

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

АКПМ - 20.00.00.000 ПЗ

гр. АКПМ-24-1

Юрій ЛАДИГІН

2025 рік

Міністерство освіти і науки України
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Факультет автоматизації та енергетики
Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Ладигін Юрій Олегович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК

681. 5

(індекс)

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Розроблення системи цифрового керування печами з використанням

(назва роботи)

мікроконтролерних технологій

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(назва освітньої програми)

174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та роботехніка

(шифр і назва спеціальності)

Консультант з нормоконтролю

асистент

(посада)

Л.І. Лагойда

(підпис)

(дата)

(ініціали та прізвище)

Здобувач освітнього ступеня

АКПм-24-1

(шифр групи)

(підпис)

(дата)

Ю.О.Ладигін

(ініціали та прізвище)

Науковий керівник

доц., к.т.н.

(науковий ступінь, вчене звання) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

В.С.Борин

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

доц., к.т.н.

(посада)

(підпис)

(дата)

А.І. Лагойда

(ініціали та прізвище)

Рецензент-опонент

доц., к.т.н.

(посада)

(підпис)

(дата)

М.В.Шавранський

(ініціали та прізвище)

Робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Івано-Франківськ - 2025

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Освітній рівень магістерський

Спеціальність 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКИТ

(А.І. Лагойда)

« » 20 року

**З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**

Ладигіну Юрію Олеговичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення системи цифрового керування печами з використанням мікроконтролерних технологій

керівник роботи доцент, к.т.н. Борин Василь Степанович

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від «10» листопада 2025 року № 699/7

2. Строк подання студентом роботи 08 грудня 2025 року

3. Вихідні дані до роботи Літературні джерела, матеріали переддипломної практики, технологічний регламент

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ. 1. Аналіз технологічного процесу в електричних і газових печах як об'єкта автоматизації. 2. Розробка технічної документації на АСК 3. Синтез цифрових регуляторів систем автоматичного управління параметрами електричних і газових печей. 4. Метрологічний аналіз вибраних ТЗА метрологічне забезпечення основних вимірювальних каналів. 5. Розрахунок показників надійності системи автоматичного регулювання температури в печі ЦС-1. Висновки. Список використаних джерел

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 01 березня 2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Вступ	15.03 2025	
2.	Аналіз технологічного процесу в електричних і газових печах як об'єкта автоматизації	01.04 2025	
3.	Розробка технічної документації на АСК	15.06.2025	
4.	Синтез цифрових регуляторів систем автоматичного управління параметрами електричних і газових печей	30.09.2025	
5	Метрологічний аналіз вибраних ТЗА та метрологічне забезпечення основних вимірювальних каналів	30.10.2025	
6	Розрахунок показників надійності системи автоматичного регулювання температури в печі ЦС-1	30.11.2025	

Студент _____

(підпис)

Ладигін Ю.О. _____

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____

(підпис)

Борин В.С. _____

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Магістерська робота присвячена розробленню сучасної системи цифрового керування промисловими печами на основі мікроконтролерних технологій, що забезпечує підвищення точності регулювання температурних режимів, енергоефективності та надійності роботи теплотехнічного обладнання. У вступних розділах проведено огляд існуючих систем керування печами, визначено їхні недоліки, зокрема низьку швидкодію, обмежену точність вимірювань, недостатню адаптивність до зміни технологічних параметрів та високу енергоємність процесів нагріву. На основі аналізу сформовано вимоги до цифрової системи керування нового покоління, орієнтованої на автоматизацію складних алгоритмів підтримання температури та інтеграцію в сучасні виробничі комплекси.

Запропонована система побудована на базі високопродуктивного мікроконтролера з широким набором периферійних модулів, що дозволяє реалізувати багатоканальний збір даних, точний контроль нагрівальних елементів та швидкодіючі алгоритми регулювання. Розроблено структурну й функціональну схеми системи, обрано типи датчиків температури та виконавчих пристроїв, забезпечено інтерфейсну сумісність із промисловими мережами. Особлива увага приділена цифровій обробці сигналів, використанню адаптивних ПІД-регуляторів, методам компенсації інерційності печей і корекції відхилень у реальному часі.

Проведене моделювання роботи системи продемонструвало зниження амплітуди температурних коливань, скорочення часу виходу на робочий режим і зменшення енерговитрат за рахунок оптимізації контролю нагрівальних елементів. Реалізовані функції самодіагностики, віддаленого моніторингу та захисту від аварійних режимів забезпечують підвищення безпеки експлуатації.

Ключові слова: АВТОМАТИЗАЦІЯ, ПІЧ, ПАРА, СИНТЕЗ, КОНТРОЛЕР, СТРУКТУРА, СИСТЕМА, РЕГУЛЮВАННЯ, АЛГОРИТМ, МОДУЛЬ

ANNOTATION

The master's thesis is devoted to the development of a modern digital control system for industrial furnaces based on microcontroller technologies, which ensures increased accuracy of temperature control, energy efficiency, and reliability of thermal equipment. The introductory sections review existing furnace control systems and identify their shortcomings, including low performance, limited measurement accuracy, insufficient adaptability to changes in technological parameters, and high energy consumption of heating processes. Based on the analysis, requirements were formed for a new generation digital control system focused on the automation of complex temperature maintenance algorithms and integration into modern production complexes.

The proposed system is built on the basis of a high-performance microcontroller with a wide range of peripheral modules, which allows for multi-channel data acquisition, precise control of heating elements, and high-speed regulation algorithms. The structural and functional diagram of the system has been developed, the types of temperature sensors and actuators have been selected, and interface compatibility with industrial networks has been ensured. Special attention is paid to digital signal processing, the use of adaptive PID controllers, methods for compensation of furnace inertia and correction of deviations in real time.

The simulation of the system operation demonstrated a reduction in the amplitude of temperature fluctuations, a reduction in the time to enter the operating mode, and a reduction in energy consumption due to optimized control of heating elements. The implemented functions of self-diagnosis, remote monitoring and protection against emergency modes ensure increased operational safety.

Keywords: AUTOMATION, FURNACE, STEAM, SYNTHESIS, CONTROLLER, STRUCTURE, SYSTEM, REGULATION, ALGORITHM, MODULE

ЗМІСТ

	ст.
ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ.....	7
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ В ЕЛЕКТРИЧНИХ І ГАЗОВИХ ПЕЧАХ ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ	13
1.1 Будова і робота трубчастої печі її технічна характеристика	13
1.2 Підігрівання теплоносія в трубчатих печах	16
1.3 Вибір та обґрунтування параметрів контролю і регулювання в трубчатій печі	17
1.4 Опис об'єкту.....	17
Висновки до розділу 1.....	19
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА ТЕХНІЧНОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ НА АСК.....	21
2.1 Розробка функціональної структури системи контролю і керування технічних засобів	21
2.2 Розробка структурної схеми	22
2.5 Висновки до розділу 2.....	24
РОЗДІЛ 3. СИНТЕЗ ЦИФРОВИХ РЕГУЛЯТОРІВ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ ПАРАМЕТРАМИ ЕЛЕКТРИЧНИХ І ГАЗОВИХ ПЕЧЕЙ	25
3.1 Синтез цифрових регуляторів системи автоматичного управління температурою електропечі	25
3.2. Синтез цифрового регулятора однопотокової трубчастої печі	34
Висновки до розділу 3.....	40
РОЗДІЛ 4. МЕТРОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ВИБРАНИХ ТЗА МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОСНОВНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ КАНАЛІВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ РЕГЕНЕРАЦІЇ ДЕГ НА УСТАНОВЦІ	41

4.1 Метрологічний аналіз вибраних ТЗА з точки зору забезпечення необхідної точності регулювання основних технологічних параметрів	41
4.2 Метрологічне забезпечення основних вимірювальних каналів технологічних параметрів	43
Висновки до розділу 4.....	49
РОЗДІЛ 5. РОЗРАХУНОК ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ В ПЕЧІ ЦС-1..	50
5.1 Елементи теорії надійності.....	50
5.2 Розробка логічних систем розрахунку АСР температури в печі ЦС-1.....	51
Висновки до розділу 5.....	55
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	56
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	57

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

АСК – автоматизована система керування;

АСР – автоматизована система регулювання;

АЦП – аналого-цифровий перетворювач;

БН – блок навантаження;

В – вимірювач;

ВМ – виконавчий механізм;

КВП і А – контрольно-вимірювальні прилади і автоматизація;

КО – керований об'єкт;

КС – комутатор сигналів;

П – пропорційний;

ПІ – пропорційно-інтегральний;

ПІД – пропорційно-інтегральний диференціальний;

Р – регулятор;

САК – система автоматичного керування;

СКВ – середньоквадратичне відхилення;

СН и П – санітарні норми і правила;

ТЗА – технічні засоби автоматизації;

ФСА – функціональна схема автоматизації.

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасні промислові печі є ключовими елементами технологічних процесів у металургії, керамічному виробництві, машинобудуванні, харчовій промисловості та інших галузях, де необхідне точне підтримання температурних режимів. Якість термічної обробки матеріалів, енергоефективність виробництва та надійність обладнання напряму залежать від ефективності системи керування печами. Традиційні аналого-регуляторні системи, що широко застосовувалися раніше, не завжди здатні забезпечити високу швидкість, гнучкість налаштувань і точність стабілізації температури в умовах швидких змін технологічних параметрів та зростання енергетичних витрат.

На тлі глобальної тенденції до цифровізації промисловості важливого значення набувають мікроконтролерні системи керування, які дозволяють реалізувати оптимальні алгоритми регулювання, автоматичну корекцію відхилень, багатоканальний збір інформації та моніторинг у реальному часі. Використання сучасних мікроконтролерів забезпечує високу точність обробки сигналів від температурних датчиків, швидке формування керувальних впливів та інтеграцію з системами верхнього рівня, такими як SCADA та MES. Завдяки цьому можливе суттєве зменшення енерговитрат, оптимізація процесів нагріву, а також підвищення продуктивності та довговічності обладнання.

Актуальність розроблення системи цифрового керування обумовлена також зростанням вимог до безпеки експлуатації печей. Наявність високих температур, термічної інерційності та ризику виходу обладнання з ладу потребує впровадження інтелектуальних механізмів захисту, автоматичного діагностування та прогнозування аварійних ситуацій. Мікроконтролерні системи мають потенціал забезпечити багаторівневий контроль, завчасне виявлення відхилень і надійний перехід у безпечний режим роботи.

Таким чином, розроблення цифрової системи керування печами з використанням мікроконтролерних технологій є актуальним науково-технічним

завданням, що сприяє підвищенню ефективності, стабільності та енергетичної оптимізації сучасних промислових процесів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дана магістерська робота виконувалась автором відповідно до основного наукового напрямку діяльності кафедри «Автоматизації та комп'ютерно - інтегрованих технологій» Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (ІФНТУНГ). «Синтез комп'ютерних систем та розробка програмного забезпечення для об'єктів нафтогазового комплексу» (ДР №011U005890) та комплексної цільової програми «Науково-організаційні засади нарощування видобутку вітчизняних нафти і газу та диверсифікації постачання енергетичних ресурсів для підвищення енергетичної безпеки України» (ДР №0115U007099). Автор роботи у рамках обраної теми безпосередньо виконав всі розділи, розробив інтелектуальну систему технологічного процесу отримання перегрітої пари та вдосконалив АСУ ТП даного процесу.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності технологічного процесу керування параметрами парового котла.

Досягнення поставленої мети здійснюється розв'язанням таких основних задач:

- проаналізувати існуючі підходи до проблеми ідентифікації і моделювання процесу керування паровим котлом для задач автоматичного регулювання;
- проаналізувати статистичні характеристики параметрів і показників процесу отримання параметрів парового котла на основі експериментальних даних;
- проаналізувати потенційні небезпеки та забезпечити безаварійну роботу автоматичної системи керування процесом керування паровим котлом;

Об'єктом дослідження є паровий котел.

Предметом дослідження є методи теорії автоматичного керування – для розробки системи керування та алгоритму її функціонування; методи

спектрально-кореляційного аналізу і обробки експериментальних даних – для аналізу закономірностей досліджуваних процесів і їх статистичних характеристик; методи ідентифікації систем – для моделювання об'єкта керування на основі вхідних і вихідних даних про досліджуваний об'єкт; методи імітаційного моделювання – для тестування розробленої системи на ПК..

Методи дослідження. Для реалізації мети дослідження та вирішення поставлених завдань у роботі застосовано комплекс наукових та інженерних методів, що охоплюють як теоретичні, так і практичні аспекти розроблення цифрової системи керування печами:

1. Методи математичного моделювання та імітаційного моделювання – побудова моделей температурних режимів печі, розробка алгоритмів цифрового керування та оцінка їх ефективності у різних режимах роботи, дослідження динаміки перехідних процесів і впливу зовнішніх збурень.

2. Синтез та проектування мікроконтролерної системи – вибір апаратної платформи, датчиків температури, виконавчих пристроїв та інтерфейсів; розробка структурних та функціональних схем системи; впровадження алгоритмів цифрової обробки сигналів, адаптивного регулювання та самодіагностики.

3. Методи аналізу та оцінки ефективності – обробка результатів моделювання та експериментів, порівняння продуктивності системи з існуючими аналогами, визначення впливу застосованих мікроконтролерних технологій на стабільність, точність та енергоспоживання печей.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у наступному:

1. Вперше запропоновано комплексний підхід до цифрового керування промисловими печами, що поєднує багатоканальний збір температурної інформації, цифрову обробку сигналів та адаптивне регулювання режимів нагріву у реальному часі на базі мікроконтролерних платформ.

2. Запропоновано методику адаптивного регулювання температури печей, яка автоматично коригує параметри керування залежно від динаміки нагрівальних елементів, зовнішніх навантажень та інерційності системи, що

забезпечує швидкий вихід на оптимальний режим роботи з мінімальними коливаннями.

