

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Таврійський національний університет
імені В.І. Вернадського
Навчально-науковий інститут муніципального управління
та міського господарства
Кафедра інженерних систем та технологій

На правах рукопису

Кваліфікаційна робота
на здобуття
другого (магістерського) рівня вищої освіти

ТЕМА РОБОТИ

«Автоматизована система локального керування температурою промислових електричних нагрівачів»

Здобувача вищої освіти
Вороніна Юрія Вадимовича
Освітня програма «**Автоматизоване управління технологічними процесами**»
(Спеціальність 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»)

(підпис)

Науковий керівник:
к.т.н., доцент Ківа І.Л.

(підпис)

Національна шкала _____
Кількість балів _____
Оцінка: ECTS _____

Таврійський національний університет імені В. І. Вернадського
Навчально-науковий інститут муніципального управління
та міського господарства
Кафедра інженерних систем та технологій
другий (магістерський) рівень вищої освіти
Спеціальність 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані
технології та робототехніка»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Завідувач кафедри

«____» _____ 2025 року

ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Вороніна Юрія Вадимовича

1. Тема роботи: Автоматизована система локального керування температурою промислових електричних нагрівачів

керівник роботи: к.т.н., доцент Ківа Ігор Леонідович

затверджені Наказом ТНУ імені В.І Вернадського:
від «_02_» _10_ 2025 р. № 116-ОД ____

2. Строк подання студентом роботи: 15.12.2025р.

3. Вихідні дані до роботи: _ робоча температура - 1300 °С; потужність нагрівача електропечі - 30 кВт; час встановлення необхідної температури печі - не більше 360 с; поточна похибка - не більше $\pm 20\%$ від амплітуди синусоїди при синусоїдальному вхідному впливі.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки: _Вступ. Автоматизовані локальні комплекси керування електричними нагрівальними установками промислового призначення. Аналіз регуляторів автоматичного керування промисловими електричними нагрівачами. Дослідження цифрових регуляторів у системах автоматичного керування температури газових печей. Охорона праці та навколишнього середовища. Загальні висновки.

5. Перелік графічного матеріалу: графічний матеріал виконаний у вигляді мультимедійної презентації.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	Ківа І.Л., доцент		
Розділ 2	Ківа І.Л., доцент		
Розділ 3	Ківа І.Л., доцент		
Розділ 4	Ківа І.Л., доцент		

7. Дата видачі завдання _12.09.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Заключний документ етапу
1	Вибір теми магістерської роботи, призначення керівника	до 12.09.2025	Затвердження переліку тем магістерських робіт
2	Пошук і відбір літератури по темі роботи, складання плану магістерської роботи	до 21.10.2025	Список літературних джерел, план роботи
3	Визначення об'єкта, предмета, мети, завдань та методів дослідження, написання вступу до теми магістерського дослідження	до 21.10.2025	Текст вступу
4	Написання тексту магістерської роботи відповідно до її структури:	21.10.2025– 02.12.2025	Текст розділів
	4.1 I розділ	21.10.2025– 28.10.2025	Текст розділу
	4.2 II розділ	28.10.2024– 4.11.2025	Текст розділу
	4.3 III розділ	4.11.2025– 11.11.2025	Текст розділу
	4.4 IV розділ	11.11.2025– 18.11.2025	
5	Підготовка графічних матеріалів чи іншого унаочнення	18.11.2025– 21.11.2025	Роздатковий матеріал, презентація
6	Оформлення кінцевого списку використаних джерел та додатків	21.11.2025– 25.11.2025	Список літературних джерел
7	Оформлення та попередній захист магістерської роботи	25.11.2025 – 09.12.2025	Магістерська робота, рішення кафедри про допуск до захисту
8	Внесення коректив та кінцеве редагування магістерської роботи	09.12.2025 – 15.12.2025	Магістерська робота
9	Реєстрація магістерських робіт на кафедрі	до 15.12.2025	Магістерська робота внесена до журналу реєстрації випускових робіт
10	Захист магістерської роботи	.12.2025 – .12.2025	Рішення Екзаменаційної комісії про захист

АНОТАЦІЯ

Воронін Ю.В. Автоматизована система локального керування температурою промислових електричних нагрівачів. – Рукопис.

Кваліфікаційна магістерська робота за спеціальністю 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка». – Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського, Київ, 2025 рік.

Кваліфікаційна магістерська робота присвячена підвищенню ефективності систем автоматичного керування електричними нагрівачами шляхом використання пропорційно-інтегрально-диференційних регуляторів та удосконаленню порядку визначення параметрів налаштування регуляторів з урахуванням наявності чистого запізнювання в об'єктах керування.

Удосконалено методику розрахунку параметрів налаштування пропорційно-інтегрально-диференційних регуляторів, а також методику параметричного визначення цифрових регуляторів для систем автоматичного керування промисловими електричними нагрівачами з урахуванням часу запізнювання в об'єктах керування. Запропонований підхід базується на використанні блоку визначення коефіцієнтів регулятора та коригуванні його коефіцієнтів передачі. Це дозволяє на етапі розроблення систем автоматичного керування промисловими електричними нагрівачами забезпечити в подальшому оптимальне за швидкодією функціонування процесу керування.

Ключові слова:, система автоматичного керування, пропорційно-інтегрально-диференційний регулятор, параметричний синтез, математичне моделювання, промисловий електричний нагрівач.

ABSTRACT

Voronin Y.V. Automated system for local temperature control of industrial electric heaters. – Manuscript.

Qualification master's thesis in specialty 174 "Automation, computer-integrated technologies and robotics". – V.I. Vernadsky Tavrichesky National University, Kyiv, 2025.

Qualification master's thesis is devoted to increasing the efficiency of automatic control systems for electric heaters by using proportional-integral-differential controllers and improving the procedure for determining the parameters of the controllers, taking into account the presence of a net delay in the control objects.

The method of calculating the parameters of the proportional-integral-differential controllers, as well as the method of parametric synthesis of digital controllers for automatic control systems for industrial electric heaters, taking into account the delay time in the control objects, has been improved. The proposed approach is based on the use of a block for determining the controller coefficients and

adjusting its transfer coefficients. This allows, at the stage of developing automatic control systems for industrial electric heaters, to ensure the optimal functioning of the control process in the future.

Keywords: automatic control system, proportional-integral-differential controller, parametric synthesis, mathematical modeling, industrial electric heater.

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1 АВТОМАТИЗОВАНІ ЛОКАЛЬНІ КОМПЛЕКСИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИМИ НАГРІВАЛЬНИМИ УСТАНОВКАМИ ПРОМИСЛОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ.....	10
1.1. Локальні системи автоматичного управління параметрами електричних печей	10
1.2. Автоматизація температурного контролю електропечі.....	13
1.3 Аналіз системи керування тепловим режимом електропечі.....	18
Висновки до розділу 1.....	23
РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ РЕГУЛЯТОРІВ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПРОМИСЛОВИМИ ЕЛЕКТРИЧНИМИ НАГРІВАЧАМИ.....	24
2.1. Побудова та параметричний синтез цифрових пропорційно-інтегрально- диференційних регуляторів	24
2.2. Використання цифрових регуляторів у системах автоматичного керування з наявністю запізнювання.....	28
2.3. Розроблення цифрового регулятора системи автоматичного керування температурним режимом електропечі оптимальної швидкодії.....	34
2.4. Розроблення цифрового нечіткого регулятора для системи автоматичного керування температурою електричної печі.....	39
2.5. Розробка цифрових регуляторів з оптимізацією за критерієм швидкодії.....	44
2.6. Ідентифікація параметрів електропечі.....	46
2.7. Робастність системи регулювання температури в електропечі.....	48
Висновки до розділу 2.....	51
РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ЦИФРОВИХ РЕГУЛЯТОРІВ У СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ГАЗОВИХ ПЕЧЕЙ...	52
3.1. Синтез цифрового регулятора оптимального за швидкодією системи автоматичного керування однопотокової печі.....	52
3.2. Оцінка робастності системи керування температурою з цифровим регулятором.....	56
3.3. Аналіз робастності системи автоматичного керування температурою із застосуванням цифрового ПІД-регулятора та нечіткого регулятора.....	59
3.4. Синтез цифрових нечітких та ПІД-регуляторів для системи автоматичного керування температурою двопотокової трубчастої печі.....	65
Висновки до розділу 3.....	72
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	73
4.1. Загальні положення при монтажних-налагоджувальних роботах теплосилових установок.....	73
4.2. Охорона праці при експлуатації одно-дво-потокової трубчастої печі.....	77
4.3. Запобігання надзвичайним ситуаціям при роботі трубчастої печі.....	81
Висновки до розділу 4.....	84
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	85
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	87

ВСТУП

Актуальність теми. Важливим та перспективним напрямком інтенсифікації сучасного промислового виробництва є впровадження систем автоматичного керування як невід'ємної складової керування технологічними процесами. На сьогодні в промисловості пріоритетного значення набувають підвищення економічної ефективності виробництва та впровадження енергозберігаючих технологій. У зв'язку з цим істотно зростають вимоги до якості процесів регулювання та керування технологічним устаткуванням, зокрема електричними та газовими печами великої потужності. Неefективна експлуатація таких установок призводить до додаткових економічних витрат. Підтримання оптимальних економічно доцільних режимів роботи електричних і газових печей упродовж тривалого часу можливе лише за умови автоматизованого контролю їх основних параметрів. Отже, впровадження систем автоматичного керування є передумовою забезпечення високої ефективності та безпечної експлуатації цих установок.

Сучасний технічний прогрес спрямований передусім на підвищення потужності й економічної ефективності технологічних установок, зменшення собівартості та покращення якості готової продукції. Показники якості й кількості продукції, а також техніко-економічна ефективність устаткування значною мірою залежать від теплового та технологічного режимів електричних нагрівачів. Це підкреслює практичну важливість і актуальність завдання оптимізації роботи теплового та енергетичного обладнання, реалізація якого неможлива без використання систем автоматичного керування параметрами їх налаштування з можливістю корегування при зміні умов роботи. Ефективність цих систем, у свою чергу, визначається насамперед якістю застосованих регуляторів.

Наявні методи автоматичного керування параметрами електричних нагрівачів здебільшого базуються на використанні аналогових пропорційно-інтегрально-диференційних регуляторів.

Впровадження комп'ютерно-інтегрованих складових у сфері автоматичного керування відзначається значним прогресом у розвитку

цифрових систем управління. Це стало можливим завдяки вдосконаленню обчислювальної техніки, зокрема мікропроцесорів і мікроконтролерів. Використання математичних моделей регуляторів і об'єктів керування в дискретному часі суттєво полегшує процес розробки регуляторів і їх практичну реалізацію.

На сучасному етапі відбувається активне впровадження регуляторів нового покоління, таких як оптимальні за швидкодією та цифрові регулятори. Цифрова архітектура регуляторів дозволяє реалізовувати автоматичні системи керування різної складності, забезпечуючи легку адаптацію програмного забезпечення на етапах розробки та експлуатації. Важливим напрямом розвитку є впровадження сучасних цифрових регуляторів у системи автоматичного керування параметрами електричних нагрівачів.

Мета магістерської дипломної роботи. Покращення якості систем автоматичного керування електричними нагрівачами шляхом використання пропорційно–інтегрально-диференційних регуляторів, а також удосконалення методики визначення параметрів цифрових регуляторів для таких систем із урахуванням наявності чистого запізнювання в об'єктах керування. Проведення дослідження систем із синтезованими регуляторами, які забезпечують необхідний рівень якості перехідних процесів у системах автоматичного керування електричними нагрівачами.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити наступні основні науково-технічні завдання:

- удосконалити методики параметричного синтезу цифрових пропорційно–інтегрально-диференційних регуляторів для систем автоматичного керування параметрами електричних нагрівачів з урахуванням впливу часу чистого запізнювання в об'єктах керування;

- виконати розробку цифрових регуляторів для систем автоматичного керування параметрами електричних нагрівачів;

- дослідити роботу цифро-аналогових систем автоматичного керування параметрами електричних нагрівачів із запропонованими цифровими

пропорційно–інтегрально-диференційними регуляторами в умовах довільних вхідних збурень;

- провести порівняльний аналіз ефективності функціонування регуляторів різних типів з метою формування рекомендацій щодо їх практичного застосування в різних системах автоматичного керування параметрами електричних нагрівачів.

Об’єкт та предмет дослідження. Об’єктом дослідження є системи автоматичного керування електричними нагрівачами, а предметом дослідження – підвищення якості керування ними, динамічної точності та швидкодії.

Наукова новизна полягає в удосконаленні методики визначення параметрів пропорційно–інтегрально-диференційних регуляторів та методики параметричного визначення цифрових регуляторів для систем автоматичного керування промисловими електричними нагрівачами з урахуванням часу чистого запізнювання в об’єктах керування.

Методи та засоби дослідження. У процесі теоретичних і експериментальних досліджень застосовано основні положення сучасної теорії автоматичного керування, методи ідентифікації об’єктів керування, а також положення теорії ймовірностей і математичної статистики для обробки результатів експериментальних досліджень.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що вони можуть бути використані під час розроблення систем автоматичного керування промисловими електричними нагрівачами, які забезпечують оптимальне за швидкодією функціонування процесу керування.

РОЗДІЛ 1 АВТОМАТИЗОВАНІ ЛОКАЛЬНІ КОМПЛЕКСИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИМИ НАГРІВАЛЬНИМИ УСТАНОВКАМИ ПРОМИСЛОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

1.1. Локальні системи автоматичного управління параметрами електричних печей

У технологічних установках широко використовуються різноманітні електричні нагрівачі. У магістерській дипломній роботі основна увага приділена електричним нагрівачам, що застосовуються в промислових електричних печах [1–4].

Попри велику різноманітність конструкцій металургійних печей та способів теплової обробки матеріалів, їх об'єднує спільна мета — створення тепла та передача його оброблюваному матеріалу. Завдяки цьому багато локальних систем автоматичного керування параметрами різних типів печей виконують подібні функції.

Найбільш поширеними в системах автоматизації металургійних печей є локальні системи регулювання температури, що працюють з використанням електричних нагрівачів. Спільність виконуваних функцій зумовлює схожість структурної та, нерідко, апаратної побудови таких систем автоматичного керування.

Локальні системи автоматичного управління параметрами печей є системами автоматичної стабілізації, тобто підтримки регульованої величини (перш за все, температури) на заданому рівні. Структурна схема системи автоматичної стабілізації приведена на рис.1.1.

Регульована величина $x(t)$, що є вихідною величиною об'єкта керування (управління) ОУ, порівнюється із завданням $u(t)$ регулятора Р і їхня різниця $\theta(t)$ надходить на вхід регулятора. Керуючий сигнал регулятора діє на вхід об'єкта. На об'єкт керування діють також неконтрольовані збурення $F(t)$, які змінюють регульовану величину, викликаючи її відхилення від заданого значення. Регулятор, якій є автоматичним стабілізатором, призначений для

усунення цих відхилень, тобто для забезпечення умови $\theta(t) = u(t) - x(t) = 0$. Виконання цієї умови забезпечує компенсацію збурень $F(t)$, які впливають на об'єкт, і компенсацію збурень, прикладених до регулятора та пов'язаних із цілеспрямованою періодичною зміною завдання регулятора. При використанні цифрового регулятора потрібні аналого-цифровий АЦП та цифро-аналоговий ЦАП перетворювачі. Похибка з виходу АЦП $\theta(k)$ подається на вхід регулятора. Сигнал з виходу регулятора надходить на ЦАП (фіксатор нульового порядку з передавальною функцією $H(s) = (1 - e^{-hs})/s$) і далі - на вхід об'єкта керування.

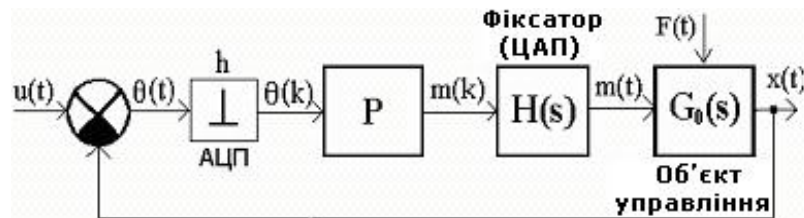


Рис. 1.1. Структурна схема системи автоматичного регулювання температури

Характеристики промислової печі в якості об'єкта регулювання за каналом «температура – витрата електроенергії», а саме статичні та динамічні, можна представити як послідовне з'єднання аперіодичної ланки першого порядку та ланки чистого запізнювання [5–6], що характеризується передатною функцією:

$$G_0(s) = \frac{K}{Ts + 1} e^{-\tau s}. \quad (1.1)$$

Подібна апроксимація є прийнятною лише для певних режимів роботи електропечі, які характеризуються конкретними значеннями регульованої величини, керуючого впливу та збурень. Експериментальні результати [7–10] свідчать, що параметри K , τ та T істотно залежать від режимних факторів печі.

На рисунку 1.2 наведено статичні характеристики нагрівальної печі зі стаціонарним подом площею 5 м^2 за каналом «температура в печі ($^{\circ}\text{C}$) – витрата електроенергії В. Із графіка видно, що коефіцієнт передачі об'єкта по цьому каналу, який визначається як тангенс кута нахилу дотичної до кривої у відповідній точці $k_i = \text{tg } \alpha_i$, істотно залежить від абсолютного значення витрати

електроенергії (крива 1, $k_1 \neq k_2$), теплового стану (криві 1 та 2, $k_3 \neq k_1, k_2$) і маси садки (крива 3, $k_4 \neq k_1, k_2, k_3$).

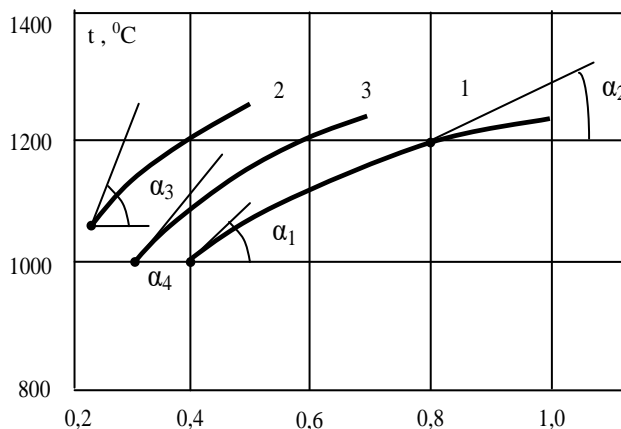


Рис.1.2. Статичні характеристики нагрівальної електропечі

Робота системи автоматичної стабілізації значною мірою визначається характером збурень. Залежно від місця їх прикладення розрізняють два основних типи: збурення, що діють на об'єкт (збурення за навантаженням), та збурення, прикладені до регулятора (збурення за завданням).

Крім того, збурення можуть відрізнятися за величиною та динамікою зміни в часі — вони можуть мати ступінчастий, періодичний, регулярний або випадковий (нерегулярний) характер.

Місце прикладення збурень визначає форму передатної функції системи стабілізації. У випадку збурення за навантаженням (рис. 1.1), коли збурення приводиться до входу об'єкта керування, можна записати таке співвідношення:

$$x = G(s)(F - m); m = W_p(s)\theta,$$

де $W_p(s)$ - передатна функція регулятора.

Тоді передатна функція системи при збуренні за навантаженням має наступний вигляд:

$$W_c^H = \frac{x}{F} = \frac{G_o(s)}{1 + G_o(s)W_p(s)}. \quad (1.2)$$

При збуренні за завданням $F = 0$

$$m = W_p(s)(u - x) = W_p(s)\theta; x = G_o(s)m.$$

В результаті вираз для передатної функції системи при збуренні за

завданням:

$$W_c^z = \frac{x}{u} = \frac{G_o(s)W_p(s)}{1 + G_o(s)W_p(s)}. \quad (1.3)$$

Порівняння виразів (1.2) і (1.3) свідчить, що передатні функції замкненої системи при збуренні за навантаженням та при збуренні за завданням відрізняються між собою.

У нагрівальних печах періодичної дії температурні збурення виникають під час завантаження та вивантаження продукції. Надходження холодних металевих заготовок при завантаженні може спричинити зниження температури на кілька десятків градусів, що супроводжується зміною тиску в робочій камері.

У великих нагрівальних печах, призначених для обробки одиничних виробів, а також у термічних печах, короточасні збурення, пов'язані з процесами завантаження чи вивантаження, зазвичай відсутні. Натомість спостерігаються ступінчасті або монотонні збурення, що виникають унаслідок зміни завдання регулятора відповідно до програми температурного режиму нагріву. У нагрівальних печах швидкість монотонної зміни температури може сягати 2–2,5 °С/хв, а в термічних — 1–1,5 °С/хв.

Випадкові збурення під час роботи печей зумовлюються коливаннями напруги живлення нагрівачів, зміною вологості та тиску повітря тощо. Повільно змінні та випадкові збурення також можуть бути наслідком зношування або старіння конструктивних частин печі.

1.2. Автоматизація температурного контролю електропечі.

Автоматичне регулювання температурного режиму зазвичай є головним завданням системи автоматики металургійної печі. Саме температурний режим, тобто рівень температури в печі, визначає інтенсивність теплопередачі до металу, а отже — швидкість його нагрівання, рівномірність розподілу температури в його об'ємі та інші ключові параметри, що характеризують процес термічної обробки матеріалу й ефективність роботи технологічного агрегату.

Температура всередині печі може також розглядатися як регулююча величина щодо температури металу або температури кладки печі.

Для забезпечення якісного регулювання температури в робочому просторі печі необхідно правильно обрати точку контролю, оптимально розмістити датчики температури, підібрати відповідний тип регулятора та налаштувати його параметри, а також обрати придатний регулюючий орган. Як датчики температури зазвичай використовують термопари або пірометри, діапазон вимірювання яких відповідає необхідним межах контрольованих температур. Термопари або пірометри встановлюють у склепінні чи стінках печі у спеціально призначених конструктивах.

Для печей, що експлуатуються при високих температурах, теплообмін між поверхнею матеріалу та робочим простором печі в може бути поданий наступним рівнянням [11-14]:

$$Q_M = c_0 \varepsilon_{np} \left[\left(\frac{T_{II}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_M}{100} \right)^4 \right] F_M, \quad (1.4)$$

де Q_M - тепловий потікдо матеріалу; ε_{np} - приведений ступінь чорноти газів, кладки, матеріалу; c_0 - коефіцієнт випромінювання абсолютного умовного чорного тіла; T_{II} - температура печі; T_M - температура поверхні металу; F_M - площа поверхні металу.

Слід розуміти що, температура печі у виразі (1.4) є усередненою характеристикою температурного потенціалу робочого простору і, головним чином, виступає параметром, що визначає величину теплового потоку, який передається металу. Відповідно, для ефективного керування процесом нагрівання металу необхідно розташовувати датчик температури таким чином, щоб він вимірював температуру, яка відповідає цьому тепловому потоку.

Під час регулювання температури в електричних печах функцію виконавчих органів виконують реле, контактори або трансформаторні пристрої, що забезпечують плавну зміну потужності.

