизованої системи керування.

6. Провести моделювання та дослідження розробленої автоматизованої системи керування з метою оцінки її ефективності та коригування параметрів.

**Об'єктом дослідження** є процеси у системі автоматичного регулювання промислового газового котла.

**Предметом дослідження** є автоматизована система керування процесами спалювання палива та регулювання параметрів теплоносія в промисловому газовому котлі з використанням сучасних засобів автоматизації.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає у розробленні вискоефективної автоматизованої системи керування промисловим газовим котлом, що забезпечує оптимізацію процесів спалювання палива, підтримання заданих параметрів теплоносія, контроль викидів та безпечну експлуатацію обладнання. Впровадження такої системи сприятиме підвищенню ефективності роботи котлів, зменшенню витрат палива, а також дотриманню екологічних норм на промислових підприємствах.

### **Публікації.**

Якименко Н. Я. Побудова алгоритмів автоматизованого керування барабанних котлів./ Збірник матеріалів проблемно-наукової міжгалузевої конференції «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» (АКІТ - 2024), Тернопіль, 2024. – С. 65–68.

					ДП.АКІТ.8091517.00.00.000 ПЗ	Арк.
						11
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

# 1 ОПИС РОБОТИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОМИСЛОВИХ КОТЛОАГРЕГАТИВ

## 1.1. Опис системи керування промислових котлоагрегатів

Барабанні парові котли є критично важливими компонентами систем гарячого водопостачання та опалення. Вони можуть працювати на різних видах палива: газі, вугільному пилу, мазуті та вугіллі. Багато котлів, що спалюють вугілля та мазут, мають системи автоматичного управління та регулювання.

Основне завдання управління котлом – підтримувати задане виробництво пари відповідно до вимог обладнання (парових турбін тощо). Схема регулювання робочих процесів залежить від конфігурації станції та типу котла. Якщо виникає дисбаланс між виробництвом та споживанням пари, тиск у паропроводі та барабані котла змінюється. Швидкість зміни тиску залежить від величини дисбалансу та акумулюючої здатності котла. Регулятори котла мають відновити тиск, змінюючи теплову потужність печі: збільшуючи її при падінні тиску чи зменшуючи при його зростанні [1].

У даній роботі будуть використані завдання регулювання: витрати пари; тиску пари; рівня рідини в барабані; розрідження в печі; надлишку повітря за пароперегрівачем; вмісту солі в котловій воді.

Котел – це така багатозв'язна система з вихідними та вхідними параметрами. Взаємозв'язки вхідних і вихідних параметрів показано на рисунку 1.1.

Регулювання барабанним котлом залежить від автоматичних систем регулювання. Є такі регулятори: витрати палива, тиску пари в паропроводі, подачі повітря, перегріву пари, регулятори живлення. У разі підбору схем регуляторів використовують моделі з нечітким описом вихідних даних і логічним висновком. Хімічно вода впливає на роботу котла без зупинки і без ремонту. Якість води в котлі встановлюється за вмістом солі в ній. У разі, коли

					ДП.АКІТ.8091517.00.00.000 ПЗ	Арк.
						12
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

підвищується вміст, то може статися потрапляння солі в турбіну потім в пароперегрівач. Коли скупчення фосфатів менше норми, то у внутрішніх поверхнях труб з'являється накип, через що відбудеться перепал труб у місцях утворення накипу. Загальна кількість вмісту солі в котловій воді тримається в межах норми завдяки безперервному і періодичного продування з барабана в спеціально зроблені розширювачі. Під час продування також видаляється шлам у нижніх колекторах. Для безперервного продування існують схеми постійного регулювання. Підтримання різниці між фосфатами в паровому навантаженні та без переривчастого продування визначаються евристичним шляхом.

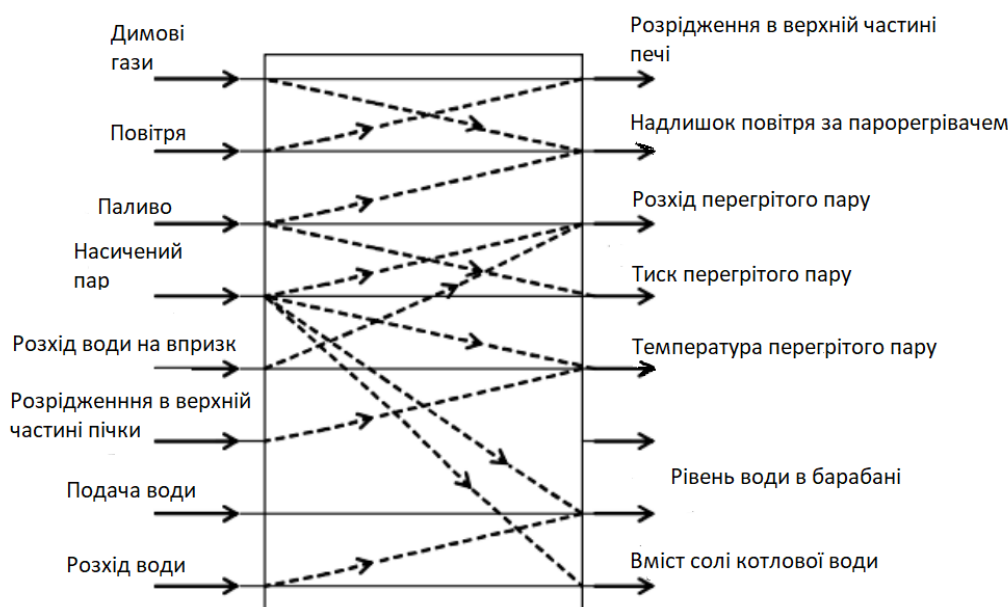


Рисунок 1.1 – Взаємозв'язки вхідних і вихідних параметрів у барабанному котлі

Регулювання барабанних парових котлів здійснюється за допомогою автоматичних систем, які включають регулятори: подачі палива, тиску пари в паропроводі, подачі повітря, перегріву пари та регулятори живлення водою. Для оптимального вибору схем регуляторів використовуються моделі з нечіткою логікою та евристичними алгоритмами на основі вихідних даних.

Якість води в котлі, зокрема вміст солей та фосфатів, має вирішальний вплив на безперебійну експлуатацію без ремонтів. Надлишок солей може

					ДП.АКІТ.8091517.00.00.000 ПЗ	Арк.
						13
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

призвести до їх осадження в турбіні та пароперегрівачі. Нестача фосфатів спричиняє утворення накипу на внутрішніх поверхнях труб, що може викликати перепали температури та пошкодження труб.

Для підтримання норм солевмісту застосовується продувка барабана в спеціальні розширювачі, при якій також видаляється шлам з нижніх колекторів. Безперервна продувка регулюється автоматично, тоді як періодичні продувки здійснюються вручну обслуговуючим персоналом за рішенням технолога.

Ключовим і складним завданням управління барабанним котлом є регулювання температури перегріву пари, на яку впливають зміни витрат води та палива, вимагаючи коригування подачі.

Основні функції алгоритмів управління: регулювання теплового навантаження (подачі палива), процесів горіння (подачі повітря), перегріву пари, температурного режиму пароводяного тракту.

На відміну від барабанних, у прямоструминних парових котлах є автоматичне регулювання подачі палива та живильної води.

Регулювання якості води відбувається на іншому обладнанні – системі водопідготовки, оскільки підтримання хімічного складу води відноситься до складних завдань, проте критично важливих для безаварійної роботи та продовження ресурсу котельного обладнання [2].

Ефективність забезпечення водно-хімічного режиму, а також загалом усього технологічного процесу виробництва тепла та електроенергії, значною мірою залежить від якості математичної моделі та її відповідності реальним умовам. Тривала експлуатація обладнання генерує великий обсяг даних, аналіз яких дозволяє виявити закономірності для управління водно-хімічним режимом. Проте, рекомендованим підходом до моделювання технологічних процесів є застосування правил нечіткого виведення загальної структури [3]. Такий підхід дає змогу створити продукційну модель, що відображає результати експертного опитування технологів-операторів та узагальнює їхній досвід якісного характеру.

					ДП.АКІТ.8091517.00.00.000 ПЗ	Арк.
						14
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Слід зазначити, що безпосереднє спостереження параметрів водно-хімічного режиму є нереальним. Існує додаткова проміжна система S, яка послідовно з'єднується з виходом системи управління водно-хімічним режимом, як зображено на рисунку 1.2. Ця система виконує функції вимірювання реальних параметрів та передає виміряні дані технологу-оператору.

Для оцінювання вектора  $Y$  та компонент вектора  $B$  необхідно враховувати додаткову похибку, спричинену збуреннями  $\Delta$  для системи S. Модель такої проміжної системи S має бути врахована.

Предметом цього дослідження не є питання досягнення необхідної точності вимірювання. Природно, модель з урахуванням збурень  $\Delta$  матиме вигляд:  $V=M(Y,B,\Delta)$ , де  $M$  – оператор, що переводить параметри  $Y$ ,  $B$ ,  $\Delta$  у вихідні параметри системи управління водно-хімічним режимом.

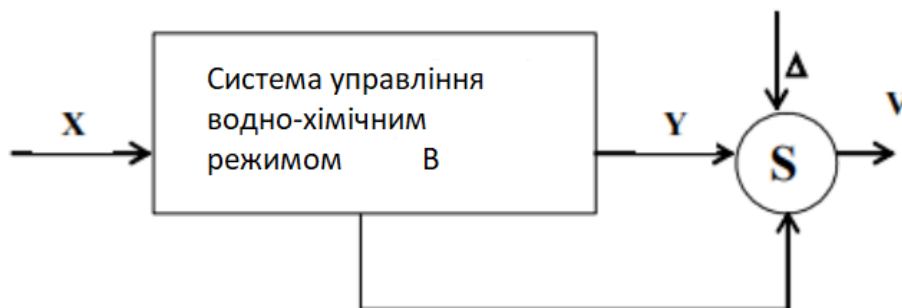


Рисунок 1.2 – Аналіз вихідних параметрів

Розроблення системи керування водо-хімічним режимом належить до класу складнореалізованих, багатофакторних завдань з нечіткою логікою. Модель, для початку, потрібно уявити, застосувавши теоретико-технічний опис. В основу теоретико-технічного опису моделі управління водно хімічним

режимом покладено поняття відповідності, відображення та відношення між елементами.

Сучасні системи управління водно-хімічним режимом часто використовують технології машинного навчання та штучного інтелекту для більш точного прогнозування та регулювання. Наприклад, нейронні мережі можуть навчатися на історичних даних для виявлення складних нелінійних залежностей між різними параметрами води та режимами роботи котла [4]. Це дозволяє швидко реагувати на зміни та попереджати порушення норм якості води.

Також активно досліджуються мультиагентні системи керування, де окремі інтелектуальні агенти відповідають за різні аспекти водно-хімічного режиму (дозування реагентів, продувка тощо). Ці агенти координують свої дії та обмінюються даними для забезпечення оптимальної роботи всієї системи.

Крім того, все більшого поширення набувають цифрові двійники - віртуальні копії реальних котлів, які дозволяють проводити комп'ютерне моделювання та випробування різних стратегій регулювання водно-хімічного режиму без ризику для обладнання [5].

## 1.2 Системи автоматичного регулювання барабанних котлів

Існуючі способи та схеми автоматичного регулювання теплового навантаження парогенератора та тиску пари в паропроводі ґрунтуються на принципах регулювання за відхиленням і збуренням, їх комбінаціях, визначаються режимом роботи котла та схемою підключення паропроводів перегрітої пари до турбіни. Конструктивні особливості барабанних котлів дозволяють розділити багатовимірну систему регулювання на відносно незалежні підсистеми: оптимізація якості горіння палива, стабілізація рівня води в барабані та температури перегрітої пари.

					ДП.АКІТ.8091517.00.00.000 ПЗ	Арк.
						16
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		



Розглянемо САР навантаження барабанного котла. Усі системи регулювання повинні підтримувати регульовану величину з мінімальними відхиленнями від заданого значення. На практиці, необхідне навантаження може бути досягнуте шляхом збільшення чутливості регулятора до відхилень, але це може призвести до коливань та втрати стійкості в циклічній САР. Регулювання теплового навантаження за необхідними параметрами тиску та температури перегрітої пари вимагає узгодженої зміни витрат палива та живильної води. При цьому, температурний режим залежить від співвідношення витрат води та палива і може регулюватися різними контрольованими величинами.

Для визначення фактичного теплового навантаження котла в схемі регулювання використовуються витрати води та палива (Рисунок 1.3). Регулювання теплового навантаження працює за співвідношенням витрат «тепло-паливо». Теплове навантаження підтримується регулятором подачі палива, а температурний режим - регулятором живлення.

Важливим завданням є поліпшення економічності горіння в печі барабанного котла, пов'язане з мінімізацією витрат палива. Стандартним підходом є регулювання співвідношення «паливо-повітря» на вході котла за вмістом кисню в димових газах [6]. Однак, показник кисню не є стабільним в процесі експлуатації через вплив багатьох факторів: якість палива, парове навантаження, втрати тепла з відхідними газами тощо.

Застосування регулювання за прямими показниками економічності котла має підвищену інерційність, особливо для котлів зі змінними характеристиками палива. Для котлів, що спалюють вторинні енергоресурси на технологічних виробництвах, більш доцільно реалізувати регулювання економічності горіння за іншими показниками. Тому для поліпшення режиму горіння в печі котла пропонується використовувати прогнозування значення ККД котла, що дозволить зменшити інерційність системи регулювання економічності процесу горіння.

					ДП.АКІТ.8091517.00.00.000 ПЗ	Арк.
						17
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

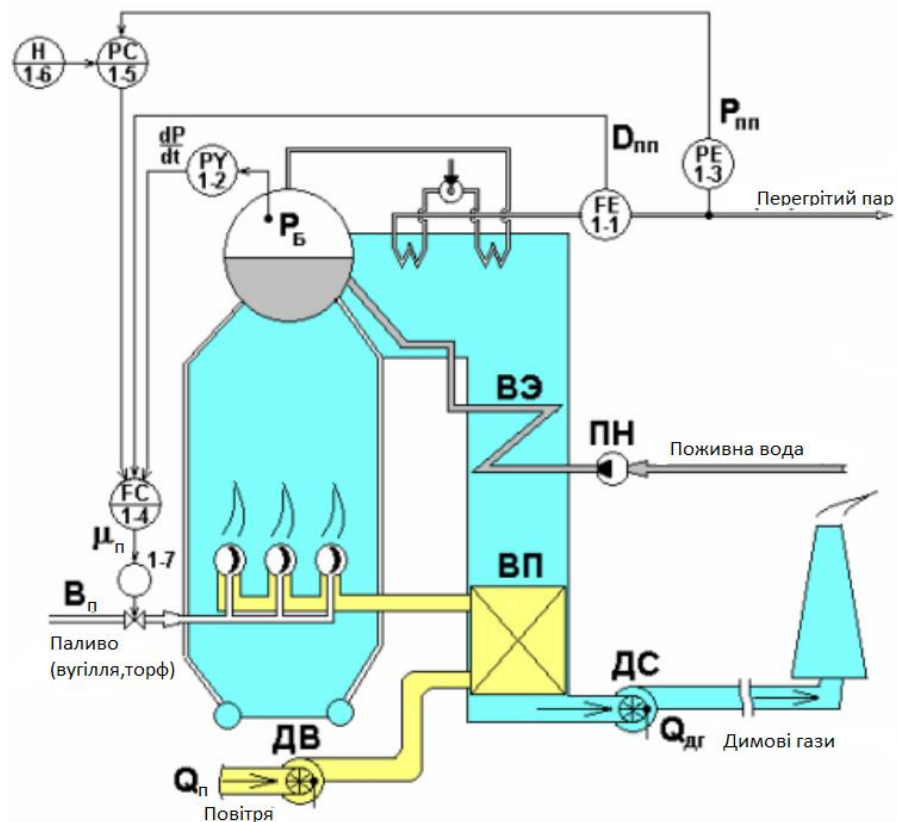


Рисунок 1.3 – Схема регулювання теплового навантаження барабанного котла

Схема регулювання економічності процесів горіння представлена на рисунку 1.4. Система складається з двох ліній. Внутрішню лінію утворюють самодіючий регулятор подачі повітря та об'єкт регулювання, що функціонує за простою схемою «пара-повітря». Зовнішня лінія утворює об'єкт регулювання, і за оцінюванням показника економічності горіння становить пристрій із вхідним сигналом, а також пристрій формування з прогнозування оцінки показника якості, економічності горіння із вхідним сигналом за потужністю, необхідною в печі котла з сигналом і паливом, що характеризує значення вихідної потужності, який як варіант виконання може вимірюватися [3]. Потреба

					ДП.АКІТ.8091517.00.00.000 ПЗ	Арк.
						18
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

використання складної системи регулювання визначена наявністю в сучасних котлах високого тиску. Це відбувається тому що в невизначений момент часу регулятор турбіни відкриває клапан для того, щоб пара надходила до турбіни, посилюючи витрату перегрітої пари з котла. Після цього мало відбутися падіння рівня води в барабані, але почало відбуватися різке зростання рівня і тільки після деякого часу почало змінюватися в «правильному» напрямку.

Це обумовлюється тим, що в екранних трубах і барабанах котлів знаходиться не вода, а пароводяна суміш, об'єм якої пов'язаний із тиском. Збільшення відкриття клапана турбіни призводить до негайного падіння тиску.

