

Міністерство освіти і науки України  
Львівський національний університет ветеринарної медицини та  
біотехнологій ім. С.З.Гжицького  
Факультет механіки, енергетики та інформаційних технологій  
Кафедра інформаційних технологій

# **КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

першого бакалаврського рівня на тему:

**«РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ  
ПРОЦЕСОМ ВИПАЛЮВАННЯ ЦЕГЛИ В ТУНЕЛЬНІЙ ПЕЧІ»**

Виконав: студент групи Акт-42сп  
спеціальності 174 «Автоматизація та  
комп'ютерно-інтегровані технології»

Сидор Р.М.

Керівник роботи:

Запорожцев С.Ю.

ЛЬВІВ-2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ  
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ  
КАФЕДРА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Освітній ступінь «Бакалавр» за спеціальністю –  
174 – „Автоматизація, комп’ютерно-інтегровані технології та робототехніка”

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Завідувач кафедри \_\_\_\_\_  
д.т.н., проф. А.М. Тригуба  
“\_\_\_” \_\_\_\_\_ 202\_ р.

## ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу студенту  
Сидору Роману Михайловичу

### 1. Тема роботи

«Розробка системи автоматизованого керування процесом випалювання цегли в тунельній печі»

Керівник роботи: Запорожцев Сергій Юрійович, к.т.н., доцент.

затверджена наказом по університету від “25” лютого 2025 р., № 123/к-с.

2. Строк подання студентом роботи: 10.06.2025 р.

3. Початкові дані до роботи:

Технологічні вимоги та обмеження при розробці автоматики для пристроїв випалювання цегли в тунельній печі; ДСТи, СНіПи; документація основних виробників ПЛК, температура в тунельній печі типу 950 °С з можливим збуренням 45 °С; виконавчий механізм - двофазний електродвигун з диференціальним магнітним підсилювачем.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки:

### 1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ

#### 1.1 Аналіз предметної області

#### 1.2 Фізико-хімічні процеси під час випалювання цегли

#### 1.3 Класифікація і характеристики тунельних печей

#### 1.4 Основні вимоги до процесу випалювання

### 2 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ЯК ОБ’ЄКТА КЕРУВАННЯ

#### 2.1 Опис об’єкта керування

#### 2.2 Математичне моделювання процесу випалювання

#### 2.3 Особливості об’єкта керування

#### 2.4 Визначення вимог до системи автоматизації

### 3 РОЗРАХУНКИ ТА ВИБІР ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ

#### 3.1 Моделювання об’єкта автоматизації

#### 3.2 Дослідження стійкості системи

#### 3.3 Розрахунок параметрів регулятора

#### 3.4 Вибір датчиків та виконавчих механізмів

### 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

## 5 ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

### ВИСНОВКИ

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):  
Аналіз предметної області. Математичне моделювання процесу випалювання.  
Вимоги до системи автоматизації печі. Схема автоматичного регулятора. Модель  
об'єкта автоматизації. Дослідження стійкості системи. Синтез регулятора.  
Спрощення регулятора та результати моделювання. Вибір технічних засобів  
автоматизації. Висновки.

6. Консультанти з розділів:

| Розділ     | Прізвище, ініціали та посада консультанта                                    | Підпис, дата   |                  |
|------------|------------------------------------------------------------------------------|----------------|------------------|
|            |                                                                              | завдання видав | завдання прийняв |
| 1, 2, 3, 5 | Запорожцев С.Ю., доцент кафедри інформаційних технологій                     |                |                  |
| 4          | Городецький І.М., доцент кафедри управління проектами та безпеки виробництва |                |                  |

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_ 202\_\_ р.

### ***КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН***

| № з/п | Назва етапів кваліфікаційної роботи                                     | Строк виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|-------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|----------|
| 1     | Написання першого розділу та означення головних завдань роботи          | 25.02 - 21.03.25              |          |
| 2     | Виконання другого розділу та формування початкових даних                | 22.03 - 11.04.25              |          |
| 3.    | Виконання третього розділу та узагальнення отриманих результатів роботи | 12.04 - 11.05.25              |          |
| 4.    | Написання розділу: «Охорона праці»                                      | 12.05 - 17.05.25              |          |
| 5.    | Вартісне оцінення ефективності пропозицій роботи                        | 18.05 - 23.05.25              |          |
| 6.    | Завершення роботи в цілому                                              | 24.05 - 10.06.25              |          |

Студент \_\_\_\_\_ Сидор Р.М.  
 (підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ Запорожцев С.Ю.  
 (підпис)

## РЕФЕРАТ

УДК 681.51 : 666.7.041.9

Розробка системи автоматизованого керування процесом випалювання цегли в тунельній печі

Сидор Р.М. Кафедра ІТ – Дубляни, ЛНУВМБ ім.С.З. Гжицького, 2025.