Металургійна піч за своїми динамічними властивостями по каналу «паливо

— температура» є інерційним і нестационарним об'єктом. Передатну функцію цього каналу можна подати у вигляді виразу (1.1), тобто вона апроксимується послідовним з'єднанням аперіодичної ланки та ланки чистого запізнювання.

Динамічні властивості об'єкта керування залежать від методу вимірювання температури. Існує два основних способи контролю температури в печі:

1. за допомогою термопар або радіаційного пірометра, спрямованого на дно вогнетривкого стакану;
2. за допомогою радіаційного пірометра, який візується безпосередньо на факел або через факел — на стінку печі чи розплавлений метал.

На рис. 1.3 подано криві розгону, що відповідають цим двом способам вимірювання температури печі.

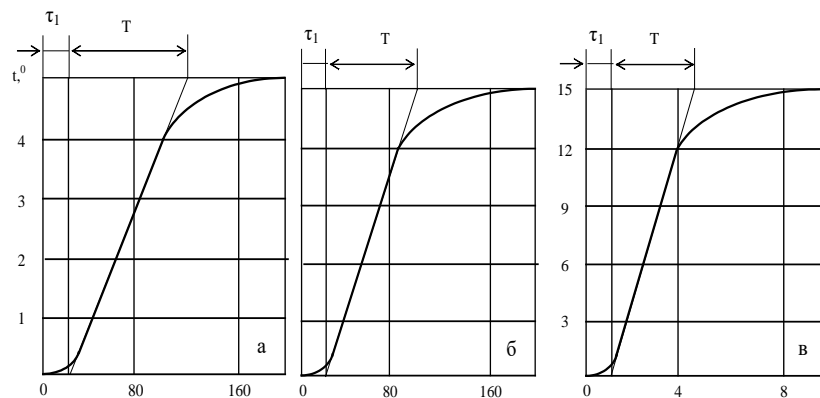


Рис.1.3. Криві розгону при вимірюванні температури печі

Час чистого запізнювання τ та стала часу T при вимірюванні температури термопарою в захисних арматурах (рис. 1.3,а), пірометром, візованим на стінку печі (рис. 1.3,б), та пірометром, візуально спрямованим на факел, що світиться(рис. 1.3,в), складають відповідно: $\tau_1 = 24c$; $\tau_2 = 4c$; $\tau_3 = 1c$; $T_1 = 86c$; $T_2 = 50c$; $T_3 = 4c$.

Обґрунтування та вибір методу вимірювання температури залежить від теплотехнічних, метрологічних та конструктивних вимог. У системах регулювання температури різних печей час запізнення та стала часу можуть досягати кількох хвилин. Це пояснюється значною інерційністю не лише

самих печей, а й температурних датчиків, які зазвичай мають масивні вогнетривкі захисні оболонки.

Кількісні показники перехідних процесів істотно залежать від режиму роботи печі. У печах безперервної дії (методичних, прохідних, протяжних) статичні та динамічні характеристики змінюються зі зміною продуктивності, тобто при коливаннях навантаження. У печах періодичної дії властивості контуру регулювання температури змінюються протягом усього циклу нагрівання. На початковому етапі, коли температура металу та кладки є низькою, їхня здатність накопичувати тепло спричиняє високий коефіцієнт передачі об'єкта. У міру прогрівання металу та стінок печі їхня теплоємність зменшується, що призводить до зниження коефіцієнта передачі.

Така нестаціонарність статичних і динамічних характеристик у системах регулювання температури печей потребує ретельного підходу до вибору та налаштування регуляторів. У кожному окремому випадку закон регулювання слід визначати з урахуванням конкретних властивостей об'єкту керування.

Схема регулювання температури з електричним регулятором безперервної дії. Принципову схему системи регулювання температури в робочому просторі печі показано на рисунку 1.4.

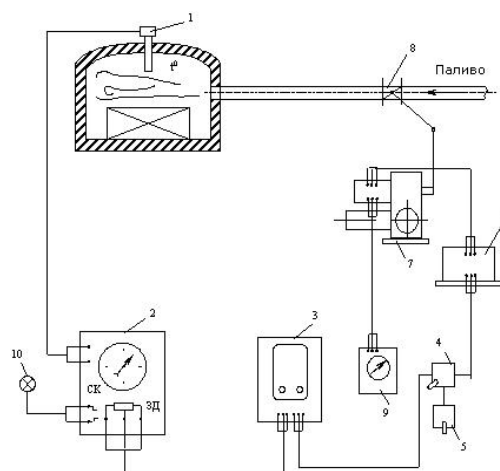


Рис.1.4. Система керування температурою в печі

Температура в печі вимірюється термопарою або пірометром 1 у комплекті з автоматичним потенціометром 2. У потенціометрі є задатчик, за допомогою якого формується електричний сигнал відповідної фази при відхиленні температури від завдання в той або інший бік. Цей сигнал небалансу надходить на

вхід електричного пропорційно-інтегрально-диференційного регулятора безперервної дії 3. Регулятор керує виконавчим механізмом 7, який переміщує регулювальний орган 8, встановлений на лінії подачі палива до печі. Якщо температура перевищує задане значення, регулятор через виконавчий механізм зменшує подачу палива, а при зниженні температури нижче заданої він відповідно збільшує її.

Коли температура відхиляється від заданого значення, повзунок потенціометра ЗД зміщується від середнього положення, і на вхід регулятора подається сигнал небалансу. Вихідний сигнал регулятора, сформований відповідно до обраного закону регулювання, через універсальні ключі управління (4, 5) та кінцеві вимикачі виконавчого механізму надходить на магнітний підсилювач (6).

Магнітний підсилювач складається з двох одноконтурних підсилювачів, увімкнених за диференціальною схемою, має внутрішній зворотний зв'язок та вихідний автотрансформатор. Він налаштований таким чином, що за відсутності вхідного сигналу вихідний сигнал також відсутній. При подачі сигналу на одну з обмоток управління підсилювача формується вихідний сигнал відповідної фази.

Після підсилення командний сигнал надходить на вхід електричного виконавчого механізму, зокрема на його керуючу обмотку. Приводом виконавчого механізму є асинхронний конденсаторний малої інерції електродвигун, який обертається у відповідну сторону при подачі сигналу певної фази на керуючу обмотку.

Регулювання температури з аналоговим електричним регулятором може бути представлено реалізовано схемою подібною рис.1.4 .

Схема регулювання температури за допомогою позиційного електричного регулятора. Температура в печі опору (рис. 1.5) вимірюється термопарою, пірометром або термометром опору 1, що працює разом з автоматичним потенціометром або мостом 2, обладнаним вбудованим позиційним регулятором.

При відхиленні температури від заданого значення у бік зниження або підвищення замикаються відповідні командні контакти регулятора — К1 або К3. Через проміжні реле Р1 або Р3 вони подають на піч живлення максимальної або мінімальної величини від трансформатора 3. Струм живлення контролюється амперметром 4.

Подача максимального струму сприяє підвищенню температури, тоді як мінімальний струм забезпечує поступове її зниження. Систему регулювання можна налаштувати так, що для охолодження печі регулятор повністю відключає живлення електронагрівників.

Якщо температура в печі досягає заданого значення, у регуляторі замикається контакт К2, і піч отримує живлення під номінальну силу струму, забезпечуючи встановлений температурний режим. Номінальна сила струму залежить від температури, маси матеріалу, що нагрівається у печі, та стану печі, тому через постійні зміни цих параметрів практично неможливо підтримувати точну температуру на заданому рівні. У той же час середню величину струму, що подається через контакт К2, вибирають близькою до номінальної для стаціонарного режиму роботи печі.

Трипозиційну схему регулювання можна перетворити на двопозиційну, якщо в регуляторі використовувати лише пару командних контактів — К1 і К3, тобто лише два рівні живлення печі. Двопозиційна система є простішою у реалізації, проте забезпечує нижчу якість керування порівняно з трипозиційною.

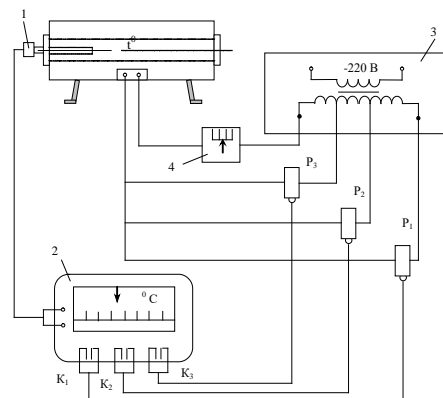


Рис.1.5. Регулювання температури позиційним електричним регулятором

1.3. Аналіз системи керування тепловим режимом електропечі

Під час роботи системи керування тепловим режимом теплової печі, яка має

канали автоматичного регулювання температури, при зміні співвідношення паливно–повітряної суміші та тиску, спостерігається взаємний вплив окремих вузлів один на одного.

Зміни співвідношення «паливо – повітря» α та тиску в печі P_{II} впливають на температуру печі (рис. 1.6).

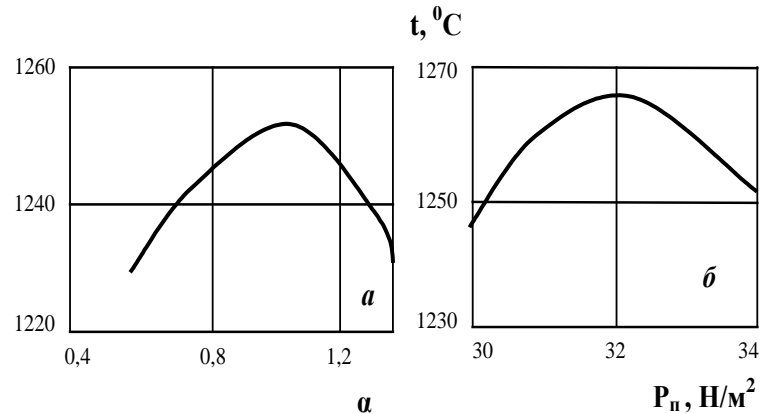


Рис.1.6. Залежність температури печі від технологічних параметрів

Взаємний вплив контурів регулювання співвідношення у паливно-повітряній суміші та тиску має односторонній характер, оскільки коливання тиску в робочому просторі практично не впливають на співвідношення паливо–повітря. Натомість зміни у пропорційному співвідношенні повітря, які спричиняють збільшення або зменшення його абсолютної кількості, що подається в піч, а також кількості продуктів згорання, викликають коливання рівня тиску в робочій камері за незмінного положення димового клапана.

Відомо [4], що за каналом регулювання температури електропіч функціонує як фільтр, який пропускає збурення переважно низьких частот, тоді як канали регулювання тиску та співвідношення реагують на збурення вищих частот.

Для дослідження взаємодії інерційного контуру регулювання температури та малоінерційного контуру регулювання співвідношення «паливо–повітря» розглянемо структурну схему двоконтурної системи стабілізації температури в печі та співвідношення паливо–повітря, подану на рис. 1.7.

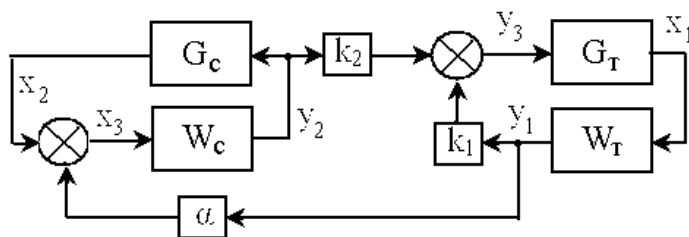


Рис.1.7. Система стабілізації температури в печі з двома контурами керування

Вихідна величина об'єкта регулювання температури x_1 надходить на вхід регулятора температури. Вихідний керуючий сигнал y_1 , впливає на об'єкт регулювання температури, а через канал зв'язку α - на регулятор співвідношення «паливо-повітря». Вхідною величиною регулятора співвідношення «паливо-повітря» є різниця $x_3 = \alpha y_1 - x_2$, де α - коефіцієнт витрати повітря. Вихідний сигнал регулятора співвідношення y_2 , який визначає витрату повітря, впливає не тільки на об'єкт регулювання співвідношення «паливо-повітря», але і на об'єкт регулювання температури через канал зв'язку k_2 . При цьому впливи регуляторів на об'єкт регулювання температури складаються:

$$y_3 = k_1 y_1 + k_2 y_2 \quad (1.5)$$

Для оцінювання впливу контуру регулювання співвідношення «паливо-повітря» на характеристики об'єкта регулювання температури необхідно визначити залежність $x_1 = f(y_1)$, використовуючи такі співвідношення, подані в операторній формі.

$$x_2(p) = G_c y_2(p), \quad (1.6)$$

$$y_2(p) = W_c x_3(p) = W_c [\alpha y_1(p) - x_2(p)] \quad (1.7)$$

Підставляючи значення $x_2(p)$ з рівняння (1.6) у вираз (1.7), отримуємо

$$y_2(p) = W_c [\alpha y_1(p) - G_c y_2(p)] = \frac{W_c \alpha}{G_c W_c + 1} y_1(p) \quad (1.8)$$

Для об'єкта регулювання температури справедливе співвідношення

$$\begin{aligned} x_1(p) &= G_T y_3(p) = G_T [k_1 y_1(p) + k_2 y_2(p)] = \\ &= G_T \left[k_1 + k_2 \alpha \frac{W_c}{G_c W_c + 1} \right] y_1(p) \end{aligned} \quad (1.9)$$

Будемо вважати, що передавальні функції розглянутих ланок мають наступний вигляд:

$$G_T = \frac{e^{-p\tau}}{T_1 p + 1}; \quad G_c = \frac{1}{T_2 p + 1}; \quad G_c = \frac{1}{T_3 p}. \quad (1.10)$$

З даних про динамічні властивості об'єктів по каналах регулювання температури, співвідношення «паливо-повітря» та тиску зрозуміло, що $T_1 \gg T_2$. Крім того, з методики настроювання І - регуляторів відомо, що для одержання аперіодичного перехідного процесу при збуренні за завданням повинно бути $T_2 \approx T_3$. З урахуванням цих зауважень розглянемо частину другої складової виразу (1.9):

$$\frac{W_c(p)}{1 + G_c(p)W_c(p)} = \frac{\frac{1}{T_3 p}}{\frac{1}{T_2 p + 1} \cdot \frac{1}{T_3 p} + 1} = \frac{T_2 p + 1}{(T_2 p + 1)T_3 p + 1} \quad (1.11)$$

Проведений аналіз показав, що при малих значеннях T_2 та T_3 вираз (1.11) є близьким до одиниці. Тоді при введенні $k = k_1 + k_2 \alpha$ залежність (1.9) приводиться до наступного вигляду:

$$x_1(p) = k G_T y_1(p) = \frac{k e^{-p\tau}}{T_1 p + 1} y_1(p). \quad (1.12)$$

Видно, що контур регулювання співвідношення паливо-повітря здійснює помітний вплив на динамічні властивості контуру регулювання температури, тому його розрахунок можна виконувати за аналогією з одним контуром системою регулювання з одним контуром. Подібні результати спостерігаються і при аналізі взаємодії контурів регулювання температури та тиску.

Таким чином, попри наявність певного взаємного впливу між контурами

регулювання температури, співвідношення та тиску, їхні динамічні характеристики можуть визначатися окремо.

Висновки до розділу 1

1. Встановлено, що системи керування промисловими електричними нагрівачами виконують аналогічні функції, що зумовлює подібність їхньої структурної організації. Це забезпечує єдині принципи побудови локальних систем автоматичного регулювання температури печей.

2. Статичні та динамічні характеристики печей як об'єктів керування температурою можуть бути описані моделлю, що складається з послідовного з'єднання аперіодичних ланок і ланок чистого запізнення. У сталих режимах роботи передавальні функції печей можна вважати незмінними.

3. Ефективність функціонування систем автоматичного регулювання параметрів електричних печей значною мірою визначається роботою систем керування електричними нагрівачами. На сьогодні впроваджуються сучасні типи регуляторів, зокрема оптимальні за швидкодією цифрові регулятори, які забезпечують вищу якість керування порівняно з традиційними рішеннями.

4. Дослідження та впровадження нових типів цифрових регуляторів у системах автоматичного керування нагрівачами електричних печей є актуальним та перспективним напрямом наукових розробок.

РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ РЕГУЛЯТОРІВ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПРОМИСЛОВИМИ ЕЛЕКТРИЧНИМИ НАГРІВАЧАМИ

2.1. Побудова та параметричний синтез цифрових пропорційно-інтегрально-диференційних регуляторів

Пропорційно-інтегрально-диференційний регулятор формує вихідний сигнал, що є сумою трьох компонентів: пропорційної, інтегральної та диференціальної. Саме тому такі регулятори часто називають триканальними. Передавальна функція аналогового пропорційно-інтегрально-диференційного регулятора має вигляд:

$$W(s) = K + K_i / s + K_d s$$

Перша складова вихідного сигналу регулятора пропорційна вхідному сигналу. Друга складова пропорційна інтегралу по часу вхідної величини. А третя складова пропорційна її похідній. Структурна схема аналогового пропорційно-інтегрально-диференційного регулятора на рис.2.1а.

При цьому пропорційно-інтегрально-диференційні регулятори використовуються у якості регулювальних елементів багатьох систем управління. Популярність цих регуляторів можна пояснити їх функціональною простотою. Для того, щоб застосувати такий регулятор в системі управління конкретним об'єктом, необхідно виконати налаштування трьох параметрів: K - коефіцієнт пропорційності, K_i - коефіцієнт в каналі інтегрування, K_d - коефіцієнт в каналі диференціювання.

Крім того, на відміну від більшості сучасних систем керування, пропорційно-інтегрально-диференційні регулятори можуть бути реалізовані як у цифровій, а саме програмній, так і в аналоговій, тобто апаратній, формах.

Передатна функція цифрового пропорційно-інтегрально-диференційного регулятора може набувати різних аналітичних форм, оскільки операції інтегрування та диференціювання в дискретному середовищі можуть бути реалізовані за допомогою різних чисельних методів.

Використовуючи апроксимацію похідної за першою різницею та інтегрування, засноване на трапецеїдальному методі, передатну функцію цифрового регулятора цього типу представляємо у такому вигляді:

$$W(z) = K + \frac{K_i h_0}{2} \frac{z+1}{z-1} + \frac{K_d}{h_0} \frac{z-1}{z}, \quad (2.1)$$

де h_0 - крок дискретизації. Структурну схему цифрового регулятора подано на рис.2.1,б.

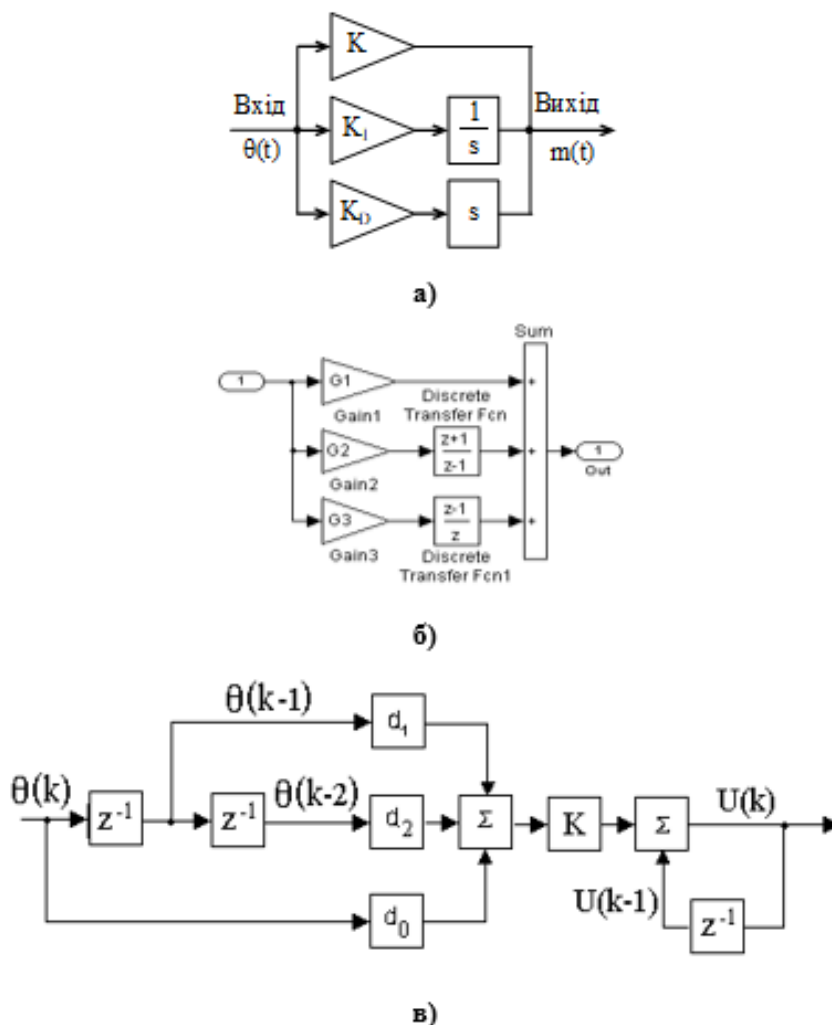


Рис.2.1. Варіанти схем ПІД- регуляторів

В теорії дискретних систем автоматичного керування часто застосовується інша форма для передатної функції цифрового ПІД-регулятора:

$$W(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 - z^{-1}}. \quad (2.2)$$

Якщо подати перший вираз формули (2.1) для передатної функції цифрового ПД-регулятора у вигляді

$$W(z) = G_1 + G_2 \frac{1 + z^{-1}}{1 - z^{-1}} + G_3 (1 - z^{-1}),$$

знаходимо, що при значеннях коефіцієнтів:

$$b_0 = G_1 + G_2 + G_3; \quad b_1 = G_2 - G_1 - 2G_3; \quad b_2 = G_3$$

обидві форми запису для передатної функції цифрового пропорційно-інтегрально-диференційного регулятора є однаковими.

В аналоговій системі керування цифровий ПД-регулятор розташовують між аналого-цифровим і цифро-аналоговим перетворювачами.

На рис.2.2,б зображено структурну схему цифрового ПД-регулятора в системі MATLAB, де на вхід In1 подається похибка неузгодженості, а на входи In2, In3, In4 відповідно значення коефіцієнтів: $G_1 = K, G_2 = \frac{K_i h_0}{2}, G_3 = \frac{K_d}{h_0}$.

Під час оптимізації параметрів цифрових ПД-регуляторів слід визначати критерії якості та функції впливу на систему. Якщо головним показником є швидкодія системи автоматичного керування, то в якості критерію якості можна використовувати час регулювання, який визначається за кривою перехідного процесу.

$$J = t_p \Rightarrow \min. \quad (2.3)$$

За потреби на перехідну характеристику системи накладають обмеження, наприклад, щодо кількості коливань або величини перерегулювання під час коливального перехідного процесу.