Практичне значення одержаних результатів. Результати проведеного дослідження мають значне прикладне значення та можуть бути безпосередньо впроваджені в сучасні технологічні процеси, що передбачають використання промислових печей різного призначення. Розроблена мікроконтролерна система цифрового керування забезпечує підвищення точності підтримання температурних режимів, що дає можливість покращити якість термічної обробки матеріалів, зменшити відсоток браку та стабілізувати технологічні характеристики готової продукції.

Розроблена система є універсальною та може бути масштабована для печей різної конструкції та потужності – від лабораторних установок до великогабаритних промислових агрегатів. Завдяки застосуванню сучасних мікроконтролерів забезпечується висока надійність, розширюваність, можливість інтеграції з SCADA-системами та іншими інформаційними платформами, що сприяє цифровізації виробництва та переходу до концепції «розумного» технологічного обладнання.

Впровадження системи дозволяє автоматизувати рутинні операції, підвищити безпеку роботи печей шляхом реалізації механізмів самодіагностики та захисту, а також забезпечити довготривалу безаварійну експлуатацію нагрівальних елементів і виконавчих пристроїв. Таким чином, результати дослідження можуть бути використані у промисловості, енергетиці, матеріалознавстві та інших галузях, де важливим є точне та ефективне керування процесами нагрівання.

Особистий внесок. Всі наукові результати та положення магістерської роботи, які виносяться на захист, одержані автором на основі результатів аналізу літературних джерел і власних досліджень.

Апробація результатів магістерської роботи. Основні результати роботи доповідались і одержали позитивну оцінку на міжнародній конференції. Borun V.S., Ladygin Yu.O. Development of a digital furnace control system using

microcontroller technologies. Modern aspects of modernization of science: status, problems, development trends. Materials of the 62th International Scientific and Practical Conference. November 7, 2025, Shumen (Bulgaria). Pp. 110-113. DOI: <https://doi.org/10.52058/62>

Публікації. Основні результати магістерської роботи викладено у 1 публікації (тези міжнародної конференції).

Структура і обсяг магістерської роботи. Магістерська робота складається зі вступу, семи розділів, висновків і додатків. Обсяг роботи 59 сторінок машинописного тексту.

Магістерська робота містить 15 рисунків, 3 таблиці, список використаних літературних джерел із 22 найменувань.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ В ЕЛЕКТРИЧНИХ І ГАЗОВИХ ПЕЧАХ ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ

1.1 Будова і робота трубчастої печі її технічна характеристика

Підприємства нафтопереробної та нафтохімічної промисловості широко використовують різноманітні трубчасті печі, призначені для вогневого нагрівання, випаровування й перегрівання рідких і газоподібних середовищ, а також для реалізації високотемпературних технологічних і хімічних процесів. Класифікація таких печей здійснюється за технологічними, теплотехнічними, конструктивними та іншими ознаками.

Одним із ключових критеріїв класифікації промислових трубчастих печей є їх функціональне призначення. Вирізняють групу печей-нагрівачів, що характеризуються високою продуктивністю та помірними температурами (200–400 °С) для нагріву вуглеводневих середовищ. Інша група - це печі нафтохімічного призначення, які виконують одночасно функції нагріву та реактора і працюють в умовах високотемпературних процесів деструкції вуглеводневої сировини.

Основним завданням трубчастої печі є забезпечення теплоносію необхідної кількості теплоти відповідно до вимог технологічного процесу. За технологічними ознаками печі поділяються на нагрівальні та нагрівально-реакційні, а за способом передачі теплоти - на радіаційні, конвекційні та комбіновані конвекційно-радіаційні. Печі великої теплової потужності або ті, що працюють з декількома потоками, зазвичай включають декілька камер радіації та конвекції.

Суттєве вдосконалення конструкцій трубчастих печей дозволило скоротити час контакту сировини в реакційній зоні з 2 с до 0,25–0,40 с та підвищити температуру процесу до 840–870 °С. Для збільшення відносної поверхні теплопередачі змійовики виготовляють багатопотоковими (4–6 паралельних потоків), що забезпечує завершення реакцій за мінімальний проміжок часу.

Вертикальне розміщення труб у сучасних печах забезпечує їх компактність і рівномірність прогріву. Наведені конструктивні рішення дозволяють

досягати теплонапруженості до 222 тис. кДж/(м²·год) та максимально допустимих температур стінок змійовика, що відповідають характеристикам жаростійких сталей (наприклад, X25H20).

З метою оптимізації відносної поверхні теплообміну (співвідношення поверхні до одиниці реакційного об'єму), конструкція реакційних печей передбачає багатопотокову архітектуру, що зазвичай включає від чотирьох до шести паралельних потоків. Критично важливим є забезпечення такого об'єму реакційного змійовика, який би гарантував завершення цільової реакції протягом мінімально необхідного часового інтервалу. Технологічно це реалізується шляхом використання печей, оснащених панельними пальниками (англ. panel burners) та екраном одно- або двостороннього опромінювання (радіаційним екраном), що сприяє гомогенному розподілу теплової енергії по поверхні реакційних труб.

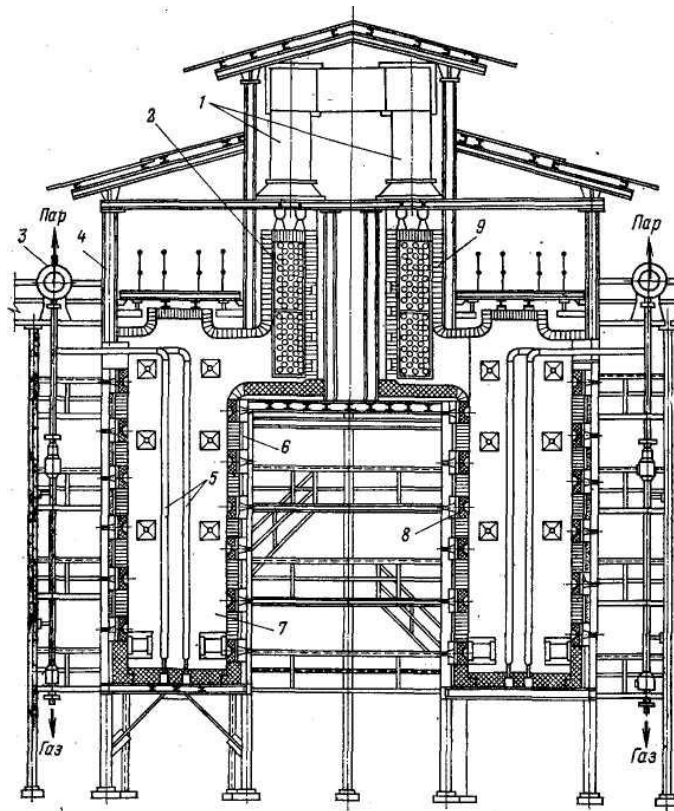


Рис. 1.1. Схема трубчатої печі

Конструктивні особливості реакційної секції трубчастих печей передбачають переважно вертикальне розташування труб, що забезпечує

підвищену компактність пічного агрегату. Як приклад можна розглянути пічний блок конструкції ВНДІНафта, призначений для піролізу бензину. Цей блок складається з двох суміжних печей, які об'єднані спільним димарем. Кожна піч обладнана чотиріпотоківим змійовиком. Сумарна продуктивність зведеного агрегату варіюється в діапазоні від 14 до 16 тонн сировини за годину.

Тепловий режим функціонування визначається теплонапруженістю поверхні труб, середнє значення якої становить 222 тисячі кілоджоулів на один квадратний метр за годину. Такий тепловий потік забезпечує максимальну температуру стінки змійовика 988 градусів за Цельсієм, що є допустимим лімітом для матеріалу труб, зокрема сталі марки X25H20.

Суміш сировини та водяної пари, частка якої становить 50–70%, попередньо подається у частину труб конвекційної секції, розташованої у верхній зоні печі. Призначення цієї секції полягає виключно у нагріванні або комбінованому процесі нагрівання та випаровування сировини. Температура на виході з конвекційної секції встановлена на рівні 600 градусів за Цельсієм.

Ефективність процесу піролізу критично залежить від поєднання високої температури та мінімізованого часу контакту реагентів. Для трубчастих реакційних печей оптимальні умови досягаються при температурі 840–860 градусів за Цельсієм і часі контакту в діапазоні 0,3–0,5 секунди.

Необхідна глибина перетворення сировини досягається виключно за умови високої теплонапруженості поверхні труб. Для деяких високоінтенсивних печей цей показник може сягати 335–378 кілоджоулів на квадратний метр за годину (що еквівалентно 80–90 тисячам кілокалорій на квадратний метр за годину).

Інтенсивність процесу теплопередачі від внутрішньої поверхні стінок труб до потоку сировини визначається швидкістю цього потоку. З метою збільшення співвідношення площі поверхні до об'єму сировинного потоку та, відповідно, інтенсифікації теплообміну, багатопотокові змійовики піролізних печей виготовляють із труб зменшеного діаметру.

Можливість подальшого підвищення швидкості паросировинної суміші лімітується зростанням гідравлічного опору в трубах. Це призводить до

небажаного підвищення абсолютного тиску в зоні реакції, що є фактором, що перешкоджає цільовому процесу. З метою зниження гідравлічного опору реакційної секції, інколи застосовують змійовики зі змінним профілем перетину, який поступово збільшується у напрямку виходу продуктів.

1.2 Підігрівання теплоносія в трубчатих печах

Трубчаста піч конструктивно складається з камери радіації та камери конвекції, пристроїв для спалювання палива, а також обладнання для створення тяги (димові труби, димососи).

Паливом зазвичай слугує природний газ. У печах реалізована роздільна подача газу та повітря, що забезпечує ефективне сумішоутворення та повне згоряння. Чим інтенсивніший контакт реагентів, тим вища температура факела й ефективність теплопередачі.

Повітря подається у піч за рахунок природної тяги через димову трубу або штучної тяги, створюваної димососами в разі недостатнього розрідження.

Передача тепла в трубчастій печі відбувається одночасно трьома механізмами: теплопровідністю, конвекцією та випромінюванням.

В камері радіації передача тепла здійснюється в основному за рахунок випромінювання від факела, розпечених стінок печі, трьохатомних і двохатомних газів (CO_2 , H_2O , O_2), і порівняно в невеликих кількостях за рахунок конвекції. Із всієї кількості тепла, прийнятого радіантними трубами порядку 85-90% передається випромінюванням. У конвекційній камері провідним є конвективний теплообмін (60–70 % тепла), доповнений випромінюванням газів і стінок (20-40 %).

Температура димових газів на виході залежить від температури сировини і зазвичай перевищує її на 120-160 °С, забезпечуючи необхідний тепловий напір для ефективного процесу нагріву.

1.3 Вибір та обґрунтування параметрів контролю і регулювання в трубчатій печі

Температурний і тепловий режими є ключовими характеристиками роботи трубчастої печі. На практиці визначальним критерієм ефективності роботи печі є температура сировини на виході зі змійовика, яка повинна підтримуватися на заданому рівні.

Автоматичні системи регулювання мають забезпечувати одночасно:

- стабілізацію температури сировини на виході,
- оптимізацію процесу горіння в пальниках.

При цьому необхідно враховувати наявність збурювальних впливів, які з певним запізненням змінюють температуру нагрітого теплоносія. Значні зміни цього параметра впливають на ефективність подальших технологічних процесів (наприклад, регенерації ДЕГу). Перегрів димових газів може призвести до аварійних режимів роботи печі.

Основні регулюючі дії полягають у впливі на витрату паливної суміші та співвідношення паливо–повітря.

Контрольованими параметрами є:

- температура технологічного потоку,
- температура димових газів.

1.4 Опис об'єкту

1.4.1 Вхідні та вихідні параметри

Для створення автоматичної системи регулювання вибираємо вертикальну циліндричну піч П-1, в якій нагрівається теплоносії Т-1 до температури 250°C, що подається у випарювач для випарювання ДЕГу.

Основними збурюючими факторами прийнято:

- витрату потоку G_n ;
- вхідну температуру потоку $T_{n.вх}$;
- температуру повітря $T_{нов}$;
- температуру палива $T_{нал}$.

Основні регулюючі дії:

- витрата паливної суміші $G_{нал}$;
- відношення паливної суміші $G_{нов}/G_{нал}$.

До вихідних координат відносяться:

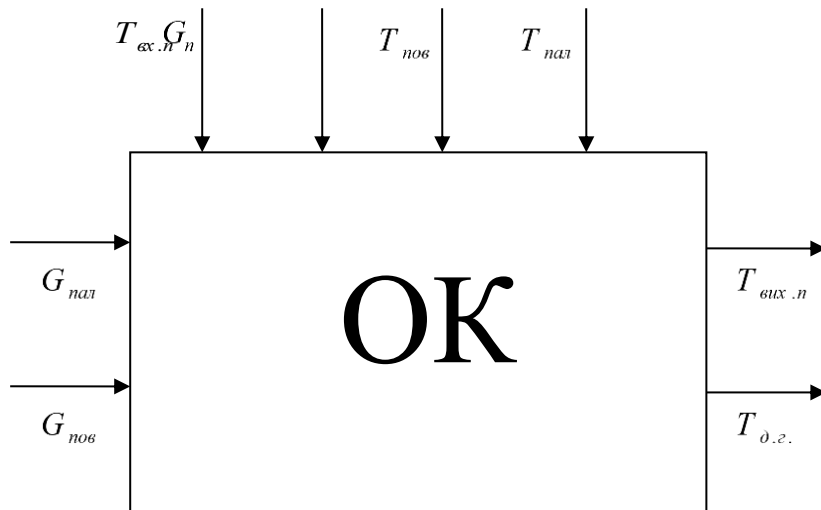
- температура технологічного потоку $T_{п.вих}$;
- температура димових газів $T_{г.г}$.