Кваліфікаційна робота: 60 с. текст. част., 17 рис., 10 арк. ілюстраційного матеріалу, 17 джерел.

Об'єкт дослідження – управління процесом випалювання цегли.

Мета роботи – підвищення ефективності процесу випалювання цегли в тунельній печі за рахунок системи автоматизованого керування.

Завдяки аналізу предметної області визначені особливості тунельних печей, схема їх роботи, розглянуті математичні моделі процесу випалювання, наведені вимоги до системи автоматизації. По заданій схемі автоматичного регулятора температури побудована модель об'єкта автоматизації - розімкнутої та замкнутої системи, а також проведено дослідження стійкості системи. Проведений синтез регулятора. Виявлено, що ПФ регулятора занадто складна, тому прийнято рішення про його спрощення. Спрощена модель регулятора є ПІД-регулятором з фільтром похідної. Моделювання перехідної характеристики виявило, що поведінка системи задовільняє вимогам. Обрані технічні засоби автоматики - датчики, виконавчі пристрої та мікроконтролерне обладнання. Розроблені міри по охороні праці та навколишнього середовища, а також здійснений розрахунок економічної ефективності системи.

**Ключові слова:** випалювання цегли, тунельна піч, система автоматизованого керування, ПІД-регулятор.

**Keywords:** brick firing, tunnel kiln, automated control system, PID regulator.

## ЗМІСТ

|                                                            |    |
|------------------------------------------------------------|----|
| ВСТУП .....                                                | 6  |
| РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ .....   | 8  |
| 1.1 Аналіз предметної області .....                        | 8  |
| 1.2 Фізико-хімічні процеси під час випалювання цегли ..... | 11 |
| 1.3 Класифікація і характеристики тунельних печей .....    | 13 |
| 1.4 Основні вимоги до процесу випалювання .....            | 16 |
| РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ЯК ОБ'ЄКТА         |    |
| КЕРУВАННЯ .....                                            | 20 |
| 2.1 Опис об'єкта керування .....                           | 20 |
| 2.2 Математичне моделювання процесу випалювання .....      | 23 |
| 2.3 Особливості об'єкта керування .....                    | 27 |
| 2.4 Визначення вимог до системи автоматизації .....        | 30 |
| РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНКИ ТА ВИБІР ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ            |    |
| АВТОМАТИЗАЦІЇ .....                                        | 33 |
| 3.1 Моделювання об'єкта автоматизації .....                | 33 |
| 3.2 Дослідження стійкості системи .....                    | 36 |
| 3.3 Розрахунок параметрів регулятора .....                 | 39 |
| 3.4 Вибір датчиків та виконавчих механізмів .....          | 43 |
| РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА ....   | 51 |
| РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ     |    |
| АВТОМАТИЗАЦІЇ .....                                        | 54 |
| ВИСНОВКИ .....                                             | 58 |
| СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ .....                                    | 59 |

## ВСТУП

В сучасному промисловому виробництві, що характеризується високими вимогами до якості продукції, енергоефективності та стабільності технологічних процесів, автоматизація термічного обладнання набуває особливої важливості. Зокрема, це стосується тунельних печей, які широко застосовуються в галузях, пов'язаних із випалюванням кераміки, будівельних матеріалів, обробкою металів і термохімічними процесами. Такі печі відзначаються безперервністю роботи, значною довжиною і температурним градієнтом по всьому робочому об'єму, що потребує тонкого регулювання параметрів процесу для забезпечення однорідності продукції.