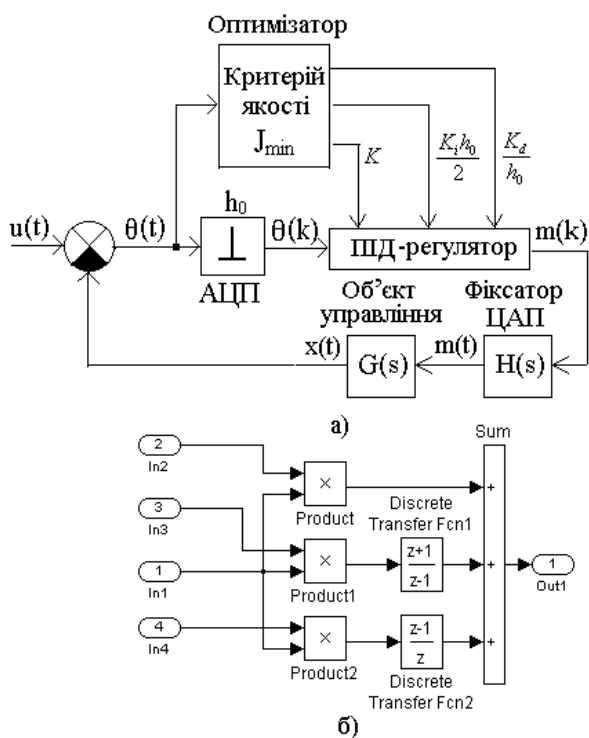


Рис.2.2. Схеми систем керування з пропорційно-інтегрально-диференційними регуляторами

Оптимальні значення параметрів пропорційно-інтегрально-диференційного регулятора визначаються шляхом мінімізації критерію якості. Зменшення цього критерію автоматично забезпечує покращення перехідних процесів у системі автоматичного керування. Для досягнення такого результату можуть застосовуватись як алгоритми умовної, так і безумовної оптимізації.

Цифрові алгоритми керування є ключовим елементом програмного забезпечення мікропроцесорних контролерів. Вони виконують опитування сигналів від датчиків, розраховують керуючі дії згідно із заданим законом регулювання та передають їх на виконавчі механізми. Період опитування (або квантування) визначається динамічними характеристиками технологічного процесу і може змінюватися від часток секунди до кількох десятків секунд.

Сучасна тенденція полягає у поступовій заміні аналогових систем керування цифровими. Це пояснюється значно ширшими можливостями цифрових систем у реалізації складних і вдосконалених алгоритмів керування, що забезпечує високу точність і швидкодію замкнених систем. ПД-алгоритми цифрового керування, за умови правильного налаштування, здатні забезпечити достатньо високу якість регулювання для більшості промислових технологічних

об'єктів.

2.2. Використання цифрових регуляторів у системах автоматичного керування з наявністю запізнювання.

Велика частка технологічних процесів, а також і промислових об'єктів, мають значне запізнювання у своїй дії. Це характерно для теплових установок, у яких використовуються промислові електричні нагрівачі. Нагрівальні печі є типовим прикладом об'єктів керування із запізненням. Таке запізнювання, властиве об'єкту управління, суттєво знижує швидкодію системи та погіршує динамічну точність процесу автоматичного регулювання [22]. Найбільш ефективним методом врахування запізнювання об'єкту автоматичного керування з передатною функцією вигляду $e^{-sT}G(s)$ є застосування в регуляторі Р ланки від'ємного зворотного зв'язку з передатною функцією $(1 - e^{-sT})G(s)$, яка виконує функцію випередження [22,23].

На рисунках 2.3, а та б наведено структурні схеми систем автоматичного керування з випередженням. Крім того, випереджувальна ланка може бути підключена паралельно до об'єкта керування, як показано на рисунках 2.3, в та г. Для всіх поданих на рисунку 2.3 структурних схем передатна функція замкненої системи має вигляд: $G_3(s) = \frac{W(s)G(s)}{1+W(s)G(s)}e^{-sT}$, де $W(s)$ - передатна функція регулятора.

Отже, якщо регулятор **Р** синтезовано для об'єкта автоматичного керування без урахування запізнювання, то при його наявності якість перехідного процесу залишається незмінною, а змінюється лише вихідна змінна системи, яка зсувається на час запізнювання.

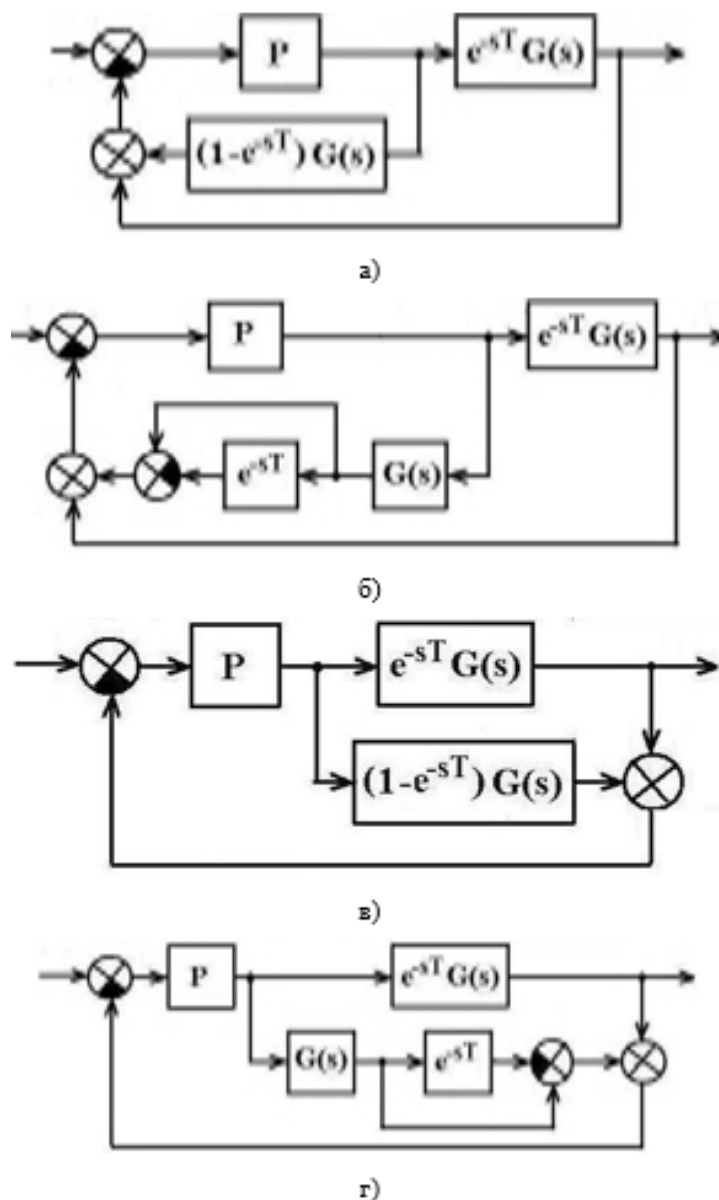


Рис.2.3. Структурні схеми з використанням випереджувальних ланок

Зазначений метод компенсації запізнювання не забезпечує необхідної динамічної точності системи автоматичного керування. Тому регулятор P слід розробляти з урахуванням вимоги досягнення, наприклад, мінімальної інтегральної оцінки якості. У межах цього методу компенсації запізнювання можуть застосовуватися стандартні пропорційно–інтегрально-диференційні регулятори.

Ланку запізнювання з передатною функцією e^{-sT} на практиці [24] реалізують або наближенням першого порядку за формулою $e^{-sT} \approx \frac{2-Ts}{2+Ts}$,

або наближенням другого порядку $e^{-sT} \approx \frac{12-6Ts+T^2s^2}{12+6Ts+T^2s^2}$.

Під час проектування систем автоматичного керування, що містить цифровий регулятор з оптимальною швидкодією та об'єкт керування із чистим запізненням, необхідно забезпечити таку роботу системи, щоб будь-який вхідний сигнал перетворювався у вихідний, який змінюється лінійно протягом інтервалу керування. Для цього потрібно визначити оптимальні керуючі дії, що впливають на об'єкт керування. Ці дії для об'єкта автоматичного керування з відомою передатною функцією $e^{-sT}G(s)$ можна обчислити, використовуючи вирази, наведені у працях [25, 26], які описують оптимальні керуючі впливи для систем з аналогічною передатною функцією $G(s)$, наступним чином:

1. Визначити інтервал керування як $t_p = Nh + \tau$, де N - порядок передатної функції об'єкта автоматичного керування, h - крок квантування в цифрового регулятора, $T \equiv \tau$ - час запізнювання;

2. Так як за час запізнювання похибка змінюється на величину $\tau\Delta\sigma$, то замість похибки системи автоматичного керування θ_n в момент початку n -го інтервалу регулювання (в момент nt_p) необхідно використати величину $\theta_n + \tau\Delta\sigma$, де $\Delta\sigma = \sigma_n - \sigma_{n-1}$, σ_n - перша різниця вхідного впливу на n -му інтервалі регулювання $nt_p \leq t < (n+1)t_p$, σ_{n-1} - перша різниця вхідного впливу на $(n-1)$ -му інтервалі регулювання $(n-1)t_p \leq t < nt_p$.

На вхід об'єкта автоматичного керування, математична модель якого описується передатною функцією $G(s) = \alpha[s(s+a)(s+b)]^{-1}$, на n -му інтервалі

керування $nt_p \leq t < (n+1)t_p$ необхідно подавати наступні впливи

$$\left. \begin{aligned} m_0 &= K_0(\Delta U + S_0\Delta\sigma) + R\sigma_{n-1}; & nt_p \leq t < nt_p + h; \\ m_1 &= K_0[q_1(\Delta U + S_0\Delta\sigma) + h\Delta\sigma] + R\sigma_{n-1}; & nt_p + h \leq t < nt_p + 2h; \\ m_2 &= K_0[q_2(\Delta U + S_0\Delta\sigma) + h\Delta\sigma(1+q_1)] + R\sigma_{n-1}; & nt_p + 2h \leq t < nt_p + 3h, \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

$$\text{де } K_0 = \frac{ab}{\alpha h(1-A)(1-B)}; \quad S_0 = 3h + \frac{a+b}{ab} - \frac{h(2+q_1)}{(1-A)(1-B)}; \quad R = \frac{ab}{\alpha};$$

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

θ_n - похибка системи автоматичного керування в момент початку n -го інтервалу регулювання, тобто похибка системи в момент nt_p .

Інтервал регулювання $t_p = Nh = 3h$, де $N = 3$ - порядок об'єкту керування; h - крок квантування; на $(n-1)$ -му інтервалі регулювання $(n-1)t_p \leq t < nt_p$ вхідний вплив характеризується першою різницею σ_{n-1} , на n -му інтервалі регулювання $nt_p \leq t < (n+1)t_p$ - першою різницею σ_n ; $\Delta\sigma = \sigma_n - \sigma_{n-1}$, $n=0,1,2,\dots$.

При цьому m_0, m_1, m_2 - прямокутні "керуючі" імпульси, кожний з яких має тривалість h та відповідну амплітуду. Якщо кількість імпульсів N , де N - порядок об'єкту керування, то інтервал регулювання складає $t_p = Nh$.

При наявності запізнення на вхід об'єкту керування з передатною функцією $G(s) = \alpha e^{-\tau s} [s(s+a)(s+b)]^{-1}$ необхідно, починаючи з моменту nt_p , подавати наступні керуючі впливи:

$$\left. \begin{aligned} m_0 &= K_0(\Delta U + \tau\Delta\sigma + S_0\Delta\sigma) + R\sigma_{n-1}; & nt_p \leq t < nt_p + h; \\ m_1 &= K_0[q_1(\Delta U + \tau\Delta\sigma + S_0\Delta\sigma) + h\Delta\sigma] + R\sigma_{n-1}; \\ & & nt_p + h \leq t < nt_p + 2h; \\ m_2 &= K_0[q_2(\Delta U + \tau\Delta\sigma + S_0\Delta\sigma) + h\Delta\sigma(1+q_1)] + R\sigma_{n-1}; \\ & & nt_p + 2h \leq t < nt_p + 3h, \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

$$\text{Де } m_3 = R\sigma_{n-1} \text{ при } nt_p + 3h \leq t < nt_p + 3h + \tau. \quad t_p = Nh + \tau \quad (2.6)$$

Аналізуючи вирази (2.5) та (2.6), зрозуміло, що для об'єкта автоматичного керування із запізнюванням можна використовувати формули (2.4) замість формул (2.5) для керуючих імпульсів, але для цього потрібно величину S_0 замінити новим значенням $S_0^* = S_0 + \tau$.

Якщо значення τ менше h , то зручно крок квантування h виражати через ціле число інтервалів запізнювання τ : $h = M\tau$. Тоді інтервал керування можливо визначити як $t_p = Nh + \tau = (NM + 1)\tau$.

Цифровий регулятор на кожному підінтервалі $nt_p \leq t < nt_p + Nh$,
 (N - порядок об'єкту) інтервалу регулювання $nt_p \leq t < (n+1)t_p$,
 ($t_p = Nh + \tau$) описується наступною передатною функцією:

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

де $\theta = \Delta U$ при індексі $i - k \geq 0$ й $\theta = 0, m = 0$ при індексі $i - k < 0$.

Цифровий регулятор на кожній частині $nt_p \leq t < nt_p + Nh$ інтервалу керування $nt_p \leq t < (n+1)t_p$ можна описати наступною передатною функцією:

$$W(z) = \frac{M(z)}{\theta(z)} = \frac{m_0 + m_1 z^{-1} + m_2 z^{-2}}{\Delta U_0 + \Delta U_1 z^{-1} + \Delta U_2 z^{-2}}$$

Структурну схему системи автоматичного керування астатичним об'єктом із наявною ланкою запізнювання наведено на рис. 2.5, а. У цій схемі аналого-цифровий перетворювач працює з кроком квантування, що дорівнює інтервалу керування

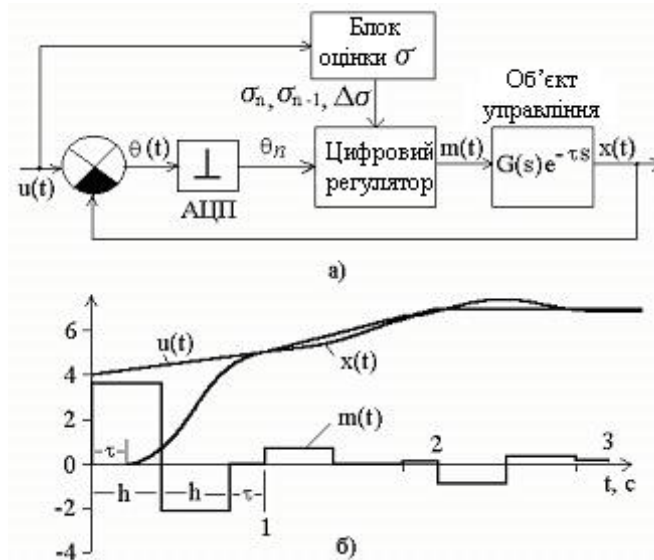


Рис.2.4. Структурна схема системи автоматичного керування астатичним об'єктом

Якщо об'єкт керування в системі (рис.2.4,а) має передатну функцію

$$G_0(s) = \frac{\alpha}{s(s+b)} e^{-\tau s} = \frac{10}{s(s+1)} e^{-0,2s}$$

$h = 2\tau = 0,4$. Тоді $t_p = Nh + \tau = 1$. На вхід об'єкту необхідно, починаючи моменту

nt_p , подавати наступні керуючі впливи:

$$m_0 = K_0(\Delta U + S_0\Delta\sigma) + R\sigma_{n-1}; \quad n \leq t < n+0,4;$$

$$m_1 = K_0[q_1(\Delta U + S_0\Delta\sigma) + h\Delta\sigma] + R\sigma_{n-1}; \quad n+0,4 \leq t < n+0,8;$$

$$m_2 = R\sigma_{n-1} = \frac{b}{\alpha}\sigma_{n-1} \quad \text{при } n+0,8 \leq t < n+1;$$

$$\text{де } K_0 = \frac{b}{\alpha h(1-B)}; \quad S_0 = 2h + \frac{1}{b} - \frac{h}{1-B} + \tau; \quad q_1 = -B; \quad B = e^{-bh}.$$

Відпрацювання системою вхідного впливу на трьох перших інтервалах регулювання подано на рис.2.4,б.

Для статичних об'єктів керування блок оцінки σ не потрібний та структурна схема системи автоматичного керування статичним об'єктом, який має ланку запізнювання, спрощується.

Методика синтезу оптимального за швидкодією цифрового регулятора для об'єктів з чистим запізнюванням складається з наступних кроків:

- визначається передатна функція об'єкта автоматичного керування;
- на основі передатної функції визначаються амплітуди керуючих імпульсів m_i , кількість яких дорівнює порядку передатної функції об'єкта автоматичного керування N , а тривалість кожного імпульсу є рівною кроку квантування h ;
- обирається крок квантування h (якщо крок квантування h менший ніж час запізнювання τ , то час запізнювання виражається цілим числом кроків квантування: $\tau = Lh$; якщо час запізнювання менший ніж крок квантування, то крок квантування виражається цілим числом інтервалів запізнювання: $h = M\tau$);
- визначається тривалість інтервалу регулювання за наступним виразом $t_p = Nh + Lh$, якщо $\tau = Lh$, або за наступним виразом $t_p = Nh + \tau = (NM + 1)\tau$, якщо $h = M\tau$;
- складається структурна схема формування керуючих імпульсів та імпульсів «підставки»;
- складається структурна схема формування швидкості (першої різниці)

вхідного керуючого впливу на інтервалі керування $nt_p \leq t < (n+1)t_p$

де $t_p = Nh$, швидкості (першої різниці) вхідного керуючого впливу на інтервалі керування $(n-1)t_p \leq t < nt_p$ та приросту швидкості на інтервалі керування $nt_p \leq t < (n+1)t_p$ ($\Delta\sigma = \sigma_n - \sigma_{n-1}$).

При цьому цифровий оптимальний за швидкодією регулятор може бути розрахований для довільних керуючих впливів, які поступають на вхід системи, оскільки в такому регуляторі закладено процедуру апроксимації довільних лінійно змінних вхідних впливів на кожному інтервалі автоматичного керування.

2.3. Розроблення цифрового регулятора системи автоматичного керування температурним режимом електропечі оптимальної швидкодії

Важливу роль серед заходів з енергозбереження відіграє автоматизація процесів споживання електроенергії промисловими електричними нагрівачами. Одним із актуальних напрямів є дослідження та створення систем автоматичного регулювання температури ключових промислових установок, зокрема потужних електричних печей [1].

Динамічні характеристики електропечі отримані в роботі [4], де розглянута лінійна модель печі як об'єкта автоматичного керування. Передатна функція електропечі

$$G(s) = \frac{\alpha}{(s+a)(s+b)} e^{-\tau s}, \quad (2.7)$$

де $a = 1/T_1$; $b = 1/T_2$; $\alpha = \frac{K_0}{T_1 T_2}$.

Отримані в результаті експериментальних досліджень значення сталих часу та коефіцієнта підсилення наступні: $T_1 = 122$ с, $T_2 = 14,5$ с, $\tau = 3,9$ с, $K_0 = 7,2$ °C/%. Керуючий вплив на об'єкт керування задається у відсотках переміщення регульовального органу.

Структурна схема системи керування температурою електропечі, виконана в інтерактивній системі MATLAB, наведена на рис.2.5. Підсилювач має насичення з рівнем $S = 18$. При більших керуючих впливах на об'єкт

автоматичного керування система стає нелінійною.

У роботі [21] для об'єкта управління в системі автоматичного управління електропечю пропонується використовувати аналоговий ПІД-регулятор з передавальною функцією

$$W(s) = K + K_i / s + K_d s, \quad (2.8)$$

оптимальними коефіцієнтами якої є наступні:

$$K = 4,84\% / ^0 C; K_i = 0,246\% / ^0 C / c; K_d = 43,32\% \cdot c / ^0 C.$$

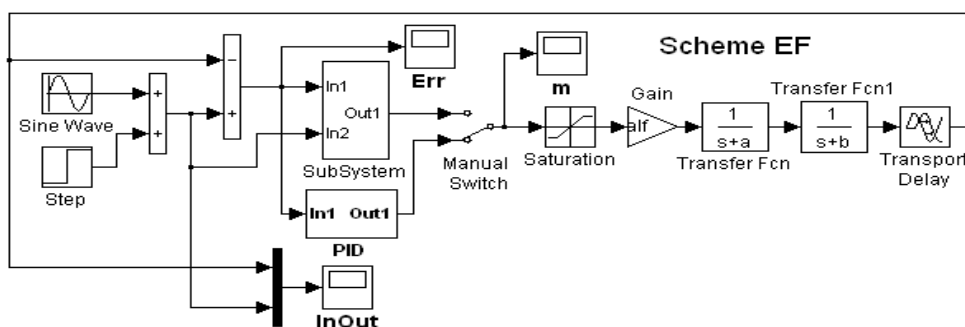


Рис. 2.5. Структура системи автоматичного керування температурою електропечі

У середовищі MATLAB передатну функцію цифрового ПІД-регулятора, який на рис. 2.5 позначено блоком PID, можна подати в різних формах, оскільки процеси інтегрування та диференціювання в цифровому вигляді можуть реалізовуватись кількома методами. Якщо апроксимувати похідну за допомогою першої різниці та виконати інтегрування за трапецеїдальним методом, тоді передатну функцію цифрового ПІД-регулятора можна записати у вигляді:

$$W(z) = K + \frac{K_i h_0}{2} \frac{z+1}{z-1} + \frac{K_d}{h_0} \frac{z-1}{z}, \quad (2.9)$$

де h_0 - крок дискретизації. Структурна схема цифрового ПІД-регулятора наведена на рис.2.6,а. При малих кроках дискретизації цифровий ПІД-регулятор є еквівалентним аналоговому.

Процеси в системі автоматичного керування (рис.2.5) з цифровим ПД-регулятором при надходженні на вхід системи вхідного впливу

$$u_0(t) = 1 + 0,2 \sin(\pi t / 180), \quad (2.10)$$

де $U_0 = 0,2$; $\omega_0 = \pi / 180 \approx 1,74 \cdot 10^{-2} \text{ рад/с}$, подані на рис.2.7.