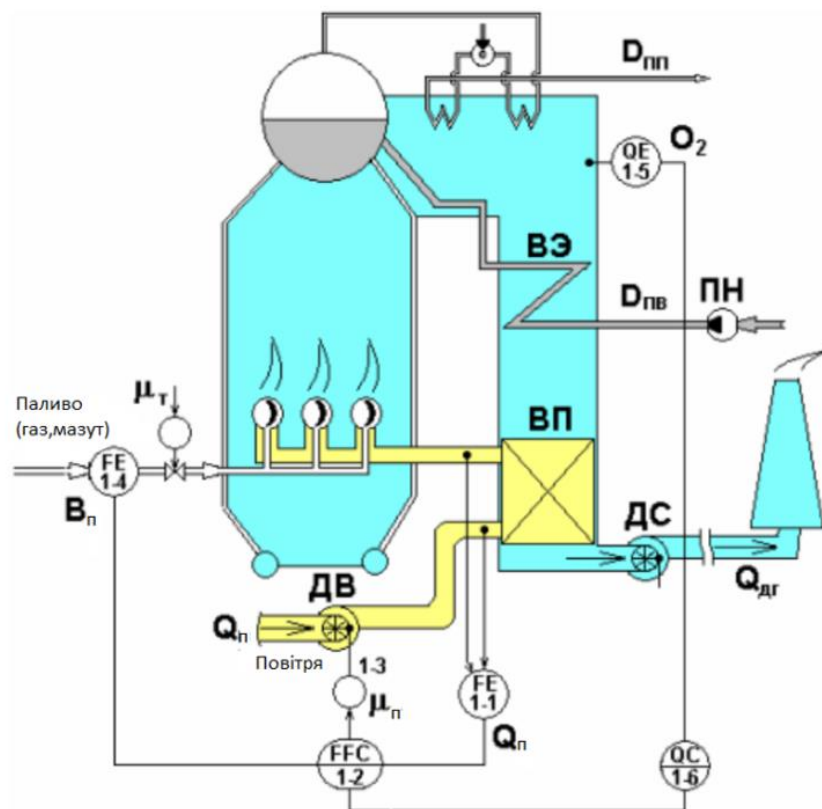


Рисунок 1.4 – Схема регулювання економічності горіння барабанного котла

Далі схема регулювання розрядження в печі барабанного котла, вона показана на рисунку 1.5. Система регулювання якості горіння палива з'єднана із системою регулювання розрядження в печ котла. В даній системі в об'єкта

					ДП.АКІТ.8091517.00.00.000 ПЗ	Арк.
						19
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

регулювання є хороші регульовальні властивості, через це система реалізується, зазвичай, як проста одноконтурна. Регулятор розрядження приймає сигнал щодо розрідження у верхній частині печі, після чого відбувається вплив і змінюється положення напрямних апаратів-димососів. Істотним збуренням для даної системи регулювання розрядження в печі барабанного котла проявляється у зміні витрати повітря, реалізованої системою регулювання якості горіння палива.

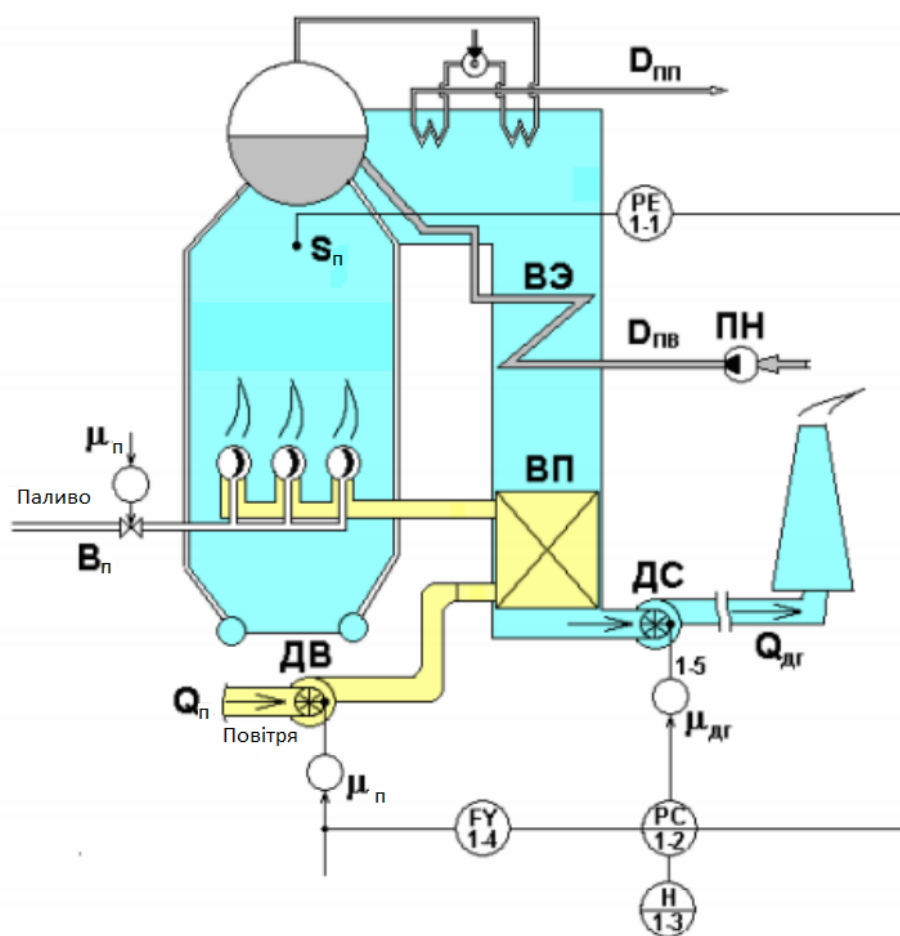


Рисунок 1.5 – Схема регулювання розрядження в печі барабанного котла

Для того щоб відбулося усунення впливу дії регулятора подачі повітря на розрідження в печі подачі повітря, то регульовальний вплив цього регулятора слід подати не тільки на апарат вентилятора, а й на вхід, попередньо перетворивши його відповідним чином у підбраному блоці компенсації

					ДП.АКІТ.8091517.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		20

збурення. Якщо в цій схемі регулювання відбулася зміна положення напрямних апаратів вентиляторів, то відбувається негайний рух напрямних апаратів димососів, саме тому розрідження в печі залишається незмінним. Якщо сигнал матиме спотворювальний характер, тоді задане значення від блоку не спотворюватиметься.

Сучасні системи регулювання парових котлів все частіше використовують нечітку логіку та штучний інтелект для покращення ефективності та точності керування. Нечіткі регулятори здатні працювати з нечіткими та неповними даними, що є типовим для котельних установок. Вони також добре справляються з нелінійними та взаємозалежними процесами в котлах [7].

Окрім того, набувають поширення гібридні підходи, які поєднують класичні методи регулювання з нечіткою логікою та нейронними мережами. Наприклад, нечіткі нейронні мережі можуть використовуватися для ідентифікації та моделювання динаміки процесів в котлі, а їх результати – для налаштування традиційних регуляторів

### 1.3 Барабанний котел як об'єкт керування

Барабанні парові котли є невід'ємними елементами управління в більшості промислових і цивільних комплексів. Їх основне призначення - безперебійне забезпечення об'єктів паровою та гарячою водою із заданими параметрами. Будь-які збої або відмови в роботі котельних установок призводять до вимушених простоїв всього комплексу чи його значної частини, що спричиняє величезні втрати та збитки.

Впровадження сучасних систем автоматичного керування котлами замість традиційних дозволяє знизити витрати на технічне обслуговування, збільшити міжремонтні періоди, спростити діагностику проблем та підвищити загальну надійність. Тому автоматизація котельних агрегатів є актуальною проблемою, що потребує ефективних рішень.

					ДП.АКІТ.8091517.00.00.000 ПЗ	Арк.
						21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Парові котли є складними багатопараметричними об'єктами автоматичного регулювання з великою кількістю контрольованих параметрів та регулювальних впливів. Крім того, вони характеризуються значними витратами робочого середовища в магістралях. Основними завданнями регулювання котельних установок, продиктованими вимогами споживачів пари та необхідністю забезпечення надійної й економічної роботи самих котлів, є:

- приведення навантаження котла у відповідність до заданого значення
- підтримання заданих значень тиску та температури пари, що подається споживачам.

Додатково слід відзначити важливість регулювання водно-хімічного режиму в котлах для запобігання корозії, накипоутворенню та продовження ресурсу обладнання. Ефективне досягнення цих завдань вимагає застосування сучасних систем автоматичного керування з використанням передових алгоритмів регулювання та діагностики.

Автоматизація котельних агрегатів дозволяє не лише підвищити надійність та економічність їх експлуатації, а й забезпечити безпеку обслуговуючого персоналу шляхом мінімізації необхідності ручного втручання в технологічні процеси.

Схему автоматичного регулювання барабанного котлоагрегату наведено на рисунку 1.6. Паровий котел виступає як складна динамічна система із взаємопов'язаними вхідними і вихідними значеннями. Однак, виражене вирівнювання регулювальних ділянок за основними каналами регулювальних впливів дає змогу стабілізувати і змінити регульовані параметри за допомогою незалежних одноконтурних систем, з'єднаних регулювальним об'єктом – котловим агрегатом [6]. Первинні повітряні регулятори монтуються по одному на млин. Кожен регулятор первинного повітря вимірює витрату первинного повітря в млині та підтримує її за допомогою регулювальних органів і відповідає завданню.

					ДП.АКІТ.8091517.00.00.000 ПЗ	Арк.
						22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Особливості котельної установки як регульовального пристрою:

а) зміна видалення пилу млинів у печі після зміни подачі палива відбувається з істотною затримкою;

б) зміна режиму повітря для первинного повітря має інтенсивний, хоча й тимчасовий, вплив на відбір палива;

в) поряд із введенням загального повітря відповідно до теплового навантаження, для цих котлів необхідно забезпечити оптимальне співвідношення первинного і загального повітря. первинного і загального повітря.

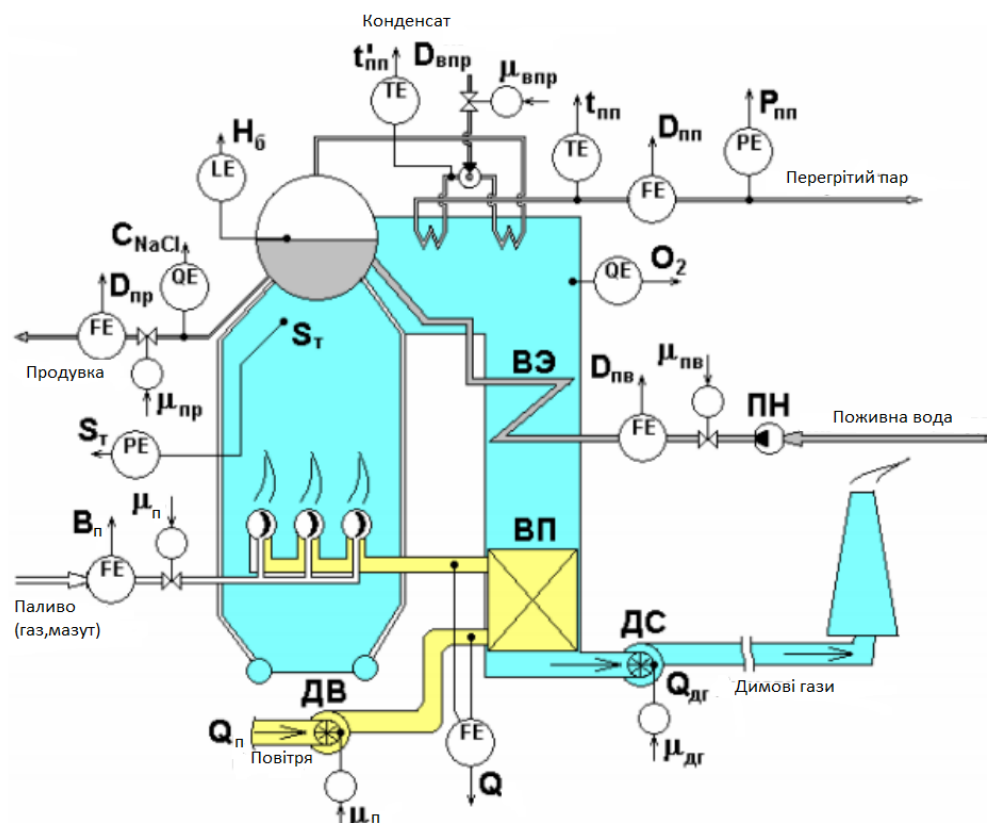


Рисунок 1.6 – Функціональна схема барабанного котлоагрегату

Такий сигнал, який швидко реагує на зміни в подачі палива, забезпечує високу швидкість керування паливом без участі первинного повітряного регулятора. Це дає змогу виконувати первинні повітряні регулятори незалежно

від регулятора палива і призначати їм функції для підтримання заданого співвідношення між загальною та первісною вартістю повітря.

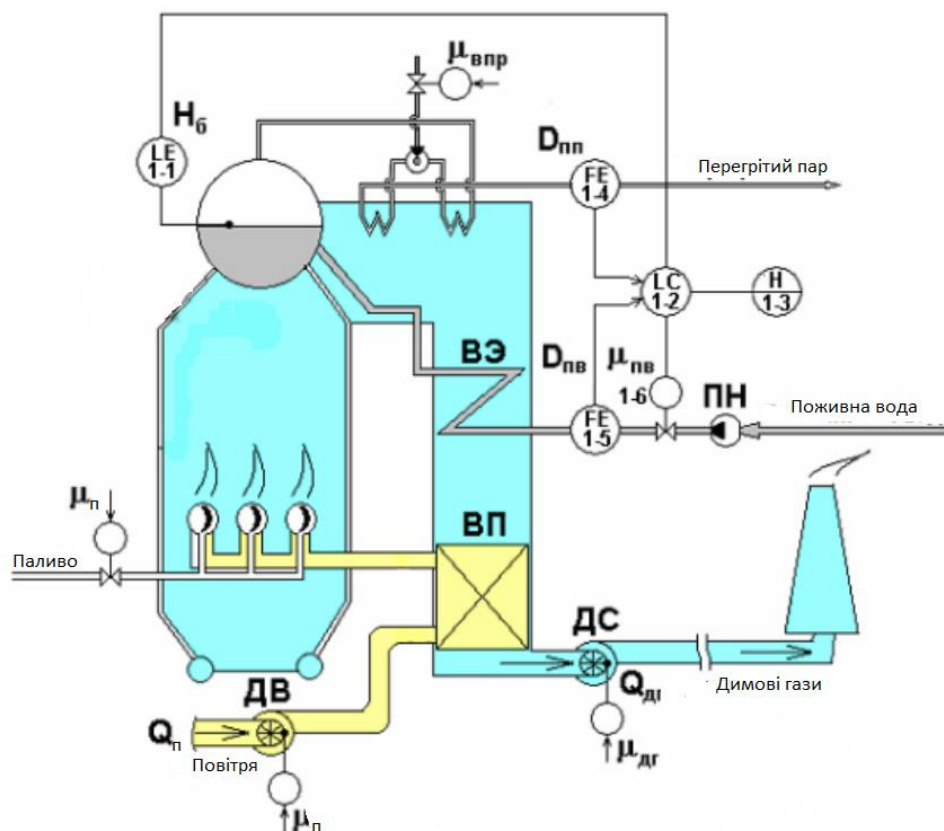


Рисунок 1.7 – Функціональна схема барабанного котлоагрегату за типом «повітря-паливо»

Для котлів було використано схему регулювання процесу горіння, створена за принципом «повітря-паливо», в якій застосовано сигнал за середньої потужності моторів, що посиляється на регулятор палива. Схема регулятора тяги істотно не змінилася. Динамічний імпульс із регулятора повітря забезпечує одночасність у повітрі та доповненнях і підвищує точність збереження розбавлення за змінного навантаження на котел.

1.4 Розроблення функціональної схеми автоматизації та обґрунтування вибору засобів автоматики



Схеми автоматизації є основними технічними документами, що визначають функціональну блокову структуру систем автоматичного керування, контролю та регулювання технологічних процесів, а також взаємодію з обладнанням та засобами автоматизації (зокрема, телемеханікою й комп'ютерними системами).

Функціональні завдання автоматизації реалізуються за допомогою різноманітних технічних засобів, серед яких: первинні вимірювальні пристрої, засоби отримання вхідної інформації, засоби перетворення та обробки даних, засоби відображення інформації для обслуговуючого персоналу, а також комбіновані, комплексні та допоміжні пристрої.

Під час розроблення схем автоматизації технологічних процесів вирішуються такі основні задачі:

- отримання первинної інформації про стан технологічного процесу та обладнання за допомогою вимірювальних перетворювачів;
- обробка, аналіз та реєстрація сигналів контролю й передача інформації про технологічні параметри та стан обладнання;
- формування керуючих впливів на виконавчі механізми для регулювання режимів роботи технологічного обладнання;
- візуалізація поточного стану процесів, сигналізація відхилень і тривог для оператора.

Належне виконання цих завдань забезпечує ефективне автоматичне керування технологічними об'єктами відповідно до заданих алгоритмів та критеріїв оптимальності.

Схеми автоматизації також визначають вимоги до надійності, точності та швидкодії контрольно-вимірювальних приладів і систем, канали передачі даних, взаємозв'язки між окремими підсистемами тощо. Їх ретельна розробка є критично важливою для досягнення високих показників якості, безпеки та економічності виробничих процесів на підприємствах.

					ДП.АКІТ.8091517.00.00.000 ПЗ	Арк.
						25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

У даній роботі схему автоматизації розроблено відповідно до вимог ДСТУ Б А.2.4-16:2008 «Система проєктної документації для будівництва» [8], ДСТУ Б А.2.4-4:2009 Основні вимоги до проєктної та робочої документації [9].

Правила виконання робочої документації автоматизації технологічних процесів. Схеми автоматизації представлено на малюнках 1.8-1.9.

Як датчик рівня обрано рівнемір VEGAPLUS 65, оскільки цей датчик підходить за всіма технічними характеристиками і є найбільш дешевим із розглянутих.

Для найбільш точного вимірювання температури температура повинна вимірюватися в декількох точках резервуара, а саме в 10 точках. Вирішення цього завдання досягається шляхом розміщення десяти датчиків з однією точкою або однією багатоточкою. З розглянутих раніше датчиків температури, обрано термоперетворювач опору ДТМЗ. Цей датчик є багатоточковим і в загальній сумі вийде дешевше, ніж розміщення десяти одноточкових датчиків ТСПУ-205 і Метран-280, а також монтаж одного датчика легший.

Вимірювання тиску проводиться датчиком тиску (манометр). З огляду на все, вибір припав на VEGABAR 81, тому що цей датчик задовольняє всім технічним вимогам, а також надійніший і точніший, ніж більш дешевший Jumo 420.