Найважливіші точки контролю подані в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Значення параметрів контролю та регулювання

Назва параметру	Одиниці вимірювання	Межі коливання параметру
температура сировини на вході в змійовик печі (ТХ)	°С	200±10
температура сировини на виході із змієвика печі (ТН)	°С	250±10
температура паливних газів на виході з зони конвекції	°С	290
тиск нагрітого теплоносія (ТН) на виході з печі	МПа	0,3-0,7
тиск паливного газу	МПа	0,3
витрата холодного теплоносія (ТХ) на вході в піч	м ³ /год	218,75
витрата палива	м ³ /год	1418



G_n – витрата потоку;

$T_{n.вх}$ – вхідна температура потоку;

$T_{нов}$ – температура повітря;

$T_{пал}$ – температура палива;

$G_{пал}$ – витрата паливної суміші;

$G_{нов}$ – витрата повітря;

$T_{вих.n}$ – вихідна температура технологічного потоку;

$T_{д.г.}$ – температура димових газів.

Рис. 1.2. Структурна схема трубчатої печі

Висновки до розділу 1

У результаті проведеного аналізу технологічних процесів, що реалізуються в електричних і газових печах, встановлено, що зазначені теплотехнічні агрегати є складними об'єктами автоматизації, які характеризуються високою інерційністю, нелінійністю та багатофакторною залежністю між параметрами нагріву. Визначено основні технологічні параметри, що підлягають контролю та регулюванню: температура робочої зони, витрата та розподіл теплової енергії,

стан нагрівальних елементів, тиск і склад газового середовища (для газових печей). Також проаналізовано фактори, що впливають на стабільність температурного режиму, зокрема тепловтрати, коливання навантаження, неоднорідність розташування матеріалу в камері та динаміка роботи приводних і захисних систем.

Проведений огляд типових конструкцій печей дозволив ідентифікувати ключові проблеми традиційних систем керування, серед яких: низька точність підтримання температури при зміні теплового навантаження, відсутність адаптивних механізмів корекції, недостатня діагностична функціональність та обмежені можливості інтеграції з сучасними цифровими платформами. Виявлено, що застосування застарілих аналогових регуляторів суттєво обмежує ефективність роботи печей та ускладнює реалізацію енергозберігаючих режимів.

Особлива увага приділена визначенню вимог до автоматизованих систем керування печами. До них належать: висока точність вимірювання температури, швидкодія регуляторів, здатність до роботи в умовах сильних температурних коливань, а також можливість реалізації кількох контурів керування та алгоритмів адаптації. Встановлено, що впровадження мікроконтролерних технологій відкриває можливість створення більш гнучких, інтелектуалізованих та енергоефективних систем керування.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА ТЕХНІЧНОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ НА АСК

2.1 Розробка функціональної структури системи контролю і керування технічних засобів.

Функціональні схеми є базовим видом технічної документації, оскільки вони відображають функціонально-блокову структуру вузлів систем автоматичного контролю, управління та регулювання технологічного процесу, а також характеризують комплектацію об'єкта засобами автоматизації.

Об'єктом управління в системах автоматизації технологічних процесів виступає сукупність основного та допоміжного обладнання разом із вбудованими регулюючими й запірними пристроями.

Виконання функціональних завдань автоматизації забезпечується комплексом технічних засобів, який включає:

- відбірні пристрої;
- первинні перетворювачі (датчики);
- засоби подання інформації оператору;
- комплектні та допоміжні елементи системи.

Розроблення функціональної схеми дає змогу:

1. визначити методи вимірювання основних технологічних параметрів;
2. вибрати технічні засоби автоматизації з урахуванням їх характеристик і умов експлуатації;
3. визначити типи приводів виконавчих механізмів регулюючих і запірних органів;
4. установити розміщення засобів автоматизації на щитах і пультах управління.

Проектом передбачено регулювання витрати, контроль температури та тиску перед еталонами й лічильником, що підлягає повірці. Інформаційно-вимірювальний комплекс має відповідати вимогам економічної доцільності,

швидкодії, точності, зручності експлуатації та наочності подання інформації оператору.

Функціональна схема автоматизації визначає структуру і взаємозв'язки між технологічним процесом, системою контролю й управління. Під час вибору приладів враховують їхнє призначення, метрологічні характеристики та умови роботи.

Метрологічні прилади характеризуються:

- межами вимірювання (верхньою та нижньою границями),
- класом точності, який відповідає максимальній допустимій похибці.

Класи точності приладів відповідають стандартним рядам: 0,01; 0,015; 0,02; 0,025; 0,04; 0,05; 0,06; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,4; 0,5; 0,6; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 4,0.

У вибухонебезпечних умовах використовують прилади у вибухозахищеному виконанні з відповідними видами захисту (вибухонепроникні, герметизовані, маслонаповнені, кварцонаповнені тощо).

Підбір первинних вимірювальних перетворювачів є важливою частиною проектування, оскільки загальна похибка вимірювальних каналів значною мірою визначається точністю датчиків. При цьому враховується не лише метрологічна якість, але й економічна доступність приладів.

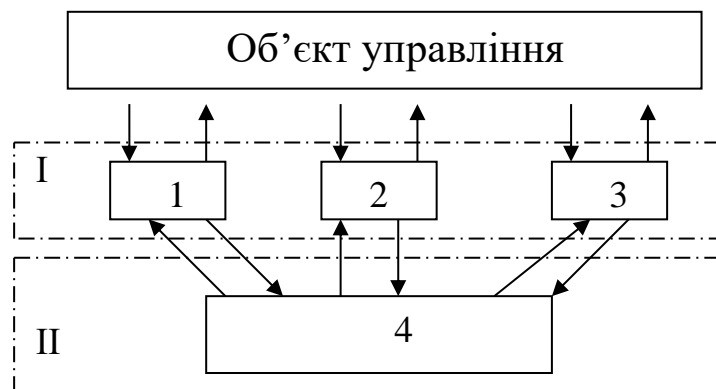
2.2 Розробка структурної схеми

Метою структурної схеми є визначення систем контролю й управління технологічним процесом та встановлення взаємозв'язків між щитовим обладнанням, пультами управління, локальними постами та технологічними об'єктами. Структурна схема також відображає організацію централізованого управління.

Під час розробки автоматизованої системи управління технологічним процесом (АСУ ТП) враховують такі вимоги:

- забезпечення надійного та ефективного функціонування технологічного обладнання;
- реалізація повного спектру функцій керування, включно з підтриманням параметрів, захистом обладнання та контролем технологічних змінних;
- забезпечення взаємодії оператора з технологічним процесом у реальному часі;
- можливість отримання оперативної та архівної інформації для обліку та аналізу роботи підприємства.

Структурна схема автоматизації процесу представлена на рис. 2.1.



де, I – перший рівень управління (1, 2, 3 – цифрові регулятори і індикатори).

II – другий рівень управління (4 – ПЕОМ).

Рис. 2.1. Структурна схема процесу автоматизації

У системі першого рівня передбачено три режими управління:

1. керування командами з вищого рівня;
2. автономне формування команд першим рівнем;
3. комбінований режим - частина команд надходить із вищого рівня, частина генерується локально.

Для другого рівня передбачено аналогічний набір режимів:

1. формування команд безпосередньо на другому рівні;
2. передавання всіх команд на засоби першого рівня;

3. змішаний режим розподілу функцій керування.

Запропонована структура забезпечує високу надійність, оперативність, ремонтпридатність та оптимальний рівень централізації. Окрім цього, мінімізується кількість необхідних каналів зв'язку та засобів контролю.

Висновки до розділу 2

У ході розроблення функціональної структури системи контролю і керування технічних засобів встановлено ключові принципи побудови ефективної автоматизованої системи, здатної забезпечувати високу точність, надійність та оперативність керування технологічними процесами. Проведений аналіз дозволив сформувавши оптимальну архітектуру системи, що включає взаємопов'язані підсистеми збору даних, первинної обробки сигналів, діагностики, виконавчого керування та інформаційної взаємодії з оператором.

Сформована функціональна структура відображає логічний розподіл функцій між апаратними та програмними компонентами, що забезпечує узгоджену роботу сенсорних модулів, мікропроцесорних контролерів, засобів комунікації та виконавчих механізмів. Визначено необхідний набір контрольованих технологічних параметрів, обґрунтовано вибір типів датчиків і засобів перетворення сигналів, а також встановлено оптимальні режими їх взаємодії з центральним контролером. У межах розділу ідентифіковано основні функціональні вимоги до системи керування, такі як модульність, масштабованість, адаптивність та можливість інтеграції з сучасними мережевими інфраструктурами. Створена структура передбачає реалізацію механізмів самодіагностики, аварійного оповіщення, інтелектуальної обробки даних та підтримку стандартних протоколів обміну, що суттєво підвищує надійність і зручність експлуатації технічних засобів.

РОЗДІЛ 3

СИНТЕЗ ЦИФРОВИХ РЕГУЛЯТОРІВ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ ПАРАМЕТРАМИ ЕЛЕКТРИЧНИХ І ГАЗОВИХ ПЕЧЕЙ

3.1. Синтез цифрових регуляторів системи автоматичного управління температурою електропечі

Серед найважливіших напрямів підвищення енергоефективності промислових установок вагому роль відіграє автоматизація процесів споживання електричної енергії. Одним із ключових об'єктів, де питання автоматичного регулювання параметрів є особливо актуальним, виступає електрична піч великої потужності.

Динамічні характеристики електропечі визначено в роботі [1], у якій подано лінійну модель об'єкта управління. Передавальна функція цієї моделі має вигляд:

$$G(s) = \frac{\alpha}{(s+a)(s+b)} e^{-\tau s} \quad (3.1)$$

де $a = 1/T_1$, $b = 1/T_2$, $\alpha = \frac{K_0}{T_1 T_2}$. Отримані в результаті експериментальних вимірювань значень сталих часу і коефіцієнту підсилення наступні: $T_1=122\text{с}$, $T_2=14,5\text{с}$, $\tau=3,9\text{с}$, $K_0=7,2^\circ\text{C}/\%$.

Структурна схема системи автоматичного управління температурою електропечі, розроблена та реалізована в інтерактивному середовищі MATLAB, представлена на відповідному рисунку (рис. 3.1). Необхідно враховувати, що підсилювач має виражену нелінійність у вигляді насичення, рівень якого встановлений на позначці 5, що відповідає значенню 18. З цього випливає, що при значних величинах керуючих впливів, спрямованих на об'єкт управління, функціонування системи набуває нелінійного характеру.

У даному дослідженні для об'єкта управління в системі автоматичного регулювання електропіччю запропоновано застосування аналогового

пропорційно-інтегрально-диференціального (ПІД) регулятора. Передавальна функція цього регулятора описується наступним чином:

$$W(s)=K+K_i/s+K_d s, \quad (3.2)$$

Де оптимальними коефіцієнтами являються наступні:

$$K=4,84\%/^{\circ}\text{C}, K_i=0,246 \%/^{\circ}\text{C}/\text{c}, K_d=7,2\% \cdot \text{c}/^{\circ}\text{C}.$$

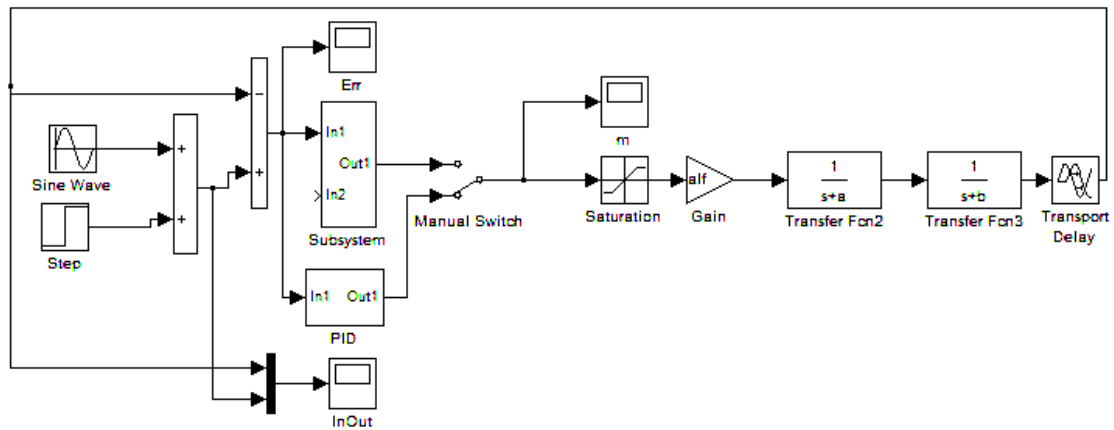


Рис. 3.1. Структурна схема системи управління температурою електропечі

У системі MATLAB передавальна функція цифрового пропорційно-інтегрально-диференціального регулятора, який на рисунку 3.1 позначений як блок PID, може бути представлена у кількох варіаціях. Це зумовлено тим, що процеси інтегрування та диференціювання у дискретній формі можуть бути реалізовані різними методами апроксимації. Якщо застосувати апроксимацію похідної першою різницею, а для інтегрування використати метод, що базується на трапецеїдальній апроксимації, передавальна функція цифрового ПІД-регулятора набуває наступного вигляду:

$$W(z) = K + \frac{K_i h_0}{2} \frac{z+1}{z-1} + \frac{K_d}{h_0} \frac{z-1}{z} \quad (3.3)$$

де h_0 - крок дискретизації (крок моделювання). Структурна схема цифрового ПІД-регулятора приведена на рис.3.2. При малих кроках моделювання цифровий ПІД-регулятор еквівалентний аналоговому.