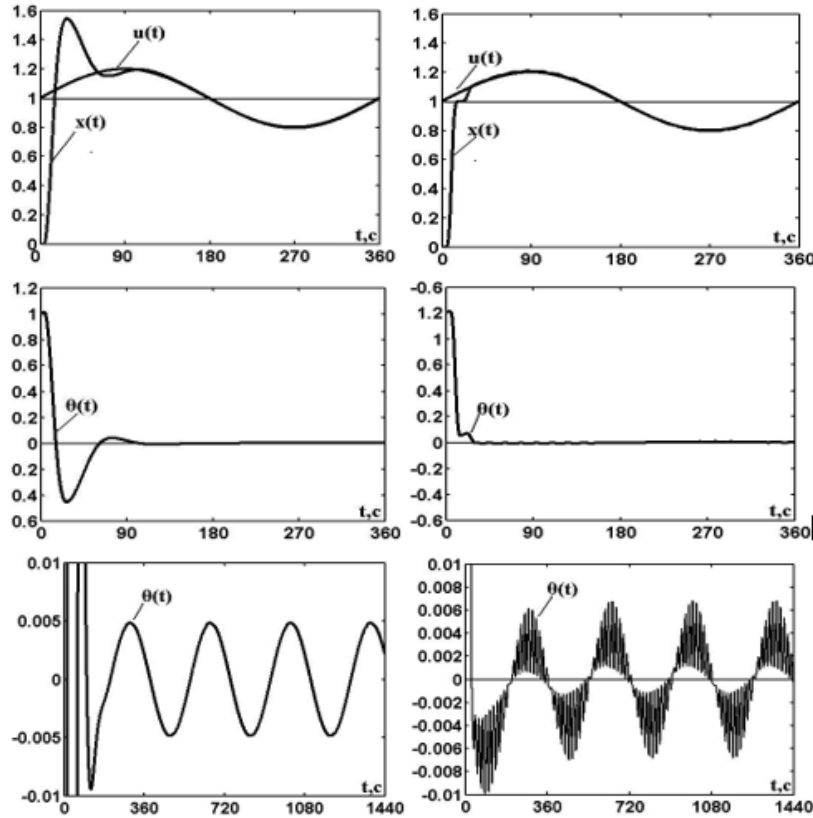


Рис. 2.7. Перехідні процеси в системі автоматичного керування температурою електропечі

Синтез цифрового регулятора, оптимального за швидкодією, для електричної печі з урахуванням інтегруючої ланки для об'єкта керування з передатною функцією:

$$G(s) = \frac{\alpha}{s(s+a)(s+b)} e^{-\tau s} \quad (2.11)$$

Цифровий регулятор на кожному підінтервалі $nt_p \leq t < nt_p + 3h$ інтервалу керування $nt_p \leq t < (n+1)t_p$ можна описати передатною функцією

$$W(z) = \frac{M(z)}{\theta(z)} = \frac{m_0 + m_1 z^{-1} + m_2 z^{-2}}{\Delta U (1 + z^{-1} + z^{-2})} \quad (2.12)$$

або різницеvim рівнянням

$$m_i = \left(\sum_{k=0}^2 m_k \theta_{i-k} - \Delta U \sum_{k=1}^2 m_{i-k} \right) / \Delta U, \quad (2.13)$$

де $\theta = \Delta U$ при індексі $i - k \geq 0$ й $\theta = 0$, $m = 0$ при $i - k < 0$.

Момент початку інтервалу керування тривалістю $t_p = 3h + \tau$, тобто в момент nt_p , середню швидкість вхідного впливу на систему автоматичного керування $u(t)$ на інтервалі регулювання $nt_p \leq t < (n+1)t_p$

$$\sigma_n = \{u[(n+1)t_p] - u(nt_p)\} / t_p \quad (2.14)$$

визначити дуже важко за винятком тих випадків, коли вхідний вплив є заздалегідь заданим, тому доцільно вимірювати поточне значення швидкості вхідного впливу

$$\sigma = \{u(kh_0) - u[(k-1)h_0]\} / h_0 \quad (2.15)$$

де h_0 - крок керування, і використовувати наближене значення першої різниці

$$\hat{\sigma}_n = \sigma(nt_p) \quad (2.16)$$

Середня швидкість вхідного впливу на попередньому інтервалі регулювання $(n-1)t_p \leq t < nt_p$ визначається наступним чином:

$$\hat{\sigma}_{n-1} = \sigma[(n-1)t_p] \quad (2.17)$$

Тоді збільшення швидкості на інтервалі керування $nt_p \leq t < (n+1)t_p$ визначається як

$$\Delta\sigma = \{\sigma(nt_p) - \sigma[(n-1)t_p]\} / t_p. \quad (2.18)$$

Для математичних моделей об'єктів керування з чистим запізнюванням формула (2.7) можна застосувати декілька варіантів структурних схем оптимальних за швидкодією цифрових регуляторів, які залежать від співвідношення часу запізнювання τ та кроку квантування в цифровому регуляторі h [6]. Виправданий варіант оптимального за швидкодією цифрового регулятора, для якого приймемо $h = \tau = 4c$.

Структурна схема такого регулятора складена на в системі MATLAB,

наведена на рис.2.6,б. На рис.2.5 оптимальний за швидкодією цифровий регулятор позначений блоком SubSystem.

Праворуч на рисунку 2.7 зображені перехідні процеси в системі при наявності оптимального за швидкодією цифрового регулятора. Цей регулятор забезпечує аперіодичний перехідний процес без перерегулювання, при цьому час керування не перевищує тридцяти секунд. Отже, швидкодія системи з таким регулятором більш ніж утричі перевищує швидкодію системи з пропорційно-інтегрально-диференційним регулятором. До того ж, система з цифровим пропорційно-інтегрально-диференційним регулятором характеризується перерегулюванням на рівні до п'ятдесяти відсотків.

На наведеному нижче рисунку показано поточну похибку, максимальне значення якої не перевищує трьох відсотків від амплітуди синусоїдального сигналу. Хоча похибка в системі з оптимальним за швидкодією регулятором дещо більша, ніж у системі з пропорційно-інтегрально-диференційним регулятором, її величина залишається досить малою. Під час програмної реалізації регуляторів на контролерах менша структурна складність цифрового пропорційно-інтегрально-диференційним регулятора не є суттєвою перевагою. Тому для практичного застосування доцільно використовувати оптимальний за швидкодією цифровий регулятор.

2.4. Розроблення цифрового нечіткого регулятора для системи автоматичного керування температурою електричної печі

Схему системи автоматичного керування, побудованої на основі нечіткої логіки, наведено на рис. 2.8. Подібні схеми детально розглянуті у працях [8, 21]. Система включає пристрій порівняння, нечіткий регулятор, об'єкт управління та ланку зворотного зв'язку. Нечіткий регулятор складається з трьох основних блоків: блоку фазифікації, блоку логічного висновку і блоку дефазифікації. Оскільки нечіткий регулятор функціонує у дискретному режимі, система автоматичного керування з його використанням, як правило, містить аналого-цифровий перетворювач та цифро-аналоговий перетворювач. На рис. 2.9 подано структурну схему системи автоматичного керування з нечітким регулятором.

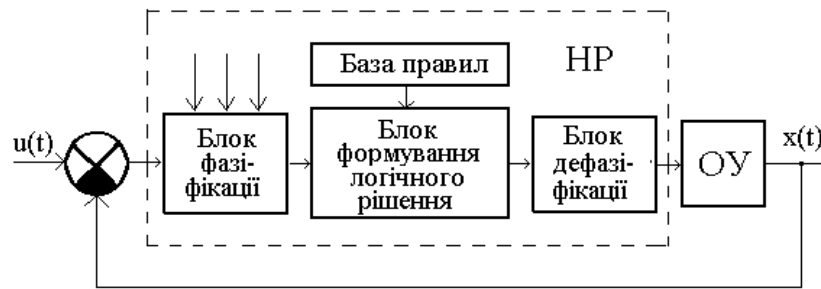


Рис.2.8. Схема системи автоматичного керування на базі нечіткої логіки

Аналого-цифровий перетворювач виконує квантування безперервної похибки $\theta(t) = u(t) - x(t)$ з кроком квантування h . В якості першої та другої похідних від похибки звичайно обчислюють першу та другу різниці за наступними виразами:

$$\dot{\theta}(k) = [\theta(k) - \theta(k-1)]/h, \quad (2.19)$$

$$\ddot{\theta}(k) = [\dot{\theta}(k) - \dot{\theta}(k-1)]/h = [\theta(k) - 2\theta(k-1) + \theta(k-2)]/h^2 \quad (2.20)$$

де $\theta(k)$ - значення квантованої похибки на виході АЦП. ЦАП являє собою, як правило, фіксатор нульового порядку з передатною функцією:

$$H(s) = (1 - e^{-hs}) / s \quad (2.21)$$

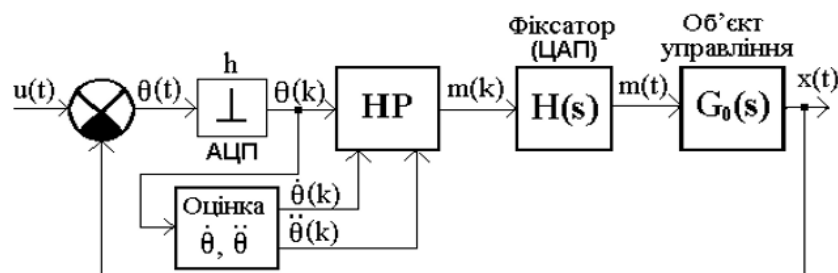


Рис.2.9. Структурна схема системи автоматичного керування з нечітким регулятором

Виділимо основні особливості нечіткого регулятора. Він функціонує в дискретному режимі, тому на кожному етапі квантування виконує всі необхідні обчислення. Регулятор опрацьовує всі вхідні змінні, що дає змогу подавати додаткову інформацію про процеси в об'єкті керування та, відповідно, забезпечувати ширший вплив на його динаміку. Система автоматичного керування, побудована на основі нечіткого регулятора, зберігає стійкість до змін

параметрів об'єкта керування завдяки нечіткій природі правил її роботи. Традиційні методи опису регуляторів за допомогою передавальних функцій не підходять для нечітких регуляторів, оскільки вони є нелінійними і не мають власної динаміки. До характерних рис таких регуляторів належать відсутність «пам'яті», складність процедури проектування та лінгвістичний опис процесу керування на основі словесних правил. Нечіткі регулятори особливо ефективні для керування об'єктами, які складно або неможливо формалізовано описати. Проте навіть у випадках, коли математичні моделі об'єкта відомі, застосування нечітких регуляторів часто дозволяє досягти вищої якості функціонування систем автоматичного керування.

Оскільки реалізація алгоритмів управління на основі нечіткої логіки можлива лише за допомогою мікроконтролерів, системи автоматичного керування з нечіткими регуляторами належать до цифрових. Однією з ключових характеристик таких цифрових систем є крок квантування — інтервал дискретизації аналогового сигналу [20]. Значення цього параметра визначає інші характеристики цифрової системи автоматичного керування, зокрема параметри традиційних цифрових регуляторів [22]. Тому під час проектування систем керування з нечіткими регуляторами особливу увагу слід приділяти вибору оптимального значення кроку квантування.

При формуванні структурних схем систем автоматичного керування з нечіткими регуляторами важливим є вибір вхідних параметрів нечіткого регулятора [28]. Для моделювання нечітких регуляторів система MATLAB має спеціальний інструментарій. Повна структурна схема нечіткого регулятора (рис.2.10,) в системі управління складається з фіксатора *Zero-Order Hold*, який працює з кроком квантування h_0 , блоків оцінки першої та другої похідних похибки системи автоматичного керування, двох блоків нормування вхідних *normin* та вихідного *normout* сигналів, центрального блоку нечіткого регулятора *Fuzzy Logic Controller* та вихідного фіксатора *Zero-Order Hold1*, який також працює з кроком квантування h_0 .

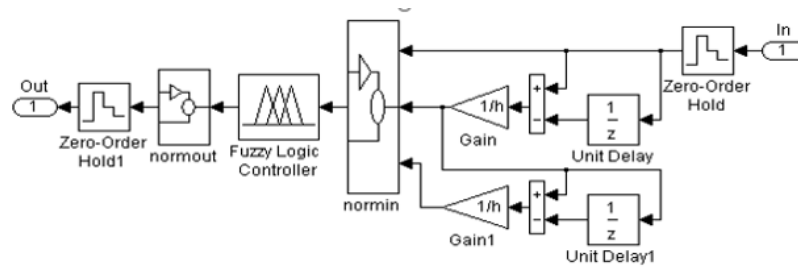


Рис.2.10. Структурна схема нечіткого регулятора

Блоки оцінки першої та другої похідних від похибки визначають наступні вирази:

$$\dot{\theta}(k) = [\theta(k) - \theta(k-1)]/h, \quad \ddot{\theta}(k) = [\dot{\theta}(k) - \dot{\theta}(k-1)]/h \quad (2.22)$$

Блоки нормування вхідних *normin* та вихідного *normout* сигналів та центральний блок *Fuzzy Logic Controller* в системі MATLAB об'єднані в блок *Controller*.

Оцінка першої та другої похідних від похибки визначається наступними виразами:

$$\dot{\theta}(k) = [\theta(k) - \theta(k-1)]/h, \quad \ddot{\theta}(k) = [\dot{\theta}(k) - \dot{\theta}(k-1)]/h \quad (2.23)$$

Блоки нормування вхідних та вихідного сигналів та центральний блок *Fuzzy Logic Controller* в системі MATLAB об'єднані в блок *Controller*.

Нормування вхідних та вихідного сигналів виконується за наступними виразами:

$$\left. \begin{aligned} u_1^* &= (\theta^* - \theta_{\min}) / (\theta_{\max} - \theta_{\min}); \\ u_2^* &= (\dot{\theta}^* - \dot{\theta}_{\min}) / (\dot{\theta}_{\max} - \dot{\theta}_{\min}); \\ u_3^* &= (\ddot{\theta}^* - \ddot{\theta}_{\min}) / (\ddot{\theta}_{\max} - \ddot{\theta}_{\min}); \end{aligned} \right\} \quad (2.24)$$

$$u_c^* = (m^* - m_{\min}) / (m_{\max} - m_{\min}) \quad (2.25)$$

Для спрощення нормування та перерахунку значень сигналів у значення елементів єдиної універсальної множини діапазони зміни вхідних та вихідного сигналів, що є параметрами нечіткого регулятора, приймаються симетричними:

$$\left. \begin{aligned} \theta_{\max} &= -\theta_{\min}; \\ \dot{\theta}_{\max} &= -\dot{\theta}_{\min}; \\ \ddot{\theta}_{\max} &= -\ddot{\theta}_{\min}; \\ m_{\max} &= m_{\min} \end{aligned} \right\} \quad (2.26)$$

З урахуванням таких припущень формули перерахунку набувають наступного вигляду:

$$\begin{aligned} u_1^* &= -(\theta^* - \theta_{\min}) / (2\theta_{\min}); \\ u_2^* &= -(\dot{\theta}^* - \dot{\theta}_{\min}) / (2\dot{\theta}_{\min}); \\ u_3^* &= -(\ddot{\theta}^* - \ddot{\theta}_{\min}) / (2\ddot{\theta}_{\min}); \\ m^* &= m_{\min} (1 - 2u_c^*). \end{aligned} \quad (2.27)$$

На основі таких перетворень структурні схеми блоків нормування вхідних (*normin*) та вихідного (*normout*) сигналів матимуть вигляд як на рисунках 2.11. та 2.12.

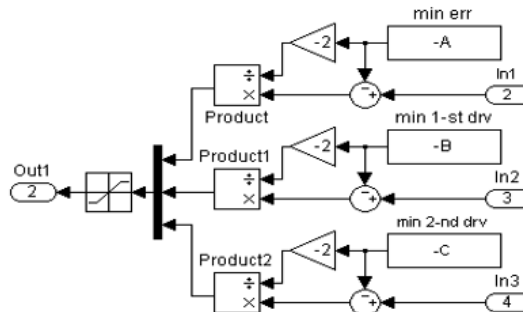


Рис.2.11. Схема блоків нормування вхідних сигналів.

У центральному блоці нечіткого регулятора *Fuzzy Logic Controller* (рис. 2.10) вибираються функції належності *membership functions*, задається база правил *rules* та виконується рішення логічних рівнянь.

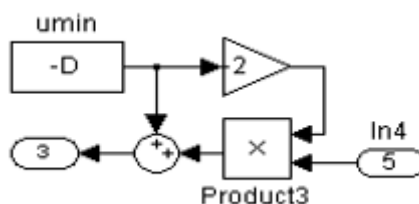


Рис.2.12. Схема блоків нормування вихідних сигналів.

На рис.2.13 показані перехідні процеси при наявності в системі цифрового нечіткого регулятора за умови надходженні на вхід системи суми одиничного ступінчастого та еквівалентного гармонічного впливів:

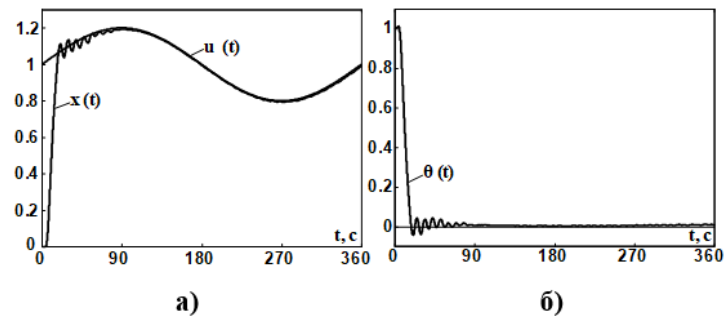


Рис. 2.13. Вплив та перехідний процес у системі автоматичного керування електропеччю з нечітким регулятором

З отриманих графіків видно, що регулятор забезпечує близький до аперіодичного перехідний процес та має малу статичну похибку.

2.5. Розробка цифрових регуляторів з оптимізацією за критерієм швидкодії.

Розробка оптимального за швидкодією цифрового регулятора для об'єкта керування з передатною функцією:

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

Динамічні характеристики електропечей як об'єктів керування часто описують за допомогою такої передатної функції [3]. Під час роботи системи автоматичного регулювання зі статичним об'єктом, що реагує на довільну вхідну дію, яку можна апроксимувати лінійно змінним сигналом, на вихід регулятора доцільно додати інтегруючу ланку, щоб надати системі астатизм першого порядку. У процесі синтезу цифрового регулятора, оптимізованого за швидкодією, інтегруючу ланку включають до передатної функції самого об'єкта керування. Тоді для об'єкта з передатною функцією $G(s) = \frac{\alpha}{s(s+b)} e^{-\tau s}$ керуючі впливи на кожному інтервалі керування тривалістю t_p визначаються у наступному вигляді [5,6]:

$$m_0 = K_0(\Delta U + S_0\Delta\sigma) + R\sigma_{n-1} \text{ при } nt_p \leq t < nt_p + h;$$

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

$$nt_p + h \leq t < nt_p + 2h;$$

$$m_2 = R\sigma_{n-1} = \frac{b}{\sim} \sigma_{n-1} \text{ при } nt_p + 2h \leq t < nt_p + 2h + \tau,$$

Структуру системи автоматичного для об'єкта, що розглядається, в системі MATLAB можна представити в наступному вигляді:

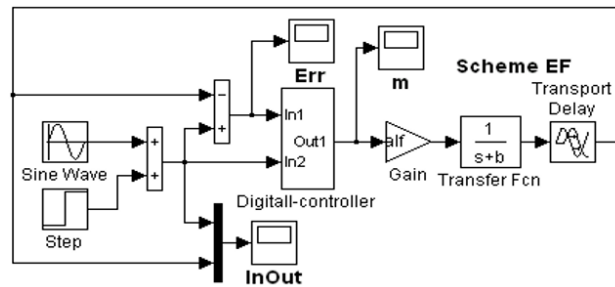


Рис.2.14. Структурна схема системи автоматичного керування

Дослідження цієї системи автоматичного керування з оптимальними за швидкодією цифровими регуляторами (digitall-controller) для електричної печі типу СНО-3.4.2,5/13 з карборундовими нагрівниками $\alpha = 100$, $b = 10$, $\tau = 0,2$ с.

показали, що регулятор повинен формувати два прямокутних керуючі імпульси m_0 та m_1 , кожний з яких повинен мати тривалість $h = 2\tau$, та один прямокутний імпульс “підставки” амплітудою $R\sigma_{n-1}$ тривалістю τ .

Структурна схема цього цифрового оптимального за швидкодією регулятора показана на рис.2.15.

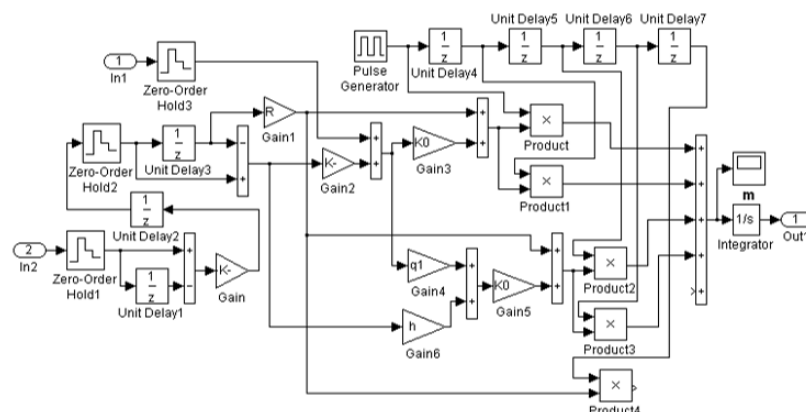


Рис.2.15. Структурна схема оптимального за швидкодією цифрового регулятора температури

Результати дослідження математичної моделі системи, приведеної на рис.2.14, з регулятором, який подано на рис.2.15 подані на рис.2.16.

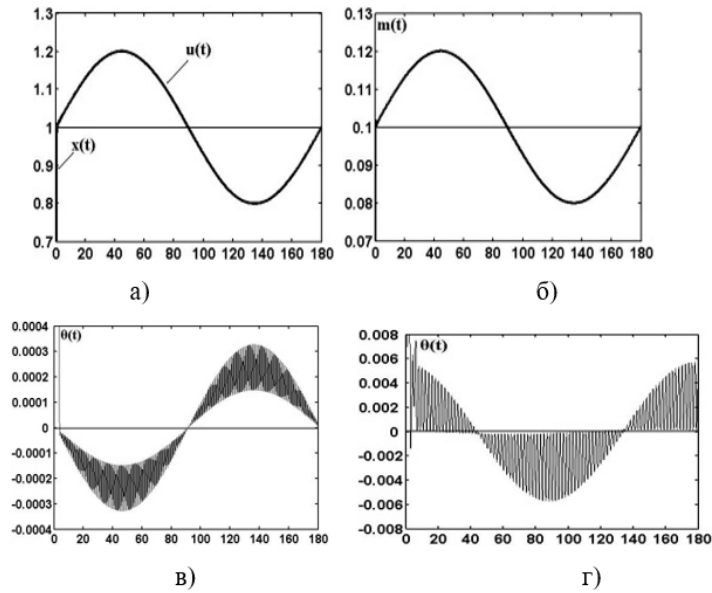


Рис.2.16. Графіки досліджень систем автоматичного керування

Процеси в системі автоматичного керування рис.2.14 відображаються на індикаторі InOut , вхідний вплив $u(t)$, вихід системи $x(t)$, керуючий вплив на об'єкт з виходу регулятора $m(t)$, Егр похибка неузгодженості $Q(t)$.

Система автоматичного керування була досліджена при впливі на вході суми одиничного ступінчатого сигналу та еквівалентного гармонічного сигналу $u_3(t) = 1 + U_3 \sin \omega_3 t = 1 + 0,2 \sin(\pi t / 90)$.