Контролером цієї системи обрано Siemens Simatic S7-300, через його переваги за технічними параметрами і найнижчою ціною порівняно з іншими розглянутими контролерами.

					ДП.АКІТ.8091517.00.00.000 ПЗ	Арк.
						26
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Найменування параметрів	Функціон. значення	Схема підключення	Контролер	Шкаф промреле	Місцевий шкаф	По місці, на стенді	
Температура вихідних газів в пірометричному кабелі в камері зварювання	TIR	AI030				900° C	1
Температура вихідних газів в пірометрічному кабелі в камері зварювання	TIR	AI030				900° C	2
Температура вихідних газів за КПТ 2 ст. нитя А з фронт	TIR	AI030				710° C	3
Температура вихідних газів за КПТ 2 ст. нитя Б з фронт	TIR	AI030				710° C	4
Температура вихідних газів за ЗНТ ст. нитя А з фронт	TIR	AI030				560° C	5
Температура вихідних газів за ЗНТ ст. нитя А з тил	TIR	AI030				560° C	6
Температура вихідних газів в пірометричному кабелі в камері зварювання корпус А з фронт	TIR	AI030				900° C	7
Температура вихідних газів в пірометричному кабелі в камері зварювання корпус А з тил	TIR	AI030				900° C	8
Температура вихідних газів за КПТ 2 ст. нитя Б з фронт	TIR	AI030				710° C	9
Температура вихідних газів за КПТ 2 ст. нитя Б з тил	TIR	AI030				710° C	10
Температура вихідних газів за ЗНТ нитя А з фронт	TIR	AI030				560° C	11
Температура вихідних газів за ЗНТ нитя А з тил	TIR	AI030				560° C	12
Розподілення верху ліній зправа корпус А	PIRAC	AI010				11НВК10 С7005	13
Розподілення верху ліній зліва корпус А	PIRAC	AI010				11НВК10 С7005	14
Інтенсивність вогню	BAS	AI010				0.012 A	15
Сигнал вогню	BAS	AI010				0.012 A	16
Переключ. вкл/відкл стан	BS	BO015					
Зовнішній сигнал "RESET"	BS	BO015					
Вибір в роботі	BS	BO010					
Інтенсивність вогню	BAS	AI010					
Сигнал вогню	BAS	AI010					
Переключ. вкл/відкл стан	BAS	BO015					
Зовнішній сигнал "RESET"	BAS	BO015					
СБ-Я в роботі	BS	BO010					
Вихідні газів (O <sub>2</sub> ) в вихідних газах нитя А	QIRAC	AI010				2%	17
Вихідні газів (NO <sub>2</sub> ) в вих. газів нитя А (11НВК10С0007)	QIR	AI010				<200 ppm	18
Вихідні газів (NO) в вих. газів нитя А (11НВК10С0005)	QIR	AI010				<1000 ppm	19
Вихідні газів (CO) в вих. газів нитя А (11НВК10С0006)	QIRAC	AI010				<2000 ppm	20
Вихідні газів (CO <sub>2</sub> ) в вих. газів нитя А (11НВК10С0008)	QIR	AI010				<2000 ppm	21
Вихідні газів (O <sub>2</sub> ) в вих. газів нитя Б (11НВК10С0009)	QIRAC	AI010				2%	22
Вихідні газів (NO <sub>2</sub> ) в вих. газів нитя Б (11НВК10С0007)	QIR	AI010				<200 ppm	23
Вихідні газів (NO) в вих. газів нитя Б (11НВК10С0005)	QIR	AI010				<1000 ppm	24
Вихідні газів (CO) в вих. газів нитя Б (11НВК10С0006)	QIRAC	AI010				<2000 ppm	25
Вихідні газів (CO <sub>2</sub> ) в вих. газів нитя Б (11НВК10С0008)	QIR	AI010				<2000 ppm	26

Рисунок 1.8 – Схема автоматизації із застосуванням ПЛК

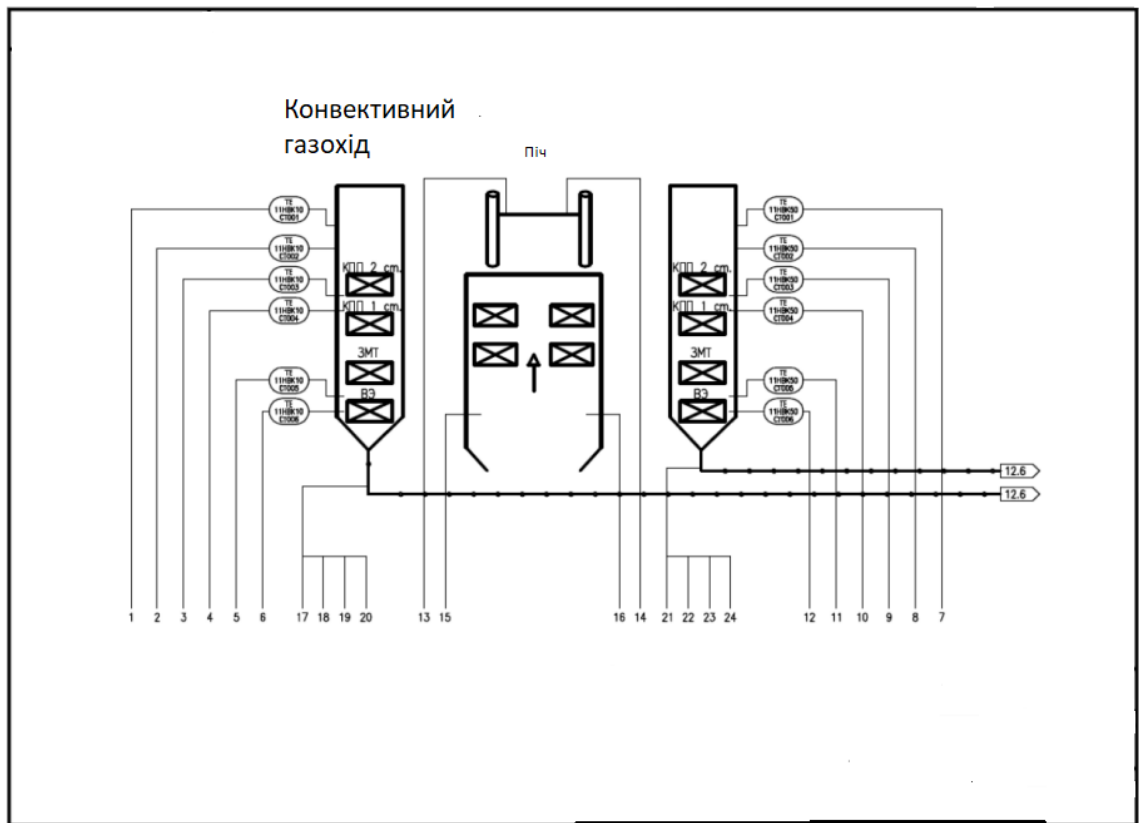


Рисунок 1.9 – Функціональна схема автоматизації газового тракту

Облік продукту передбачає точний вимір маси. Маса, в свою чергу, залежить від густини та об'єму. Для розрахунку густини, необхідно знати температуру продукту, а для розрахунку об'єму продукту в баку, досить знати рівень заповнення. Регулювання тиску газової камери здійснюється на основі

результатів вимірювання. Для вирішення цих завдань потрібні відповідні технічні засоби, а саме: датчики температури, вимірювачі рівня та манометри. Вибір технічних засобів автоматизації здійснювався з раніше розглянутих.

					ДП.АКІТ.8091517.00.00.000 ПЗ	Арк.
						28
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підп.</i>	<i>Дата</i>		

## 2 АЛГОРИТМИ КЕРУВАННЯ БАРАБАННИМ КОТЛОМ

### 2.1 Визначення передавальних функцій за каналами керування

Складність сучасних промислових підприємств спричинила автоматизацію управління обладнанням, що включає датчики для контролю над поведінкою обладнання та дистанційно керованих клапанів, що впливають на небажані події. Автоматизація виробництва захищає цілісність установки фізично. Проте, вона реагує на ненормальні умови. Задані значення задаються для пристроїв у робочому просторі, і якщо поведінка таких пристроїв, як тиск пари, виходить за межі зазначеного діапазону, спрацьовує сигналізація, і блоки управління, такі як клапан, запускаються для скидання обладнання до попередньо встановленого робочого стану. Як уже згадувалося, датчики відіграють ключову роль в управлінні промисловими установками, такими як паровий котел. Дані, які є наявні, не використовуються. Тим часом, дані датчиків для реагування на небажані події можуть бути використані для прогнозування і, отже, діяти, щоб забезпечити стійкий загальний стан системи.

Дані датчика можуть надати корисну інформацію, щоб оцінити, чи працює котел у межах специфікації, і під час перевірки даних тренда може передбачити небажані події, такі як зупинка. Однак, вилучення інформації з необроблених даних, створених датчиками, є непростим завданням. На сьогодні все ще залежить від підготовлених операторів для ручної інтерпретації даних. Якщо у виробництві є багато датчиків, пов'язаних із необхідністю постійної кількості даних вимірювань задля фокусування для моніторингу процесу, то необхідна комп'ютерна підтримка.

Основна мета розробленої системи полягає в тому, щоб допомогти операторам технологічних установок діагностувати обладнання, прогнозувати небажані події, такі як зупинка установки, пропонувати адекватні значення

					ДП.АКІТ.8091517.00.00.000 ПЗ	Арк.
						29
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

установки, пропонувати адекватні значення заданого значення обладнання і розуміти характеристики збоїв у роботі технологічних установок.

Модель складається з трьох основних компонентів:

1) Індивідуальний аналіз даних датчиків: аналіз даних датчиків для виявлення закономірностей, що призводять до небажаних подій для конкретного обладнання.

2) Аналіз даних групового датчика: аналіз кореляції даних датчиків для визначення залежностей між поведінкою обладнання і виявлення помилок у даних.

3) Глобальний аналіз технологічних процесів: аналіз даних датчиків для визначення найкращого встановленого значення для всього обладнання, яке може призвести до створення більш стабільної технологічної установки.

Розглянемо детально вплив кожного каналу керування на технічний стан відповідних елементів котлоагрегату та допоміжного обладнання ТЕЦ.

Канал «Витрата повітря – розрідження в печі» : зниження розрідження може свідчити про присмоктування зовнішнього повітря в піч, проблеми з вентиляторами або порушення режиму горіння при сталій витраті повітря.

Канал «Витрата палива – тиск палива»: падіння тиску палива може бути наслідком витоків у трубопроводах або несправності обладнання паливоподачі (млинів, вентиляторів, циклонів, бункерів), при цьому витрата палива також знижується.

Канал «Температури вхід-вихід»: якщо температура живильної води не змінилася, але температура перегрітої пари знижується при сталих витратах води та пари, це означає порушення роботи систем горіння та паливоповітроподачі. Падіння температури на вході свідчить про проблеми в турбінному цеху.

Канал «Витрата пари – рівень у барабані»: підтримка рівня є критичним завданням. Високий рівень може призвести до потрапляння води в пароперегрівач, гідроударів, відкладень солей, перегрівів поверхонь, зниження

					ДП.АКІТ.8091517.00.00.000 ПЗ	Арк.
						30
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

ККД турбіни та корозії. Низький рівень порушує циркуляцію, викликає втрату води та оголення труб з їх перегрівом.

Канал «Витрата живильної води – витрата перегрітої пари» є найважливішим, оскільки характеризує найнебезпечніші ситуації для трубних систем котла.

Для інтегральної оцінки стану використовуються інтелектуальні методи з залученням знань та досвіду персоналу ТЕЦ.

Аналіз каналів показує: канал «Витрата – Рівень» – суто регулюючий; канал «Тиск-Витрата пари» стосується більше турбіни; канал «Витрата-Тиск палива» відображає стан паливоподачі, а не котла.

Сучасні системи діагностики та прогнозування стану парових котлів все частіше використовують методи машинного навчання та штучного інтелекту. Наприклад, згорткові нейронні мережі можуть застосовуватися для виявлення аномалій та прогнозування відмов на основі даних датчиків та історичних записів [10]. Також використовуються методи глибокого навчання з вчителем та без вчителя для побудови моделей деградації обладнання.

Іншим перспективним напрямком є застосування методів обробки часових рядів, зокрема рекурентних нейронних мереж (LSTM, GRU) для прогнозування майбутніх значень параметрів котла та виявлення трендів, що можуть вказувати на проблеми [11]. Такі підходи дозволяють враховувати часову залежність даних.

## 2.2. Складання алгоритмів керування барабанного котла

Для нормальної роботи БК необхідно виконати такі роботи:

попередньо задані параметри тиску пари й потужності пари при максимальній надійності та економічності котла з використанням механізмів регулювання витрати палива, повітря, тяги;

підтримувати нормальний рівень температури пари;

					ДП.АКІТ.8091517.00.00.000 ПЗ	Арк.
						31
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

підтримувати нормальний рівень води в барабані і рівномірне живлення котла водою.

Підтримка нормального тиску котла необхідна для регулювання роботи котла. Оскільки відносно постійний тиск свідчить про правильну роботу котла, то збільшення тиску пари означає, що відбувається занадто багато продуктивності пари в котлі. Для її зниження зменшують подачу газу й повітря в піч, що представлено на рисунку 2.1. Регулювання тиску пари в котлі безпосередньо пов'язане з регулюванням потужності котла й управляється зміною подачі повітря і палива в камеру згоряння і регулюванням необхідної тяги [12]. Порушення роботи водонагрівачів призводить до зниження температури, яка показана на рисунку 2.2. За постійної подачі палива і зниження температури живильної води продуктивність парогенератора знижується, а температура перегріву пари підвищується. Збільшення надлишку повітря в пічовій камері пов'язане зі збільшенням кількості продуктів згоряння в пароперегрівачі. Під час перегріву, теплогенерація якого за рахунок конвекції більша, ніж за рахунок радіації, збільшення надлишку повітря спричиняє підвищення температури перегріву. Різноманітність факторів, що впливають на нагрівання пари, призводить до необхідності підрахунку площі нагріву пароперегрівача із запасом. Перегрів знижується за допомогою регулятора, що підтримує встановлену температуру пари.

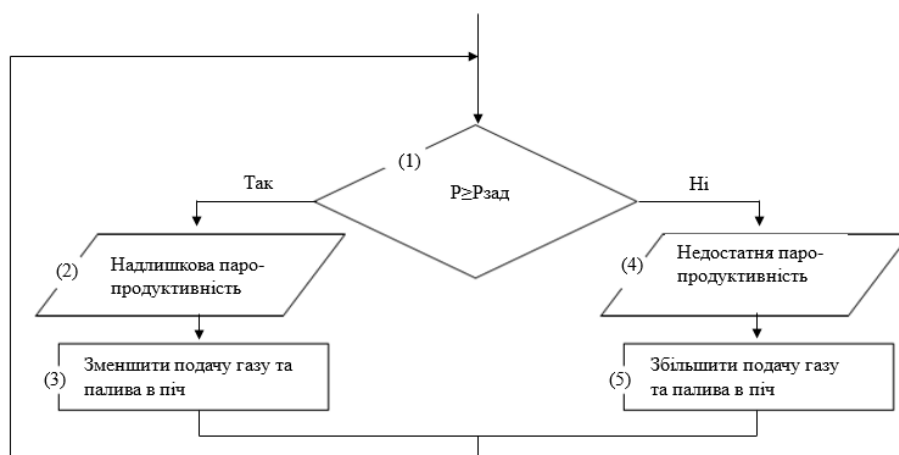


Рисунок 2.1 – Фрагмент блок-схеми алгоритму регулювання тиску



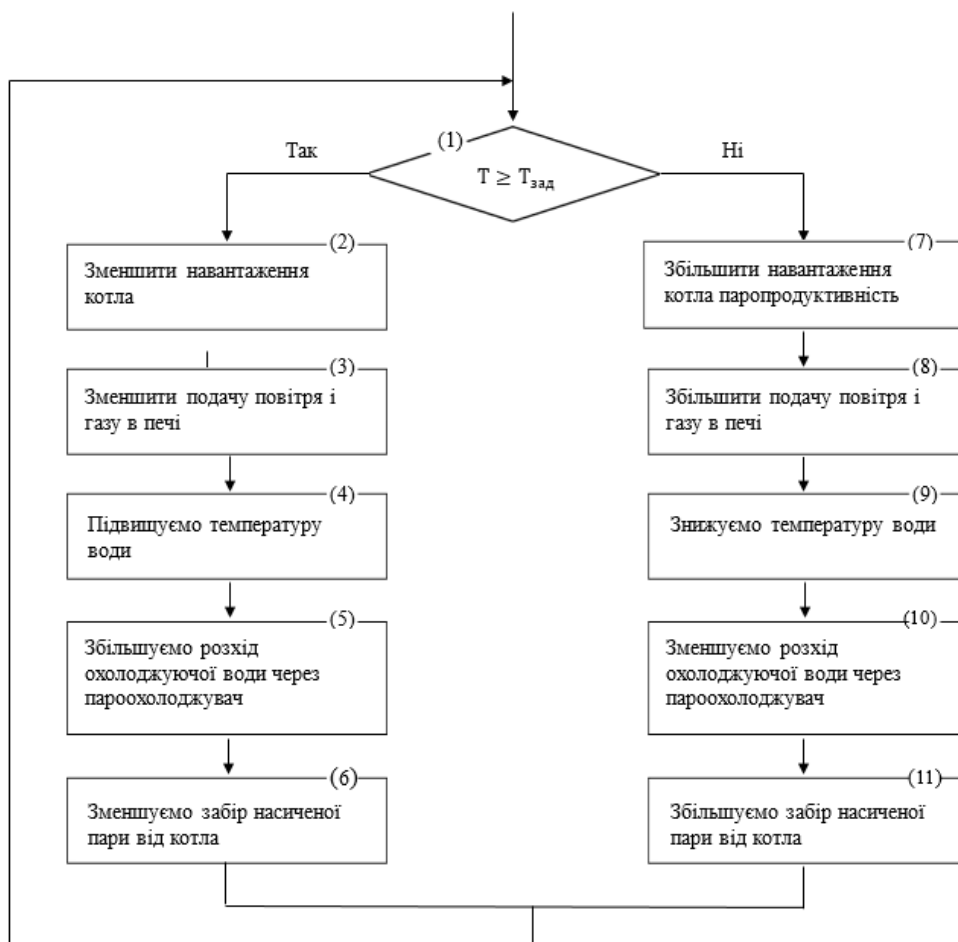


Рисунок 2.2 – Фрагмент блок-схеми алгоритму регулювання температури пари

Як видно на рисунку 2.2, температура пари порівнюється із заданою температурою, якщо вона перевищує її, то йде до блоку (2), і починається процес зниження температури пари. Блок (2) знижує навантаження на котел, далі (3) зменшує подачу повітря і газу в піч, (4) підвищує температуру живильної води, але (5) збільшує витрату теплоносія, блок (6) виконує зменшення об'єму насиченої пари. З блоку (7) відповідно до відповідно до блоку (11) виконуються процедури підвищення температури пари, що точно відповідають методам. Умови безпечної та надійної роботи парогенератора і турбіни вимагають, щоб рівень у барабані підтримувався в певних межах. Для підтримання нормального водопостачання в котлі необхідно забезпечити матеріальний баланс пари і води. Живлення регулюється автоматично або вручну. Підтримання заданого рівня води в барабані здійснюється шляхом

автоматичного регулювання потоку живильної води і пари. Рівень води в калібрувальному склі повинен трохи відрізнятись від нормальних значень.