Нижче представлені результати дослідження системи з цифровим ПД-регулятором. При довільній входній дії $u(t)$, яка змінюється з максимальною швидкістю ω_{max} і максимальним прискоренням ε_{max} , зручно розглядати еквівалентну гармонійну дію $u_3(t) = U_3 \sin \omega_3 t$, параметри якої визначаються із співвідношень: $U_3 = \omega_{max}^2 / \varepsilon_{max}$, $-\omega_{max} = \varepsilon_{max} / \omega_{max}$. У свою чергу, якщо задані параметри еквівалентної дії, то максимальна швидкість ω_{max} і максимальне прискорення ε_{max} довільної входньої взаємодії знаходяться із співвідношення:

$$\omega_{max} = U_3 \omega_3, \quad -\varepsilon_{max} U_3 \omega_3^2$$

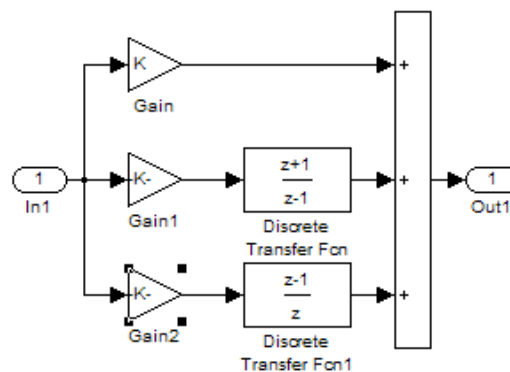


Рис. 3.2. Структурна схема цифрового ПД-регулятора

Проведене дослідження динамічних характеристик системи, оснащеної цифровим ПД-регулятором, виявило наявність значних недоліків у перехідних процесах. Зокрема, спостерігається суттєве перерегулювання, яке досягає 50%, та тривалий час регулювання, що становить до 100 секунд. Водночас, у стаціонарному режимі відстеження гармонічного опорного сигналу поточна помилка регулювання є мінімальною. Як ілюстрацію цих характеристик, процеси, що відбуваються в системі (див. рис. 3.1) при використанні цифрового ПД-регулятора, були проаналізовані під час подачі на вхід системи керуючого впливу, де:

$$u_3(t) = 1 + 0.2 \sin(\pi t / 180)$$

$$\text{де } -u_3 = 0.2, \quad -\omega_3 = \pi / 180 \approx 1.74 \cdot 10^{-2} \text{ рад/с} \quad (3.4)$$

зображені на рисунку 3.3 (зліва)

Необхідно підкреслити, що гармонічний опорний сигнал, період якого становить 360 секунд, класифікується як швидкозмінний вплив для даної системи. Це підтверджується порівнянням із постійними часу об'єкта управління, які дорівнюють 122 секундам і 14,5 секундам відповідно. Теоретично, зі зменшенням частоти вхідного сигналу очікується подальше зниження поточної помилки у стаціонарному режимі відстеження. Однак, критичним моментом є те, що параметри перерегулювання та час регулювання залишатимуться незмінно великими.

Разом із тим, включення інтегрувальної складової не лише підвищує точність відтворення повільно змінних сигналів, але й дозволяє компенсувати систематичні похибки, що виникають унаслідок неточностей моделі, шумів датчиків або зовнішніх збурювальних впливів. Такий підхід сприяє мінімізації статичної помилки та підвищує робастність системи керування. Додатково, у процесі синтезу цифрового регулятора необхідно враховувати особливості дискретизації сигналів та вибір оптимального періоду квантування, оскільки ці фактори суттєво впливають на стійкість і динамічні характеристики замкненої системи.

Важливо також забезпечити відповідність алгоритму регулятора апаратним обмеженням мікроконтролерної платформи, зокрема обчислювальним ресурсам та швидкодії аналого-цифрових і цифро-аналогових перетворювачів. Врахування цих аспектів дозволяє досягти узгодженості між теоретично синтезованою оптимальною структурою та реальною реалізацією регулятора на цифровому обладнанні. Отже, розробка оптимального цифрового регулятора з інтегрувальною ланкою є необхідним етапом підвищення ефективності системи керування та забезпечення якісного регулювання технологічного процесу за широкого спектра вхідних дій і зовнішніх збурень.

Процеси в системі з ПД-регулятором

Процеси в системі з оптимальним по швидкодії регулятором

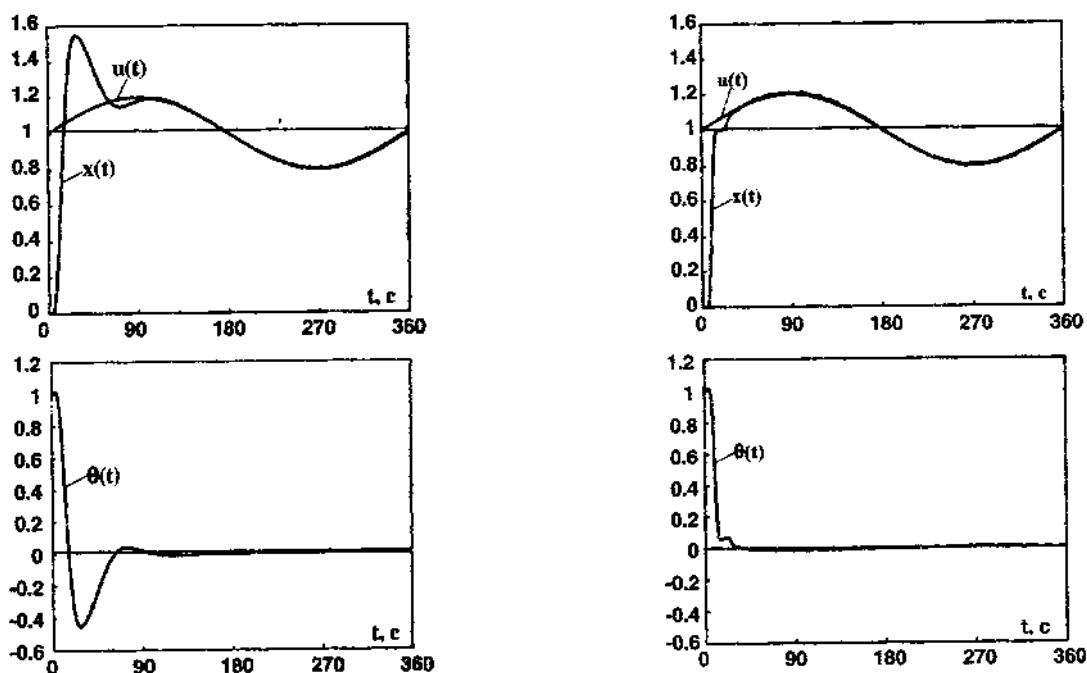


Рис. 3.3. Процеси в системі з різними регуляторами

Тоді для об'єкту з передавальною функцією:

$$G(s) = \frac{\alpha}{s(s+a)(s+b)} e^{-\tau s} \quad (3.5)$$

$$m_1 = K_0[q_1(\Delta U + S_0\Delta\sigma) + h\Delta\sigma] + R\sigma_{n-1} \text{ при } nt_p + h \leq t < nt_p + 2h;$$

$$m_2 = K_0[q_2(\Delta U + S_0\Delta\sigma) + h\Delta\sigma(1 + q_1)] + R\sigma_{n-1} \text{ при } nt_p + 2h \leq t < nt_p + 3h.$$

$$m_3 = R = \frac{ab}{\alpha} \text{ при } nt_p + 3h \leq t < nt_p + 3h + \tau, \text{ де } t_p = 3h + \tau;$$

$$K_0 = \frac{ab}{\alpha h(1-A)(1-B)}; \quad S_0 = \frac{ab}{ab} - \frac{h(2+q_1)}{(1-A)(1-B)} + \tau;$$

$$q_1 = -(A+B); q_2 = AB; A = e^{-ah}; B = e^{-bh}. \quad (3.6)$$

Цифровий регулятор на кожному підінтегралі $nt_p \leq t < nt_p + 3h$ інтервалу регулювання $nt_p \leq t < (n+1)t_p$ можна описати передавальною функцією

$$W(z) = \frac{M(z)}{\theta(z)} = \frac{m_0 + m_1 z^{-1} + m_2 z^{-2}}{\Delta U(1 + z^{-1} + z^{-2})}$$

або

$$m_i = \left(\sum_{k=0}^2 m_k \theta_{i-k} - \Delta U \sum_{k=1}^2 m_{i-k} \right) / \Delta U$$

де $-\theta = \Delta U$ (3.7)

В момент початку n -го інтервалу регулювання тривалість $t_p = 3h + \tau$, першу різницю вхідного впливу на систему управління $u(t)$ на інтервалі регулювання $nt_p \leq t < (n+1)t_p$

$$\sigma_n = \{u[(n+1)t_p] - u(nt_p)\} / t_p \quad (3.9)$$

виміряти не можливо, тому будемо вимірювати значення швидкості вхідного впливу:

$$\sigma = \{u(kh_0) - u[(k-1)h_0]\} / h_0 \quad (3.10)$$

де h_0 - крок моделювання, і використовується наближене значення першої різниці:

$$\hat{\sigma} = \sigma(nt_p) \quad (3.11)$$

перша різниця (середня швидкість) вхідного впливу на попередньому інтервалі регулювання $(n-1)t_p \leq t < nt_p$ визначається як:

$$\hat{\sigma}_{n-1} = \sigma[(n-1)t_p] \quad (3.12)$$

тоді перевищення швидкості на інтервалі регулювання $nt_p \leq t < (n+1)t_p$ визначається як

$$\Delta\sigma = \{\sigma(nt_p) - \sigma[(n-1)t_p]\} / t_p \quad (3.13)$$

Для математичних моделей об'єктів управління, які містять чисте запізнювання (як показано у формулі (3.5)), може бути запропоновано низку варіантів структурних схем цифрових регуляторів, які є оптимальними за

критерієм швидкодії. Вибір конкретної структурної конфігурації залежить від співвідношення між часом запізнювання та кроком квантування у системі цифрового регулювання. h . Розглянемо варіант оптимального по швидкодії цифрового регулятора, для якого прийємо $h = \tau = 4c$ (τ в реальному об'єкті рівне 3,9с).

Структурна схема вказаного регулятора, яка була синтезована на основі математичних виразів (3.6) та (3.10)–(3.13), реалізована в інтерактивній системі MATLAB і представлена на Рисунку 3.4. (На рис. 3.1 оптимальний за швидкодією цифровий регулятор ідентифікований як блок Subsystem).

На рис. 3.3 (права частина) ілюструються перехідні процеси, що відбуваються в системі за умови застосування оптимального за швидкодією цифрового регулятора. Даний регулятор гарантує аперіодичний перехідний процес, тобто без перерегулювання, при цьому час регулювання не перевищує 30 секунд. Отже, швидкодія системи з цим регулятором перевищує швидкодію системи, що використовує ПД-регулятор, більш ніж у три рази. Слід також зазначити, що система з цифровим ПД-регулятором характеризується перерегулюванням до 50 відсотків.

Поточна помилка розрегулювання в системі з оптимальним за швидкодією регулятором, хоча і є дещо більшою за помилку в системі з ПД-регулятором, залишається в межах допустимих, достатньо малих значень.

З точки зору програмної реалізації регуляторів на мікро-ЕОМ, менша структурна складність цифрового ПД-регулятора не становить значної переваги. Таким чином, для практичного впровадження рекомендовано використовувати оптимальний за швидкодією цифровий регулятор.

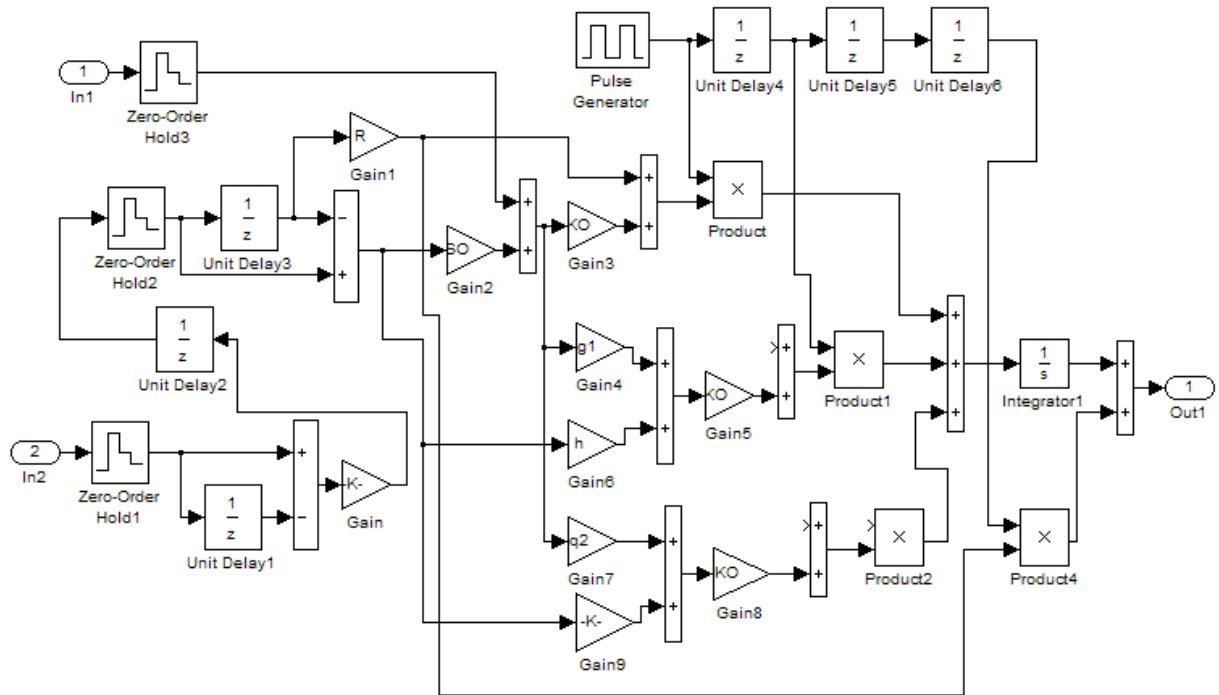


Рис. 3. 4. Структурна схема регулятора в інтерактивній системі MATLAB

Структурна схема системи управління температурою електропечі з цифровим нечітким регулятором, виконана в інтерактивній системі MATLAB, приведена на рис.3.5 (структурна схема регулятора приведена на рисунку окремо).