Система с високою точністю відпрацьовує вхідний вплив. При цьому вихід системи $x(t)$ та керуючий вплив на об'єкт автоматичного керування з виходу регулятора $m(t)$, а максимальна поточна похибка не перевищує 0,16%.

2.6. Ідентифікація параметрів електропечі

Важливим етапом дослідження електропечі як об'єкта автоматичного керування є визначення параметрів її передатної функції для різних режимів роботи. Проведемо аналіз процесу ідентифікації параметрів електропечі як елемента системи автоматичного керування.

Метою параметричної ідентифікації є визначення числових значень параметрів математичної моделі об'єкта за відомої структурної схеми. Існує значна кількість підходів до виконання ідентифікації. Для лінійних стаціонарних

об'єктів найчастіше застосовують частотні методи, метод перехідної характеристики, а також різні регресійні підходи, включно з методом найменших квадратів. У активних методах ідентифікації зазвичай використовують синусоїдальні сигнали або ступінчасті впливи як вхідні дії.

Параметрична ідентифікація, за якої структура об'єкта та вигляд його передатної функції відомі, а необхідно визначити лише числові значення параметрів, називається ідентифікацією у вузькому розумінні. Такий підхід, що спирається на апріорні відомості про об'єкт, найбільш відповідає реальним умовам проектування і широко застосовується в інженерній практиці.

Завдання визначення невідомих параметрів об'єкта з передатної функції

$G(s) = \frac{\alpha}{(s+a)(s+b)} e^{-\tau}$ можливо з моделлю із аналогічною передатною функцією

$$\hat{G}(s) = \frac{\hat{\alpha}}{(s+\hat{a})(s+\hat{b})} e^{-\hat{\tau}} = \frac{K_0}{(\hat{T}_1 s + 1)(\hat{T}_2 s + 1)} e^{-\tau} \quad (2.28)$$

На вхід об'єкта керування та на вхід моделі подаються сигнали $u(t)$ синусоїдальної форми або ступінчасті стрибки, а різницю виходів $Q(t)$ на блок обчислення критерію якості.

Математичний запис критерію якості подається у наступному вигляді:

$$J = \frac{1}{L} \sum_{v=0}^{L-1} \theta_v^2 \Rightarrow \min, \quad (2.29)$$

де похибка Q_v обчислюється із кроком моделювання h_0 , а значення L визначає інтервал спостереження.

Загальна схема ідентифікації параметрів об'єкта автоматичного керування наведена на рис.2.17.

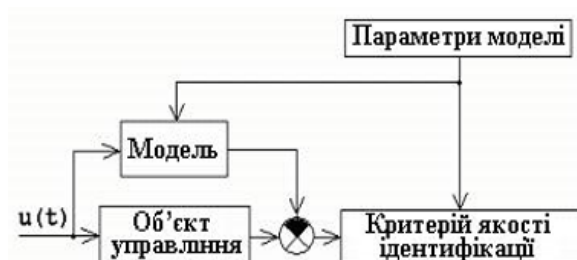


Рис.2.17. Схема ідентифікації параметрів об'єкта автоматичного керування

При заданому вхідному впливі $u(t)$ як похибка $Q(t)$, так і критерій якості ідентифікації залежать від параметрів моделі

$$J = F(\hat{a}, \hat{b}, \hat{\alpha}, \hat{\tau}) \quad (2.30)$$

Мінімізація критерію якості є завданням оптимізації параметрів моделі. Оптимальні і найбільш близькі до невідомих параметрів об'єкта управління параметри моделі відповідають мінімальному значенню критерію якості.

Для мінімізації критерію якості доцільно застосувати метод модифікованої умовної оптимізації [24,27]. Сутність методу полягає в наступному. Спочатку обчислюють функціонал $J = F(\hat{a}, \hat{b}, \hat{\alpha}, \hat{\tau})$ у базисній точці. Потім кожен змінну по черзі змінюють шляхом додавання або віднімання довжини кроку H_k . Якщо така зміна змінних приводить до зменшення функціонала, то для одержання мінімального функціонала знаходять нову базисну точку. Якщо така зміна змінних не приводить до зменшення функціонала, то змінюють довжину кроку.

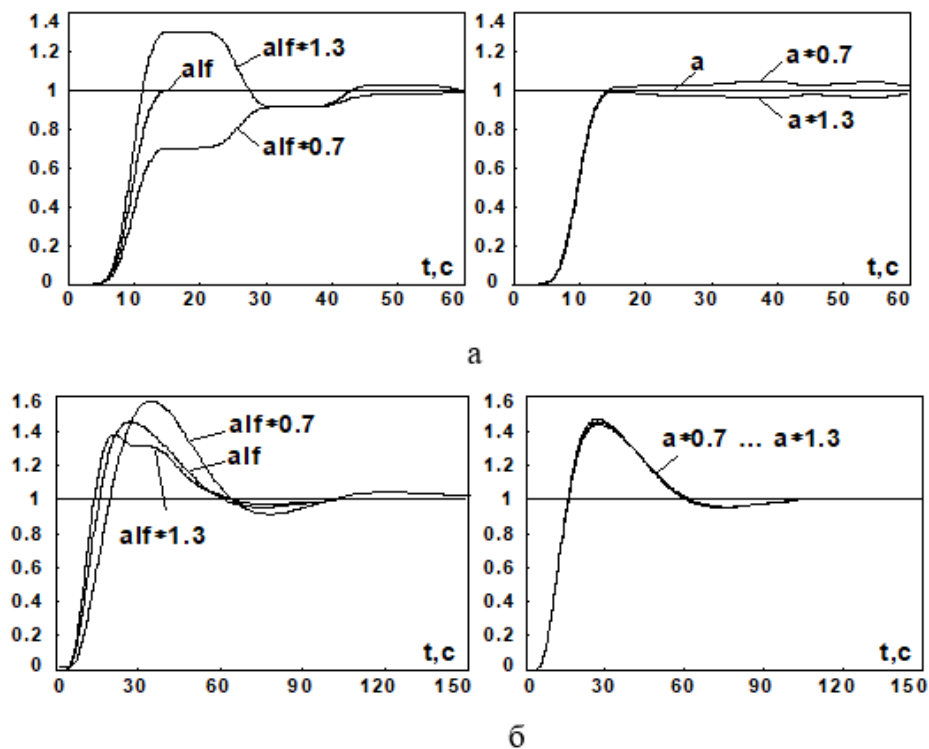
Коли знову отримана базисна точка відрізняється від попередньої, проводять пошук за зразком, а саме рухаються в напрямку від попередньої базисної точки до отриманої. При цьому змінну змінюють по формулі $P_k = 2c_k - d_k$. Де P_k – значення змінної в точці зразка; c_k – значення k -ї змінної в останній точці; d_k – значення k -ї змінної в попередніх базисних точках. Пошук завершується тоді, коли довжина кроку зменшиться до заданого малого значення. Такий метод параметричної ідентифікації дозволяє одержувати досить точні значення параметрів об'єкта керування.

2.7. Робастність системи регулювання температури в електропечі

Сучасні методи синтезу систем автоматичного керування передбачають обов'язкове дослідження їхньої робастності — здатності забезпечувати необхідну якість функціонування незалежно від неточностей моделі чи значної невизначеності характеристик об'єкта керування [31]. Такий підхід враховує той факт, що реальні фізичні системи та умови їхньої роботи неможливо описати абсолютно точно: вони можуть змінюватися непередбачувано та зазнавати різноманітних збурень. Робастність, по суті, визначається чутливістю системи керування до факторів, не врахованих під час її аналізу та проектування —

зокрема до збурень, шумів датчиків, неточностей моделі чи інших похибок, що впливають на динаміку функціонування системи.

Робастність систем зазвичай досягається шляхом правильного вибору регулятора. Оскільки основною функцією регулятора є забезпечення необхідної якості роботи системи як у перехідних, так і в усталених режимах, варто обирати такі типи регуляторів, які гарантують потрібну швидкодію при ступінчастому вхідному сигналі (що визначається часом регулювання), мінімальні динамічні похибки за довільних вхідних впливів та прийнятні зміни показників якості системи керування. Практичний інтерес становить аналіз перехідних процесів у системі автоматичного керування електропеччю з використанням розглянутих цифрових регуляторів за умов неточно визначених параметрів передатної функції. Якщо регулятори настроєні на параметри α , a , b , τ , а реальні параметри α та a значно відрізняються. Результати дослідження подані на рис.2.18.



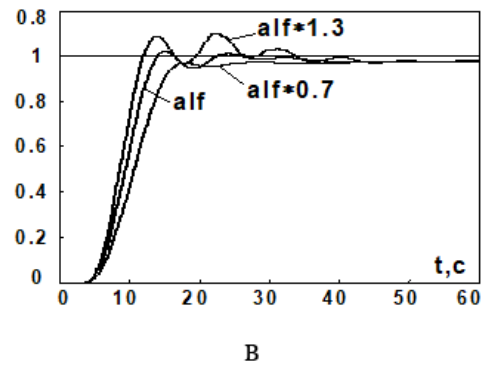


Рис. 2.18. Дослідження робастності системи автоматичного керування температурою електропечі: а - система з оптимальним за швидкодією цифровим регулятором; б - система з цифровим пропорційно-інтегрально-диференціальним регулятором; в - система із цифровим нечітким регулятором

Неточне визначення параметра - тобто найбільшої сталої часу електропечі - незначно впливає на характер перехідного процесу в системі з будь-яким із розглянутих типів регуляторів. Проте помилка в заданні цього параметра спричиняє суттєве викривлення перехідного процесу, особливо в системі з цифровим регулятором, оптимізованим за швидкодією. У такому випадку додатково помітно зростає тривалість перехідного процесу.

Висновки до розділу 2

1. Аналіз системи автоматичного регулювання температури електропечі (об'єкта керування другого порядку із запізненням), у якій використовувались три типи регуляторів, показав таке: цифровий ПД-регулятор формує перехідні процеси з доволі значним перерегулюванням і великим часом встановлення. Натомість оптимальний за швидкодією регулятор забезпечує перехідні процеси без перерегулювання та втричі швидше встановлення параметрів. Нечіткий регулятор формує майже аперіодичний перехідний процес із часом регулювання не більше ніж 30 с і малою поточною похибкою, але супроводжується коливаннями. Тому найдоцільнішим є застосування оптимального за швидкодією цифрового регулятора.

2. Удосконалено методику синтезу цифрових швидкодіючих оптимальних регуляторів для систем автоматичного керування температурою електропечі з урахуванням різних співвідношень між кроком квантування регулятора та часом запізнення в об'єкті керування. На основі цієї методики проведено дослідження систем регулювання температури для об'єктів із різним часом запізнення.

3. Запропоновано спрощений підхід до ідентифікації параметрів електропечі як об'єкта керування, у якому передавальна функція ланки чистого запізнення апроксимована Паде-наближенням другого порядку.

4. Виконано дослідження робастності системи автоматичного керування температурою електропечі, як об'єкта другого порядку із запізненням, для трьох типів регуляторів. Похибка у визначенні найбільшої сталої часу електропечі майже не впливає на форму перехідного процесу незалежно від використаного регулятора. Водночас неточність у визначенні коефіцієнта підсилення суттєво спотворює перехідний процес, особливо в системі з оптимальним за швидкодією цифровим регулятором, де також значно збільшується тривалість перехідного процесу.

РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ЦИФРОВИХ РЕГУЛЯТОРІВ У СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ГАЗОВИХ ПЕЧЕЙ

3.1. Синтез цифрового регулятора оптимального за швидкодією системи автоматичного керування однопотокової печі

Нафтова сировина рухається екранною поверхнею, на якій підігрівається групою газових пальників, розташованих у спільній топковій камері. Температуру нагрівання сировини в конструкції регулюють шляхом зміни подачі палива до пальників. У якості регульованої величини виступає температура сировини на виході зі змійовика, а керуючою величиною — витрата палива, що подається до пальників.

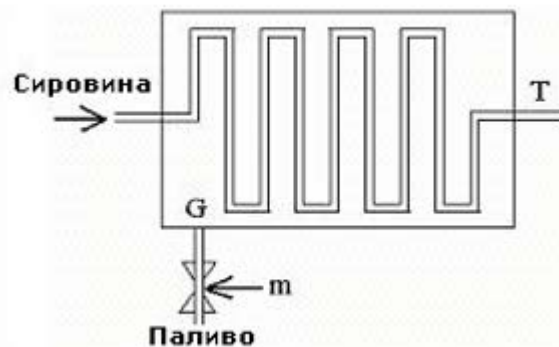


Рис. 3.1. Схема однопотокової трубчастої печі

Передатна функція трубчастої печі як об'єкта управління, отримана за даними експерименту, визначається у наступному вигляді:

$$G_0(s) = \frac{\alpha}{(s+b)^3} e^{-ts} \quad (3.1)$$

В якості виконавчого пристрою використовується пристрій типової конструкції: електродвигун + регульований вентиль. Стала часу печі значно перевищує сталу часу електродвигуна. Тому останньою можна знехтувати та виконавчий пристрій прийняти, як інтегруючу ланку з передатною функцією $1/s$. При цьому передатна функція самого об'єкта керування визначається у наступному вигляді:

$$G(s) = \frac{\alpha}{s(s+b)^3} e^{-\tau s} \quad (3.2)$$

Структурну схему системи керування температурою сировини на виході змішувача, реалізовану в інтерактивному середовищі MATLAB, подано на рис. 3.2. У ній оптимальний за швидкодією цифровий регулятор представлено у вигляді двох підсистем — SubSystem та SubSystem1.

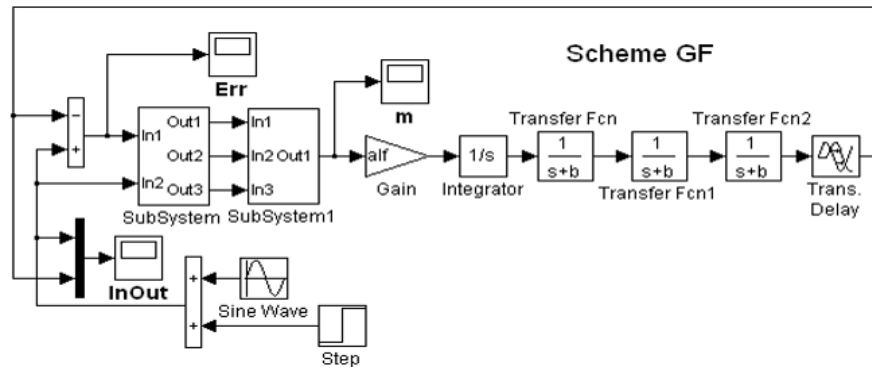


Рис. 3.2. Схема системи управління температурою сировини в MATLAB

Для об'єкта управління з передатною функцією (3.2) амплітуди імпульсів тривалістю h оптимального керуючого впливу на кожному інтервалі регулювання визначаються:

$$\begin{aligned} m_0 &= K_0(\Delta U + S_0 \Delta \sigma), \quad nt_p \leq t < nt_p + h; \\ m_1 &= K_0[q_1(\Delta U + S_0 \Delta \sigma) + h \Delta \sigma], \quad nt_p + h \leq t < nt_p + 2h; \\ m_2 &= K_0[q_2(\Delta U + S_0 \Delta \sigma) + h(1 + q_1) \Delta \sigma], \quad nt_p + 2h \leq t < nt_p + 3h; \end{aligned} \quad (3.3)$$

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

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

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

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

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

$\Delta U = \theta_n$, де θ_n – похибка системи в момент початку n -го інтервалу регулювання тривалістю $t_p = 4h + \tau$, тобто похибка в момент nt_p . h - крок квантування. $\Delta \sigma = \sigma_n - \sigma_{n-1}$, де σ_n - перша різниця вхідного впливу на інтервалі регулювання $nt_p \leq t < (n+1)t_p$, σ_{n-1} - перша різниця вхідного впливу на інтервалі регулювання $(n-1)t_p \leq t < nt_p$.

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

$$W(z) = \frac{M(z)}{\theta(z)} = \frac{m_0 + m_1 z^{-1} + m_2 z^{-2} + m_3 z^{-3}}{\Delta U (1 + z^{-1} + z^{-2} + z^{-3})} \quad (3.4)$$

або різницеvim рівнянням

$$m_i = \left(\sum_{k=0}^3 m_k \theta_{i-k} - \Delta U \sum_{k=1}^3 m_{i-k} \right) / \Delta U, \quad (3.4)$$

де $\theta = \Delta U$ при індексі $i - k \geq 0$ та $\theta = 0$, $m = 0$ при індексі $i - k < 0$.

Для математичних моделей об'єктів управління із чистим запізнюванням можна застосувати декілька варіантів структурних схем, оптимальних за швидкодією цифрових регуляторів, які залежать від співвідношення часу запізнювання та кроку квантування в цифровому регуляторі.

Структурна схема такого регулятора, складена на підставі виразів (3.3) та (2.10) - (2.13) в системі MATLAB, наведена на рис.3.3 блок SubSystem та рис.3.4 блок SubSystem1.

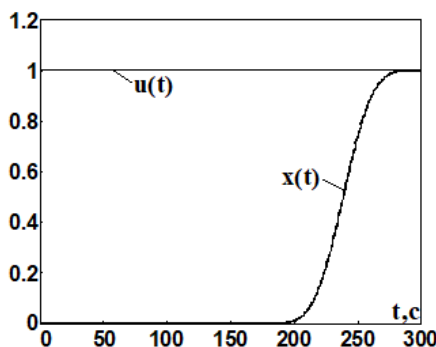


Рис.3.5. Перехідна характеристика системи автоматичного керування температурою. $U(t)$ – вхід, $X(t)$ – вихід системи автоматичного керування

Якщо виникає потреба змінювати температуру сировини за довільним законом, слід враховувати інерційний характер системи. Тому, щоб мінімізувати похибку контролю, зміни температури мають відбуватися досить повільно.

На рис.3.6 зображено процеси в системі автоматичного керування при надходженні на вхід системи суми одиничного стрибка та еквівалентного синусоїдального сигналу вигляду:

$$u(t) = 1 + 0,5 \sin(\pi t / 7200) \quad (3.6)$$

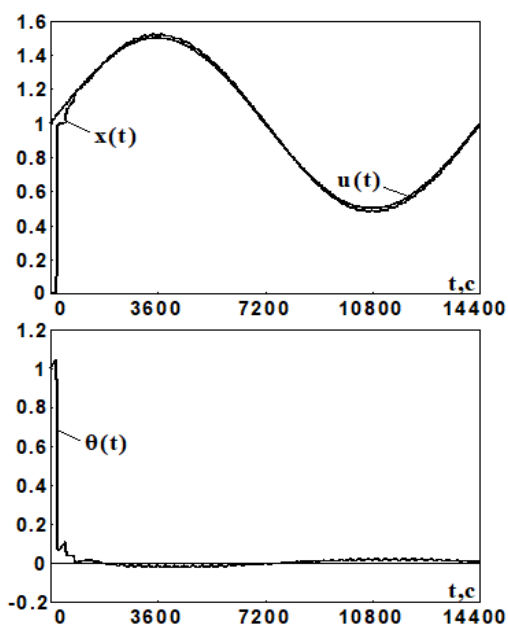


Рис.3.6. Процеси в системі автоматичного керування при надходженні на вхід системи суми одиничного стрибка та еквівалентного синусоїдального сигналу

3.2. Оцінка робастності системи керування температурою з цифровим регулятором

Робастність системи автоматичного керування визначається її здатністю

забезпечувати необхідну якість функціонування навіть за наявності неточностей моделі або значної невизначеності параметрів об'єкта керування [23]. Показником робастності виступає чутливість системи до зовнішніх збурень, шумів датчиків, неврахованих у моделі характеристик об'єкта чи помилок моделювання, які впливають на її динаміку та не були враховані під час етапів аналізу і синтезу.

Зазвичай достатній рівень робастності досягається завдяки правильному вибору регулятора, який забезпечує потрібну швидкодію у відповідь на ступінчасту зміну вхідного сигналу (визначену часом регулювання), мінімальні динамічні похибки при довільних вхідних впливах, а також допустимі відхилення якості роботи системи, що визначаються зазначеними параметрами.

Перехідні процеси в системі автоматичного керування електропідчю, оснащений цифровим регулятором, оптимізованим за швидкодією рис. 3.2–3.4, у випадку неточного задання параметрів передатної функції (3.2).

Регулятори настроєні на зазначені вище параметри α, b, τ , а реальні параметри α та b значно відрізняються від них. При цьому як неточне задання параметра α , так і неточне задання однієї із частот спряження b , приводить до значної деформації та збільшення тривалості перехідного процесу. Рисунок 3.7.

На рис.3.8 та 3.9 показані процеси в системі при надходженні на вхід системи суми одиничного стрибка та синусоїдального впливу за умови неточного задання параметрів передатної функції. На рисунках: а) – вхідний вплив та реакції системи, б) - похибки неузгодженості. При $1,3 \times \alpha$ максимальна поточна похибка становить приблизно 7% від амплітуди синусоїди, а при $0,7 \times \alpha$ вона дорівнює 10%. При $1,3 \times b$ і при $0,7 \times b$ максимальна поточна похибка становить приблизно 8% від амплітуди синусоїди. Таким чином, при відхиленнях значень параметрів передатної функції об'єкта керування на $\pm 30\%$ від розрахункових максимальна похибка збільшується приблизно в двічі.