Управління температурним режимом тунельної печі — одне з ключових завдань, що має суттєвий вплив на ефективність усього виробничого циклу. Висока інерційність об'єкта, наявність збурень у вигляді зміни складу завантаження або коливань зовнішніх температур, а також потреба в точному дотриманні теплового профілю вимагають застосування сучасних автоматизованих систем регулювання. В умовах, коли навіть незначні відхилення від заданої температури можуть призвести до браку або втрати властивостей матеріалів, ручне управління вже не забезпечує належного рівня контролю. У зв'язку з цим впровадження надійної, точної та адаптивної системи автоматичного регулювання температури є не просто бажаним, а критично необхідним кроком у розвитку виробництва.

Теплова обробка в тунельних печах вимагає підтримання строго визначеної температури у кожній зоні печі — зоні попереднього нагріву, основного випалу та охолодження. При цьому важливо не лише підтримувати температуру, а й плавно змінювати її у часі відповідно до заданого профілю. Сучасні технології автоматичного керування дозволяють враховувати інерційність об'єкта, реалізовувати адаптивні алгоритми та забезпечувати сталість режимів навіть за впливу зовнішніх збурень. Створення такої системи

базується на побудові математичної моделі об'єкта регулювання, виборі оптимальної структури регулятора та відповідному підборі виконавчих механізмів і сенсорів. Цей процес не лише дозволяє досягти вищої якості продукції, а й оптимізує енергоспоживання, підвищує ресурс обладнання і забезпечує більшу стабільність виробництва.

Актуальність теми посилюється також зростаючими вимогами до енергоефективності та зниження впливу на навколишнє середовище. В умовах глобального зростання цін на енергоресурси, автоматизоване керування технологічним обладнанням стає основою для підвищення конкурентоспроможності підприємств. Це особливо важливо для підприємств, що працюють у режимі великого обсягу випуску, де навіть незначна економія на одиницю продукції трансформується в суттєві загальні вигоди.

Робота, присвячена побудові САР для тунельної печі, є прикладом застосування системного підходу до розв'язання складного технічного завдання, що включає етапи аналізу об'єкта, побудови моделі, синтезу та перевірки регулятора, вибору елементної бази, а також оцінки ефективності впровадження. Завдяки поєднанню теоретичних засад автоматичного керування, практичного досвіду та сучасних засобів моделювання, можливо досягти суттєвого покращення роботи печі — як з точки зору технологічної ефективності, так і в аспекті ресурсозбереження.

Таким чином, тема даного дослідження є важливою і своєчасною, адже охоплює як фундаментальні підходи до побудови САР, так і прикладне впровадження сучасних засобів автоматизації в реальні промислові умови. Результати такої розробки можуть бути легко адаптовані до подібних технологічних об'єктів, розширюючи можливості для підвищення ефективності та стабільності широкого спектру виробничих процесів.

## РОЗДІЛ 1

### ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ

#### 1.1 Аналіз предметної області

Виробництво цегли є одним із найдавніших технологічних процесів, який має величезне значення у будівництві та архітектурі. Основним етапом створення якісного будівельного матеріалу є процес випалювання, що визначає механічні властивості, довговічність і зовнішній вигляд готової продукції. Випалювання забезпечує видалення залишкової вологи, спікання мінералів та утворення твердого, стійкого до навантажень матеріалу. Серед усіх типів промислових печей найбільш ефективними для масового виробництва цегли стали тунельні печі, які дозволяють досягати високої продуктивності, рівномірності обробки та економічного використання енергоресурсів.

Тунельна піч являє собою стаціонарний нагрівальний тунель (рис.1.1), через який поступово проходить конвеєр з викладеними виробами. [1-2]



Рисунок 1.1 - Тунельна піч для випалу цегли

Вироби послідовно переміщуються через різні температурні зони: сушіння, попереднього нагріву, випалювання і охолодження. Такий підхід

дозволяє безперервно випалювати велику кількість цегли за оптимальним температурним графіком. Основною перевагою тунельних печей є можливість точного контролю температурного профілю вздовж усього маршруту проходження виробів, що істотно зменшує ймовірність дефектів, таких як тріщини, деформації або недостатнє випалення.

Сам процес випалювання є складним фізико-хімічним явищем, що включає взаємодію багатьох факторів: теплопередачі, масопереносу, фазових перетворень і хімічних реакцій. [3-4] На початкових етапах випалювання основне завдання полягає у видаленні вологи з виробів, що вимагає поступового підвищення температури для уникнення раптового випаровування води та утворення мікротріщин. Далі, при досягненні температури спікання, мінерали починають взаємодіяти, створюючи міцну, щільну структуру, що визначає кінцеві властивості цегли. На останніх стадіях температура поступово знижується, що дозволяє запобігти термічним напруженням та забезпечити однорідне охолодження.