Синтез нечіткого регулятора виконаний по формулах (3.12)-(3.27) для трикутних функцій приналежності з кроком квантування (кроком надходження даних в нечіткий регулятор) $h = 0,01$ з. Помилка на виході АЦП $\theta(k)$ в кожному каналі управління, її перша $\theta(k) = [\theta(k) - \theta(k - 1)]/h$ і друга $\ddot{\theta}(k) = [\dot{\theta}(k) - \dot{\theta}(k - 1)]/h$ різниці подаються на вхід регулятора. Сигнал з виходу регулятора поступає на ЦАП (фіксатор нульового порядку з передавальною функцією $H(s) = (1 - e^{-hs})/si$ далі на вхід об'єкту управління.

В нечіткому регуляторі налаштовуються діапазони зміни вхідних і вихідних змінних всіх функцій $:\mu^1(u) = 1 - u, -\mu^2(u) = u$, де u – параметр єдиної універсальної множини $U=[0,1]$. Для зменшення числа параметрів настройки діапазону зміни змінних прийняті симетричними:

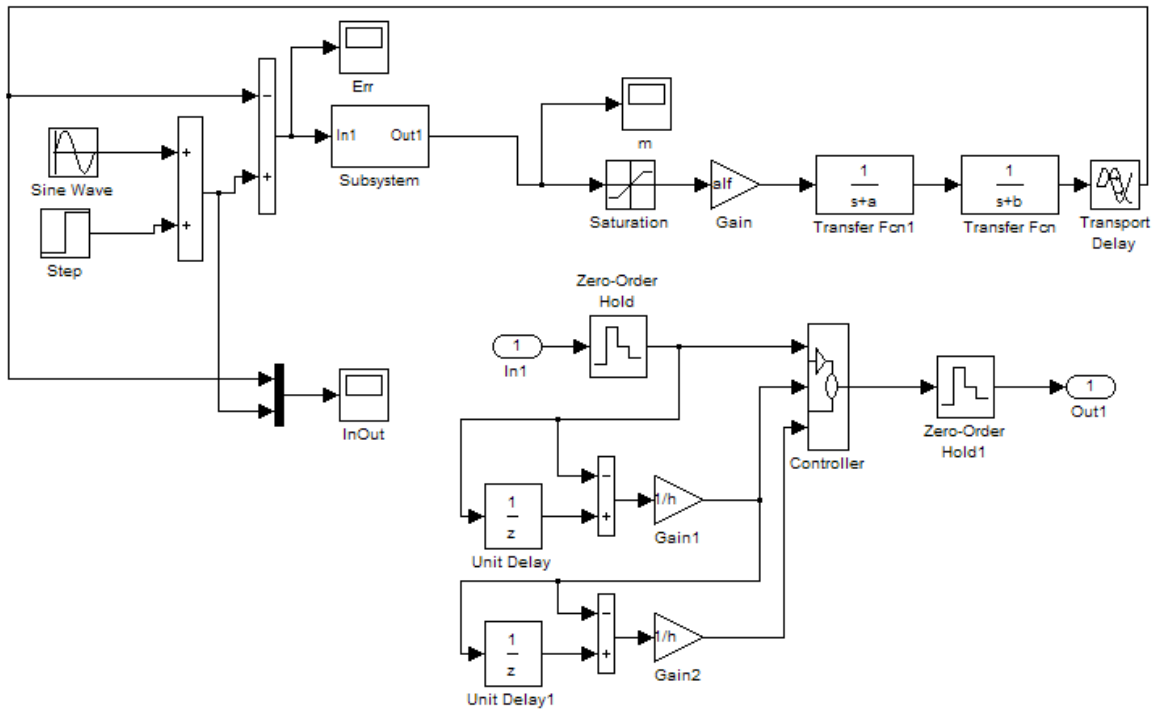


Рис. 3.5. Структурна схема системи управління температурою електропечі з цифровим нечітким регулятором

Налаштування нечіткого регулятора проводилася з метою отримання мінімальної поточної помилки розузгодження.

Діапазони зміни вхідних і вихідних змінних після налаштування регулятора наступні: $[-0,33, 0,33]$, $[-0,07, 0,07]$, $[-0,035, 0,035]$, $[-34,3, 34,3]$.

На рис.3.6 показані перехідні процеси за наявності в системі цифрового нечіткого регулятора під час вступу на вхід системи дії $u_s(t) = 1 + 0.2 \sin(\pi t / 180)$. Даний регулятор забезпечує близький до аперіодичного (з невеликими коливаннями) перехідний процес з часом регулювання, не перевищуючим 30с, і достатньо малу поточну помилку.

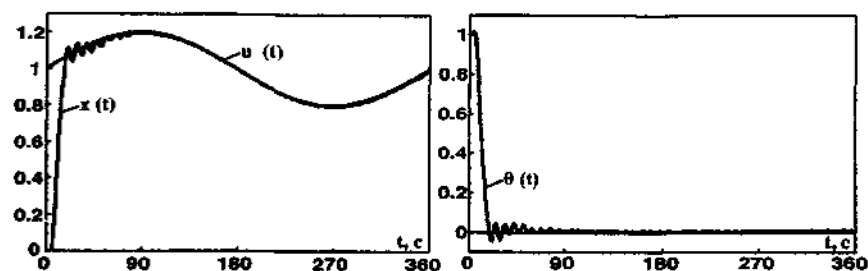


Рис. 3.6. Перехідні процеси

3.2 Синтез цифрового регулятора однопотокової трубчастої печі

Схема однопотокової трубчастої печі для нагріву нафтової сировини перед його переробкою представлена на рис.3.7.

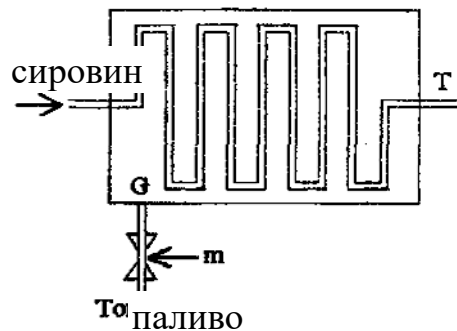


Рис. 3.7. Схема однопотокової трубчастої печі

Нафтова сировина транспортується через реакційний змійовик (екранну поверхню), який піддається обігріву групою газових пальників, розташованих у спільній радіаційній камері. Регулювання температури нагріву сировини у змійовику здійснюється шляхом модифікації витрати палива, що подається до пальників. Змінною, що підлягає регулюванню, є температура сировини на виході змійовика, позначена як T . Керуючим впливом, відповідно, виступає витрата палива, що надходить до пальників, позначена як G .

Передавальна функція трубчастої печі як об'єкту управління, одержана за даними експерименту, визначається у вигляді:

$$G_0(s) = \frac{\alpha}{(s + b)^3} e^{-\tau s}$$

$$\text{де } -b = 1/180\text{с}^{-1}, \tau = 180\text{с}, \alpha = 10^{-60}\text{C} \cdot \text{с}/\text{m}^3. \quad (3.14)$$

Передавальна функція загального загального об'єкту управління визначається у вигляді:

$$G_0(s) = \frac{\alpha}{s(s+b)^3} e^{-\tau s} \quad (3.15)$$

Структурна схема системи автоматичного управління температурою сировини на виході змійовика, яка була розроблена та реалізована в інтерактивній системі MATLAB, наведена на рис. 3.8. У цій схемі оптимальний

за швидкодією цифровий регулятор представлений у вигляді двох окремих функціональних блоків, позначених як Subsystem та SubSystem1.

Нижче буде викладено теоретичний синтез оптимального за швидкодією цифрового регулятора та представлені результати дослідження динамічних процесів у даній системі, отримані за допомогою методів математичного моделювання.

Для об'єкту управління з передавальною функцією (3.15) амплітуди імпульсів тривалістю h оптимальної управляючої дії на кожному інтервалі регулювання $nt_p \leq t < (n + 1)t_p$ визначаються:

$$m_0 = K_0(\Delta U + S_0\Delta\sigma), \quad nt_p \leq t < nt_p + h;$$

$$m_1 = K_0[q_1(\Delta U + S_0\Delta\sigma) + h\Delta\sigma], \quad nt_p + h \leq t < nt_p + 2h;$$

$$m_2 = K_0[q_2(\Delta U + S_0\Delta\sigma) + h\Delta\sigma(1 + q_1)], \quad nt_p + 2h \leq t < nt_p + 3h;$$

$$m_3 = K_0[q_3(\Delta U + S_0\Delta\sigma) + h\Delta\sigma(1 + q_1 + q_2)], \quad nt_p + 3h \leq t < nt_p + 4h;$$

$$m_4 = R, \quad nt_p + 4h \leq t < nt_p + 4h + \tau,$$

$$\text{де } t_p = 4h + \tau; \quad K_0 = \frac{b^3}{\alpha h(1-B)^3}; \quad (3.16)$$

$$S_0 = 4h + \frac{3}{b} - \frac{h(3 + 2q_1 + q_2)}{(1-B)^3} + \tau, \quad R = b^3/\alpha,$$

$$q_1 = -3B, \quad q_2 = 3B^2, \quad q_3 = -B^3, \quad B = e^{-bh}$$

$\Delta U = \theta_n$, θ_n - помилка системи у момент початку n -го інтервалу регулювання тривалістю $t_p = 4h + \tau$, тобто помилка у момент nt_p .

h - крок квантування.

$\Delta\sigma = \sigma_n - \sigma_{n-1}$, σ_n - перша різниця вхідної дії на інтервалі регулювання $nt_p \leq t < (n + 1)t_p$,

σ_{n-1} - перша різниця вхідної дії на інтервалі регулювання $(n - 1)t_p \leq t < nt_p$.

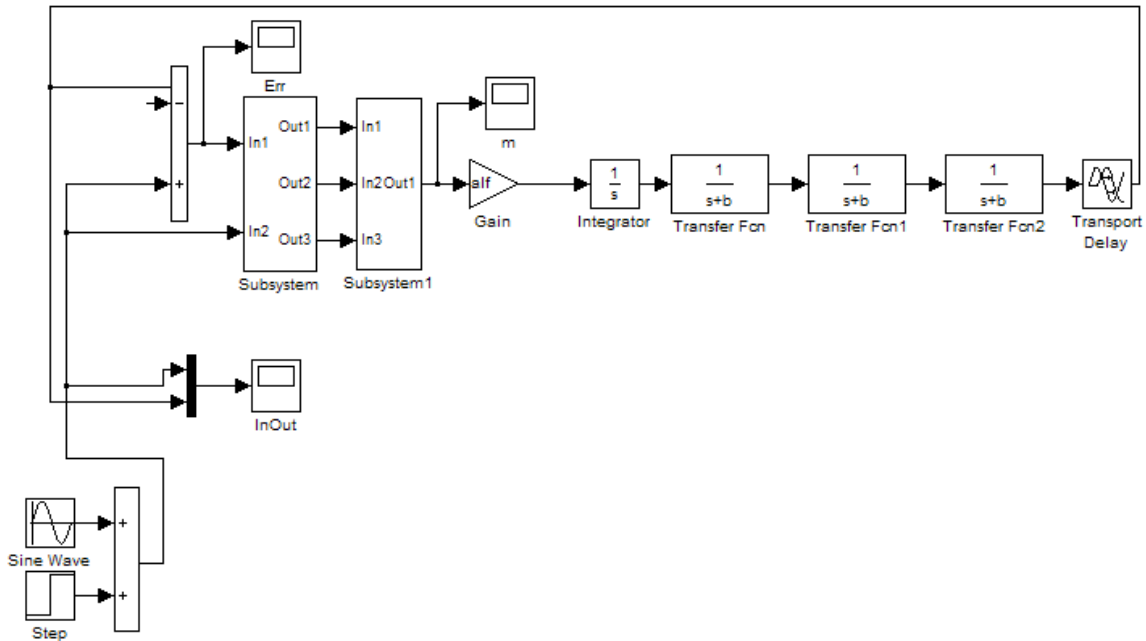


Рис 3.8. Структурна схема системи управління температурою сировини

Цифровий регулятор на кожному підінтервалі інтервалі $nt_p \leq t < nt_p + 4h$ інтегралу регулювання $nt_p \leq t < (n + 1)t_p$ можна описати передавальною функцією:

$$W(z) = \frac{M(z)}{\theta(z)} = \frac{m_0 + m_1 z^{-1} + m_2 z^{-2} + m_3 z^{-3}}{\Delta U (1 + z^{-1} + z^{-2} + z^{-3})} \quad (3.17)$$

або різницеvim рівнянням:

$$m_i = (\sum_{k=0}^2 m_k \theta_{i-k} - \Delta U \sum_{k=1}^2 m_{i-k}) / \Delta U \quad (3.18)$$

де $\theta = \Delta U$ при $i=k>0$ і $\theta = 0$, $m = 0$ при $i-k<0$.

Для математичних моделей об'єктів управління з чистим запізнюванням (див. формулу (3.15)) можна запропонувати декілька варіантів структурних схем оптимальних по швидкодії цифрових регуляторів, які залежать від співвідношення часу запізнювання τ і кроку квантування в цифровому регуляторі h . Розглянемо варіант оптимального по швидкодії цифрового регулятора, для якого приймемо $h = \tau/6 = 30c$ (τ в реальному об'єкті рівно 180с).