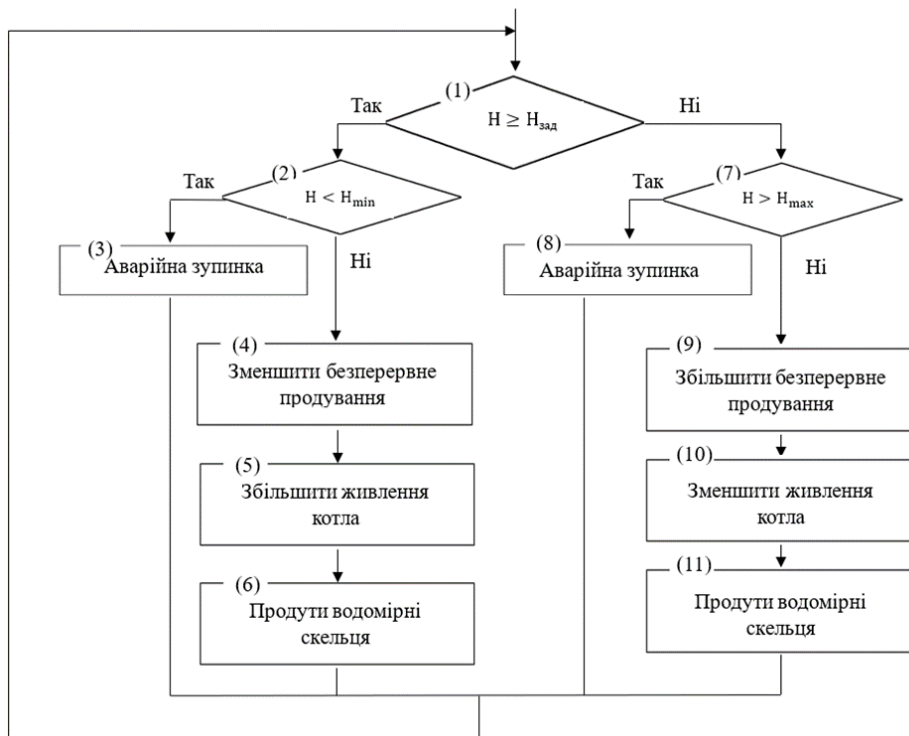


Рисунок 2.3 – Фрагмент блок-схеми алгоритму регулювання рівня води

Тихий рівень води є ознакою застою рідкого скла. При збереженні рівномірного потоку води і пари здійснюється нормальна подача води. Тому потрібно стежити за тиском води, що подається. При підвищенні теплового навантаження печі збільшується обсяг парової суміші, що призводить до підвищення рівня, а це означає, що навантаження котла має бути знижено. З того, що рівень води залежить від подачі та продувки котла, впливає, що при підвищенні рівня води до верхньої межі – продування котла знижується, живлення збільшується. Якщо ця процедура не допомагає, виконується аварійна зупинка. І навпаки, якщо рівень дозволяє відносно низький – необхідно збільшити живлення й зменшити вентиляцію як продемонстровано на рисунку 2.3.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата

Для забезпечення надійної та безпечної роботи парових котлів важливим є застосування сучасних методів технічного діагностування та прогнозування. Одним з перспективних підходів є використання вейвлет-аналізу для виявлення ранніх ознак несправностей на основі вібраційних сигналів. Вейвлет-перетворення дозволяє виділяти характерні особливості коливань, спричинених дефектами обладнання. Іншим напрямком є застосування методів машинного навчання, зокрема нейронних мереж, для побудови діагностичних моделей на основі даних датчиків котла. Наприклад, згорткові нейронні мережі можуть використовуватися для класифікації режимів роботи та виявлення аномалій [13]. Окрім діагностики, ці методи також можуть застосовуватися для прогнозування залишкового ресурсу критичних вузлів котла.

Для забезпечення надійної та безпечної роботи парових котлів важливим є застосування сучасних методів технічного діагностування та прогнозування. Одним з перспективних підходів є використання вейвлет-аналізу для виявлення ранніх ознак несправностей на основі вібраційних сигналів. Вейвлет-перетворення дозволяє виділяти характерні особливості коливань, спричинених дефектами обладнання [14].

Іншим напрямком є застосування методів машинного навчання, зокрема нейронних мереж, для побудови діагностичних моделей на основі даних датчиків котла. Наприклад, згорткові нейронні мережі можуть використовуватися для класифікації режимів роботи та виявлення аномалій [15]. Окрім діагностики, ці методи також можуть застосовуватися для прогнозування залишкового ресурсу критичних вузлів котла.

Системи прогнозної аналітики та раннього попередження відіграють ключову роль у підвищенні ефективності та безпеки експлуатації парових котлів. Вони аналізують потоки даних від датчиків та історичні записи для виявлення прихованих патернів і трендів, що можуть вказувати на зародження дефектів або порушення технологічних режимів. На основі цієї інформації формуються рекомендації для обслуговуючого персоналу щодо коригування

					ДП.АКІТ.8091517.00.00.000 ПЗ	Арк.
						35
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

параметрів роботи обладнання та проведення превентивного обслуговування і ремонту [16]. Застосування таких систем дозволяє знизити ризики аварійних зупинок і продовжити міжремонтний ресурс котлів.

### 2.3 Інтелектуальна система управління

Метод BFO (Bacteria Foraging Optimization) базується на моделюванні поведінки бактерій, зокрема Escherichia Coli. Ці бактерії здатні пересуватися за допомогою шести або більше джгутиків, що обертаються зі швидкістю 100-200 обертів на секунду, керованих власними біологічними «моторами».

BFO імітує процес живлення (пошук, обробка, споживання їжі) бактерій E.Coli у просторі пошуку поживних речовин. Спочатку генерується випадковий набір рішень (кожене рішення представляє окрему бактерію) в цьому просторі пошуку. Далі оцінюється «придатність» (якість) кожного розв'язку. Найкращі розв'язки виділяються за допомогою цільової функції, а інші модифікуються відповідно до значень придатності з використанням певних операторів. Така процедура дозволяє отримати ефективний набір розв'язків для наступних ітерацій. Ці алгоритмічні кроки повторюються до знаходження оптимального рішення.

Метод BFO був винайдений Кевіном М. Пассіно та імітує природний відбір, прагнучи відкинути «поганих» особин з неефективними стратегіями живлення та сприяти успішним стратегіям. Стратегія живлення розділяється на чотири процеси: хемотаксис, роїння, розмноження та елімінація/розсіювання [17].

Хемотаксис моделює рух бактерій у напрямку або від більшої концентрації поживних речовин. Роїння симулює здатність бактерій утворювати групи та колективно шукати поживу. Розмноження дозволяє

					ДП.АКІТ.8091517.00.00.000 ПЗ	Арк.
						36
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

найкращим бактеріям розмножуватись, а елімінація видаляє найгірших. Розсіювання допомагає уникнути зациклення в локальних оптимумах.

Хемотаксис. Цей процес є характерною рисою руху бактерій у пошуках їжі. Цей процес можна визначити двома способами: плаванням та акробатикою. Коли бактерії рухаються в заданому напрямку, це називається плаванням. Тим часом методи акробатики – це коли бактерії починають рухатися в зовсім іншому напрямку. Математично падіння будь-якої бактерії може бути представлено одиничною довжиною випадкового напрямку, помноженою на довжину кроку цієї бактерії. Тим часом для плавання випадкова довжина заздалегідь визначена.

У Хемотаксисі локомоція кишкової палички через набір відносно жорстких джгутиків моделюється двома типами поперемінного руху, бігом і падінням, що дає змогу бактерії шукати поживні речовини. Нехай  $S$  – загальна популяція бактерій у просторі пошуку,  $i$  – ітерація, індекс хемотаксичного кроку позначається як  $j$ , розмноження позначається через  $k$ , а  $l$  - елімінація-розсіювання.

Спочатку генеруються випадкові популяції частинок, і значення цільової функції / функції придатності для кожної частинки можна обчислити за допомогою:

$$J(i, j, k, l) = \text{Function}(p(i, j, k, l))$$

Потім, використовуючи формулу, прогнозується найкраще значення придатності для кожного хемотаксичного руху і зберігається в локальній пам'яті. Опісля, кожна частинка виконує хемотактичний рух за допомогою акробатичних і плавальних дій.

$$J_{last} = J(i, j, k, l);$$

$$J_{local}(i, j) = J_{last};$$

					ДП.АКІТ.8091517.00.00.000 ПЗ	Арк.
						37
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$\theta'(j+1, k, l) = \theta'(j, k, l) + C(i)\varphi(j).$$

де  $C(i)$  ( $i = 1, 2, \dots, S$ ) розмір кроку, зробленого у випадковому напрямку  $\varphi(j)$ ,  $\varphi(j)$  може бути представлено наступним чином:

$$\varphi(j) = \frac{\Delta(i)}{\sqrt{\Delta^T(i) \cdot \Delta(i)}}$$

де  $\Delta$  позначає вектор у випадковому напрямку, елементи якого перебувають у діапазоні  $[-1, 1]$ . Після хемотаксичних переміщень частинки досягають нового положення в просторі пошуку, і значення цільової функції для цього нового положення може бути оцінено через (2.1), а найкраще значення придатності знову зберігається (2.2).

$$J(i, j+1, k, l) = \text{Function}(P(i, j+1, k, l)). \quad (2.1)$$

$$J_{local}(i, j+1) = J(i, j+1, k, l). \quad (2.2)$$

Якщо значення придатності  $J$ , оцінене для поточного хемотаксичного руху  $J(j+1, k, l)$ , менше за попереднє  $J(j, k, l)$  для задач мінімізації, то буде зроблено ще один крок у тому ж напрямку. В іншому випадку, бактерія падатиме у випадковому напрямку.

Роїння. Бактерії, які практикують поведінку Роя. Цей процес починається тоді, коли всі здорові бактерії притягують інші бактерії, щоб разом досягти того місця, де їжа багата, які математично відносяться до точки рішення. Штрафна функція буде додана до початкової функції витрат для досягнення збіжності бактерій. Штрафна функція фактично заснована на відносних відстанях кожної з них бактерія від найбільш пристосованої бактерії до тієї тривалості пошуку. На рисунку 2.4 подано блок-схему методу.

					ДП.АКІТ.8091517.00.00.000 ПЗ	Арк.
						38
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

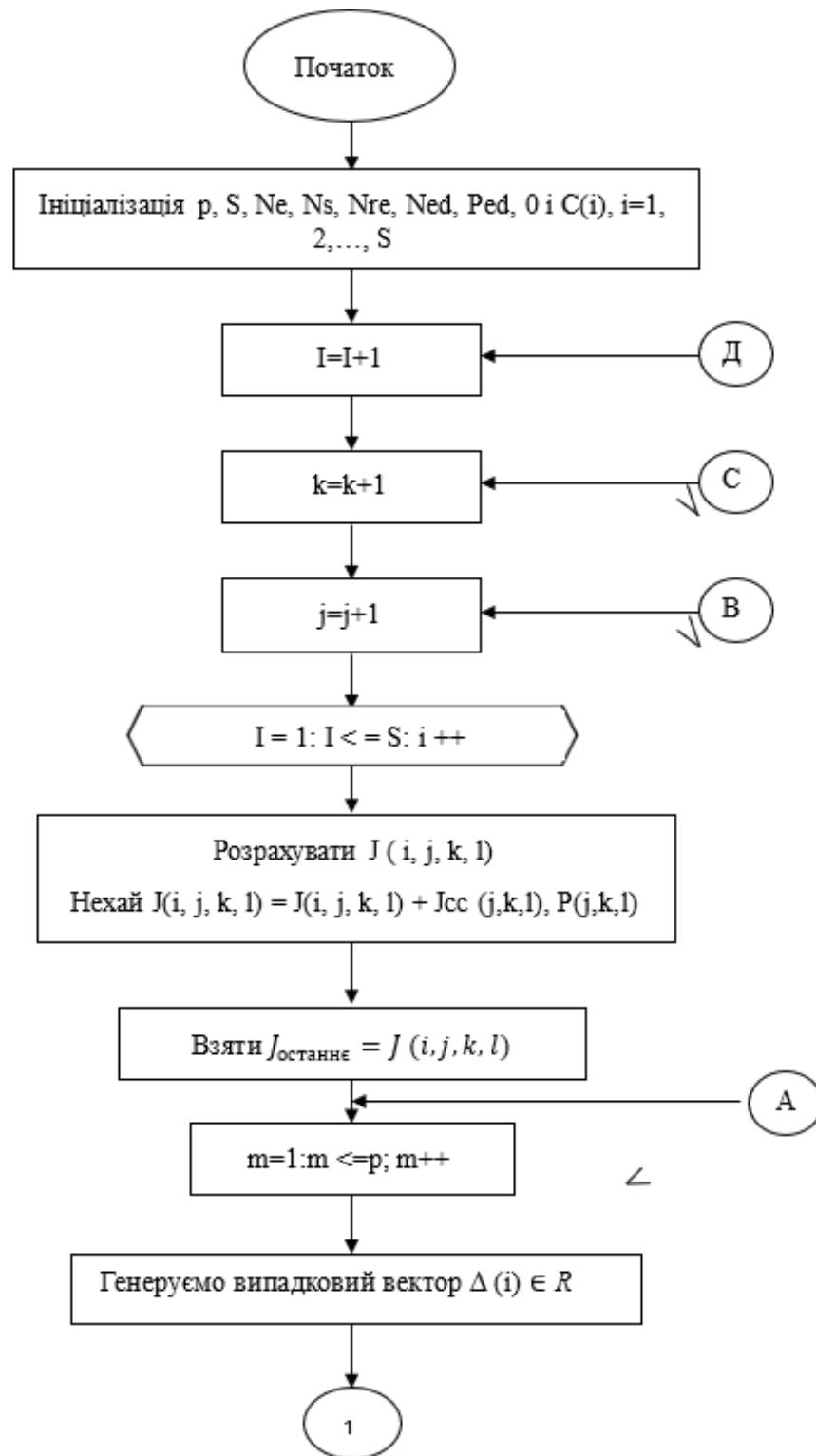


Рисунок 2.4 — Блок-схема роботи класичного алгоритму

Після того, як усі бактерії злилися в точку розв'язання, ця штрафна функція стане нульовою. Ефект роїння полягає в тому, що бактерії збираються

в групі і переміщуються у вигляді концентричних візерунків із високою щільністю бактерій. на рисунку 2.5 зображено продовження детальної блок-схеми алгоритму.

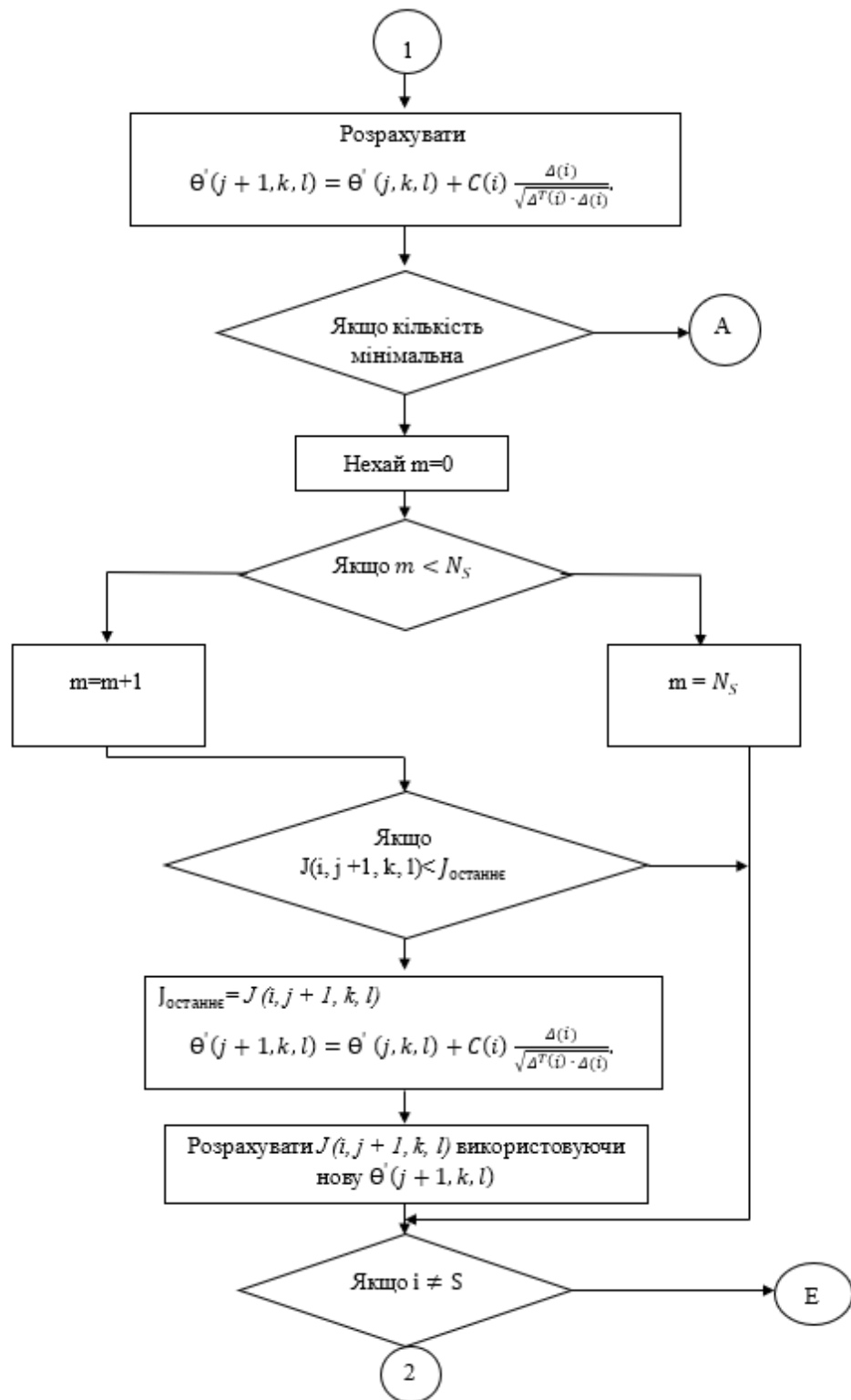


Рисунок 2.5 – Продовження блок-схеми роботи

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата



На рисунку 2.6 представлено продовження роботи класичного методу.