Успішність процесу багато в чому залежить від стабільності умов всередині тунельної печі. Фактори, такі як рівномірність розподілу температури, швидкість руху конвеєра, вологість навколишнього повітря та теплові втрати через стінки печі, мають істотний вплив на кінцевий результат. Будь-які відхилення можуть призвести до зниження якості виробів, підвищення відсотка браку та зростання витрат енергії. Саме тому точний контроль технологічних параметрів випалювання стає ключовим завданням на сучасних виробництвах.

Одним з головних труднощів є динамічний характер процесу випалювання, де часова затримка між дією на систему та її реакцією може бути досить значною. Зокрема, зміна потужності нагрівальних пристроїв або зміна витрати повітря не призводить до миттєвої зміни температури виробів, що ускладнює оперативне управління. Крім того, характеристики печі змінюються залежно від навантаження, стану теплоізоляції, умов навколишнього середовища, що вимагає створення адаптивних або гнучких систем керування.

Сучасні тунельні печі часто оснащуються складними системами автоматичного контролю, які включають у себе температурні датчики, витратоміри газу або повітря, виконавчі механізми керування пальниками, заслінками та вентиляторами (рис.1.2). Завдання таких систем полягає у тому, щоб забезпечити підтримку оптимальної температурної кривої вздовж усієї довжини печі, незважаючи на можливі зовнішні або внутрішні збурення. Це дає змогу мінімізувати кількість дефектної продукції, знизити енергоспоживання та стабілізувати виробничий процес.



Рисунок 1.2 - Тунельна піч з системою автоматизації

Застосування автоматизації у процесі випалювання також пов'язано з необхідністю забезпечення безпеки виробництва. Неправильне керування температурою може призвести до аварійних ситуацій, таких як перегрів обладнання, неконтрольоване горіння або надмірне накопичення продуктів згоряння. Автоматичні системи виявлення аварійних режимів і системи аварійної зупинки процесу є обов'язковими компонентами сучасних печей.

Особливу роль у випалюванні цегли відіграє правильний розподіл температури не лише у загальному об'ємі печі, але й всередині окремих виробів. Нерівномірність нагрівання або охолодження навіть на кілька градусів може викликати внутрішні напруження, що в подальшому призведе до руйнування цегли під час експлуатації. Тому одним із основних напрямків удосконалення технологічних процесів є оптимізація температурного профілю з використанням сучасних математичних моделей і алгоритмів керування.

У підсумку можна зазначити, що технологія випалювання цегли у тунельних печах є складною багатофакторною задачею, яка потребує точного керування тепловими і газодинамічними процесами у режимі реального часу. Ефективність і надійність виробництва безпосередньо залежать від якості організації автоматизації та рівня розуміння особливостей самого процесу.

## 1.2 Фізико-хімічні процеси під час випалювання цегли

Процес випалювання цегли в тунельній печі є складним комплексом фізико-хімічних перетворень, що відбуваються під дією температури. Вироби, виготовлені з глинистих матеріалів, при нагріванні поступово змінюють свою структуру, набуваючи нових фізичних властивостей. На початкових етапах випалювання основною метою є видалення вологи, яка міститься як у вигляді вільної води, так і у вигляді зв'язаної води, що утримується у кристалічних структурах мінералів. Цей процес відбувається при температурах до 200–300 °C і супроводжується зміною маси виробу та появою початкових напружень.

Подальше підвищення температури призводить до активізації хімічних перетворень у матеріалі. Глинисті мінерали, такі як каолініт, проходять стадію дегідроксилювання, що є незворотнім процесом втрати гідроксильних груп і перетворенням структури на метакаолін. Ця стадія випалювання має вирішальне значення, оскільки вона визначає подальшу реакційну здатність матеріалу при високотемпературних фазових переходах. Такі перетворення супроводжуються зміною об'єму, щільності та механічної міцності цегли.