Структурна схема такого регулятора, складена на підставі виразів (3.16) і (3.10) - (3.13) в інтерактивній системі MATLAB, приведена на рис.3.9 (блок Subsystem) і рис.3.10 (блок SubSystem1).

Блок Subsystem містить наступні елементи.

Фіксатор Zero-Order Hold 1 (працює з кроком моделювання h_0), блок затримки Unit Delay 1 (працює з кроком моделювання h_0), суматор і підсилювач Gain (з коефіцієнтом передачі $1/h_0$) реалізують вираз (9.10). Виходом підсилювача Gain є поточне значення швидкості вхідної дії σ .

Фіксатор Zero-Order Hold 2 (працює з кроком $tr = 4h + \tau = 10h$),

де h -крок квантування, блок затримки Unit Delay2 (працює з кроком $1/h_0$) і суматор реалізують вирази (3.11) - (3.13). Виходом блоку затримки Unit Delay2 є перша різниця (середня швидкість) вхідної дії на попередньому інтервалі регулювання $\hat{\sigma}_{n-1}$, а виходом суматора є приріст швидкості на інтервалі регулювання $\Delta\sigma$.

Фіксатор Zero-Order Hold 3 (працює з кроком $10h$) квантує помилку системи управління.

Імпульсний генератор Pulse Generator генерує імпульси одиничної амплітуди тривалістю h з періодом проходження $10h$. Ці імпульси безпосередньо з генератора і з ліній затримок Unit Delay4 - Unit Delay6 (кожна для зсуву імпульсів на крок квантування h) поступають на відповідні помножувачі Product і утворюють стробуючі тривалістю h імпульси, необхідні для тимчасового розподілу імпульсів оптимальної керуючої дії m_0, m_1, m_2, m_3 (див. формули (3.16)). По виразах (3.16) складена решта частини структурної схеми блоку Subsystem.

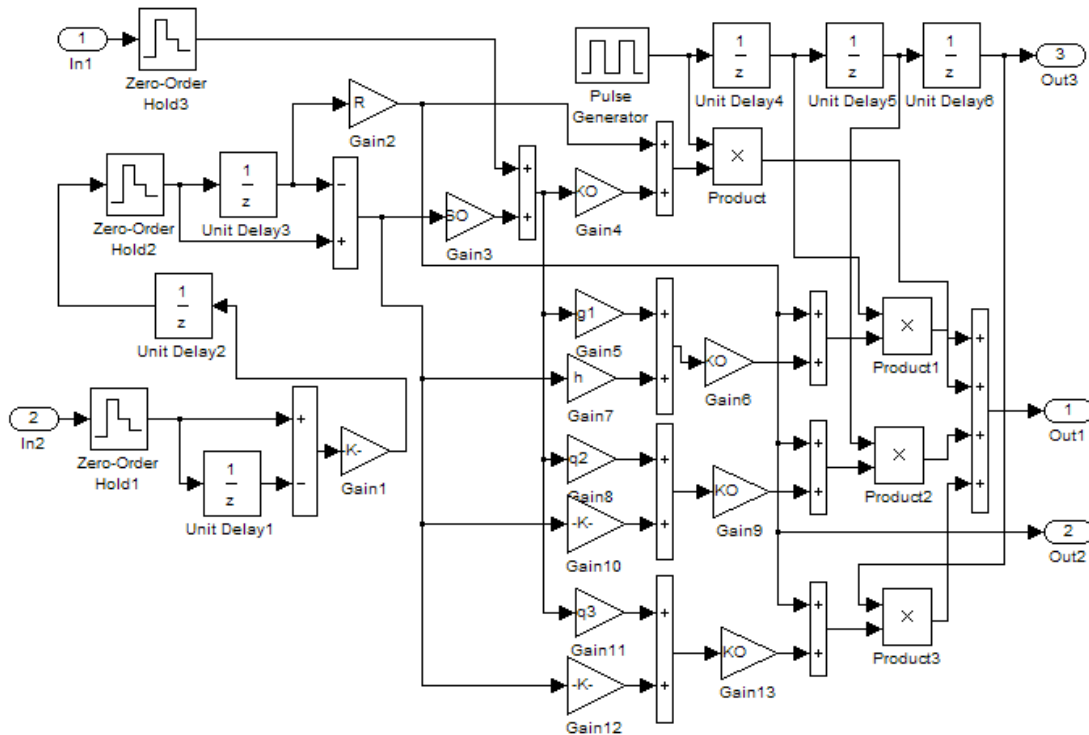


Рис. 3.9. Структурна схема оптимального по швидкодії цифрового регулятора

Блок SubSystem1 (див. рис.3.10) необхідний для формування "підставки" $R = b^3/\alpha$ на час затримки $T=6h=180$ с, коли регулятор не генерує імпульсів управління об'єктом.

На рисунку 3.11 представлено реакцію системи на одиничний вхідний вплив (де $u(t)$ позначає вхідний сигнал, а $x(t)$ – вихідний сигнал системи) за умови інтеграції оптимального за швидкодією цифрового регулятора. Зазначений регулятор забезпечує аперіодичний перехідний процес, тобто без перерегулювання, який починається після часової затримки, що становить 180 секунд. Час регулювання при цьому не перевищує 120 секунд. Це дозволяє досягти встановленого значення необхідної температури сировини за сумарний час, що не перевищує 300 секунд (180 с затримка + 120 с регулювання).

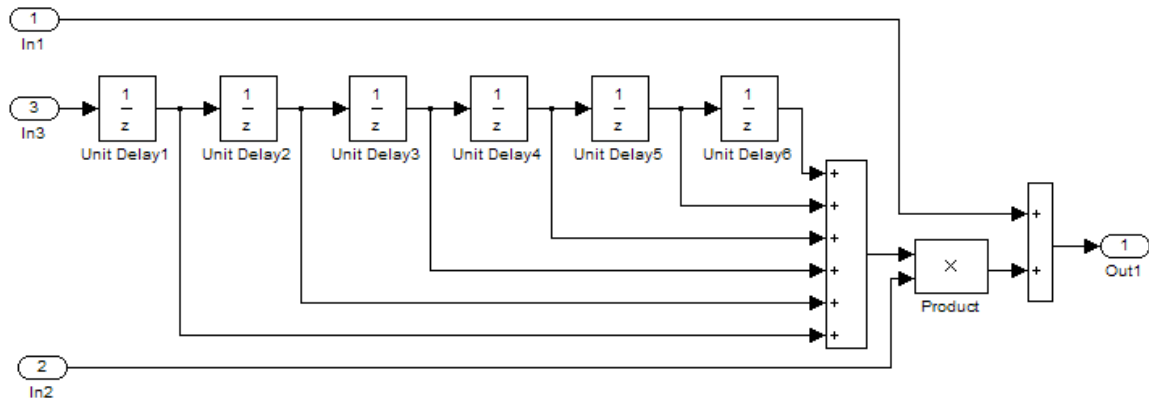


Рис. 3.10. Структурної схеми блоку Subsystem

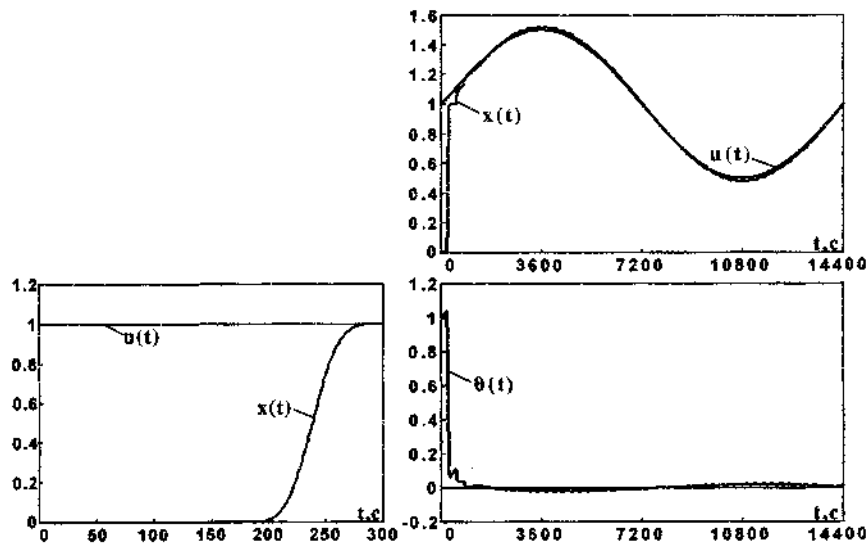


Рис. 3.11. Реакція системи на одиничний вхідний вплив

При необхідності змінювати температуру сировини по якому-небудь закону слід мати у вигляді, що система є інерційною, тому для зменшення помилки стеження зміни температури сировини повинні бути достатньо повільними. Також показані процеси в системі під час вступу на вхід системи одиничного стрибка і синусоїдальної дії: $u(t) = 1 + 0.5 \sin(\pi t/720)$. При такій синусоїдальній дії поточна помилка $\theta(t)$ не перевищує 4% від амплітуди синусоїди. При збільшенні частоти вхідної дії помилка зростає.

Висновки до розділу 3

У розділі здійснено комплексний аналіз та синтез цифрових регуляторів, призначених для автоматичного управління ключовими параметрами електричних і газових печей, з урахуванням їхніх специфічних динамічних характеристик і умов експлуатації. Показано, що об'єкти даної категорії належать до класу інерційних та часто нелінійних систем, які потребують застосування спеціалізованих алгоритмів керування для забезпечення високої точності, швидкодії та стійкості у широкому діапазоні режимів роботи.

У процесі синтезу обґрунтовано застосування оптимальних методів регулювання, зокрема алгоритмів, що враховують реакцію об'єкта на лінійно-змінні впливи та дозволяють формувати керуючі сигнали з мінімальною перехідною похибкою. Доведено доцільність включення інтегрувальної ланки до структури регулятора для забезпечення властивості астатизму першого порядку та здатності системи точно відтворювати повільно змінні або довільні вхідні дії. Зазначено, що такий підхід сприяє зменшенню статичної помилки та підвищує робастність системи в умовах зовнішніх збурень та параметричної невизначеності.

Особливу увагу приділено впливу дискретизації та вибору періоду квантування на якість керування, що є критично важливим для систем, реалізованих на мікроконтролерних платформах. Встановлено, що правильне узгодження математичної моделі регулятора з апаратними ресурсами дозволяє уникнути втрати стійкості та забезпечує стабільну роботу системи у реальному часі. Запропоновані структури цифрових регуляторів демонструють здатність до адаптації, підвищення енергоефективності та забезпечення плавного регулювання температурних режимів.

РОЗДІЛ 4

МЕТРОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ВИБРАНИХ ТЗА. МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОСНОВНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ КАНАЛІВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

4.1 Метрологічний аналіз вибраних ТЗА з точки зору забезпечення необхідної точності регулювання основних технологічних параметрів

Основне завдання метрологічного забезпечення у процесі експлуатації засобів автоматизації полягає в досягненні високої точності вимірювання технологічних параметрів. Засоби вимірювальної техніки мають відповідати умовам роботи об'єкта, забезпечувати стабільність характеристик та можливість функціонування в межах установлених метрологічних норм.

Метрологічне забезпечення вимірювальних каналів передбачає проведення оцінки похибок. Методи оцінювання похибок застосовують переважно щодо вимірювальних каналів, у складі яких використовуються серійні засоби вимірювання, включені до Державної системи приладів.

Повірка вимірювальних каналів системи автоматизації та системи керування проводиться у робочих умовах експлуатації засобів вимірювання, що входять до їх складу.

При повірці вимірювальних каналів застосовуються наступні засоби автоматизації:

- а) зразкові засоби вимірювання;
- б) дзеркало зразкових сигналів;
- в) імітатор сигналів;
- г) прилади для контролю умов повірки;
- д) допоміжні засоби.

Ретельний контроль питомих похибок і їх складових забезпечує можливість

гарантованого досягнення необхідної точності регулювання в технологічному процесі. Прилади, що входять до складу вимірювальних каналів, підбираються відповідно до класифікації за межами вимірювання й класами точності, що гарантує відповідність параметрів регулювання нормативним вимогам.

Вимоги до метрологічних характеристик зразкових засобів вимірювання встановлюють, що допустима похибка цих приладів має бути щонайменше у п'ять разів меншою порівняно з допустимою похибкою вимірювальних каналів температури, тиску та витрати. Для каналів вимірювання рівня цей коефіцієнт повинен становити не менше чотирьох.

Манометри та вакуумметри, які використовуються для проведення пневматичних випробувань на герметичність з'єднань пневматичних трас вимірювального каналу, повинні мати верхню границю вимірювання, що дорівнює співвідношенню 4/3 від вимірюваного тиску. Клас точності цих приладів має бути не нижче 1,5.

Вибір зразкових засобів вимірювання для інших вимірювальних каналів здійснюється згідно з положеннями рекомендації Тпр – 29 – 77 "Типовая программа государственных измерений". Цей документ рекомендує вважати достатнім співвідношення границь допустимих похибок зразкової апаратури та повірочного вимірювального каналу (елемента) у тих випадках, коли в загальній похибці переважає систематична складова.

$$\frac{\Delta_{\text{доп}}}{\Delta_{\text{об}}} \geq 5,$$

Якщо у повірюваного вимірювального каналу (елемента) переважаючою є випадкова складова похибки. Для виконання процедури повірки необхідно забезпечити дотримання низки обов'язкових умов.

По-перше, має бути повністю завершений комплекс монтажних і налагоджувальних робіт на вимірювальному каналі, який підлягає повірці. Це повинно бути задокументовано відповідно до вимог, встановлених у будівельних нормах і правилах (СНІП 111-34).