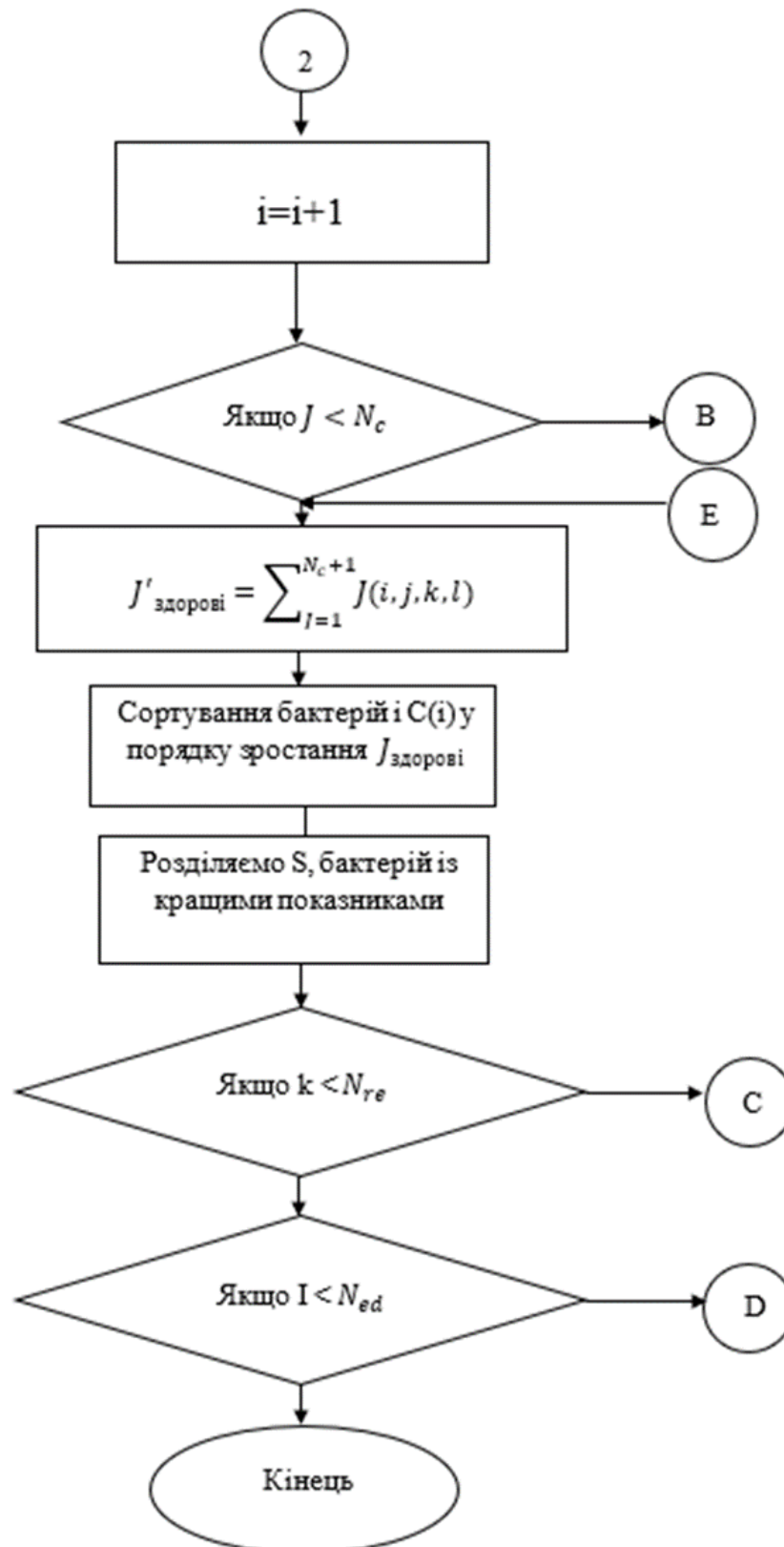


Рисунок 2.6 – Продовження роботи класичного алгоритму

Математичне представлення цього роїння може бути представлено таким чином:

$$J_{CC}(\theta, P(j, k, l)) = \sum_{i=1}^S J_{CC}^i(\theta, \theta^i(j, k, l)) = \sum_{i=1}^S [-d_{attract} \exp[-\omega_{attract} \sum_{m=1}^P (\theta_m - \theta_m^i)^2]] + \sum_{i=1}^S [-h_{repel} \exp[-\omega_{repel} \sum_{m=1}^p (\theta_m - \theta_m^i)^2]].$$

де  $d_{attract}$  – глибина і ширина атрактанта відповідно,  $h_{repel}$  – висота і ширина репелента відповідно, а  $p$  – розмірність оптимізаційної задачі.

Розмноження. На цій стадії здоровий або найкращий набір бактерій буде розділений на дві групи. Більш здорові бактерії замінять іншу половину бактерій, які будуть знищені через їхні бідніші кормові здібності. Це робить популяцію бактерій завжди постійною в процесі еволюції.

$$J_{health}^i = \sum_{j=1}^{N_c+1} J(i, j, k, l).$$

Ліквідація та розосередження. У процесі еволюції може статися раптова непередбачувана подія, яка може радикально змінити гладкий процес еволюції та призвести до знищення набору бактерій та/або розсіювання їх у новому середовищі. Ця невідома подія може призвести до того, що новий набір бактерій опиниться поруч із харчовим місцем, хоча вона не порушуватиме звичайний хемотаксичний ріст набору бактерій. Коли цей метод застосовується в оптимізації, він фактично допомагає зменшити поведінку застою, яка часто з'являється в деяких алгоритмах, що практикують паралельний пошук. За допомогою цього алгоритму можна отримати найкращі значення  $k_p, k_i$  і  $k_d$ .

Докладний лістинг методу представлений у додатках Б і В.

					ДП.АКІТ.8091517.00.00.000 ПЗ	Арк.
						42
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Метод бактеріальної форажної оптимізації (BFO) знайшов застосування в задачах оптимізації енергетичних систем. Зокрема, його використовували для оптимізації роботи теплових електростанцій (ТЕС) та теплоелектроцентралей (ТЕЦ).

У роботі BFO був застосований для оптимального розподілу навантаження між генеруючими одиницями ТЕС з урахуванням обмежень на викиди та витрату палива. Результати показали, що BFO забезпечує кращу збіжність та якість розв'язків порівняно з іншими метаевристичними методами. Дослідники з Індії [18] використали модифікований варіант BFO для оптимізації комбінованого виробництва тепла та електроенергії на ТЕЦ. Їх підхід дозволив мінімізувати експлуатаційні витрати та викиди  $CO^2$ .

Інший приклад [19] демонструє застосування BFO для оптимального планування режимів роботи когенераційної системи на основі газових турбін ТЕЦ з метою максимізації прибутку. Ці дослідження підтверджують ефективність BFO як інструменту для вирішення складних оптимізаційних задач в енергетичному секторі, зокрема на теплових електростанціях та теплоелектроцентралях. Адаптація та вдосконалення цього алгоритму може допомогти розробити більш інтелектуальні системи керування енергооб'єктами ТЕЦ.

					ДП.АКІТ.8091517.00.00.000 ПЗ	Арк.
						43
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

### 3 СИСТЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ БАРАБАННИМ КОТЛОМ

#### 3.1 Розробка системи автоматичного керування

Об'єктом керування в даній роботі є система автоматичного регулювання температури. Схема системи автоматичного регулювання температури наведена на рисунку 3.1.

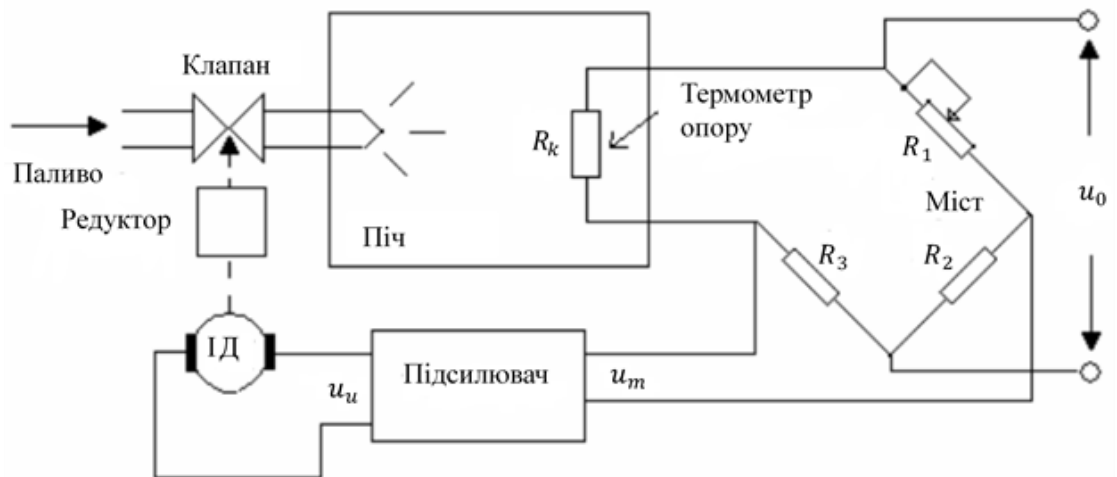


Рисунок 3.1 – Схема системи автоматичного регулювання температури

Лінеаризовані рівняння елементів системи мають наступний вигляд:

Піч:

$$\Delta\theta = \theta_3 - \theta, \quad T_0 \cdot \frac{d}{dt} \Delta\theta + \Delta\theta = k_0 \cdot \mu - k_1 \cdot f.$$

Потенціометричний міст:

$$u_m = k_\theta \cdot \theta$$

Підсилювач:

$$T_m \frac{du_u}{dt} + u_u = k_m \cdot u_m.$$

Двигун з редуктором:

$$T_{\partial\text{в}} \cdot \frac{d^2}{dt^2} \mu + \frac{d}{dt} \mu = k_{\partial\text{в}} \cdot u_u .$$

Перш за все, необхідно побудувати функціональну схему системи для подальшої роботи. Для отримання передавальної функції всієї системи необхідно перемножити послідовно з'єднані елементи, замкнувши їх негативним зворотним зв'язком. на рисунку 3.2 представлена функціональна схема автоматизації.

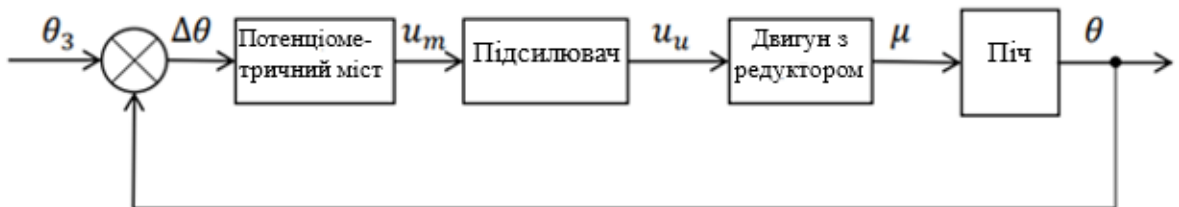


Рисунок 3.2 – Функціональна схема замкнутої системи

Виходячи зі схеми малюнка, знаходимо передавальну функцію всієї системи, тобто і для замкнутої, і для розімкнутої системи. У цьому випадку, замкнута система – це система зі зворотним зв'язком, розімкнута ж – система, що не має зворотного зв'язку.

Для початку необхідно знайти еквівалентну  $G(s)$  для розімкнутої системи.

$$G(s) = k_{\partial} \cdot \frac{k_m}{T_m s + 1} \cdot \frac{k_{\partial\text{в}}}{T_{\partial\text{в}} s^2 + s} \cdot \frac{k_0}{T_0 s + 1} . \quad (3.1)$$

Як параметри об'єкта керування використовуємо таблицю 3.1:

					ДП.АКІТ.8091517.00.00.000 ПЗ	Арк.
						45
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Таблиця 3.1. Параметри об'єкта керування

$T_0$	$k_0$	$k_1$	$k_\partial$	$T_m$	$k_m$	$T_{\partial\partial}$	$k_{\partial\partial}$	$f$
с	-/см	-/см	В/-			С	см/Вс	см
1,7	4,0	2,0	1,0	0,02	10	0,03	0,20	$2\sin 0.5t$

Підставивши потрібні значення, отримуємо:

$$G(s) = 1 \cdot \frac{10}{0,02s + 1} \cdot \frac{0,20}{0,03s^2 + s} \cdot \frac{4}{1,7s + 1} = \frac{8}{(0,02s + 1)(0,03s^2 + s)(1,7s + 1)}$$

$$= \frac{8}{0,00102s^4 + 0,0856s^3 + 1,75s^2 + s}$$

У результаті вийшла коливальна ланка четвертого порядку. Звідси випливає, що передавальна функція замкнутої системи дорівнює:

$$H(s) = \frac{8}{0,00102s^4 + 0,0856s^3 + 1,75s^2 + s + 8}$$

Дотримуючись передавальної функції, отримуємо перехідну характеристику системи, яка представлена на рисунку 3.3.

Розглянемо амплітудно-частотну (АЧХ), фазо-частотну (ФЧХ) та амплітудно-фазо-частотну (АФЧХ) характеристики системи. Ці характеристики описують поведінку системи в частотній області.

Амплітудно-частотна характеристика показує залежність амплітуди вихідного сигналу від частоти вхідного сигналу. Фазо-частотна характеристика відображає різницю фаз між вхідним та вихідним сигналами на різних частотах. Відношення амплітуд та різниця фаз називаються відповідно амплітудно-частотною та фазо-частотною характеристиками ланки або системи.

					ДП.АКІТ.8091517.00.00.000 ПЗ	Арк.
						46
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

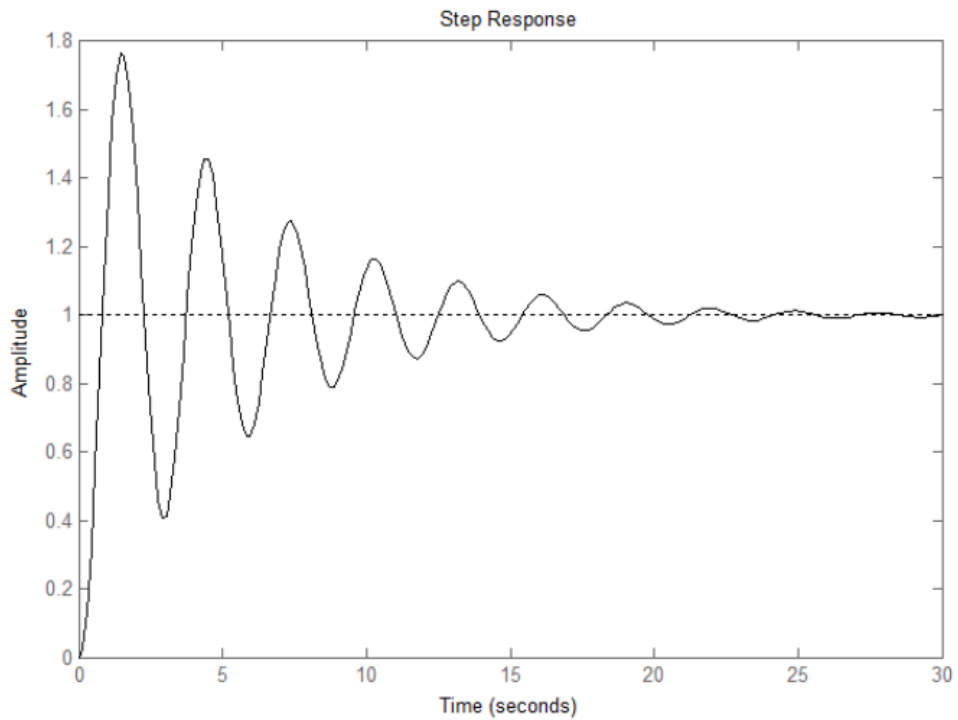


Рисунок 3.3 – Перехідна характеристика

АЧХ демонструє, як ланка пропускає сигнали різних частот. ФЧХ показує затримку або випередження вихідного сигналу відносно вхідного на різних частотах [6].

Для отримання АЧХ, ФЧХ та АФЧХ необхідно замінити оператор Лапласа в передавальній функції на оператор Фур'є. Це дозволяє знайти дійсну та уявну частини відповідної частотної передавальної функції системи.

АФЧХ об'єднує інформацію про амплітудні та фазові зміни, що вносяться системою до гармонічного сигналу на різних частотах.