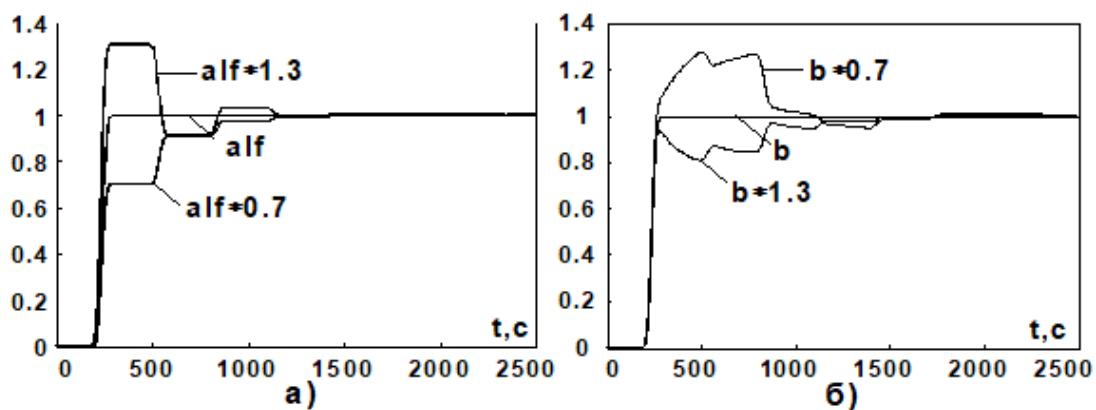


Рис. 3.7. Визначення робастності автоматичного керування при зміні значень параметрів α та b

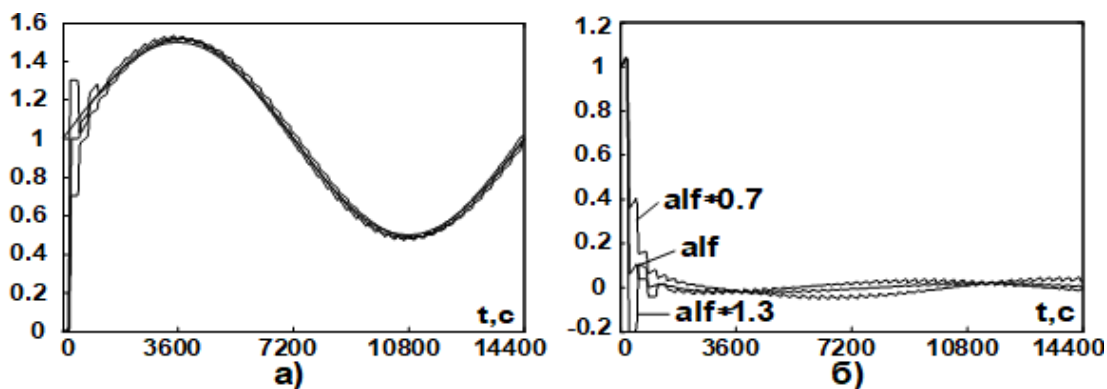


Рис. 3.8. Процеси в системі автоматичного керування при надходженні на вхід системи суми одиничного стрибка та синусоїдального впливу

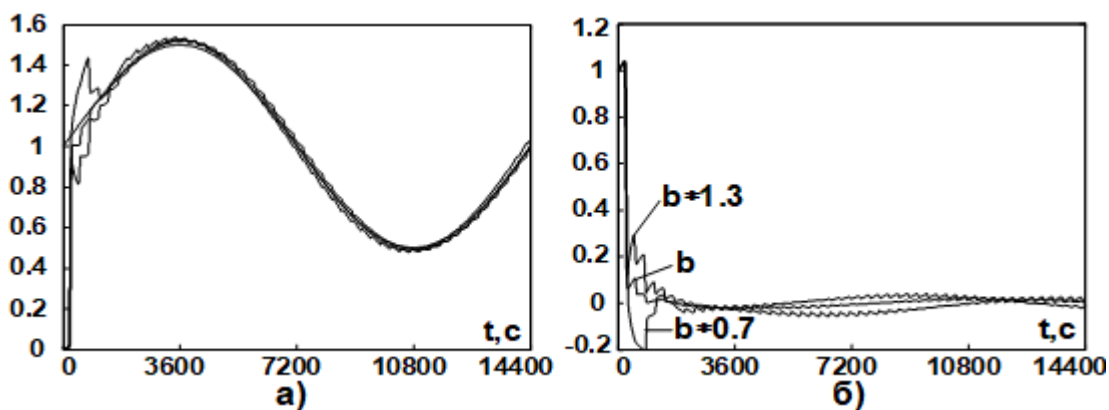


Рис. 3.9. Процеси в системі автоматичного керування при надходженні на вхід системи суми одиничного стрибка та синусоїдального впливу

3.3. Аналіз робастності системи автоматичного керування температурою із застосуванням цифрового ПІД-регулятора та нечіткого регулятора.

Використання цифрового ПІД-регулятора та нечіткого регулятора для об'єкта з передатною функцією (4.2) виявляється малоефективним, оскільки вони не забезпечують формування необхідного перехідного процесу. У такій ситуації досягти бажаних динамічних характеристик можливо шляхом застосування предиктора Сміта, призначеного для об'єктів із чистим запізнюванням. Структурну схему системи з предиктором Сміта подано на рис. 3.10. Для об'єкта з передатною функцією $e^{-sT}G(s)$ цифровий регулятор типу P вводить в контур позитивного зворотного зв'язку з передатною функцією $(e^{-sT} - 1)G(s)$. У цьому випадку синтез регулятора здійснюється для моделі об'єкта з передатною функцією $G(s)$ [36].

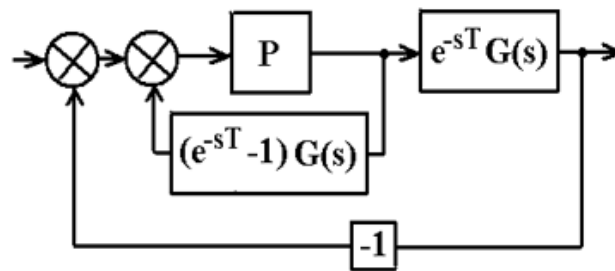


Рис.3.10. Структурна схема системи автоматичного керування сировини на виході

Структурна схема системи регулювання температури сировини на виході зміювика, побудована в інтерактивному середовищі MATLAB відповідно до схеми, поданої на рис. 3.10, зображена на рис. 3.11. Аналіз роботи цієї системи з використанням цифрового пропорційно-інтегрально-диференційного регулятора показує наступні результати: при подачі ступінчастого вхідного сигналу оптимальний перехідний процес — з мінімальним часом встановлення та найменшим перерегулюванням — спостерігається за таких параметрів передатної функції об'єкта керування:

$b = 1/180c^{-1}$; $\tau = 180c$; $\alpha = 1/(180)^3 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot c / \text{M}^3$; і параметрах регулятора:

$K = 0,0027$; $K_i = 0$; $K_d = 0,8639$.

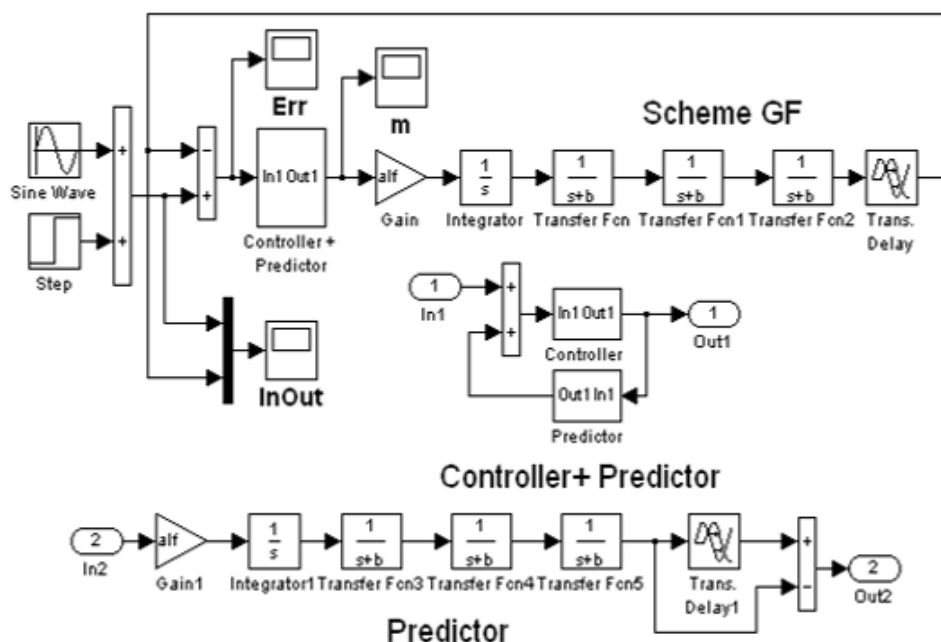


Рис. 3.11. Структурна схема системи управління температурою сировини

Перехідні процеси в системі із зазначеними параметрами пропорційно-інтегрально-диференційного регулятора та предиктора при точному та неточному заданні параметрів передатної функції об'єкта керування показані на рис.3.12. Неточне задання параметра або однієї з частот спряження передатної функції об'єкта керування призводить до зміни форми перехідного процесу та збільшення його тривалості. Коли на вхід системи подається сума одиничного стрибка та еквівалентного синусоїдального сигналу (3.6), а параметри передатної функції об'єкта керування задані відповідно до (3.2), задовільна реакція системи спостерігається за таких параметрів ПІД-регулятора: $K = 0,0037$; $K_d = 1,2974$. За цих умов вихід системи характеризується незначною коливальністю, проте поточна похибка становить близько 20% амплітуди вхідного синусоїдального сигналу.

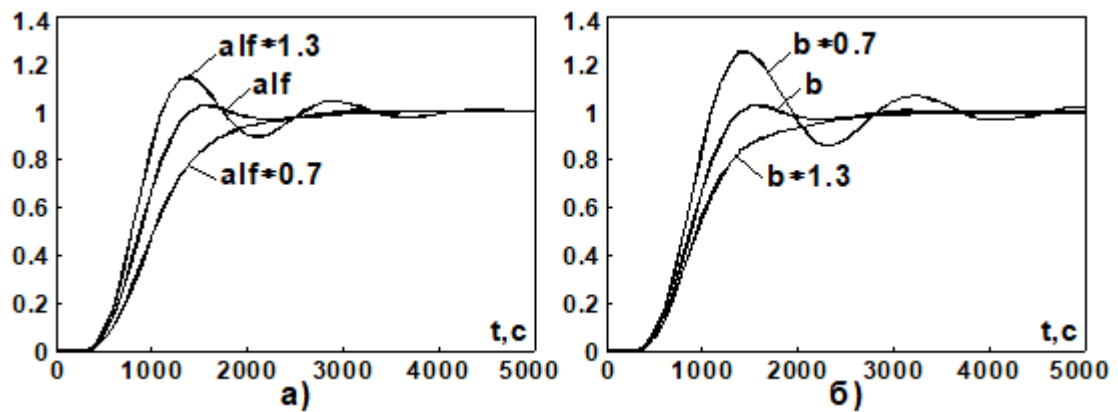


Рис.3.12. Перехідні процеси в системі із зазначеними параметрами пропорційно-інтегрально-диференційного регулятора та наявності предиктора при точному та неточному заданні параметрів передатної функції об'єкта керування

На рис.3.13 та 3.14 показані процеси в системі із пропорційно-інтегрально-диференційним регулятором і предиктором при надходженні на вхід системи суми одиничного стрибка й еквівалентного синусоїдального впливу (3.6) за умови неточного задання параметрів передатної функції об'єкта керування (3.2). На рисунках: а) – вхідний вплив та реакції системи, б) – похибки неузгодженості. При $1,3 \times \alpha$ максимальна поточна похибка становить приблизно 15% від амплітуди синусоїди, при $0,7 \times \alpha$ вона дорівнює 28%. При $1,3 \times b$ максимальна поточна похибка становить приблизно 25% від амплітуди синусоїди й при $0,7 \times b$ приблизно 14%. Незначне зменшення поточної похибки при зміні параметрів об'єкта керування пов'язане зі зростанням коливальності і достатньо великим часом перехідного процесу.

Дослідження даної системи із цифровим нечітким регулятором дає наступні результати. При ступінчастому вхідному впливі кращий перехідний процес з найменшими часом регулювання та перерегулювання отримуємо при параметрах передатної функції об'єкта керування: $b = 1/180 \text{ c}^{-1}$; $\tau = 180 \text{ c}$; $\alpha = 1/(180)^3 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{c} / \text{M}^3$ та параметрах регулятора – симетричних діапазонів зміни вхідних та вихідної змінних:

$$\theta_{\min} = -\theta_{\max} = -552,94; \dot{\theta}_{\min} = -\dot{\theta}_{\max} = -1,5434;$$

$$\ddot{\theta}_{\min} = -\ddot{\theta}_{\max} = -101,12; m_{\min} = -m_{\max} = -4,22.$$

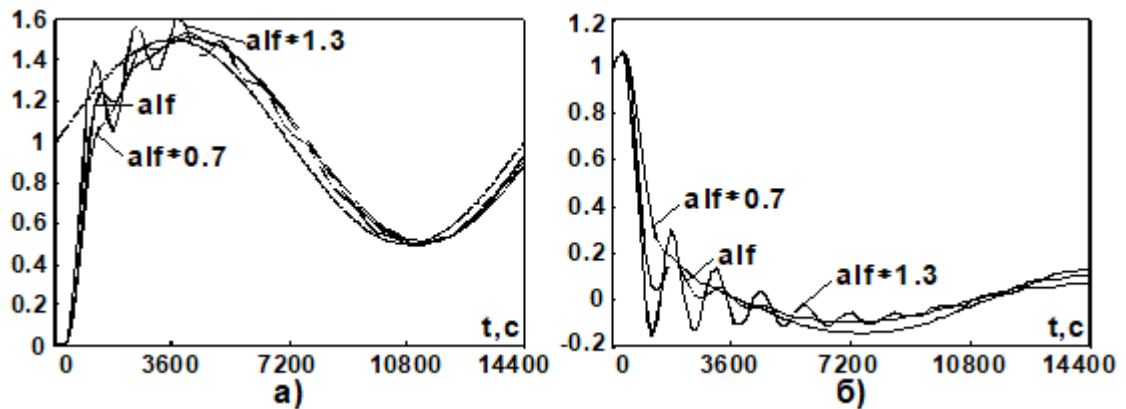


Рис.3.13. Процеси в системі із пропорційно-інтегрально-диференційним регулятором та предиктором при надходженні на вхід системи суми одиничного стрибка й еквівалентного синусоїдального впливу за умови неточного задання параметрів передатної функції об'єкта керування

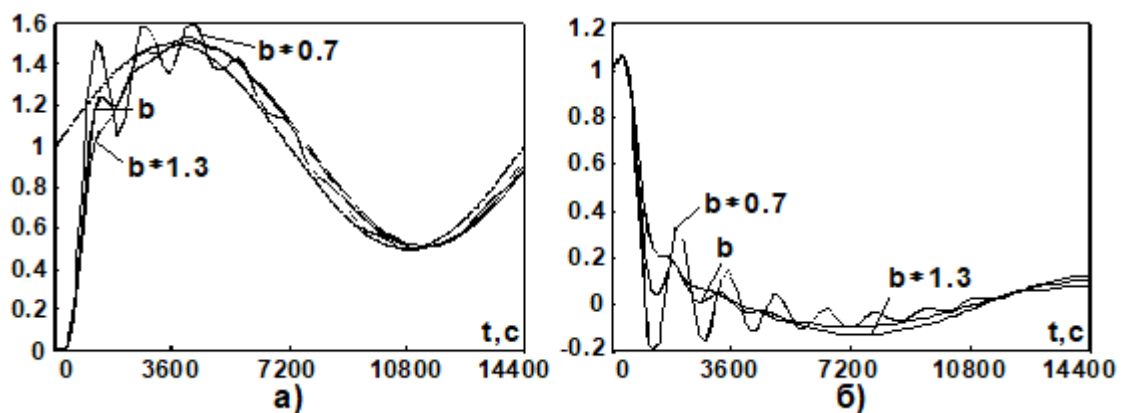


Рис.3.14. Процеси в системі із ПД-регулятором та предиктором при надходженні на вхід системи суми одиничного стрибка й еквівалентного синусоїдального впливу за умови неточного задання параметрів передатної функції об'єкта керування

Синтез нечіткого регулятора виконано по формулах (3.1) – (3.13) із кроком надходження даних у нечіткий регулятор $h = 1$ с. Похибка на виході аналого-цифрового перетворювача $\theta(k)$ у кожному каналі управління, її перша $\dot{\theta}(k) = [\theta(k) - \theta(k-1)]/h$ й друга $\ddot{\theta}(k) = [\dot{\theta}(k) - \dot{\theta}(k-1)]/h$ різниці подаються

на вхід регулятора. Сигнал з виходу регулятора надходить на цифро-аналоговий перетворювач - фіксатор нульового порядку з передатною функцією $H(s) = (1 - e^{-hs})/s$ і далі на вхід об'єкта керування. У нечіткому регуляторі настраюються діапазони зміни вхідних та вихідної змінних $[\theta_{\min}, \theta_{\max}]$, $[\dot{\theta}_{\min}, \dot{\theta}_{\max}]$, $[\ddot{\theta}_{\min}, \ddot{\theta}_{\max}]$, $[m_{\min}, m_{\max}]$.

Перехідні процеси в системі із зазначеними параметрами нечіткого регулятора та предиктора при точному та неточному заданні параметрів передатної функції об'єкта керування(3.2) наведені на рис.3.15.

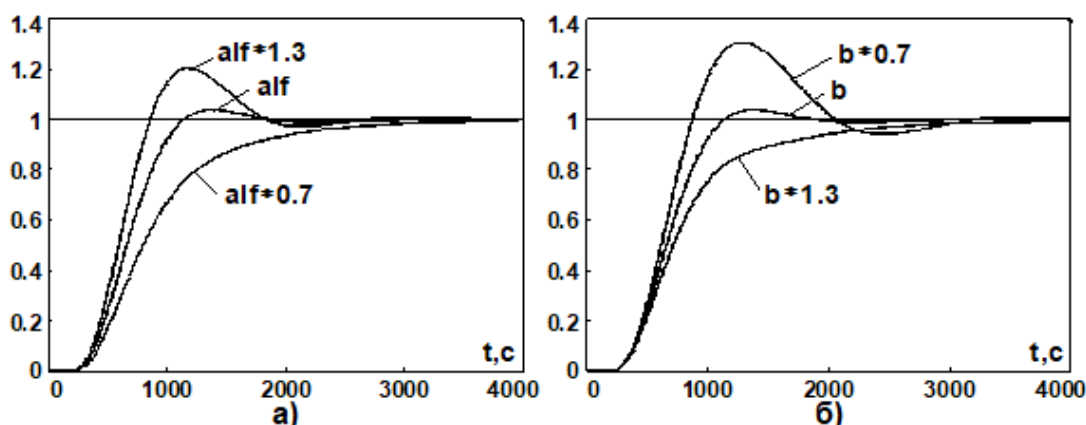


Рис.3.15. Перехідні процеси в системі при застосуванні нечіткого регулятора та предиктора при точному та неточному заданні параметрів передатної функції об'єкта керування

За умови подачі на вхід системи суми одиничного стрибка та еквівалентного синусоїдального впливу (3.6), а також використання параметрів передатної функції об'єкта керування згідно з (3.2), потрібна реакція системи з нечітким регулятором спостерігається за таких параметрів регулятора:

$$\theta_{\min} = -552,93; \dot{\theta}_{\min} = -1,6332; \ddot{\theta}_{\min} = -101,12; m_{\min} = -7,81 .$$

За зазначених параметрів вихідний процес у системі демонструє незначні коливання, проте поточна похибка становить близько 20% від амплітуди вхідного синусоїдального впливу.

На рисунках 3.16 і 3.17 наведено динаміку роботи системи з нечітким регулятором та предиктором у разі подачі на вхід суми одиничного стрибка та

еквівалентного синусоїдального сигналу (3.6) за умов неточно визначених параметрів передатної функції об'єкта керування (3.2).

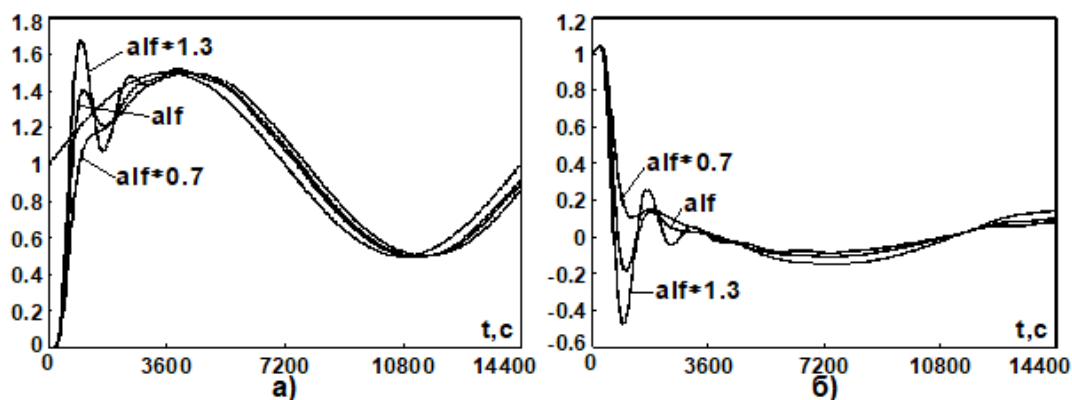


Рис.3.16. Процеси в системі з нечітким регулятором та предиктором при надходженні на вхід системи суми одиничного стрибка та еквівалентного синусоїдального впливу при неточному заданні параметрів передатної функції об'єкта керування

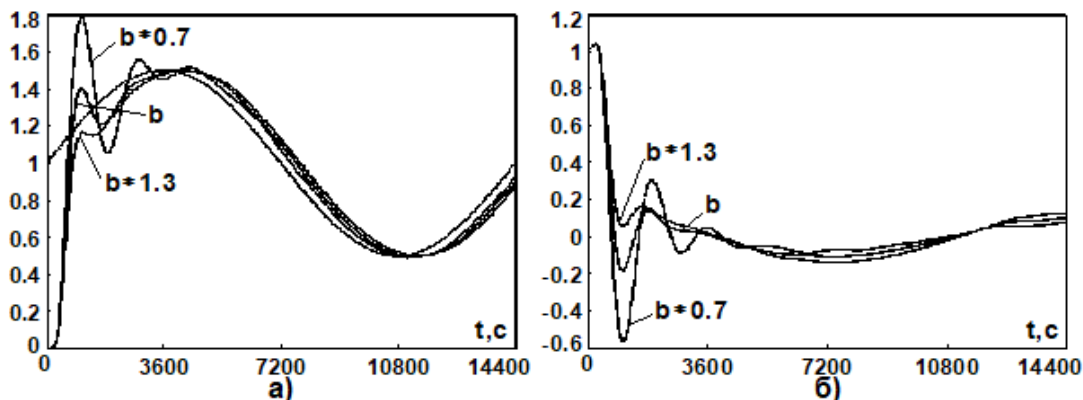


Рис.3.17. Процеси в системі з нечітким регулятором та предиктором при надходженні на вхід системи суми одиничного стрибка та еквівалентного синусоїдального впливу при неточному заданні параметрів передатної функції об'єкта керування

На рисунках 3.16 та 3.17: а) - вхідний вплив та реакція системи, б) - похибки неузгодженості. При $1,3 \times \alpha$ максимальна поточна похибка становить приблизно $\pm 17\%$ від амплітуди синусоїди, а при $0,7 \times \alpha$ вона дорівнює $\pm 29\%$. При $1,3 \times b$ максимальна поточна похибка становить приблизно $\pm 26,5\%$ від амплітуди

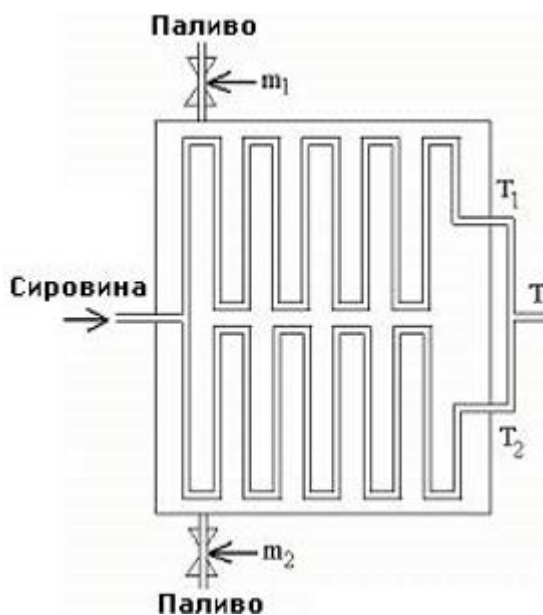
синусоїди й при $0,7 \times b$ приблизно $\pm 16\%$. Незначне зменшення поточної похибки при зміні параметрів об'єкта керування обумовлене різким зростанням коливальності перехідного процесу.