У температурному діапазоні 600–900 °C починається процес спікання, під час якого частки матеріалу поступово зливаються під дією міжчасткових сил та поверхневого натягу. Спікання сприяє формуванню монолітної структури виробу і значно підвищує його механічні характеристики. Водночас у матеріалі можуть проходити процеси вивільнення оксидів вуглецю, залишкових органічних домішок або інших летких компонентів, що впливають на мікропористу структуру цегли. Правильне керування температурним режимом

на цій стадії критично важливе для забезпечення однорідності структури та мінімізації утворення тріщин.

Одним із визначальних процесів на заключних етапах випалювання є фазове перетворення мінералів у більш стабільні форми. Наприклад, каолініт внаслідок теплового впливу утворює муліт — стабільну керамічну фазу, яка забезпечує високу термостійкість і механічну міцність цегли. Формування муліту починається при температурах близько 950–1050 °C і супроводжується кристалізацією нової структури з одночасним ущільненням матеріалу. Важливо зазначити, що кінцева мікроструктура цегли значною мірою залежить від швидкості нагрівання і охолодження, що вимагає ретельного підбору температурного профілю випалювання.

Особливістю випалювання в тунельних печах є поступове проходження виробів через зони з різною температурою, що дозволяє оптимізувати теплові й хімічні процеси на кожному етапі. Спочатку цегла потрапляє у зону попереднього нагріву, де основним завданням є обережне видалення вологи без утворення внутрішніх тріщин. Надто швидке нагрівання в цій зоні призводить до різниці температур між поверхнею та серцевиною виробу, що викликає напруження й може спричинити його руйнування. Оптимальне управління температурним градієнтом на початкових етапах випалювання є важливою умовою отримання якісного продукту.

Після видалення вологи вироби переміщуються у зону основного випалювання, де відбуваються ключові фізико-хімічні перетворення матеріалу. У цій зоні температура поступово підвищується до 1000–1100 °C, що сприяє глибоким структурним змінам. Спостерігається інтенсивне спікання, формування стабільних мінеральних фаз і зменшення об'єму пор, що визначає щільність і міцність готової цегли. Характеристики кінцевого виробу залежать не тільки від максимального рівня температури, але й від часу перебування в зоні високих температур. Надто короткий час може призвести до неповного спікання, а надто довгий — до перенасичення мулітової фази та появи надмірної крихкості.

Останньою важливою стадією є контрольоване охолодження цегли. Зниження температури повинно бути поступовим, щоб уникнути появи термічних тріщин внаслідок різких перепадів. У процесі охолодження відбувається остаточне затвердіння структури матеріалу, стабілізація фізичних характеристик та зняття залишкових напружень. Охолодження зазвичай проводиться у спеціальній зоні тунельної печі, де температурний режим розрахований так, щоб забезпечити максимально безпечний перехід від високотемпературних фаз до стабільних кімнатних умов.

Таким чином, фізико-хімічні процеси під час випалювання цегли є багатоступеневими та взаємопов'язаними. Якість кінцевого продукту визначається не тільки складом вихідної сировини, але й суворим дотриманням режиму нагрівання, часу перебування в різних температурних зонах та режиму охолодження. Розуміння механізмів цих перетворень є основою для розробки систем автоматизованого керування процесом випалювання, які дозволяють оптимізувати виробничий цикл, мінімізувати витрати енергії та підвищити стабільність якості виробів.

### 1.3 Класифікація і характеристики тунельних печей

Тунельні печі посідають провідне місце серед технологічного обладнання для випалювання керамічної продукції, насамперед будівельної цегли. [5-6] Їхня популярність пояснюється можливістю забезпечення безперервного виробничого процесу, високої продуктивності та стабільної якості готової продукції. Конструктивно тунельна піч є довгим горизонтальним каналом, розділеним на зони попереднього нагріву, випалювання та охолодження, через які вироби переміщуються на спеціальних вагонетках або за допомогою конвеєрних систем. На рис.1.3 показана схема тунельної печі, на якій цифрами вказані: 1 - зона підігріву, 2 - зона випалювання, 3 - зона охолодження.