Ці характеристики є важливими інструментами для аналізу та проектування лінійних систем в частотній області.

$$G(s) = \frac{8}{0.00102(jw)^4 + 0.0856(jw)^3 + 1.75(jw)^2 + (jw) + 8} \quad (3.2)$$

На рисунку 3.4 показано амплітудно-фазову частотну характеристику розімкненої системи:

					ДП.АКІТ.8091517.00.00.000 ПЗ	Арк.
						47
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

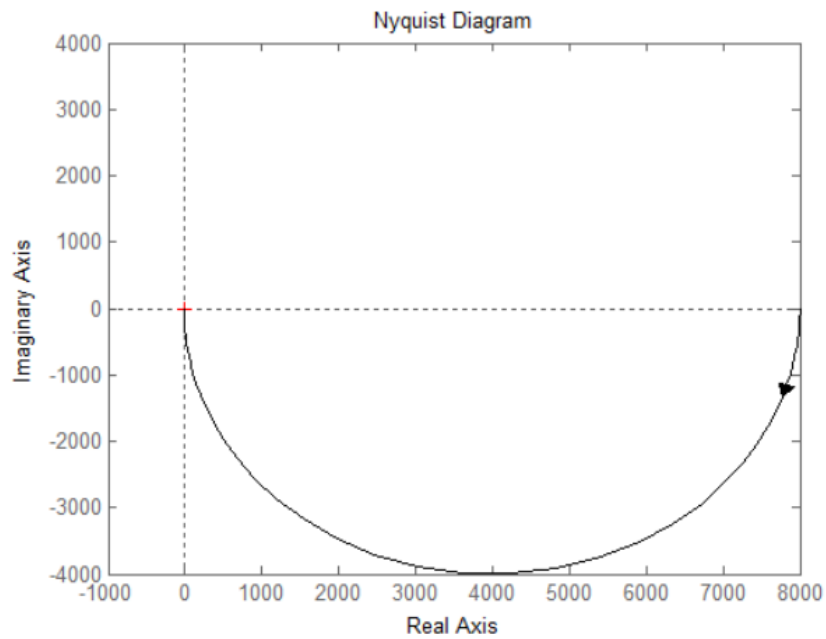


Рисунок 3.4 – АФЧХ розімкнутої системи

На рисунку 3.5 відображено амплітудно-частотну та фазово-частотну характеристики розімкнутої системи:

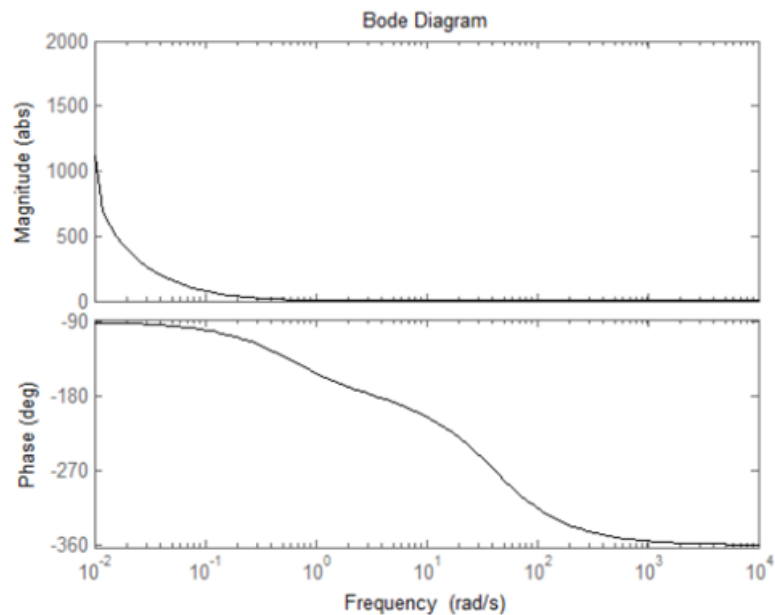


Рисунок 3.5 – АЧХ, ФЧХ розімкнутої системи

Дані амплітудно-частотні та фазово-частотні характеристики були отримані за допомогою Matlab оператором Боде.

					ДП.АКІТ.8091517.00.00.000 ПЗ	Арк.
						48
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		



### 3.2 Аналіз розімкнутої та замкнутої систем керування

Стійкість системи може бути трьох видів: стійка, нестійка або на межі стійкості. Основним методом визначення стійкості є метод Ляпунова, з якого впливають два критерії: критерій Гурвіца та критерій Михайлова. Крім того, існує ще критерій Найквіста.

Метод Ляпунова для визначення стійкості лінійних систем ґрунтується на знаходженні полюсів (коренів характеристичного поліному) системи:

Система буде стійкою, якщо всі корені характеристичного поліному мають від'ємні значення.

Система буде нестійкою, якщо хоча б один корінь характеристичного поліному є додатним.

Система перебуватиме на межі стійкості, якщо принаймні один корінь характеристичного поліному дорівнює нулю або має уявну частину.

Таким чином, метод Ляпунова дозволяє визначити стійкість системи шляхом аналізу розташування полюсів у комплексній площині [20].

Крім критерію Гурвіца та критерію Михайлова, існує також критерій Найквіста, який дозволяє визначити стійкість лінійної системи без безпосереднього знаходження коренів характеристичного рівняння. Цей критерій базується на аналізі амплітудно-фазової частотної характеристики розімкнутої системи в комплексній площині [21]. Необхідною і достатньою умовою стійкості за критерієм Найквіста є те, щоб годограф Найквіста не охоплював точку  $(-1, 0j)$  комплексної площини, а кількість обходів навколо неї дорівнювала різниці між кількостями полюсів у правій і лівій напівплощинах [22].

Крім того, сучасні методи аналізу стійкості часто використовують поняття областей стійкості ( $D$ -розбиття), які є узагальненням класичного підходу Ляпунова і дозволяють отримати необхідні та достатні умови стійкості для систем зі структурованими невизначеностями (рисунок 3.6) [23].

					ДП.АКІТ.8091517.00.00.000 ПЗ	Арк.
						49
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Як видно з рисунку 3.7 замкнута система стійка за I методом Ляпунова, оскільки має від'ємні дійсні частини.

Запас стійкості є мірою відстані системи від втрати стабільності. Прийнятними мінімальними значеннями вважаються 30 градусів для фазового запасу та 6 дБ для запасу за амплітудою. Рисунок 3.7 демонструє ці запаси стійкості, проілюстровані на амплітудно-частотній та фазо-частотній характеристиках.

```
>> G=tf([8],[0.00102 0.0856 1.75 1 0])
G =
      8
-----
0.00102 s^4 + 0.0856 s^3 + 1.75 s^2 + s
Continuous-time transfer function.

>> pole(G)
ans =
      0
-50.0000
-33.3333
-0.5882
```

Рисунок 3.6 – Полюси розімкнутої системи

Відповідно до I методу Ляпунова, система на межі стійкості, оскільки є нульовий корінь за всіх від'ємних полюсів. Також знаходимо полюси замкнутої системи для перевірки стійкості.

Фазовий запас визначає, наскільки система віддалена від становища на межі стійкості по фазі, коли зсув фаз дорівнюватиме 180 градусів. Амплітудний запас показує, наскільки значення передавальної функції відрізняється від одиниці на граничній частоті, де фаза дорівнює -180 градусів [24]. Достатні запаси стійкості забезпечують надійну роботу системи та її стійкість до збурень і невизначеностей у параметрах.

					ДП.АКІТ.8091517.00.00.000 ПЗ	Арк.
						50
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

```

>> G=tf([8],[0.00102 0.0856 1.75 1 8])

G =

      8
-----
0.00102 s^4 + 0.0856 s^3 + 1.75 s^2 + s + 8

Continuous-time transfer function.

>> pole(G)

ans =

-49.8058 + 0.0000i
-33.7646 + 0.0000i
-0.1756 + 2.1525i
-0.1756 - 2.1525i

```

Рисунок 3.7 – Полюси замкнутої системи

Водночас, надто великі запаси можуть призводити до погіршення характеристик перехідного процесу.

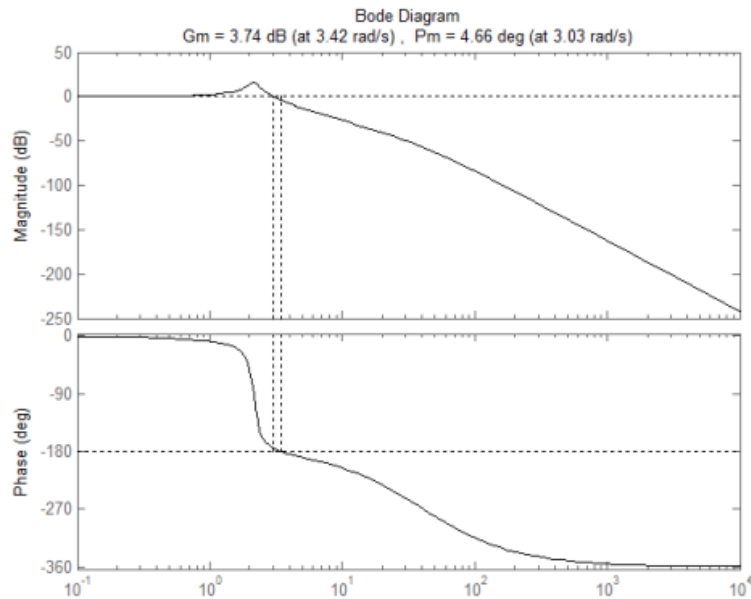


Рисунок 3.8 – Запас стійкості

Опираючись на дані, показані на рисунку 3.8. видно, що:

- запас стійкості за амплітудою = 3,74 dB;
- запас стійкості за фазою = 46,6 grad

Оцінки якості. Для того щоб надалі переконатися в ефективності

					ДП.АКІТ.8091517.00.00.000 ПЗ	Арк.
						51
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

синтезованого керування, запасів стійкості для даного об'єкта недостатньо, необхідно порівняти оцінки якості системи. Оцінки якості системи бувають прямі й непрямі. На рисунку 3.9 показано прямі оцінки якості системи.

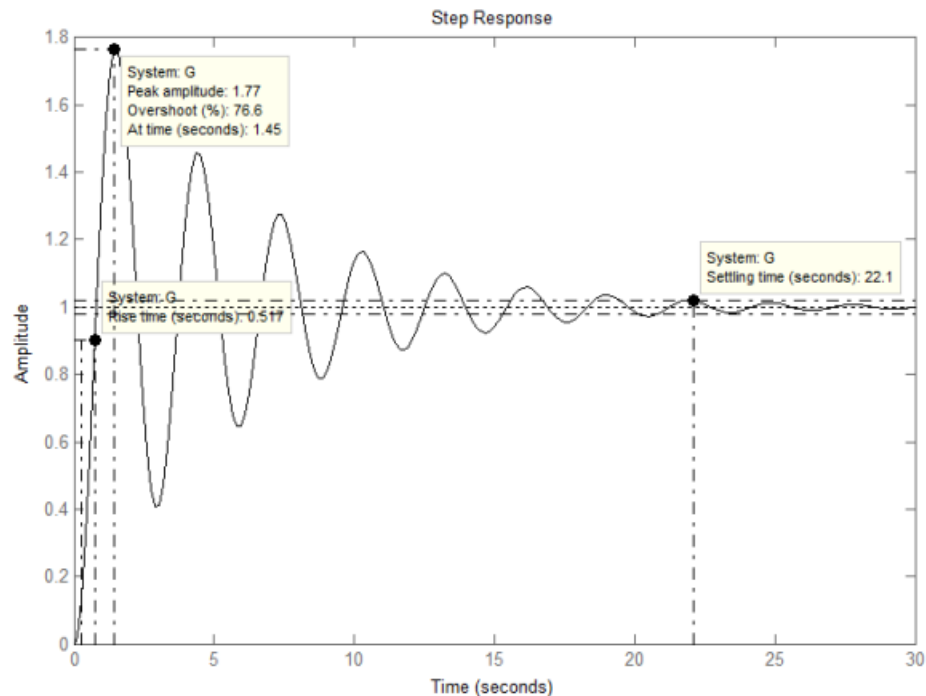


Рисунок 3.9 – Прямі оцінки якості системи в Matlab

Досліджувана замкнута система має такі прямі оцінки якості:

- 1) Час регулювання:  $T_{set} = 22.1$  с
- 2) Перерегулювання:  $P_{ov} = 76,6\%$
- 3) Кількість коливань:  $M = 7$
- 4) Коливання:  $\mu = 82,5\%$
- 5) Період коливань:  $T = 2,93$
- 6) Час досягнення першого максимуму:  $T_p = 1,77$  с
- 7) Час наростання:  $T_R = 0,517$  с
- 8) Декремент затухання:  $x = 1,67$
- 9) Встановлена помилка:

$$e_{ss} = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t);$$

$$e_{ss} = s \cdot \lim_{s \rightarrow 0} \frac{0,00102s^4 + 0,0856s^3 + 1,75s^2 + s + 8}{0,00102s^4 + 0,0856s^3 + 1,75s^2 + s + 16} \cdot \frac{1}{s} = \frac{1}{2}$$

Непрямі оцінки якості. Непрямі оцінки якості бувають кореневі та частотні, які вираховують за полюсами системи.

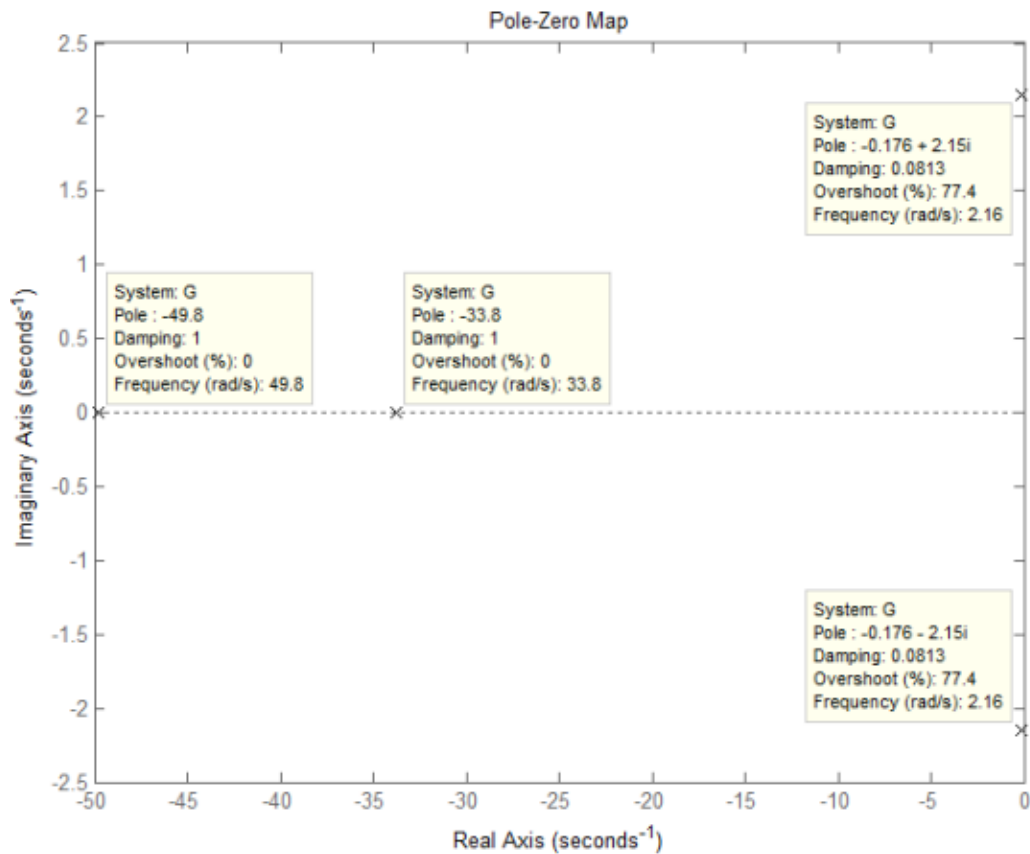


Рисунок 3.10 – Кореневі полюси

Частотні:

- 1) Показник коливань:

$$\mu = \frac{M_{max}(\omega)}{M(0)} = 6,15.$$

- 2) Смуга пропускання: [0-3,34]
- 3) Резонансна частота:  $\omega_p = 2,15$
- 4) Частота зрізу:  $\omega_{CF} = 3,01$

Кореневі:

- 1) Ступінь стійкості:  $\eta = |\alpha_{min} = 3,38|$

					ДП.АКІТ.8091517.00.00.000 ПЗ	Арк.
						53
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

2) Коливання:  $\mu = \frac{\beta}{\alpha} = 0,64$

У таблиці 3.2. подано прямі оцінки перехідного процесу.

Таблиця 3.2 - Значення оцінок якості системи

№	Оцінка якості	Система без регулятора
1	Час регулювання	$T_{set} = 22.1 \text{ c}$
2	Перерегулювання	$P_{ov} = 76,6\%$
3	Кількість коливань	$M = 7$
4	Коливання	$\mu = 82,5\%$
5	Період коливань	$T = 2,93$
6	Час досягнення першого максимуму	$T_p = 1,77 \text{ c}$
7	Час наростання	$T_r = 0,517c$
8	Декремент затухання	$x = 1,67$
9	Встановлена помилка	$e_{ss} = 1/2$

Виходячи з представлених даних у таблиці, необхідний регулятор має позбавити від коливання, оскільки відсоток коливання, що дорівнює 82,5%, занадто високий, необхідно прагнути до мінімального значення.

3.3 Синтез інтелектуальної системи керування на основі переміщення бактерій.

Формула П-регулятора має вигляд:

$$u(t) = k_p e(t). \quad (3.3)$$

де  $k_p$  – коефіцієнт посилення пропорційної складової.

Знаходження граничного коефіцієнта. Параметри регулятора будуть виступатимуть як бактерії, які в природному доборі прагнуть усунути тварин із поганими стратегіями годівлі та сприяють тим, хто має успішні стратегії годівлі. тим, хто має успішні стратегії годування.