Таким чином, аналіз системи керування температурою однопотокової трубчастої печі як об'єкта з істотною часовою затримкою та застосуванням різних типів регуляторів дає змогу сформулювати такий висновок. Для керування об'єктів із значним часом запізнення найбільш ефективним є використання цифрових регуляторів, оптимізованих за швидкодією, оскільки вони забезпечують значно кращі динамічні характеристики системи порівняно з пропорційно-інтегрально-диференціальними та нечіткими регуляторами. Переваги таких цифрових швидкодіючих регуляторів стають особливо помітними за умови їх точного налаштування.

3.4. Синтез цифрових нечітких та ПІД-регуляторів для системи автоматичного керування температурою двопотокової трубчастої печі

Схему двопотокової трубчастої печі подано на рис. 3.18. Нафтова сировина подається через дві паралельні змійовики (екранні поверхні), кожен із яких обігривається групою газових пальників у спільній топковій камері. Під час регулювання температури нагрівання сировини в змійовиках шляхом зміни подачі палива кожен змійовик отримує тепло як від основних, так і від додаткових пальників. Це спричиняє появу перехресних зв'язків у системі керування. Конструктивна симетрія печі визначає відповідну симетрію її динамічних каналів.

Модель двопотокової трубчастої печі для нагрівання нафтової сировини як об'єкта управління розглянуто в роботі [34]. Регульованими змінними цього об'єкта (рис. 3.19, а) є температури сировини на виході з кожного змійовика $T_1(t)$ та $T_2(t)$. Керуючими впливами виступають витрати палива, що подаються до пальників відповідних каналів $g_1(t)$ і $g_2(t)$..



Як виконавчі механізми зазвичай застосовують схему типу: електродвигун + регульований вентиль. Оскільки сталі часу печі значно більші за сталу часу електродвигуна, останньою можна знехтувати, а кожен виконавчий механізм змодельовати як інтегруючу ланку з передавальною функцією $G(s) = 1/s$. Також сталу часу датчика температури вважають малою, тому її приймають рівною нулю, розглядаючи датчик як пропорційну ланку.

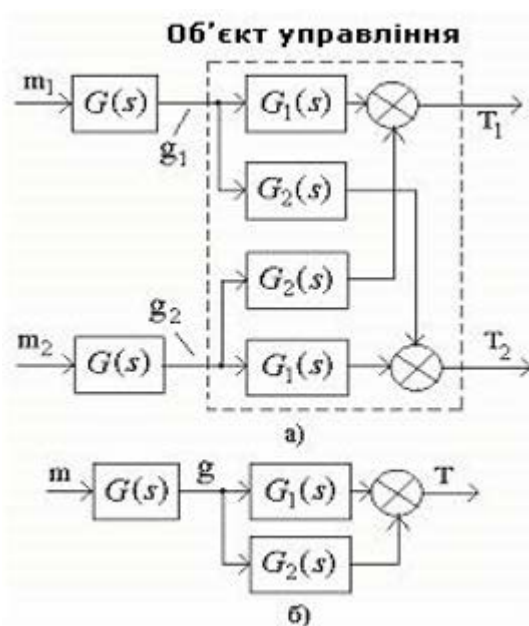


Рис.3.19. Модель двопотокової трубчастої печі

При збереженні симетричності роботи каналів і подачі того самого сигналу керування $m(t) = m_1(t) = m_2(t)$ на електродвигуни можна визначити: $g_1(t) = g_2(t) = g(t)$ та $T_1(t) = T_2(t) = T(t)$. Тоді розрахункова структурна схема об'єкта керування разом з виконавчими пристроями набуває простого вигляду (рис.3.19,б).

Передатні функції отримані в роботі [34] за даними експерименту:

- для прямих каналів
$$G_1(s) = \frac{k_1}{(1+T_0s)^3} e^{-\tau_1s};$$

- для перехресних
$$G_2(s) = \frac{k_2}{(1+T_0s)^4} e^{-\tau_2s};$$

де коефіцієнти передачі $k_1 = 0,06 \text{ }^0C / (\text{м}^3 \cdot \text{ч}^{-1})$, $k_2 = 0,03 \text{ }^0C / (\text{м}^3 \cdot \text{ч}^{-1})$; стала часу аперіодичної ланки $T_0 = 180\text{с}$; сталі часу запізнювання $\tau_1 = 180\text{с}$, $\tau_2 = 240\text{с}$.

На рис. 3.20 наведено модель системи керування температурою сировини на виході паралельних змішувиків, реалізовану в інтерактивному середовищі MATLAB з використанням нечіткого та ПІД-регуляторів.

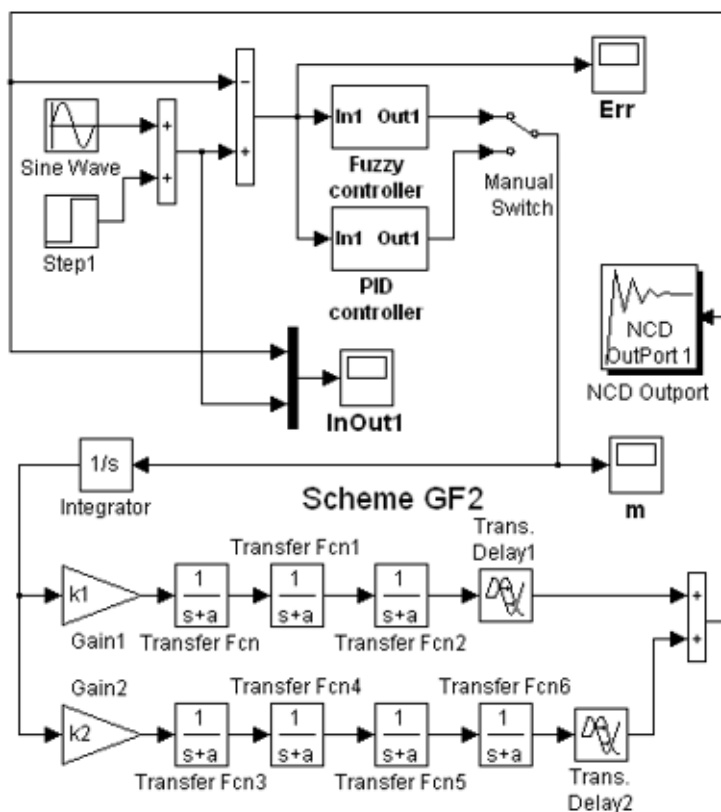


Рис.3.20. Модель системи керування температурою сировини на виході паралельних змійовиків з нечітким та пропорційно-інтегрально-диференціальними регуляторами

Передатна функцію цифрового ПІД-регулятора

$$W(z) = K + \frac{K_i h_0}{2} \frac{z+1}{z-1} + \frac{K_d}{h_0} \frac{z-1}{z}, \text{ де } h_0 - \text{ крок дискретизації. Підсилювачі}$$

$G_1 = K, G_2 = \frac{K_i h_0}{2}, G_3 = \frac{K_d}{h_0}$.
Gain1, 2 і 3 мають коефіцієнти підсилення

При моделюванні крок дискретизації обраний 1с.

Система має оптимальний перехідний процес при параметрах ПІД-регулятора (рис.3.21,а): $G_1 = 0,0123; G_2 \approx 0; G_3 = 6,0754$.

і при параметрах нечіткого регулятора (рис.3.21,б):

$$A = 2,8541; B = 0,0066; C = 1,1401; D = 0,1426.$$

Час регулювання в системі з ПІД-регулятором складає $t_p \approx 1500c$, час регулювання в системі з нечітким регулятором - $t_p \approx 1800c$.

На рис.3.21. перехідні процеси в системі автоматичного керування температурою: а – при застосуванні ПІД-регулятора; б – при застосуванні нечіткого регулятора.

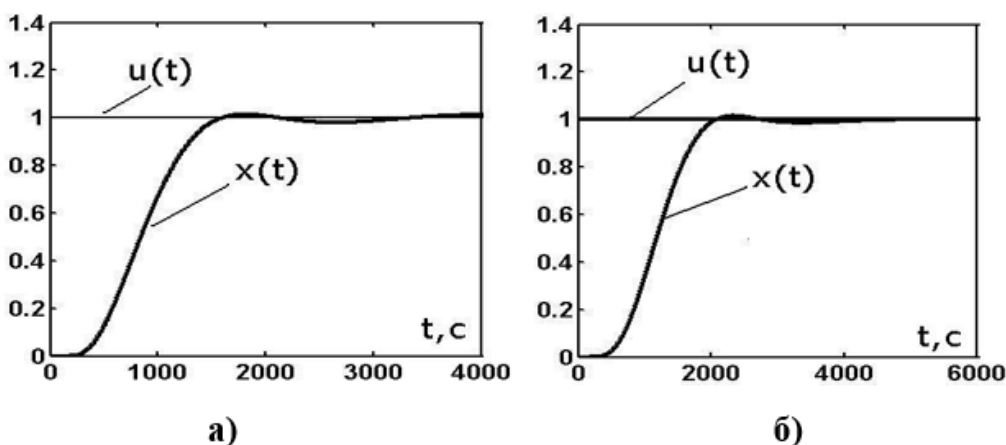


Рис.3.21. Перехідні процеси в системі автоматичного керування температурою

Процеси в системі з ПІД-регулятором при надходженні одиничного стрибка і синусоїдального сумарного вхідного впливу: $u(t) = 1 + \sin(\pi t / 7200)$ подані на рис.3.22.

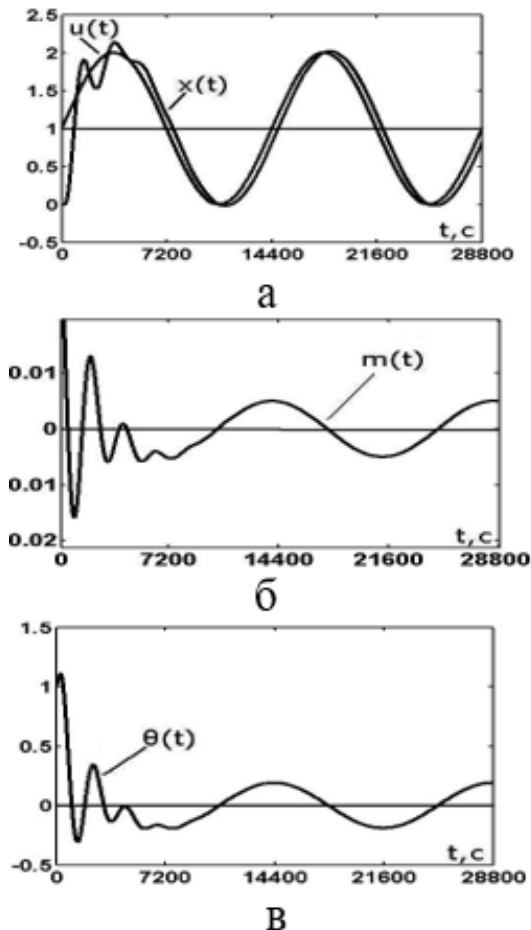


Рис.3.22. Процеси в системі з ПІД-регулятором при надходженні одиничного стрибка і синусоїдального сумарного вхідного впливу

Процеси в системі з нечітким регулятором при надходженні одиничного стрибка і синусоїдального сумарного вхідного впливу на рис.3.23.

Позначення на рисунках: а) $u(t)$ – вхід, $x(t)$ - вихід системи, б) $x(t)$ - керуючий вплив на об'єкт керування з виходу регулятора, в) $\theta(t)$ - похибка неузгодженості.

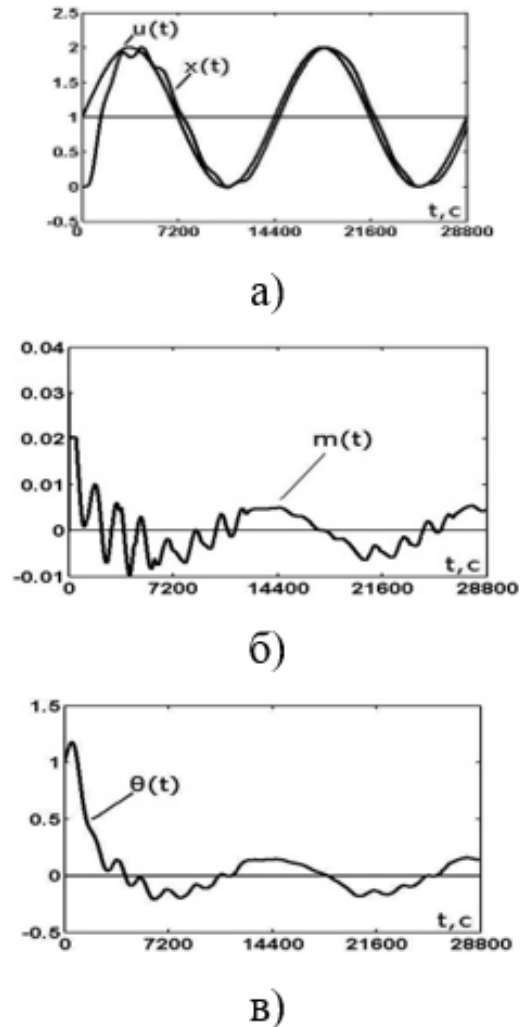


Рис.3.23. Процеси в системі з нечітким регулятором при надходженні
одиночного стрибка і синусоїдального сумарного вхідного впливу

Система має мінімальну поточну похибку при параметрах ПІД-регулятора (рис.3.22,в): $G_1 = 0,0258$; $G_2 \approx 0$; $G_3 = 9,9175$; і при параметрах нечіткого регулятора (рис.3.23,в): $A = 0,7048$; $B \approx 0$; $C = 0,9773$; $D = 0,0893$.

Максимальна величина мінімальної поточної похибки в системі з ПІД-регулятором становить приблизно $\pm 20\%$, а в системі з нечітким регулятором $\pm 16\%$ від амплітуди синусоїдального вхідного впливу.

Під час налаштування цифрового ПІД-регулятора та нечіткого регулятора в інтерактивному середовищі MATLAB було застосовано блок NCD (Nonlinear Control Design), який реалізує методи динамічної оптимізації для проектування систем керування. Цей інструмент, створений для роботи в Simulink, автоматично підбирає параметри системи. У схемі на рис. 3.20 — параметри

регуляторів, спираючись на задані обмеження щодо перехідних характеристик, зокрема часу встановлення, перерегулювання для реакції на ступінчастий сигнал чи допустимих меж поточної похибки.

За результатами досліджень системи з розробленими регуляторами встановлено, що через значну інерційність об'єкта керування вихід на задану температуру можливий приблизно за 0,5 години. Якщо виникає потреба змінювати температуру сировини за певним законом, слід враховувати інерційний характер системи: щоб зменшити похибку стеження, зміни температури мають відбуватися достатньо повільно.

Висновки до розділу 3

1. Аналіз роботи системи автоматичного регулювання температури однопотокової трубчастої печі, що характеризується значним запізненням, у поєднанні з різними типами регуляторів показав, що найбільш ефективним рішенням є використання цифрових оптимальних за швидкодією регуляторів. Вони забезпечують суттєво кращі динамічні характеристики керування об'єктами з великим часом затримки порівняно з пропорційно-інтегрально-диференціальними та нечіткими регуляторами.

2. Переваги цифрового оптимального за швидкодією регулятора найбільш помітні за умови точного налаштування його параметрів, коли характеристики об'єкта керування достовірно ідентифіковані та залишаються незмінними. Такий регулятор забезпечує аперіодичний перехідний процес без перерегулювання. Завдяки цьому необхідну температуру сировини можна встановити за оптимальний час.

3. При синусоїдальному впливі поточна похибка не перевищує чотирьох відсотків від амплітуди синусоїди. При відхиленнях значень параметрів передавальної функції об'єкта управління до тридцяти відсотків від розрахункових максимальна поточна похибка збільшується до восьми відсотків від амплітуди синусоїди.

4. Для систем управління температурою однопотокової трубчастої печі при нечіткому або пропорційно-інтегрально-диференціальному регуляторі і предикторі при синусоїдальному діянні поточна похибка досягає двадцяти відсотків від амплітуди синусоїди.

5. Дослідження системи автоматичного керування температурою двопотокової трубчастої печі із синтезованим оптимальним за швидкодією цифровим регулятором показали, що зміна кроку квантування з шестидесяти секунд до дев'яноста призводить до збільшення поточної похибки. При цьому зменшується перерегулювання з шестидесяти відсотків до двадцяти семи відсотків, але час регулювання в перехідному процесі збільшується.

РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

ВСТУП

Основні нормативні документи, що застосовуються при встановленні теплосилових установок в Україні.

1. ДБН В.2.2-27:2025 «Промислові будівлі» — містить вимоги до проектування промислових будівель, де можуть розміщуватись печі.

2. ДБН В.2.5-67:2025 «Опалення, вентиляція та кондиціонування повітря» - може бути корисний для аспектів димоходів, вентиляції, розсіювання газів та ін.

3. Наказ № 541 від 22.10.2008 «Про затвердження технологічних нормативів допустимих викидів забруднюючих речовин із теплосилових установок, номінальна теплова потужність яких перевищує 50 МВт»

4. ДБН В.2.2-27:2025 «Промислові будівлі» — містить вимоги до проектування промислових будівель, де можуть розміщуватись печі.

4.1. Загальні положення при монтажних-налагоджувальних роботах теплосилових установок

Монтаж теплосилових установок належить до робіт підвищеної небезпеки, оскільки пов'язаний з переміщенням важких елементів, використанням зварювального обладнання, роботи на висоті та експлуатацією електроінструментів. Організація безпечних умов праці здійснюється відповідно до вимог чинного законодавства України у сфері охорони праці, зокрема Закону «Про охорону праці», Правил будови і безпечної експлуатації обладнання, Правил пожежної безпеки, будівельних норм, а також внутрішніх інструкцій підприємства.

До виконання монтажних робіт допускається персонал, який пройшов:

- навчання і перевірку знань з охорони праці;
- спеціальну підготовку щодо безпечного виконання монтажних, вантажно-розвантажувальних та зварювальних робіт;
- медичний огляд відповідно до характеру робіт.

Працівники повинні бути ознайомлені з технологічними картами та інструкціями з монтажу обладнання, а також забезпечені необхідними засобами індивідуального захисту.

Організація безпечного робочого процесу передбачає попередню підготовку монтажного майданчика. Поверхня повинна бути рівною, очищеною від сміття та сторонніх предметів. Небезпечні зони (місця можливого падіння предметів, зони роботи кранів, місця зварювання) необхідно позначити сигнальною розміткою та попереджувальними знаками.

Основні вимоги:

- Забезпечення нормативного рівня освітлення, особливо у місцях виконання точних монтажних операцій.
- Організація вентиляції для видалення зварювальних газів і пилу.
- Наявність евакуаційних шляхів, вільних від зашарашення.
- Облаштування індивідуальних засобів захисту та аптечки першої медичної допомоги.

Всі інструменти повинні бути справними, мати відповідну ізоляцію, маркування та проходити періодичну перевірку.

Під час монтажу теплосилових установок працівники зобов'язані використовувати такі засоби індивідуального захисту:

- захисні каски з підборідним ременем;
- спецодяг, виготовлений з негорючих або вогнетривких тканин;
- спецвзуття з металевим підноском та протиковзкою підошвою;
- захисні рукавиці: брезентові, комбіновані або термостійкі (залежно від виду робіт);
- захисні окуляри або лицьові щитки при виконанні зварювальних робіт;
- респіратори або протигази при роботі в запиленому або загазованому середовищі;
- страхувальні пояси при роботі на висоті понад 1,3 м.

Видача, облік та контроль використання ЗІЗ здійснюються згідно з нормативами підприємства.

Зварювальні роботи є одним з найбільш небезпечних етапів монтажу теплосилових установок. Основні вимоги:

1. Допуск до зварювання мають тільки працівники, які пройшли відповідне навчання та атестацію.
2. Місце зварювання повинно бути обладнане екранами, що захищають оточуючих від ультрафіолетового випромінювання.
3. Балони з киснем та горючими газами повинні розташовуватися у вертикальному положенні, на відстані не менше 5 м від місця проведення робіт.
4. Перед зварюванням необхідно перевірити відсутність залишкового тиску або вибухонебезпечних сумішей у трубопроводах.
5. Після завершення зварювання здійснюється протипожежний огляд зони робіт.

Особлива увага приділяється наявності іскроуловлювачів, справності редукторів та цілісності шлангів.

Монтаж теплосилового обладнання передбачає переміщення важких елементів масою від кількох сотень до кількох тонн, тому застосовуються вантажопідйомні механізми.

Основні вимоги:

- Підйомні механізми повинні мати технічний паспорт і пройти періодичний огляд.
- Стропування елементів виконується сертифікованими стропами, вантажними ланцюгами або канатами.
- Переміщення вантажу дозволено тільки по сигналу відповідальної особи (сигнальника).
- Забороняється перебувати під підвішеним вантажем.
- Під час монтажу обладнання стоянка кранів повинна бути на рівному та укріпленому майданчику.

Усі операції проводяться відповідно до технологічних карт вантажопідіймальних робіт.

Монтаж теплосилових установок включає під'єднання електроприводів насосів, вентиляційних установок та автоматики. Електробезпека забезпечується шляхом:

- допуску до електромонтажу персоналу з групою з електробезпеки не нижче III;
- періодичної перевірки заземлення та справності кабелів;
- використання переносного освітлення напругою не більше 12 В у вузьких або металевих просторах;
- встановлення попереджувальних знаків «Небезпечно – електрична напруга»;
- обов'язкового відключення обладнання і вивішування плаката «Не вмикати – працюють люди» під час ремонту.

Робота з електроінструментом у вологих приміщеннях дозволена лише за наявності пристрою захисного вимкнення.

Протипожежні заходи передбачають:

- наявність вогнегасників у безпосередній близькості до робочого майданчика;
- заборону зберігання легкозаймистих матеріалів біля джерел тепла;
- проведення вогневих робіт лише за нарядом-допуском;
- забезпечення вентиляції для видалення газів і парів;
- встановлення металевих екранів при виконанні гарячих робіт.

Після завершення робіт відповідальна особа проводить огляд приміщення на предмет наявності тліючих матеріалів.

Монтаж окремих елементів теплосилових установок (внутрішні поверхні резервуарів, котлів, теплообмінників) виконується у замкнених просторах.

Основні вимоги:

- доступ здійснюється лише за нарядом-допуском;
- перед початком роботи проводиться газоаналіз повітря на вміст кисню та шкідливих речовин;
- освітлення – тільки вибухозахищене;

- антишумовими навушниками;
- діелектричними рукавицями при роботі з електрообладнанням;
- переносними газоаналізаторами при роботах у замкнених об'ємах.