По-друге, параметри живлення, споживана потужність, а також робочі умови

експлуатації окремих компонентів вимірювального каналу і засобів повірки повинні бути верифіковані та відповідати технічним умовам (ТУ) або технічним описам, наданим для відповідних технічних засобів вимірювання, що входять до складу каналу.

По-третє, кожен автоматичний засіб вимірювання у складі вимірювального каналу повинен мати необхідну супровідну документацію, а саме: випускний атестат (паспорт) від приладобудівного підприємства, експлуатаційний паспорт. Крім того, кожен елемент має бути попередньо перевірений на справність і придатність до використання.

По-четверте, усі зразкові засоби вимірювання, що застосовуються для повірки, повинні бути атестовані в органах Державної метрологічної служби та мати чинні свідоцтва про повірку.

По-п'яте, діапазон можливостей джерел зразкових сигналів (імітаторів сигналів) має узгоджуватися з конкретними значеннями вхідних сигналів у повірочних точках діапазону вимірювань досліджуваного каналу.

По-шосте, опір повного навантаження вимірювальних перетворювачів (давачів) не повинен перевищувати граничних значень, регламентованих у відповідній нормативно-технічній документації.

4.2 Метрологічне забезпечення основних вимірювальних каналів технологічних параметрів

4.2.1 Розрахунок метрологічних показників каналу вимірювання температури

Розрахунок метрологічних показників каналу вимірювання температури в печі вимагає застосування зразкових засобів. Для проведення повірки термопари використовується зразковий ртутний термометр типу ТЛ-7. Його характеристики включають ціну поділки 0,1 градуса Цельсія та діапазон вимірювання від 0 до 350 градусів Цельсія.

Результати експериментальних досліджень були отримані при повільному зміні вимірюваної величини – як при її збільшенні, так і при зменшенні. Вимірювання проводилися у шести контрольних точках, що відповідають 10%, 20%, 40%, 60%, 80% та 100% від повної шкали вимірювального каналу. Зведені дані цих вимірювань представлені у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Значення температури при проведенні експерименту, в °С

Значення температури зразкового термометра	Номер експерименту				
	1	2	3	4	5
30	29,7	29,9	30,2	30,0	30,0
60	60,0	59,9	59,9	60,0	60,2
120	120,2	120,1	120,0	120,0	120,1
180	180,1	179,9	179,8	180,3	180,1
240	240,2	240,0	239,9	240,0	240,0
300	299,8	300,0	299,9	300,1	300,0
300	300,3	300,1	299,7	299,9	300,1
240	240,1	240,1	240,0	239,9	240,4
180	179,8	179,9	180,1	180,1	180,0
120	120,2	120,4	119,9	120,0	119,9
60	59,8	59,9	59,9	60,1	60,0
30	29,8	30,1	30,0	30,0	30,1

Похибка вимірювання при повільному збільшенні і зменшенні розраховуються по формулі.

$$\Delta_{ji} = x_{вимji} - x_{джи}, \quad (4.1)$$

де Δ_{ji} – абсолютна похибка вимірювального каналу в точці з діапазоном вимірювання, °С;

$x_{вимji}$ - дійсне (зразкове) значення сигналу. X на вході вимірювального сигналу в точці j діапазону вимірювання, °С;

$x_{джи}$ – виміряне значення вихідного сигналу в точці j діапазону вимірювання, °С;

На основі цієї формули (4.1) побудуємо таблицю 4.2 абсолютних похибок при повільному збільшенні і зменшенні температури.

Таблиця 4.2

Абсолютні значення похибок вимірювання температури.

Номер експерименту	Абсолютна похибка, °C											
	$\Delta 1$	$\Delta 2$	$\Delta 3$	$\Delta 4$	$\Delta 5$	$\Delta 6$	$\Delta 6'$	$\Delta 5'$	$\Delta 4'$	$\Delta 3'$	$\Delta 2'$	$\Delta 1'$
1	-0,3	0	0,2	0,1	0,2	-0,2	0,3	0,1	-0,2	0,2	-0,2	-0,2
2	-0,1	-0,1	0,1	-0,1	0	0	0,1	0,1	-0,1	0,4	-0,1	0,1
3	0,2	-0,1	0	-0,2	-0,1	-0,1	-0,3	0	0,1	-0,1	-0,1	0
4	0	0	0	0,3	0	0,1	-0,1	-0,1	0,1	0	0,1	0
5	0	0,2	0,1	0,1	0	0	0,1	0,4	0	0,1	0	0,1

Оцінимо середнє значення абсолютних похибок в кожній точці діапазону вимірювання за формулою:

$$\begin{aligned}\bar{\Delta}_{Mj} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_{ji}; \\ \bar{\Delta}_{Tj} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta'_{ji},\end{aligned}\tag{4.2}$$

де $\bar{\Delta}_{Mj}$ - середнє значення абсолютної похибки вимірювання в точці j діапазону вимірювання при підході до неї зі сторони менших значень температури;

$\bar{\Delta}_{Tj}$ - середнє значення абсолютної похибки вимірювання при підході зі сторони більших значень температури;

n - кількість експериментів;

Підставляючи числові значення абсолютних похибок вимірювання в формулу (4.2), отримаємо:

$$\bar{\Delta}_{M1} = (-0,3 - 0,1 + 0,2 + 0 + 0) / 5 = -0,04;$$

$$\bar{\Delta}_{M2} = (0 - 0,1 + 0,1 + 0 + 0,2) / 5 = 0;$$

$$\bar{\Delta}_{M3} = (0,2 + 0,1 + 0 + 0 + 0,1) / 5 = 0,08;$$

$$\bar{\Delta}_{M4} = (0,1 - 0,1 - 0,2 + 0,3 + 0,1) / 5 = 0,04;$$

$$\bar{\Delta}_{M5} = (0,2 + 0 - 0,1 + 0 + 0) / 5 = 0,02;$$

$$\bar{\Delta}_{M6} = (-0,2 + 0 - 0,1 + 0,1 + 0) / 5 = -0,02;$$

$$\bar{\Delta}_{T1} = (0,3 + 0,1 - 0,3 - 0,1 + 0,1) / 5 = 0,02;$$

$$\bar{\Delta}_{T2} = (0,1 + 0,1 + 0 - 0,1 + 0,4) / 5 = 0,1;$$

$$\bar{\Delta}_{T3} = (-0,2 - 0,1 + 0,1 + 0,1 + 0) / 5 = -0,02;$$

$$\bar{\Delta}_{T4} = (0,2 + 0,4 - 0,1 + 0 - 0,1) / 5 = 0,08;$$

$$\bar{\Delta}_{T5} = (-0,2 - 0,1 - 0,1 + 0,1 + 0) / 5 = -0,06;$$

$$\bar{\Delta}_{T6} = (-0,2 + 0,1 + 0 + 0 + 0,1) / 5 = 0;$$

Варіацію вимірювального каналу визначаємо як абсолютне значення різниці між значенням $\bar{\Delta}_{Mj}$ і $\bar{\Delta}_{Tj}$

$$b_j = |\bar{\Delta}_{Mj} - \bar{\Delta}_{Tj}|$$

$$b_1 = |-0,04 - 0,02| = 0,06$$

$$b_2 = |0 - 0,1| = 0,1$$

$$b_3 = |0,08 + 0,02| = 0,1 \tag{4.3}$$

$$b_4 = |0,04 - 0,08| = 0,04$$

$$b_5 = |0,02 + 0,06| = 0,08$$

$$b_6 = |-0,02 - 0| = 0,02$$

Оцінка варіації вимірювального каналу в точці j діапазону вимірювання – це найбільша по абсолютній величині варіація в точках діапазону повірки, тобто $b=0,1$.

Статична складова абсолютної похибки вимірювального каналу в точці j повірки діапазону вимірювань визначається згідно формули

$$\Delta\bar{C}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_{ji} \tag{4.3}$$

В якості оцінки систематичної похибки $\Delta\bar{C}_j$ вимірювального каналу приймаємо найбільше значення по абсолютній величині систематичної складової. Отже, $\Delta\bar{C}_j = 0,07$.

Визначаємо випадкову складову абсолютної похибки, яка оцінюється

середнім квадратичним відхиленням

$$\tilde{\delta}_j(\Delta) = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\Delta_{ji} - \Delta \bar{C}_j)^2}}{n-1} \quad (4.5)$$

де n – об'єм виборки при визначенні метрологічних характеристик.

Підставляючи дані в формулу (4.5), отримаємо:

$$\begin{aligned} \tilde{\delta}_j(\Delta) &= \frac{\sqrt{(-0,3 - 0,07)^2 + (-0,1 - 0,07)^2 + (0,2 - 0,07)^2 + (-0,07)^2 + (-0,07)^2}}{5 - 1} \\ &= 0,11. \end{aligned}$$

Абсолютна похибка вимірювального каналу визначається

$$\Delta \leq |\bar{\Delta}_{e \max}| + b |\tilde{\delta}_j(\Delta)| \quad (4.6)$$

де b – коефіцієнт який визначається законом розподілу випадкової складової абсолютної похибки і прийнятої довірливої вірогідності; $b=1,65$.

Отже,

$$\Delta \leq 0,1 + 1,65 \cdot 0,11$$

$$\text{або } \Delta \leq 0,2815$$

Систематичну складову приведеної похибки знайдемо шляхом переводу похибок вимірювального каналу з абсолютної форми в приведену за формулою

$$\gamma_c = \frac{\bar{\Delta}_c \cdot 100}{X_N}, \quad (4.7)$$

де γ_c – систематична складова приведеної похибки;

$\bar{\Delta}_c$ - систематична складова абсолютної похибки;

X_N - нормуюче значення вимірюваної величини.

Отже,

$$\gamma_c = \frac{0,07 \cdot 100}{300} = 0,23$$

Приведену похибку знаходимо як

$$\text{або } \gamma^0 = \frac{0,2815 \cdot 100}{300} = 0,094.$$

Оскільки приведена похибка $\gamma^0 = 0,094$, то вимірювальний канал системи

автоматичного регулювання температури на базі отриманих засобів автоматизації задовільняє вимогам точності і придатний до експлуатації, як технічний засіб автоматизації.

Висновки до розділу 4

У розділі здійснено комплексний метрологічний аналіз технічних засобів автоматизації, обраних для вимірювання ключових технологічних параметрів, що використовуються у системі керування електричними та газовими печами. Проведені дослідження дозволили визначити відповідність застосованих датчиків, перетворювачів і вимірювальних модулів вимогам точності, надійності та стабільності, які є критично важливими для забезпечення ефективності теплотехнічних процесів.

Встановлено, що основними факторами, що впливають на достовірність вимірювань, є температурні дрейфи, нелінійність характеристик чутливих елементів, шумові складові сигналів та зовнішні збурення, пов'язані з умовами експлуатації обладнання. Аналіз показав, що обрані ТЗА забезпечують необхідний рівень точності, а застосування калібрувальних процедур, корекційних алгоритмів та цифрової фільтрації дозволяє мінімізувати похибки і підвищити стабільність вимірювальних каналів.

РОЗДІЛ 5

РОЗРАХУНОК ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ В ПЕЧІ ЦС-1

5.1 Елементи теорії надійності.

Ключова значущість забезпечення надійності розробленої системи визначається тим, що надійність є однією з фундаментальних властивостей технічних засобів і систем. Ця властивість характеризує їхню здатність виконувати задані функції протягом усього періоду експлуатації, тобто підтримувати стабільні показники, функціонувати без відмов, реалізуючи заданий алгоритм роботи із задовільною точністю.

Наведемо стислі дефініції основних термінів, які використовуються в теорії надійності.

Надійність визначається як здатність окремого пристрою або системи загалом виконувати призначені функції, зберігаючи при цьому експлуатаційні показники у встановлених межах протягом необхідного інтервалу часу або заданої кількості робочих циклів.

Надійність як кількісний показник базується на чіткому визначенні станів працездатності та непрацездатності (відмови) елемента або всієї системи.

Працездатність - це такий технічний стан елемента або системи, за якого вони зберігають здатність виконувати покладені на них функції, підтримуючи значення заданих параметрів у межах, визначених відповідною нормативно-технічною документацією. Якщо позначити експлуатаційні характеристики елемента або системи як $y_1, y_2, y_3, \dots, y_m$, то стан працездатності формально визначається системою нерівностей:

$$y_{1\min} \leq y_1 \leq y_{1\max}$$

$$y_{2\min} \leq y_2 \leq y_{2\max}$$

.....

$$y_{m\min} \leq y_m \leq y_{m\max}$$

де граничні значення $y_{1\max}$, $y_{1\min}$, $y_{2\min}$, $y_{2\max}$, $y_{n\min}$, $y_{m\max}$ задаються технічними умовами.

Подія, яка спричиняє порушення хоча б однієї з нерівностей, що визначають працездатність (визначених у формулі (5.1), кваліфікується як втрата працездатності. Це означає виникнення відмови або виходу з ладу елемента чи системи.

За характером виникнення відмови можуть бути класифіковані наступним чином:

а) Раптові відмови - характеризуються стрибкоподібною, або скачкоподібною, зміною параметрів елемента або системи, що відбувається практично миттєво.

б) Поступові відмови - характеризуються плавною зміною параметрів елемента або системи протягом певного часу.

Збій визначається як подія, що призводить до тимчасової відмови, після чого працездатність відновлюється без необхідності зовнішнього втручання чи ремонту.

Безвідмовність – це властивість елемента або системи безперервно зберігати стан працездатності протягом заданого часового інтервалу або певної кількості виконаних операцій.

З огляду на те, що відмови та збої технічних елементів є випадковими подіями, теоретичною основою для методів розрахунку показників надійності є математичний апарат теорії ймовірностей та математичної статистики.