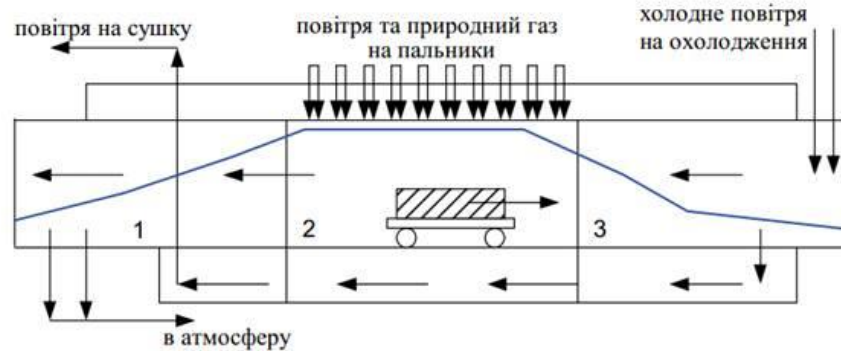


Рисунок 1.3 - Схема тунельної печі

Основний принцип роботи тунельної печі ґрунтується на протитечії: гази рухаються назустріч виробам, що дозволяє максимально ефективно використовувати тепло і рівномірно прогрівати продукцію. Завдяки цьому досягається не тільки економія палива, але й оптимізація температурного режиму в кожній зоні печі.

За способом організації руху і обігріву розрізняють кілька основних типів тунельних печей. Найбільш традиційним є варіант із фіксованим тунелем і переміщенням вагонеток із виробами. Ці печі характеризуються стабільністю режимів і відносною простотою обслуговування. Інший різновид — печі з рухомими нагрівальними секціями або з адаптивними зонами обігріву. Вони дозволяють точніше регулювати температурний профіль уздовж тунелю, що є корисним при випалюванні виробів з різними тепловими вимогами, але ускладнюють конструкцію та збільшують вартість технічного обслуговування.

За типом енергоносія тунельні печі поділяються на газові, нафтові, електричні та комбіновані. Газові печі є найпоширенішими завдяки доступності природного газу й можливості ефективного регулювання теплових потоків. Нафтові печі, хоч і вимагають спеціальної системи подачі палива та очищення продуктів згоряння, застосовуються в регіонах з відповідною інфраструктурою. Електричні тунельні печі, попри вищу вартість електроенергії, мають очевидні переваги в екологічності, стабільності температурних режимів і можливості тонкого налаштування процесу.

Розвиток технологій конструкції тунельних печей демонструє перехід від масивних важких кладок до легких теплоізоляційних конструкцій. Раніше печі будували з вогнетривкої цегли значної товщини, що забезпечувало добру теплову інерцію, але збільшувало час виходу на робочий режим і втрати тепла. Сучасні печі використовують комбінацію легких вогнетривких плит, волокнистих матеріалів і спеціальних композиційних теплоізоляційних покриттів. Це дозволяє значно скоротити енергоспоживання та зробити процес більш гнучким.

Особлива увага приділяється вдосконаленню вагонеток. Ранні моделі мали масивні конструкції з чавуну або сталі, що спричиняло значні витрати енергії на їх нагрівання під час проходження печі. У сучасних печах застосовуються легкі металеві рами, облицьовані теплоізоляційними матеріалами, або спеціальні керамічні платформи, що істотно знижує теплові втрати й навантаження на механізми транспортування.

Ще однією важливою еволюційною зміною стало впровадження систем автоматизованого контролю температурного режиму, витрат газу та швидкості руху вагонеток. Завдяки використанню датчиків температури, тиску й газового аналізу вдалося істотно підвищити якість продукції та зменшити відсоток браку. Системи керування на основі ПЛК дозволяють оперативно реагувати на зміни в процесі випалювання та оптимізувати енергоспоживання.

Порівняльний аналіз різних видів тунельних печей дає змогу зробити висновок, що вибір конкретної конструкції залежить від таких чинників, як масштаб виробництва, тип виробів, доступність енергоресурсів, технологічна гнучкість і вимоги до якості. Для великомасштабного випуску стандартної цегли ідеальним варіантом залишаються класичні газові тунельні печі з фіксованим тунелем і послідовним переміщенням вагонеток. Для виробництва спеціалізованої кераміки з підвищеними вимогами до температурного режиму частіше застосовують електричні або комбіновані печі з можливістю точного налаштування зон обігріву.

Печі з адаптивною архітектурою, хоча й мають вищу вартість будівництва та експлуатації, дозволяють забезпечити гнучке регулювання профілю температури відповідно до змін виробничої програми, що особливо цінно для підприємств із широким асортиментом продукції. Натомість класичні тунельні печі вигідніші для великих безперервних виробництв із усталеним технологічним процесом.