Забезпечення безпечної експлуатації однопотокової трубчастої печі можливе лише за умови комплексного застосування організаційних, технічних і санітарно-гігієнічних заходів. Виконання вимог охорони праці дозволяє запобігти виникненню аварійних ситуацій, знизити ризик травмування персоналу та підвищити надійність технологічного процесу

4.3. Запобігання надзвичайним ситуаціям при роботі трубчастої печі

Експлуатація трубчастих печей є джерелом впливу на навколишнє середовище через викиди в атмосферу, теплове навантаження та потенційне забруднення ґрунту і водних об'єктів.

Основною метою заходів охорони навколишнього середовища є запобігання забрудненню, мінімізація шкідливих викидів та відповідність чинним екологічним нормативам. Основними документами по дотриманню заходів по охороні навколишнього середовища при експлуатації трубчастих печей є:

- Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища»;
- Закон України «Про охорону атмосферного повітря»;
- ДСТУ ISO 14001:2016 «Системи екологічного менеджменту»;
- НПАОП 0.00-1.20–98 «Правила пожежної безпеки в Україні»;
- Санітарні норми ДСанПіН 3.3.6.037–99 щодо викидів шкідливих речовин у атмосферу.

Основні джерела забруднення при роботі трубчастої печі це:

1. Викиди продуктів згоряння
 - оксиди азоту (NO_x);
 - оксид вуглецю (CO);
 - вуглеводні;

Метою заходів охорони праці є попередження виробничого травматизму, професійних захворювань та аварій при експлуатації трубчастої печі.

При роботі однопотокової трубчастої печі на персонал впливають такі небезпеки:

1. Підвищена температура обладнання та робочої зони
Температура зовнішньої поверхні печі може досягати 200–350 °С, а температуравогнетривкої кладки — понад 1000 °С.
2. Газонебезпека і вибухонебезпечні середовища
 - витоки палива;
 - утворення вибухонебезпечних газоповітряних сумішей;
 - продукти неповного згоряння (СО).
3. Підвищений рівень шуму і вібрацій
Вентилятори та пальники створюють шум до 85–95 дБ.
4. Імовірність руйнування труб або футеровки
Це може призвести до викиду гарячих продуктів та займання середовища.
5. Підвищений тиск у трубах і системі подачі палива
Порушення регулювання може викликати розрив труб та пожежу.
6. Електрична небезпека. Обладнання керування печі живиться від мережі до 380 В.
7. Хімічні фактори
Потрапляння на шкіру та в дихальні шляхи вуглеводнів, продуктів термічного розкладу.

Для безпечної експлуатації печі вводяться такі заходи:

3.1. Навчання та інструктажі

- Первинний інструктаж на робочому місці.
- Повторний інструктаж не рідше ніж раз на 6 місяців.
- Щорічна перевірка знань з охорони праці та пожежної безпеки.
- Допуск до роботи лише працівників з кваліфікацією оператор котельних/печей або апаратник термічних процесів.

Для допуску до обслуговування печі необхідно:

- Перевірка справності автоматики, сигналізації, системи подачі палива.

- Заборона роботи при несправних контрольно-вимірювальних приладах.
- Очищення робочого місця, відсутність сторонніх предметів.
- Наявність засобів пожежогашіння (вогнегасники ВВК, ВП).

При експлуатації обладнання необхідним є регулярне ведення журналів:

- журнал огляду печі;
- журнал роботи пальників;
- журнал аварійних і планових відключень.

Однопотокова трубчаста піч повинна мати системи автоматизації та захисту табути обладнана:

- датчиками температури з верхньою межею сигналізації;
- датчиками тиску в трубах та газопроводах;
- газоаналізаторами СО та вибухонебезпечних газів;
- автоматичним відключенням подачі палива при згасанні полум'я;
- блокуванням запуску при відсутності тяги;
- аварійною кнопкою «Стоп».

Вентиляція в приміщенні повинна відповідати додатковим вимогам:

- Природна та примусова вентиляція для відведення газів.
- Норма: не менше трьохкратного повітрообміну на годину.
- В зоні пальників — місцева витяжка.

4.3. Температурна ізоляція

Для зниження тепловтрат і запобігання опікам забезпечується додаткова температурна ізоляція:

- теплоізоляція корпусу печі;
- встановлення огорожень і теплових екранів.

Протипожежні заходи включають в себе:

- Використання негорючих матеріалів для футеровки та обшивки;
- Вільний доступ до пожежних гідрантів;
- Використання тільки іскробезпечного інструменту під час ремонтів;
- Категорія приміщення за вибухопожежною небезпекою — Б (вуглеводні).

Безпека під час пуску та експлуатації печі повинна відповідати наступним вимогам:

1. Перевірка герметичності газопроводів.
2. Продувка печі інертним газом або повітрям.
3. Підпал пальників з використанням запалювальних пристроїв.
4. Плавний набір температури згідно з технологічним регламентом.
5. Контроль кольору полум'я, тиску та температури.

При експлуатації необхідно проводити додаткові заходи:

- Заборонено відкривати оглядові люки при робочій температурі.
- Заборонено регулювати пальники вручну під час нестабільного полум'я.
- Регулярний контроль температури стінок труб не вище допустимого значення.
- Перевірка параметрів КВПП (манометри, термопари).

При позаштатній ситуації загасанні полум'я:

1. Негайне перекриття палива.
2. Продування камери повітрям.
3. Повторний запуск дозволяється лише після комісійного огляду.

При витoku газу:

- припинити подачу палива;
- увімкнути аварійну вентиляцію;
- покинути приміщення до зниження концентрації нижче ГДК.

Санітарно-гігієнічні умови та засоби індивідуального захисту в робочій зоні вимагають дотримання параметрів мікроклімат робочої зони.

Допустимі параметри згідно ДСН 3.3.6.042–99:

- температура повітря: 18–28 °С;
- швидкість руху повітря: $\leq 0,3$ м/с.

При роботі біля печі застосовуються теплові екрани та локальні охолоджувальні установки.

Персонал забезпечується засобами індивідуального захисту

- спецодягом з вогнестійкої тканини;
- термостійкими рукавицями;
- захисними окулярами або щитком;
- каскою;

- антишумовими навушниками;
- діелектричними рукавицями при роботі з електрообладнанням;
- переносними газоаналізаторами при роботах у замкнених об'ємах.

Забезпечення безпечної експлуатації однопотокової трубчастої печі можливе лише за умови комплексного застосування організаційних, технічних і санітарно-гігієнічних заходів. Виконання вимог охорони праці дозволяє запобігти виникненню аварійних ситуацій, знизити ризик травмування персоналу та підвищити надійність технологічного процесу

4.3. Охорона навколишнього середовища при роботі трубчастої печі

Експлуатація трубчастих печей є джерелом впливу на навколишнє середовище через викиди в атмосферу, теплове навантаження та потенційне забруднення ґрунту і водних об'єктів.

Основною метою заходів охорони навколишнього середовища є запобігання забрудненню, мінімізація шкідливих викидів та відповідність чинним екологічним нормативам. Основними документами по дотриманню заходів по охороні навколишнього середовища при експлуатації трубчастих печей є:

- Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища»;
- Закон України «Про охорону атмосферного повітря»;
- ДСТУ ISO 14001:2016 «Системи екологічного менеджменту»;
- НПАОП 0.00-1.20–98 «Правила пожежної безпеки в Україні»;
- Санітарні норми ДСанПіН 3.3.6.037–99 щодо викидів шкідливих речовин у атмосферу.

Основні джерела забруднення при роботі трубчастої печі це:

1. Викиди продуктів згоряння
 - оксиди азоту (NO_x);
 - оксид вуглецю (CO);
 - вуглеводні;

- тверді частинки (сажі, пил).
2. Теплові викиди
- високі температури гарячих газів у димарі;
 - підвищення температури навколишнього повітря в зоні приміщення та прилеглої території.
3. Вплив на ґрунт і воду
- розливи палива та мастильних матеріалів;
 - продукти охолодження або конденсатів, що можуть потрапляти у стоки.
4. Шум і вібрації
- робота вентиляторів і систем подачі палива створює локальний шумовий фон до 85–95 дБ;
 - вібраційне навантаження на будівельні конструкції.

При роботі печі необхідно здійснювати контроль викидів в атмосферу:

- Обов'язковий моніторинг концентрації шкідливих газів у димових газах;
- Використання пальників із низьким рівнем утворення NO₂;
- Регулярне очищення димарів і систем вентиляції;
- Встановлення фільтрів або скрубберів для газоочистки.

Для забезпечення теплового захисту навколишнього середовища необхідна:

- Ізоляція корпусу печі для зниження теплового випромінювання;
- Встановлення охолоджувальних зон або екранів для обмеження теплового впливу на персонал і навколишнє середовище.

Для захисту ґрунтів і водних об'єктів потрібна:

- Організація герметичних майданчиків для зберігання та використання палива;
- Впровадження систем збору та нейтралізації конденсатів і стоків;
- Контроль за відсутністю просочування мастильних матеріалів у ґрунт.

Для зменшення шумового та вібраційного навантаження є необхідним:

- Встановлення шумопоглинальних екранів та підвісних антивібраційних платформ;

- Технічне обслуговування вентиляторів та механізмів для зниження рівня шуму;
- Дотримання санітарних норм для рівня шуму на території підприємства.

Основні організаційні заходи:

1. Розробка екологічної документації
 - Плани контролю викидів та стоків;
 - Журнали спостережень за станом навколишнього середовища;
 - Ведення обліку використаних хімічних речовин.
2. Навчання персоналу
 - Інструктажі щодо екологічної безпеки;
 - Дотримання технологічних режимів для зменшення шкідливих викидів;
 - Проведення тренінгів з дій при аварійних ситуаціях (витік палива, пожежа, аварійний викид газів).
3. Аварійна готовність
 - Наявність інструментів та обладнання для локалізації розливів;
 - Системи сигналізації про перевищення концентрацій шкідливих речовин;
 - План швидкого реагування на аварійні ситуації з екологічним ризиком.

Для зменшення впливу на навколишнє середовище передбачено:

- Періодичний контроль концентрації шкідливих речовин у повітрі робочої зони та димових газах;
- Вимірювання температури газів на виході з печі;
- Ведення журналів контролю та обліку викидів;
- Проведення внутрішніх екологічних аудитів та оцінки відповідності нормативним вимогам.

Дотримання екологічних вимог при експлуатації трубчастих печей дозволяє:

- значно знизити викиди шкідливих речовин у атмосферу;
- запобігти забрудненню ґрунтів і водних об'єктів;
- забезпечити безпечні умови для працівників і населення, що проживає поруч;
- підвищити ефективність технологічного процесу за рахунок контролю параметрів печі.

Екологічна безпека повинна бути комплексною і включати організаційні, технічні та санітарно-гігієнічні заходи.

Висновки до розділу 4

1. Експлуатація трубчастої печі супроводжується впливом на навколишнє середовище через викиди шкідливих газів, теплове навантаження, шум, вібрації та потенційне забруднення ґрунту і води. Аналіз показав, що основними джерелами забруднення є продукти згоряння палива, конденсати, розливи мастильних речовин та теплові випромінювання.

2. Для мінімізації екологічного впливу необхідно застосовувати комплекс заходів:

- технічні (очищення димових газів, ізоляція корпусу печі, фільтри та скрубери, вентиляційні системи);
- організаційні (контроль викидів, ведення журналів, навчання персоналу, план дій при аварійних ситуаціях);
- санітарно-гігієнічні (захист ґрунту та водних об'єктів, шумозахисні екрани).

3. Дотримання цих заходів дозволяє знизити шкідливий вплив на атмосферу, ґрунти та водні ресурси, забезпечити безпечні умови для персоналу та населення, а також підвищити ефективність і надійність роботи печі. Екологічна безпека є невід'ємною складовою сучасного технологічного процесу і повинна реалізовуватись комплексно, системно та відповідно до чинних нормативних вимог.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Розглянуто задачу параметричного синтезу цифрових оптимальних за швидкодією на основі нечіткої логіки та пропорційно-інтегрально-диференційних регуляторів для систем автоматичного керування нагрівачами електричних печей. Проведено дослідження методами математичного моделювання систем із синтезованими регуляторами, що забезпечують необхідну якість роботи систем автоматичного керування навіть за наявності значного запізнювання в об'єктах керування.

2. Удосконалено методики параметричного синтезу нечітких та пропорційно-інтегрально-диференційних регуляторів, які застосовуються разом із предиктором. Запропоновано методику синтезу пропорційно-інтегрально-диференційних регуляторів, що передбачає включення блоку оптимізації коефіцієнтів регулятора та їх корекцію за допомогою спеціальних перемножувачів.

3. Покращено методику параметричного синтезу цифрових регуляторів, оптимальних за швидкодією. Синтез регуляторів для об'єктів із запізнюванням реалізується через спеціальний блок, який додатково до основного генерує керуючі імпульси і спеціальні "підставні" імпульси на інтервалі запізнювання після формування основних керуючих сигналів.

4. Проведено дослідження цифро-аналогових систем автоматичного керування електричними нагрівачами газових печей із синтезованими цифровими регуляторами: оптимальними за швидкодією, нечіткими та ПІД-регуляторами, при дії східчастих та довільних вхідних впливів.

5. Результати дослідження систем автоматичного керування електричними нагрівачами печей з трьома типами регуляторів показали, що нечіткий регулятор забезпечує майже аперіодичний перехідний процес із невеликою поточною похибкою при незначній коливальності. На основі проведених досліджень для практичного застосування рекомендовано використовувати цифровий регулятор, оптимальний за швидкодією.

6. Досліджено робастність системи керування температурою електропечі (об'єкта другого порядку з запізнюванням) з використанням трьох типів регуляторів. Встановлено, що неточне визначення найбільшої сталої часу печі майже не впливає на форму перехідного процесу незалежно від типу регулятора. Натомість помилка у заданні коефіцієнта підсилення призводить до суттєвої деформації перехідного процесу, особливо в системі з цифровим регулятором, оптимальним за швидкодією, при цьому значно збільшується тривалість перехідного процесу.

7. Розглянуто вплив на навколишнє середовище при експлуатації трубчастої печі, що супроводжується викидами шкідливих газів, тепловим навантаженням, шумом, вібрацією та потенційним забрудненням ґрунту і води. Запропонований комплекс заходів по забезпеченню безпеки при експлуатації цього типу обладнання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. API Standard 560. Fired Heaters for General Refinery Services, American Petroleum Institute, 2018.
2. Álvarez de Miguel, S. et al. Identification model and PI and PID controller design for a novel electric air heater, 2017. digital.csic.es
3. Арутюнов, С. Г. Тепломасообмін у промислових нагрівальних агрегатах. — М.: Хімія, 2009. — 360 с.
4. Автоматизація виробничих процесів / І. В. Ельперін, О. М. Пупена, В. М. Сідлецький, С. М. Швед. — Київ : Ліра К, 2021. — 378 с.
5. Автоматизація виробничих процесів / Я. І. Проць, В. Б. Савків та ін. — Тернопіль : ТНТУ ім. Пулюя, 2011. — 344 с.
6. Бабіченко, А. К. та ін. Мікропроцесорні засоби в автоматизованих системах керування технологічними процесами : підручник. Харків : Вид-во ТОВ «Водний Спектр Джі-ЕМ-Пі», 2016. — 440 с.
7. Бобух, А. О. Автоматизовані системи керування технологічними процесами : навч. посіб. — Харків : ХНАМГ, 2006. — 185 с.
8. Бойко, В. П. Технологія металургійних печей. — К.: Вища школа, 2015. — 320 с.
9. Будник, А.Ф. Типове обладнання термічних цехів та ділянок. — Суми.: Видавництво СумДУ, 2008. — 212 с.
10. Chen, Y., et al. Computational Fluid Dynamics (CFD) Simulation of Tubular Furnaces. Applied Thermal Engineering, 2019, Vol. 162, pp. 114–126.
11. Diduch, C., Dubay, R., Li, W.G. Temperature control of injection molding. Part 1: Modeling and identification. Polym. Eng. Sci., №44
12. Dullerud, G.E.; Paganini, F. A Course in Robust Control Theory: A Convex Approach. Springer Verlag, New York, 2000.
13. Engineering Toolbox. Tubular Furnaces – Heat Transfer and Design. URL: https://www.engineeringtoolbox.com/furnaces-tubular-d_1855.html
14. GOST 11494-2013. Трубчатые печи. Общие технические условия. — Москва, 2013.

15. Глоба, Л.С. Розробка інформаційних ресурсів та систем. Підручник у 2 т. — К.: НТУУ „КПІ”, 2015. Т.2. — 376 с.
16. Гостєв, В.І., Крайнев, В.В., Скуртов, С.М. Синтез цифрового регулятора однопоточної трубчастої печі. Вісник Технологічного університету Поділля, 2003, №3, Т.1 (51), С.18-22.
17. Huang, H. Temperature Control Method for Electric Heating Furnaces, MDPI — Sensors, 2025.
18. Hussein, M. M. et al. Modern Temperature Control of Electric Furnace, MDPI — Energies, 2022.
19. Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. — Hoboken: Wiley, 2011. — 820 p.
20. Ian Barkin, Jochen Wirtz, Pascal Bornet. Intelligent Automation: Learn how to harness Artificial Intelligence to ...
21. Ivanenko, O., & Petrenko, O. CFD Simulation of Flow and Temperature Fields in Tubular Furnaces. Applied Mechanics and Materials, 2018, Vol. 888, pp. 201–208.
22. Ivanenko, O. V. Optimization of Heat Transfer Processes in Tubular Furnaces Using Numerical Methods. Дис. д-ра техн. наук. — Х., 2017. — 220 с.
23. Ivanov, A. Energy Efficiency of Single-Pass Furnace Systems. Energy, 2020, Vol. 197, pp. 117–125.
24. ISO 13705:2019. Industrial Furnaces — Safety and Thermal Performance Requirements.
25. Карташов, В. В. Посібник з лекцій з дисципліни «Автоматизовані системи керування технологічними процесами». Тернопіль : Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2017. — 149 с.
26. Коротка, Л. І., Зеленцов, Д. Г., Науменко, Н. Ю., Ляшенко, О. А., Солодка, Н. О. Обчислювальний інтелект: теорія нечітких множин : навч. посібник. Дніпро: ДВНЗ УДХТУ, 2020. — 161 с.
27. Кравченко, В. П. Автоматизація технологічних процесів і виробництв : конспект лекцій. Маріуполь : ПГТУ, 2017. — 165 с. URL: <http://umm.pstu.edu/handle/123456789/12405>

28. Кузнєцов, А. І. Теорія тепломасообміну в трубчастих печах. — Х.: ХНАДУ, 2012. — 280 с.
29. Козлов, В. П. Термодинамічний аналіз процесу нагріву в трубчастих печах. *Металургія*, 2016, №5, с. 23–30.
30. Корчемний, М. О., Федорейко, В. С. Інтелектуальні технології управління та прийняття рішень: навчально–методичний посібник. Тернопіль: ТНПУ, 2008. — 140 с.
31. Lee, J., & Chen, H. CFD-Based Design of Single-Pass Tubular Furnaces. *Heat Transfer Engineering*, 2020, Vol. 41, pp. 789–802.
32. Lee, S. H., & Kim, J. Numerical Modeling of Heat Transfer in Single-Pass Furnaces. *Journal of Mechanical Science*, 2017, Vol. 31, pp. 2010–2020.
33. Ладанюк, А. П., Трегуб, В. Г., Ельперін, А. Ю. Автоматизація технологічних процесів і виробництв харчової промисловості. Київ : НУХТ, 2001. — 244 с.
34. Литвиненко, С. І. Теплотехніка металургійних агрегатів. — К.: Наукова думка, 2013. — 245 с.
35. Mahmoud, S., Magdi; Munro, N. *Robust Control and Filtering for Time-Delay Systems*. Marcel Dekker Inc., 1989.
36. Матвійчук, А. В. Аналіз та прогнозування розвитку фінансово-економічних систем із використанням теорії нечіткої логіки: монографія. К.: Центр навчальної літератури, 2005. — 206 с.
37. Мітталь, Р. *Furnace Technology and Design*. — London: Springer, 2014. — 350 p.
38. Міхайлов, П. В. Розрахунок та проектування трубчастих печей. — Спб.: Лань, 2011. — 310 с.
39. Novak, P., & Müller, K. Design Optimization of Industrial Tube Furnaces. *Journal of Industrial Engineering*, 2017, Vol. 45, pp. 78–90.
40. Островерхов, М.Я., Сільвестров, А.М., Зеленський, К.Х. *Методи дослідження електротехнічних систем і комплексів*. — К.: ТАЛКОМ, 2019. — 300 с.

41. Patankar, S. V. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. — New York: Hemisphere, 1980. — 320 p.
42. Петренко, О. В., & Іваненко, В. М. Моделювання однопотокової трубчастої печі для нагріву металу. Теплотехніка та енергетика, 2019, №4, с. 55–63.
43. Пупена, О. М. Розроблення людино-машинних інтерфейсів та систем збирання даних з використанням програмних засобів SCADA/HMI. Київ : Ліра К, 2020. — 594 с.
44. Патент України №123456. Однопотокова трубчаста піч з оптимізованим газорозподілом, 2017.
45. Промислові засоби автоматизації: навч. посібник. Ч.2. — Х.: НТУ «ХП», 2003. — 658 с.
46. Riber, M., et al. Review on PID, fuzzy and hybrid fuzzy-PID controllers, 2024. SpringerLink
47. Ranade, V. V. Computational Flow Modeling for Chemical Reactor Engineering. — Amsterdam: Academic Press, 2002. — 410 p.
48. Shevchenko, M. V. Development of an Efficient Single-Pass Tubular Furnace for Metal Heating. Дис. канд. техн. наук. — К., 2018. — 150 с.
49. Smolin, A. P. Computer Modeling of Processes in Industrial Heating Units. Дис. канд. техн. наук. — СПб., 2016. — 180 с.
50. Smith, R., & Brown, D. Combustion Optimization in Industrial Tube Furnaces. Fuel, 2018, Vol. 217, pp. 312–320.
51. Thermal Processing. Practical Examples of Furnace Design and Simulation. URL: <https://www.thermalprocessing.com>
52. US Patent 9876543. Single-Pass Tube Furnace with Enhanced Heat Transfer, 2018.
53. Versteeg, H., & Malalasekera, W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method. — Harlow: Pearson, 2007. — 480 p.
54. Wang, S., et al. Optimization of Tube Furnace Heating Process Using Numerical Simulation. Journal of Thermal Science, 2021, Vol. 30, pp. 45–58.
55. Zungeru, A. M. Design and simulation of an Automatic Room Heater Control system, ScienceDirect, 2018.

56. Zhang, L., & Wang, H. Heat Transfer Analysis in Single-Pass Tubular Furnaces. *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, 2018, Vol. 123, pp. 1123–1135.
57. Zhang, T., et al. Influence of Burner Position on Temperature Uniformity in Single-Pass Furnace. *Energy Conversion and Management*, 2020, Vol. 221, 113120.