5.2 Розробка логічних систем розрахунку АСР температури в печі ЦС-1

Основною та найбільш точною кількісною оцінкою надійності є ймовірність безвідмовної роботи. Ця ймовірність визначається як ймовірність того, що протягом заданого часового інтервалу t в елементі або системі не відбудеться жодної відмови. Якщо позначити час до першої відмови через T , то ймовірність того, що елемент або система функціонуватиме безвідмовно:

$$P(t) = P\{T \geq t\}. \quad (5.2)$$

Оскільки час T є показником, тобто величиною випадковою, то в практиці розраховують показники надійності.

Математичне очікування $M(t)$, яке називається середнім часом безвідмовної роботи, або роботи до відмови. Для оцінки ймовірності відмови елемента або системи в момент часу t застосовують функцію

$$Q(t) = Q\{T < t\} \quad (5.3)$$

Функція $Q(t)$ характеризує “не надійність” елемента або системи, тобто показує яка ймовірність того, що елемент чи система вийде з ладу раніше моменту часу t .

Із визначенням функцій $P(t)$ та $Q(t)$ очевидно, що

$$P(t) + Q(t) = 1 \quad (5.4)$$

Характеризувати надійність елементів функцією $P(t)$ не завжди зручно, оскільки при малих значеннях t ймовірність безвідмовної роботи близька до одиниці і мало відрізняється від функції $Q(t)$.

Тому для оцінки характеристик надійності часто застосовують функцію $F(t)$, яка називається густиною розподілу часу безвідмовної роботи елемента.

$$f(t) = \frac{dQ}{dt} = \frac{dP}{dt} \quad (5.5)$$

Відношення $f(t)/P(t)$ характеризується інтенсивністю відмов і одержало назву характеристики

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} \quad (5.6)$$

Ця кількісна оцінка (ймовірність безвідмовної роботи) є фундаментальною для характеристики надійності елементів і найбільш часто використовується у довідкових та нормативних матеріалах. Оскільки вказані функції часу за своєю суттю є імовірнісними оцінками, для їхнього числового визначення застосовуються закони розподілу випадкових величин.

Далі ми наведемо доведення того, що основні залежності у функціонуванні

надійності зберігають чинність, навіть якщо не впливають на експоненціальний закон розподілу.

$$\lambda(t) = \text{const}; \quad (5.7)$$

$$P(t) = e^{-\lambda t}; \quad (5.8)$$

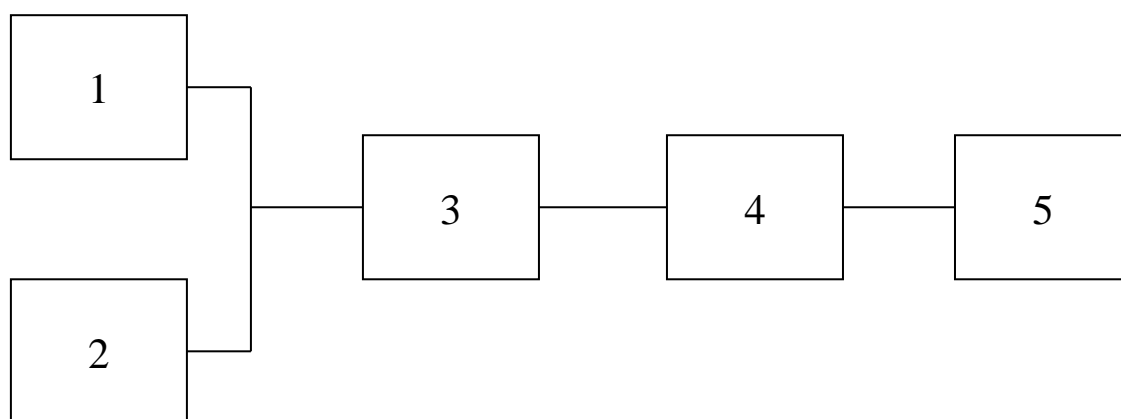
$$Q(t) = 1 - e^{-\lambda t}; \quad (5.9)$$

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}; \quad (5.10)$$

$$T = 1/\lambda; \quad (5.11)$$

Для аналізу надійності системи автоматичного регулювання складаються логічні схеми розрахунку надійності, в основі якої лежить принцип з'єднання елементів в залежності від їх впливу на загальну надійність системи з врахуванням їх взаємозв'язку.

Розглянемо контур регулювання температури в печі ЦС-1, логічна схема якого показана на рисунку 5.1



1 – термопара;

2 – термопара;

3 – мікропроцесорний контролер ;

4 – виконавчий механізм;

5 – регулюючий орган.

Рис. 5.1. Структурна схема розрахунку надійності контуру регулювання температури продукту печі ЦС-1.

По таблицях /6/ знаходимо:

$$\lambda_{1,2} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1};$$

$$\lambda_3 = 10 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1};$$

$$\lambda_4 = 140 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1};$$

$$\lambda_5 = 120 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1};$$

Тоді інтенсивність відмов рівня

$$\lambda = \sum_{i=1}^5 \lambda_i \quad (5.12)$$

$$\text{То } \lambda = (5 \cdot 2 + 10 + 140 + 120) \cdot 10^{-6} = 2.8 \cdot 10^{-4} \text{ год}^{-1}.$$

Знайдемо час наробки на відмову за формулою (5.11)

$$T = \frac{1}{2.8 \cdot 10^{-4}} = 3571 \text{ год}$$

Згідно формули (5.8) знайдемо ймовірність безвідмовної роботи системи

$$P(2000) = e^{-2.8 \cdot 10^{-4} \cdot 2000} = 0,571$$

Згідно формули (5.9) ймовірність відмови рівна

$$Q(2000) = -e^{-2.8 \cdot 10^{-4} \cdot 2000} + 1 = 0,429$$

Частота відмов знаходиться за формулою (5.10)

$$f = 2.8 \cdot 10^{-4} \cdot e^{-2.8 \cdot 10^{-4} \cdot 2000} = 1,6 \cdot 10^{-4}$$

Схема розрахунку надійності каналу регулювання температури, яка приведена на рисунку (5.1), містить послідовність з'єднання елементів, тому відмова жодного з елементів у контурі регулювання веде до відмови цілого контуру регулювання.

Висновки до розділу 5

У межах розділу здійснено детальний розрахунок показників надійності системи автоматичного регулювання температури в печі ЦС-1, що дозволив оцінити здатність системи забезпечувати безперервне, стабільне та точне функціонування у реальних умовах експлуатації. Проведений аналіз продемонстрував, що надійність є ключовим фактором ефективності теплотехнічних агрегатів, адже від неї залежить не лише якість температурного режиму, але й безпека, енергоефективність та тривалість роботи обладнання.

Розраховані показники безвідмовності, інтенсивності відмов, напрацювання на відмову та ймовірності безвідмовної роботи підтвердили, що вибрана структура системи автоматичного регулювання, а також застосовані технічні засоби забезпечують достатній рівень технічної готовності для тривалої експлуатації. Особливу увагу приділено аналізу найбільш вразливих елементів — датчиків температури, виконавчих механізмів та мікроконтролерних модулів. Встановлено, що саме ці компоненти визначають загальний рівень надійності системи, а їх правильний вибір, резервування та періодичне технічне обслуговування дозволяють мінімізувати імовірність відмов.

Також проведено оцінку впливу умов роботи печі ЦС-1 — високих температур, вібраційних навантажень, коливань напруги — на працездатність системи. Показано, що застосування сучасних елементів з підвищеною термостійкістю, захисних фільтрів і стабілізуючих пристроїв значно покращує надійність функціонування системи керування. Запропоновано рекомендації щодо підвищення надійності, зокрема впровадження регулярної діагностики, удосконалення алгоритмів самоконтролю та використання резервних каналів вимірювання для критично важливих параметрів.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Проведено комплексне дослідження технологічного процесу в електричних і газових печах як об'єкта автоматизації. На основі аналізу встановлено конструктивні особливості трубчастої печі, принципи її функціонування та основні технічні характеристики, що визначають динаміку теплотехнічного процесу. Розроблено уточнену структурну схему трубчастої печі, яка враховує ключові зв'язки між технологічними параметрами та засобами керування. Знайдено вхідні і вихідні величини моделі технологічного процесу в електричних і газових печах.

Сформовано та обґрунтовано підходи до побудови функціональної структури системи контролю і керування технічними засобами автоматизації. Наведено структурну схему автоматизації технологічного процесу, що забезпечує необхідний рівень централізації, контроль параметрів і взаємодію між підсистемами.

Узагальнено та побудовано математичні та структурні моделі технологічного процесу, які служать основою для моделювання на ЕОМ та подальшого синтезу системи автоматизованого керування. Розроблені моделі дозволяють адекватно відтворити динаміку електричних і газових печей та формують підґрунтя для синтезу цифрових регуляторів.

Також на графіках зображені процеси, які відбуваються в системі з ПД-регулятором та в системі системі з оптимальним по швидкодії регулятором.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ковриго Ю.М. Методика налаштування H_{∞} -ПІД регулятора для об'єктів із запізнюванням [Текст] / Ю.М. Ковриго, Т.Г. Баган // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – Київ. – 2019. – № 1. – С. 27-33.
2. Bova, S., Codara, P., Maccari, D., Marra, V. A., Logical analysis of Mamdani-type fuzzy inference, I theoretical bases, IEEE International Conference on Fuzzy Systems, Barcelona, pp. 1-8, 2021.
3. Технологічний регламент УПГ Богородчанського УМГ ДП "Прикарпаттрансгаз", 1991р. 303с.
4. Автоматизація процесів переробки нафти та газу: навч. посіб. / Г.Н.Семенцов, М.І.Горбійчук, Л.І.Жуган, С.А.Чеховський. - Львів: Світ, 1992. - 352 с.
5. Горбійчук М.І. Моделювання об'єктів і систем керування в нафтовій та газовій промисловості: навч. посіб. Ч. 1. - Івано-Франківськ: ІФДТУНГ, 1999. - 149 с.
6. Горбійчук М.І. Математичне моделювання на ЕОМ технологічних об'єктів: навч. посіб. - Івано-Франківськ: Факел, 2001. - 240 с.
7. Горбійчук М.І. Моделювання об'єктів і систем керування в нафтовій та газовій промисловості: навч. посіб. Ч. 2. - Івано-Франківськ: ІФДТУНГ, 1999. - 226 с.
8. Compernelle, Tine & Witters, Nele & Van Passel, Steven & Thewys, Theo, 2011. "Analyzing a self-managed CHP system for greenhouse cultivation as a profitable way to reduce CO₂-emissions," Energy, Elsevier, vol. 36(4), pages 1940-1947.
Режим доступу:
<https://uhdspace.uhasselt.be/dspace/bitstream/1942/11943/1/compernelle%201.pdf>
9. Теорія систем керування: підручник / В. І. Корнієнко, О. Ю. Гусєв, О. В. Герасіна, В. П. Щокін. Дніпро: НГУ, 2017. 497 с.
10. Шаруда, В. Г. Дослідницька частина в кваліфікаційній роботі магістра [Текст]: навч. посіб. / В. Г. Шаруда, В. В. Ткачов, А. В. Бубліков; Держ. ВНЗ "Нац. гірн. ун-т". - Дніпропетровськ: НГУ, 2015. - 489 с.

11. Методичні вказівки і завдання для індивідуальної підготовки студентів по курсах “Проектування, монтаж і експлуатація систем автоматизації” та “Автоматизація технологічних процесів”. – Івано-Франківськ, 1991.
12. Практикум з курсу “Цифрові системи керування та обробки” для студентів спеціальності 7.092501 “Автоматичне управління технологічними процесами і виробництвами”. – Івано-Франківськ, 1998.
13. Critten DL, Bailey VJ. A review of greenhouse engineering developments during the 1990s. *Agricultural and Forest Meteorology* 2002;122:1e22.
14. Directive 2004/8/EC of the European Parliament and of the Council of 11 February 2004.
15. Семенцов Г.Н., Гордійчук М.І., Жуган Л.І., Чеховський С.А. Автоматизація процесів переробки нафти та газу. –Л.; Світ, 1992. -352 с.
16. Nielsen, B & Madsen, H 1995, 'Identification of Transfer Functions for Control of Greenhouse Air Temperature', *Journal Agric. Engng.Res.*, vol. 60, сторінки. 25 34.
Режим доступу:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0021863485710931?>
17. Курсове проектування. Методичні вказівки з курсу „Організація та планування виробничо-комерційної діяльності” для студентів спеціальності 7.092501 – Автоматизація технологічних процесів і виробництв. Васильченко Г.В., Волошинова В.Н. –Ів.-Фр.; 1995. 38 с.
18. Семенцов Г.Н. Планування та обробка результатів експерименту: навч. посіб. / Семенцов Г.Н. Теорія автоматичного управління (нелінійні та дискретні системи): навч. посіб. / Г.Н.Семенцов, І.І.Чигур. - Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2014. - 96 с.
19. Семенцов Г.Н. Теорія автоматичного управління (нелінійні та дискретні системи): навч. посіб. / Г.Н.Семенцов, І.І.Чигур. - Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2014. - 96 с.
20. Aidan O'Dwyer Handbook PI and PID Controller Tuning Rules.–2nd Edition.– Ireland: Imperial College Press.– 545 p

- 21.Лагойда А.І., Шавранський М.В., Когутяк М.І., Борин В.С., Чигур І.І. «Магістерська робота»: Методичні вказівки. – Івано-Франківськ: Факел, 2024. – 30 с.
- 22.Boryn V.S., Ladygin Yu.O. Development of a digital furnace control system using microcontroller technologies. Modern aspects of modernization of science: status, problems, development trends. Materials of the 62th International Scientific and Practical Conference. November 7, 2025, Shumen (Bulgaria). Pp. 110-113. DOI: <https://doi.org/10.52058/62>