Важливим аспектом вибору тунельної печі також є питання обслуговування й ремонту. Сучасні печі проектуються з урахуванням можливості швидкого демонтажу секцій теплоізоляції, заміни пальників і транспортних механізмів без зупинки всього виробництва, що дозволяє зменшити втрати продуктивності під час технічного обслуговування.

Як бачимо, грамотний вибір типу тунельної печі, її конструкційних особливостей і системи керування визначає загальну ефективність виробництва, витрати енергії, рівень автоматизації та стабільність якості готової продукції. У подальших етапах роботи важливо враховувати ці особливості під час розробки адаптивної системи керування технологічним процесом випалювання.

Таким чином, тунельні печі різних конструкцій демонструють значну варіативність як за технологічними характеристиками, так і за рівнем енергетичної ефективності й гнучкості керування. Усі ці чинники безпосередньо впливають на якість випалювання та економічність виробничого процесу. Проте досягнення оптимальних результатів випалювання неможливе без точного дотримання і підтримання необхідних температурних режимів на різних етапах проходження виробів через піч. Це, своєю чергою, висуває особливі вимоги до систем контролю і регулювання процесу, що формують окрему важливу галузь технологічного забезпечення сучасного виробництва.

#### 1.4 Основні вимоги до процесу випалювання

Процес випалювання цегли є важливою частиною виробництва, і він визначає якість кінцевого продукту. Він включає в себе складний комплекс

фізичних, хімічних і термодинамічних процесів, кожен з яких має свої вимоги, які необхідно дотримуватись для досягнення високої якості продукції. Задоволення цих вимог є критичним для отримання цегли, яка відповідає встановленим стандартам. У цьому контексті розгляд основних вимог до процесу випалювання є необхідним для розуміння ключових аспектів, що визначають ефективність технологічного процесу. [3-4]

Якість випалу є одним з основних критеріїв, що визначає кінцеву якість цегли. Це включає кілька факторів, серед яких найбільш важливими є рівномірність прогрівання цегли, стабільність хімічних перетворень, а також правильність контролю температури протягом усього процесу. Рівномірне прогрівання матеріалу запобігає утворенню тріщин і дефектів, що можуть виникнути через нерівномірний розподіл температури. Залежно від типу цегли та її складу, необхідно контролювати певну температурну криву, яка забезпечить повне протікання необхідних хімічних реакцій і досягнення бажаних механічних властивостей кінцевого продукту.

Ще однією ключовою вимогою є підтримання стабільної і рівномірної температури в тунельній печі протягом усього процесу. Тунельні печі працюють за принципом безперервного руху цегли через зону нагріву, що вимагає постійного контролю температурного режиму на різних етапах випалу. Температура в печі має поступово зростати, досягши пікових значень, і потім знижуватися. Будь-які коливання температури можуть призвести до дефектів у цеглі, таких як тріщини або нерівномірність кольору, що впливає на зовнішній вигляд і механічні характеристики готової продукції.

Енергоефективність процесу випалювання також є важливим аспектом, оскільки цей процес є енергозатратним. Від ефективності споживання енергії залежить не лише витрати на виробництво, але й екологічний вплив на навколишнє середовище. Для досягнення високої енергоефективності необхідно оптимізувати споживання палива, вдосконалити теплоізоляцію печі та використовувати сучасні технології, які знижують втрати тепла. Одним з таких підходів є рекуперація тепла, що дозволяє використовувати тепло від

відпрацьованих газів для попереднього прогріву свіжих порцій цегли або повітря, що подається в піч.

Контроль середовища в тунельній печі має велике значення для забезпечення якості випалювання. Це включає в себе не тільки контроль температури, але й параметрів, таких як вологість, склад газів та швидкість повітря. Вологість може значною мірою впливати на рівень вологи в цеглі, що може змінювати її об'єм та структуру під час випалу. Надмірна вологість може призвести до виникнення дефектів, таких як тріщини або здуття матеріалу. Крім того, контроль складу газів, таких як кисень, вуглекислий газ та інші компоненти, дозволяє ефективно регулювати процеси горіння палива і забезпечити оптимальні умови для випалювання.