Дано передавальну функцію:

$$G(s) = \frac{8}{0.00102 \cdot s^4 + 0.0856 \cdot s^3 + 1.75 \cdot s^2 + s}$$

Знаходимо граничний коефіцієнт посилення для об'єкта керування з П-регулятором. на рисунку 3.11 представлено функціональну схему з регулятором.

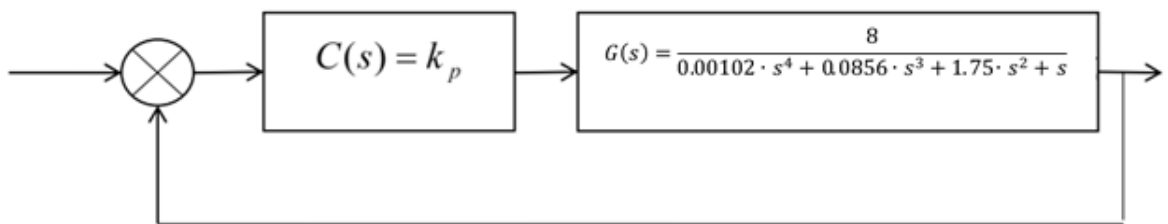


Рисунок 3.11 – Функціональна схема керування

Для цього необхідно створити передавальну функцію щодо помилки задавального сигналу системи з регулятором.

$$T(s) = \frac{G(s) \cdot C(s)}{1 + G(s) \cdot C(s)}. \quad (3.3)$$

Посилаючись на цю формулу, маємо:

					ДП.АКІТ.8091517.00.00.000 ПЗ	Арк.
						55
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$T(s) = \frac{k \cdot k_p}{0.00102 \cdot s^4 + 0.0856 \cdot s^3 + 1.75 \cdot s^2 + s + k \cdot k_p}. \quad (3.4)$$

Характеристичне рівняння:

$$0.00102 \cdot s^4 + 0.0856 \cdot s^3 + 1.75 \cdot s^2 + s + k \cdot k_p = 0.$$

Виводимо матрицю Гурвіца:

Оскільки П-регулятор не вносить істотних змін, достатньо подивитися на параметри рівняння.

$$\Delta = \begin{vmatrix} 0,0856 & 1 & 0 & 0 \\ 0,00102 & 1,75 & 8k_p & 0 \\ 0 & 0,0856 & 1 & 0 \\ 0 & 0,00102 & 1,75 & 8k_p \end{vmatrix}$$

$$a_0 = 0.00102, a_1 = 0.0856, a_2 = 1.75, a_3 = 1, a_4 = k \cdot k_p.$$

Застосуємо критерій Гурвіца:

$$a_0 > 0, a_1 > 0, a_2 > 0, a_3 > 0, a_4 > 0.$$

Випишемо нерівність, у якій присутній коефіцієнт  $k$ :

$$a_4 = k \cdot k_p > 0;$$

$$k > 0.$$

Граничний коефіцієнт посилення:

$$k > 0;$$

$$k_p < 2,538.$$

					ДП.АКІТ.8091517.00.00.000 ПЗ	Арк.
						56
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		



Виходячи з цього, необхідно, щоб коефіцієнт пропорційності, у якому система стійка, лежав у межі  $k_p \in (0; 2,538)$ .

Постановка задачі синтезу інтелектуального регулятора. При заданій математичній моделі об'єкта керування (4) необхідно знайти параметри П-регулятора (5), який забезпечує виконання критерію якості:

$$I = \int_0^{\infty} e^2(t) dt \rightarrow \min.$$

У такому разі спочатку задається перетворення:

$$I = \int_0^{\infty} e(t)^2 dt = J = \frac{1}{2a_n^2 \Delta} (B_m \Delta_m + B_{m-1} \Delta_{m-1} + \dots + B_1 \Delta_1 + B_0 \Delta_0) - \frac{b_m b_{m-1}}{a_n^2}$$

У якому параметри  $a$  і  $b$  вираховуються із передавальної функції замкнутої системи:

$$G(s) = \frac{8k_p}{0.00102s^4 + 0.0856s^3 + 1.75s^2 + s + 8k_p}$$

У даному випадку в системі  $m=0, n=4$ :

$$J = \frac{1}{2a_4^2 \Delta} (B_0 \Delta_0) - \frac{b_1 \cdot 0}{a_2^2} = \frac{1}{2a_4^2 \Delta} (B_0 \Delta_0).$$

Знаходимо потрібні параметри:

$$\Delta = \begin{vmatrix} a_4 & -a_2 & a_0 & 0 \\ 0 & a_3 & -a_1 & 0 \\ 0 & -a_4 & a_2 & -a_0 \\ 0 & 0 & -a_3 & a_1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 8k_p & -1.75 & 0.00102 & 0 \\ 0 & 1 & -0.0856 & 0 \\ 0 & -8k_p & 1.75 & -0.00102 \\ 0 & 0 & -1 & 0.0856 \end{vmatrix}$$

Стовпець  $(m+1-k)$  змінюємо на вектор:

$$[a_{n-1} \quad a_n \quad 0 \quad 0 \dots]^T.$$

					ДП.АКІТ.8091517.00.00.000 ПЗ	Арк.
						57
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Нова отримана матриця має наступний вигляд:

$$\Delta_0 = \begin{vmatrix} a_4 & a_3 & a_0 & 0 \\ 0 & a_4 & -a_1 & 0 \\ 0 & 0 & a_2 & -a_0 \\ 0 & 0 & -a_3 & a_1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 8k_p & 1 & 0.00102 & 0 \\ 0 & 8k_p & -0.0856 & 0 \\ 0 & 0 & 1.75 & -0.00102 \\ 0 & 0 & -1 & 0.0856 \end{vmatrix}$$

Визначник матриць четвертого порядку було отримано в командний рядок MATLAB, представленому в Додатку Г.

Інші параметри знаходяться за формулами:

$$a_n = 64k_p^2;$$

$$B_0 = 64k_p^2.$$

Підставивши всі необхідні значення в початкову формулу, отримуємо вираз інтегральної квадратичної помилки:

$$J = \frac{1}{2 \cdot 64k_p^2 \cdot (20.243k_p - 0.0056k_p^2 + 0.14878)} \cdot 64k_p^2 \cdot (1.19024k_p - 0.469k_p^2).$$

Отриманий вираз використовується як цільова функція в методі оптимізації на основі моделювання переміщення бактерій, щоб знайти значення граничного коефіцієнта за якого система має мінімум.

Початкові дані методу мають такий вигляд: кількість бактерій = 10; кількість хемотаксичних стадій = 10; кількість кроків відтворення = 2; імовірність ліквідації та розсіювання = 0,25; кількість про ліквідацію-розсіювання події = 2. Дані параметри дають задовільні результати за перевітками з простими завданнями на пошук екстремуму. На рис. 2.12. показано процес пошуку мінімуму за допомогою Matlab.

					ДП.АКІТ.8091517.00.00.000 ПЗ	Арк.
						58
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

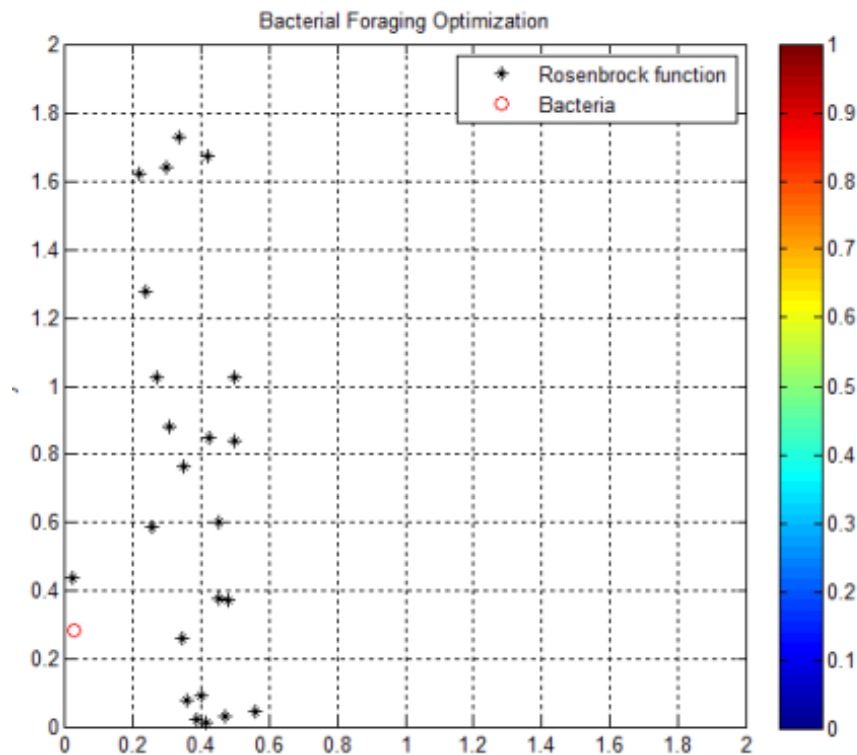


Рисунок 3.12 – Метод оптимізації BFO

Зробимо розрахунок коефіцієнта пропорційності П-регулятора для управління процесом горіння палива на основі методу переміщення бактерій. Для цього необхідно в М-файлі MATLAB створити скрипт, у якому буде реалізовуватися критерій якості методу оптимізації налаштування П-регулятора BFO в MATLAB для генерації оптимізованого значення коефіцієнта пропорційності, що являє собою . Цей скрипт наведено в Додатку А.

Розглядається зважена сума цільової функції і як критерієм зупинки евристичного пошуку обирається максимізація цієї функції заперечення. Пропоновану роботу реалізовано з використанням програмного забезпечення Matlab. Імітаційне дослідження виконано для операцій еталонного стеження та придушення перешкод. Унаслідок цього отримуємо оптимальний коефіцієнт і закон керування:

$$u(t) = 0.025 \cdot e(t). \quad (3.5)$$

Полюси отриманої системи показано на рисунку 3.13. Виходячи з цього малюнка можна помітити більший ступінь стійкості, оскільки найменший за модулем полюс дорівнює  $-0.291$ .

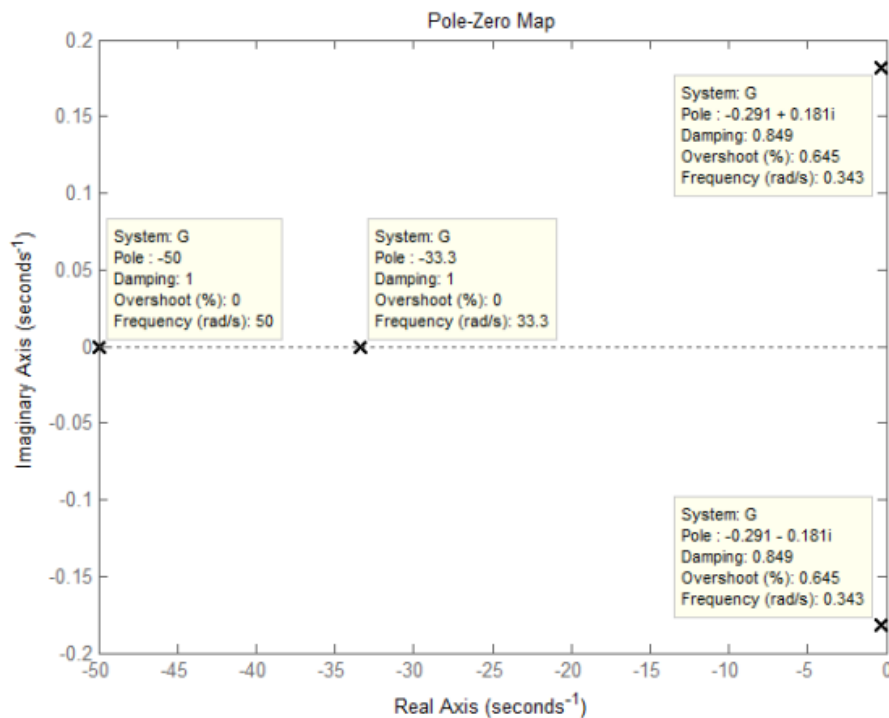


Рисунок 3.13 – Полюси системи, отримані в результаті синтезу регулятора

Далі на рисунку 3.14 було отримано перехідну характеристику з П-регулятором.

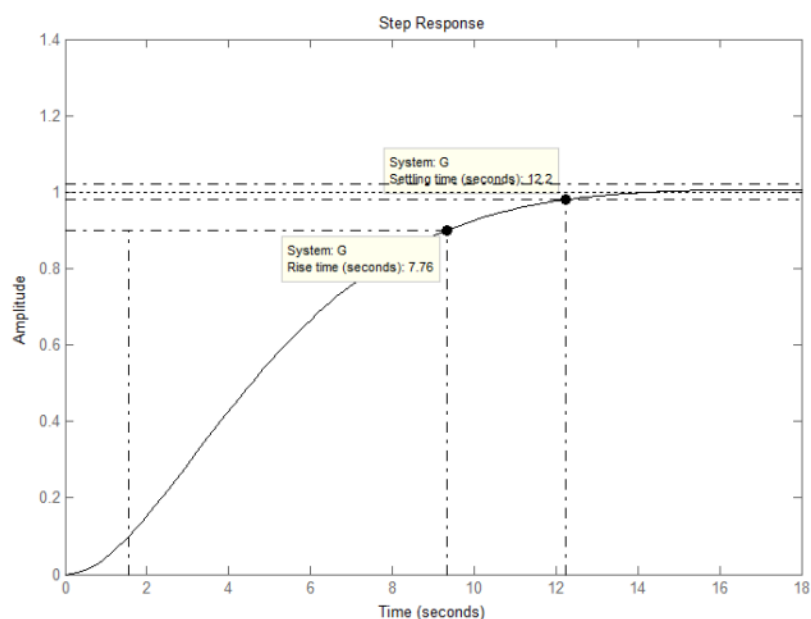


Рисунок 3.14 – Перехідна характеристика з П-регулятором (8)

Програмне забезпечення Control System Toolbox дає змогу аналізувати динаміку лінійних систем. Тут дозволено візуалізувати поведінку системи в часовій і частотній областях. Також витягти характеристики системи, такі як час наростання, перевищення і час осідання. Можна проаналізувати стабільність системи. Використовуємо ці інструменти для аналізу поведінки моделей установок або перевірки працездатності налаштованої системи управління. На рисунку 3.15 показано АЧХ і ФЧХ системи з регулятором і отримано запаси стійкості:

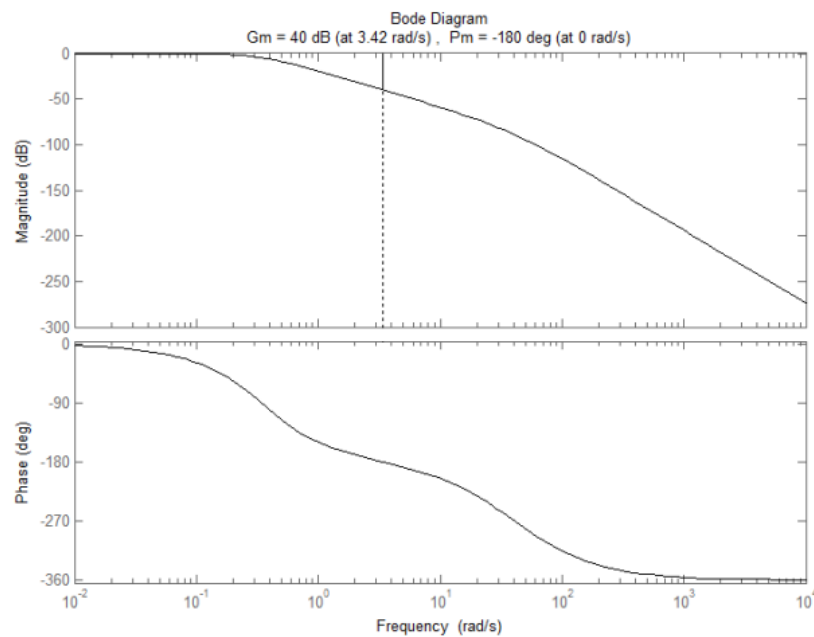


Рисунок 3.15 – АЧХ і ФЧХ системи з П-регулятором (3.5)

Для порівняння, змодуємо в середовищі Matlab вихідну систему, систему з регулятором на основі методу переміщення бактерій і з регулятором, отриманим у результаті тюнінгу в Matlab. Кожен контур замикається зворотним зв'язком через блок суматора (Sum), на вхід подається одиничний ступінчастий сигнал (Step). Вихідні сигнали збираються через елемент Mux для відображення на екрані осцилографа. У блоці PID Controller задається параметр Proportional (P), що представляє коефіцієнт  $k_p$ , тоді як значення параметрів Integral (I) і Derivative (D) дорівнюють нулю. Таким чином реалізується керування об'єктом

за пропорційним законом регулювання. Отримані результати показано на рисунку 3.16.

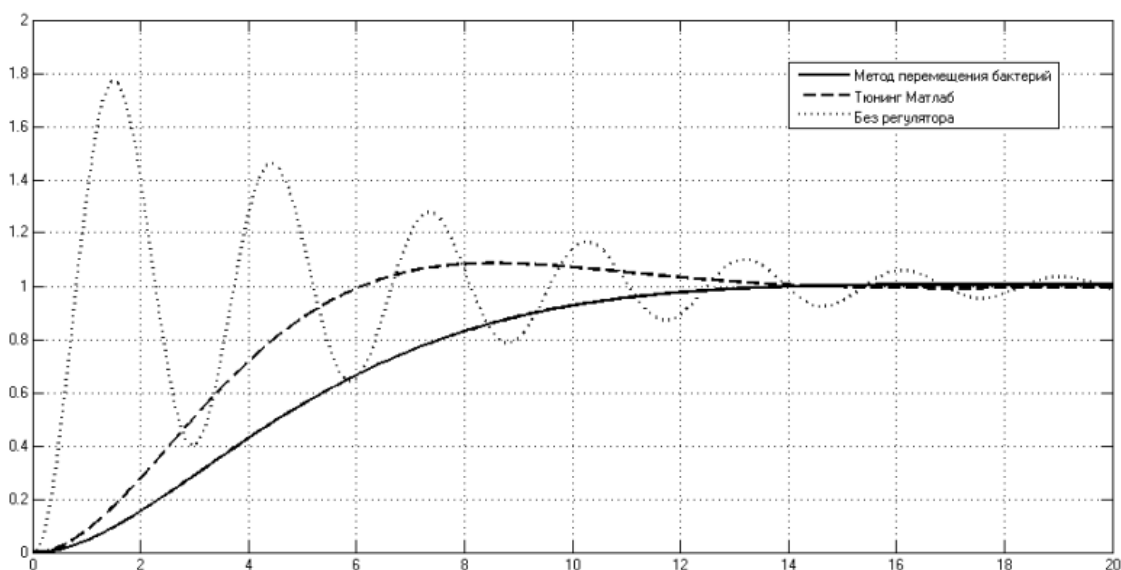


Рисунок 3.16 – Порівняння методів оптимізації

Виходячи з характеристик, можна помітити, що розглянутий метод має переваги перед автоналаштуванням, оскільки немає жодних коливань. Як видно, під час додавання в систему П-регулятор, система значно поліпшується.

Детальніше порівняння значення оцінок якості систем із регулятором і без, розглянемо в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3. Значення оцінок якості системи в порівнянні

№	Оцінка якості	Система без регулятора
1	Час регулювання	$T_{set} = 22.1 \text{ c}$
2	Перерегулювання	$P_{ov} = 76,6\%$
3	Кількість коливань	$M = 7$
4	Коливання	$\mu = 82,5\%$
5	Період коливань	$T = 2,93$
6	Час досягнення першого максимуму	$T_p = 1,77 \text{ c}$
7	Час наростання	$T_r = 0,517 \text{ c}$
8	Декремент затухання	$x = 1,67$
9	Встановлена помилка	$e_{ss} = 1/2$

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата

Відповідно до таблиці можна зробити висновок про те, що синтезована система управління енергетичними об'єктами ТЕЦ задовільняє задані вимоги, мету досягнуто.

					ДП.АКІТ.8091517.00.00.000 ПЗ	Арк.
						63
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підп.</i>	<i>Дата</i>		

## ВИСНОВКИ

У процесі виконання даної дипломної роботи було виконано наступні завдання:

- розроблено інтелектуальну систему керування енергетичними об'єктами ТЕЦ, а саме барабанним котлом;
- у процесі виконання роботи було вивчено особливості технологічного процесу барабанного котла, а також розглянуто різні методи автоматичного керування котлом;
- був освоєний сам об'єкт управління, а саме барабанний котел. Незважаючи на те, що існує багато типів котлоагрегатів, було достатньо вивчити технологічні параметри одного з них. У цій дипломній роботі було вивчено технологічні параметри барабанного котла типу БКЗ 420 – 140;
- розроблено функціональну схему автоматизації;
- проаналізовано динамічні властивості розімкнутої і замкненої системи й отримано результати моделювання в часовій та частотній областях;
- для розроблення алгоритмів керування проведено математичне моделювання декількох процесів на основі даних, отриманих протягом реального часу, а саме протягом реального часу складено математичну модель об'єкта керування і обчислено передавальні функції. На основі того, що коливання не задовольняли задані значення, було сформульовано постановку задачі синтезу П-регулятора. Також розглянуто метод оптимізації на основі моделювання переміщення бактерій. Отримано граничний коефіцієнт критерієм Гурвіца, у результаті якого налаштовували параметр за допомогою оптимального П-регулятора на основі інтелектуального методу.

Також розглянуто метод оптимізації на основі моделювання переміщення бактерій. Отримано граничний коефіцієнт критерієм Гурвіца, у результаті якого налаштовували параметр за допомогою оптимального П-регулятора на основі інтелектуального методу.

					ДП.АКІТ.8091517.00.00.000 ПЗ	Арк.
						64
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		



Одним з ключових досягнень даної роботи стало успішне застосування метаевристичного методу бактеріальної форажної оптимізації (BFO) для налаштування параметрів П-регулятора барабанного котла. На відміну від класичних аналітичних методів розрахунку параметрів регуляторів, BFO дозволив знайти їх оптимальні значення шляхом ітераційного моделювання природних процесів пошуку поживних речовин бактеріями. Такий біоінспірований підхід виявився ефективнішим для вирішення складних багатовимірних задач оптимізації порівняно з традиційними методами.

Крім того, у ході роботи було розглянуто можливість подальшого вдосконалення системи керування шляхом застосування модифікованих варіантів BFO. Наприклад, гібридизація з методом імітації відпалу може допомогти уникнути проблеми зациклення в локальних оптимумах. Також перспективним є використання паралельних обчислень для прискорення збіжності BFO під час розв'язання оптимізаційних задач великої розмірності.

Розроблена інтелектуальна система керування може слугувати основою для створення ефективних систем автоматичного регулювання на інших енергетичних об'єктах ТЕЦ та ТЕС. Застосування сучасних метаевристичних методів оптимізації відкриває нові можливості для підвищення продуктивності, енергоефективності та екологічності експлуатації теплових електростанцій.

Таким чином, результати даного дослідження демонструють перспективність використання біоінспірованих інтелектуальних методів, зокрема BFO, для розробки сучасних систем автоматичного керування складними технологічними процесами в енергетичній галузі.

					ДП.АКІТ.8091517.00.00.000 ПЗ	Арк.
						65
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

1. Шкурат К. Кваліфікаційна робота «Автоматизація процесу обліку та регулювання теплоносія в опалювальних системах». SumDU Repository: Home. Режим доступу: URL: [https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream/123456789/92681/1/Shkurat\\_bak\\_rob.pdf](https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream/123456789/92681/1/Shkurat_bak_rob.pdf)
2. FEATURES OF WATER TREATMENT FOR BOILER ROOMS Thermophysics and Thermal Power Engineering. Home Page. Режим доступу: URL: <https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2021.2>.
3. Гостев В.И., Стеклов В.К., Скляренко С.Н. Оптимальные системы управления с цифровыми регуляторами: Справочник. – К.: КИРЦ «Сенс», 1995. – 484 с.
4. Experimental study of the heat transfer problem in expansion devices in CO2 refrigeration systems / M. Mastrowski et al. Energy. 2019. Vol. 173. P. 586–597. Режим доступу: URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.097>
5. Large-scale aggregation of prosumers toward strategic bidding in joint energy and regulation markets / X. Xiao et al. Applied Energy. 2020. Vol. 271. P. 115159. Режим доступу: URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115159>
6. Ахметжанов Р.Д., Федюн Р.В. Розробка і дослідження системи автоматичного керування параметрами водогрійних котлів системи централізованого теплопостачання міського мікрорайону. Донецьк : ДонНТУ, 2015. 15 с.
7. Torque Ripple Mitigation of T-3L Inverter Fed Open-End Doubly-Salient Permanent-Magnet Motor Drives Using Current Hysteresis Control / H. Liu et al. Energies. 2019. Vol. 12, no. 16. P. 3109. Режим доступу: URL: <https://doi.org/10.3390/en12163109>
8. ДСТУ Б А.2.4-16:2008. Головна - Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного. Режим доступу: URL:

					ДП.АКІТ.8091517.00.00.000 ПЗ	Арк.
						66
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

<http://www.tsatu.edu.ua/ettp/wp-content/uploads/sites/25/11-dstu-b-a.2.4-16-2008.pdf>.

9. ДСТУ Б А.2.4-4:2009 Основні вимоги до проектної та робочої документації. Останні новини, нормативи та публікації - ДБНУ - Державні

10. Будівельні норми України - норми: ДБН, ДСТУ, СНиП, ГОСТ, СН, ВБН.

Режим доступу URL: [https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu\\_b\\_a\\_2\\_4\\_4\\_2009/5-1-0-781](https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_b_a_2_4_4_2009/5-1-0-781)

11. Awwal Mohammed Arigi, Gayoung Park, Jonghyun Kim An Approach to Analyze Diagnosis Errors in Advanced Main Control Room Operations Using the Cause-Based Decision Tree Method. Energies 2021, 14(13), P. 3832. Режим доступу: <https://doi.org/10.3390/en14133832>

12. Yang Xu, Jingzhou Pang, Xiaoyu Wang, Anding Zhu Enhancing Bandwidth and Back-Off Range of Doherty Power Amplifier With Modified Load Modulation Network. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques ( Volume: 69, Issue: 4, April 2021). Pp. 2291 - 2303 Режим доступу: URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9354111>

13. Браїловський В. В., Савльєв В. Є., Рождественська М. Г. ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ. Режим доступу: URL: <https://archer.chnu.edu.ua/handle/123456789/4744?show=full&locale-attribute=en>

14. Kang L., Tang J., Liu Y. Optimal design of an organic Rankine cycle system considering the expected variations on heat sources. Energy. 2020. Vol. 213. P. 118841. Режим доступу: URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020>

15. Sun Y., Han X. Research on Vibration Fault Diagnosis Technology of Steam Turbine Unit in Power Plant Based on Wavelet Theory. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 631. P. 012096. Режим доступу: URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/631/1/012096>

					ДП.АКІТ.8091517.00.00.000 ПЗ	Арк.
						66
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

16. Rokni M. (2019) Boiler tubes failure diagnosis using a convolutional neural network. *Neural Comput & Applic*, 31, 7615–7625. Режим доступу: <https://doi.org/10.1007/s00521-018-3538-z>

17. Timothy G. Walmsley, Michael R.W. Walmsley, Martin J. Atkins, James R. Neale Improving energy recovery in milk powder production through soft data optimisation / T. G. Walmsley et al. *Applied Thermal Engineering*. 2013. Vol. 61, no. 1. P. 80–87. Режим доступу: URL: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.01.051>

18. Rodgers B. *Tire Engineering: An Introduction*. Routledge & CRC Press. Режим доступу: URL: <https://www.routledge.com/Applications-of-Bacterial-Foraging-Optimization-in-Clustering-Analysis/Tang-Sheng-Hu/p/book/97803674422>

19. Mengting Jiang, Camilo Rindt and David M. J. Smeulders Optimal Planning of Future District Heating Systems—A Review *Energies* 2022, 15(19), 7160. Режим доступу: <https://doi.org/10.3390/en15197160>

20. Усенко О. О. Випускна кваліфікаційна робота здобувача першого (бакалаврського) рівня освіти «СИСТЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ РОБОТОМ МАНІПУЛЯТОРОМ». Режим доступу: URL: <http://dspace.wunu.edu.ua/bitstream/316497/48304/1/%D0%A3%D1%81%D0%B5%D0%BD%D0%BA%D0%BE.pdf>

21. GAȔOLEWSKI M. DATA FUSION. THEORY, METHODS, AND APPLICATIONS : монографія. Warsaw : INSTITUTE OF COMPUTER SCIENCE POLISH ACADEMY OF SCIENCES, 2015. 291 p. Режим доступу: URL: [https://www.researchgate.net/publication/293483803\\_Data\\_Fusion\\_Theory\\_Methods\\_and\\_Applications](https://www.researchgate.net/publication/293483803_Data_Fusion_Theory_Methods_and_Applications).

22. Katsuhiko O. *Modern Control Engineering*. Prentice Hall, 2010. Режим доступу: URL: [http://docs.znu.ac.ir/members/pirmohamadi\\_ali/Control/Katsuhiko%20Ogata%20%20Modern%20Control%20Engineering%205th%20Edition.pdf](http://docs.znu.ac.ir/members/pirmohamadi_ali/Control/Katsuhiko%20Ogata%20%20Modern%20Control%20Engineering%205th%20Edition.pdf)

23. J. Kennedy; R. Eberhart: Particle swarm optimization. *IEEE Xplore*. Режим доступу: URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/488968>

					ДП.АКІТ.8091517.00.00.000 ПЗ	Арк.
						67
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

24. ElectronicsTutorials. Butterworth Filter Design Режим доступу: URL:  
[https://www.electronics-tutorials.ws/filter/filter\\_8.html](https://www.electronics-tutorials.ws/filter/filter_8.html)

					ДП.АКІТ.8091517.00.00.000 ПЗ	Арк.
						68
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підп.</i>	<i>Дата</i>		

ДОДАТОК А

Скрипт М-file

```
function J = fitnessBFO(v)
```

```
% v is a vector with two elements
```

```
% -----
```

```
% Rosenbrock function
```

```
k = v (1);
```

```
J = ((6325941*k)/3125000 - (10914*k^2)/1953125 + 7439/50000)  
/(2*((7439*k)/6250 - (183184*k^2)/390625));
```

```
End
```

					ДП.АКІТ.8091517.00.00.000 ПЗ	Арк.
						69
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

## ДОДАТОК Б Лістинг методу ВФО

```

% (1) Initialization
n = 2;           % Dimension of search space
S = 60;         % Number of bacteria in the colony
Nc = 25;        % Number of chemotactic steps
Ns = 4;         % Number of swim steps
Nre = 4;        % Number of reproductive steps
Ned = 2;        % Number of elimination and dispersal steps
Sr = S/2;       % The number of bacteria reproductions (splits) per generation
Ped = 0.5;      % The probability that each bacteria will be eliminated/dispersed
c(:,1) = 0.05*ones(S,1); % the run length unit (the size of the step taken in each run or tumble)
% Initial positions
for m=1:S       % the initial positions
    B(1,:,1,1) = 10*rand(S,1)';
    B(2,:,1,1) = 10*rand(S,1)';
end
%% Loops
% (2) Elimination-dispersal loop
for l = 1:Ned
    % (3) Reproduction loop
    for k = 1:Nre
        % (4) Chemotaxis (swim/tumble) loop
        for j=1:Nc
            % (4.1) Chemotactic step
            for i=1:S
                % (4.2) Fitness function
                J(i,j,k,l) = fitnessBFO(B(:,i,j,k,l));
                % (4.3) Jlast
                Jlast=J(i,j,k,l);
                % (4.4) Tumble
                Delta(:,i) = unifrnd(-1,1,n,1);
                % (4.5) Move
                B(:,i,j+1,k,l)=B(:,i,j,k,l)+c(i,k)*Delta(:,i)/sqrt(Delta(:,i)*Delta(:,i));
                % (4.6) New fitness function
                J(i,j+1,k,l)=fitnessBFO(B(:,i,j+1,k,l));
                % (4.7) Swimming
                m=0; % counter for swim length
                while m < Ns
                    m=m+1;
                    if J(i,j+1,k,l)<Jlast
                        Jlast=J(i,j+1,k,l);
                        B(:,i,j+1,k,l)=B(:,i,j+1,k,l)+c(i,k)*Delta(:,i)/sqrt(Delta(:,i)*Delta(:,i)) ;
                        J(i,j+1,k,l)=fitnessBFO(B(:,i,j+1,k,l));
                    else
                        m=Ns;
                    end
                end
                J(i,j,k,l)=Jlast; %???
            end % (4.8) Next bacterium
            x = B(1,:,j,k,l);
            y = B(2,:,j,k,l);
            clf % clears figure
            run rose_fungraph.m
            plot(x,y,'*','markers',6) % plots figure
            axis([-1.5 1.5 -1 3]), axis square
            xlabel('x'); ylabel('y')
            title('Bacterial Foraging Optimization'); grid on
            legend('Rosenbrock function','Bacteria')
            pause(.01)
            hold on
        end % (5) if j < Nc, chemotaxis
    end % (6) Reproduction
    % (6.1) Realth
    Jhealth=sum(J(:, :, k, l), 2); % Set the health of each of the S bacteria
    [Jhealth, sortind]=sort(Jhealth); % Sorts bacteria in order of ascending values
    B(:, :, 1, k+1, l)=B(:, sortind, Nc+1, k, l);
    c(:, k+1)=c(sortind, k); % Keeps the chemotaxis parameters with each bacterium at the next
    % (6.2) Split the bacteria
    for i=1:Sr % Sr??
        B(:, i+Sr, 1, k+1, l)=B(:, i, 1, k+1, l); % The least fit do not reproduce, the most fit ones spl
    end
end

```

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата

ДП.АКІТ.8091517.00.00.000 ПЗ

Арк.

70

## ДОДАТОК В

### Продовження лістинг методу ВФО

```
        c(i+Sr,k+1)=c(i,k+1);
    end
end % (7) Loop to go to the next reproductive step
% (8) Elimination-dispersal
for m=1:S
    if Ped>rand % % Generate random number
        B(1,:,1,1)= 50*rand(S,1)';
        B(2,:,1,1)= .2*rand(S,1)';
    else
        B(:,m,1,1,1)=B(:,m,1,Nre+1,1); % Bacteria that are not dispersed
    end
end
end
%% Results
reproduction = J(:,1:Nc,Nre,Ned);
[jlastreproduction,O] = min(reproduction,[],2); % min cost function for each bacterial
[Y,I] = min(jlastreproduction);
pbest = B(:,I,O(I,:),k,1);
display('Best solution:')
display(['x = ' mat2str(pbest(1),2)])
display(['y = ' mat2str(pbest(2),2)])
plot(pbest(1),pbest(2),'ro')
hold off
legend('Rosenbrock function','Bacteria','Best solution')
```

					ДП.АКІТ.8091517.00.00.000 ПЗ	Арк.
						71
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		



## ДОДАТОК Г

Визначення матриці четвертого порядку:

```
Command Window
>> syms k
>> A=[8*k -1.75 0.00102 0;0 1 -0.0856 0;0 -8*k 1.75 -0.00102;0 0 -1 0.0856]

A =

[ 8*k, -7/4, 51/50000, 0]
[ 0, 1, -107/1250, 0]
[ 0, -8*k, 7/4, -51/50000]
[ 0, 0, -1, 107/1250]

>> det(A)

ans =

(7439*k)/6250 - (183184*k^2)/390625

>> M=[1 -1.75 0.00102 0;8*k 1 -0.0856 0;0 -8*k 1.75 -0.00102; 0 0 -1 0.0856]

M =

[ 1, -7/4, 51/50000, 0]
[ 8*k, 1, -107/1250, 0]
[ 0, -8*k, 7/4, -51/50000]
[ 0, 0, -1, 107/1250]

>> det(M)

ans =

(6325941*k)/3125000 - (10914*k^2)/1953125 + 7439/50000
```

					ДП.АКІТ.8091517.00.00.000 ПЗ	Арк.
						72
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		