Успішне виконання вимог до процесу випалювання вимагає постійного моніторингу та регулювання параметрів печі. У цьому контексті важливо мати точні засоби вимірювання і контролю, здатні швидко реагувати на зміни в процесі. Печі повинні бути оснащені сучасними датчиками для вимірювання температури, вологості, складу газів, що дозволяє операторам швидко коригувати процеси для досягнення максимальних результатів.

Таким чином, основні вимоги до процесу випалювання в тунельних печах включають забезпечення високої якості випалу, рівномірність температури, енергоефективність та контроль середовища. Всі ці фактори взаємопов'язані, і їх реалізація безпосередньо впливає на кінцевий результат. Дотримання цих вимог є необхідним для отримання цегли високої якості та досягнення ефективності виробничого процесу.

У додаток до базових вимог важливо враховувати також динаміку змін температури та середовища у печі. Процес випалювання має характер високої інерційності, і це накладає обмеження на можливість швидкого регулювання. Будь-яке коригування режимів нагріву або охолодження повинно враховувати, що температура у масиві матеріалу змінюється повільніше, ніж температура повітряного середовища. Відповідно, щоб уникнути перевищення або недогріву, необхідно правильно прогнозувати зміну параметрів.

Ще одним аспектом є особливості теплового навантаження на різні ділянки печі. У тунельній печі існують окремі зони прогріву, випалювання та охолодження. Кожна з цих зон має свої оптимальні параметри, які повинні бути дотримані для забезпечення правильного протікання процесу. Зокрема, у зоні прогріву необхідно запобігати занадто швидкому підвищенню температури, щоб уникнути термічного шоку, тоді як у зоні випалювання слід забезпечити тривале перебування цегли при максимальній температурі для повного завершення хімічних реакцій. В зоні охолодження, навпаки, температура має знижуватись поступово, щоб не викликати тріщиноутворення через різке охолодження матеріалу.

Стабільність процесу також залежить від рівномірності подачі палива та розподілу повітря у печі. Використання нерівномірного подавання повітря або палива може призводити до утворення "гарячих" або "холодних" зон, що негативно позначається на якості продукції. Тому до основних вимог належить також забезпечення оптимального співвідношення кількості палива і повітря, підтримка правильного режиму горіння та рівномірного розподілу тепла.

В умовах сучасного виробництва особливу увагу приділяють екологічним вимогам до процесу випалювання. Мінімізація викидів шкідливих речовин, таких як оксиди азоту, вуглекислий газ і пил, є невід'ємною частиною загальних вимог до технології. Це передбачає використання систем очищення газів, оптимізацію процесу горіння та застосування альтернативних видів палива з меншим екологічним навантаженням.

Узагальнюючи, процес випалювання цегли в тунельних печах базується на дотриманні комплексу вимог, спрямованих на забезпечення високої якості продукції, оптимальне використання енергетичних ресурсів, підтримку стабільності параметрів процесу і зниження негативного впливу на навколишнє середовище. Кожен з цих аспектів взаємопов'язаний, а їх сумісне виконання є запорукою не лише високої конкурентоспроможності виробленої цегли, а й економічної ефективності виробництва в цілому.

## РОЗДІЛ 2

### АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

#### 2.1 Опис об'єкта керування

Тунельна піч як об'єкт керування є складною теплофізичною системою, що об'єднує в собі низку взаємопов'язаних елементів, кожен з яких виконує певну функцію у загальному процесі випалювання цегли. Структура печі побудована таким чином, щоб забезпечити безперервний рух виробів через різні температурні зони і підтримувати оптимальні умови для здійснення фізичних і хімічних перетворень матеріалу.

Основною частиною тунельної печі є її робоча камера [7-8] — довгий тунель, розділений умовно на три основні зони: прогріву, випалювання і охолодження. Вироби на піддонах або спеціальних візках повільно переміщуються по рейковій або конвеєрній системі від початку до кінця печі, проходячи послідовно всі етапи термічної обробки. Рух візків зазвичай здійснюється за допомогою механізмів поступального переміщення із контрольованою швидкістю, що дозволяє точно регулювати тривалість перебування виробів у кожній зоні.

Джерела тепла в печі представлені пальниками, розміщеними у верхній або бокових стінках тунелю. Пальники можуть працювати на газовому, рідкому або твердому паливі, в залежності від конструкції печі і доступних ресурсів. Важливою характеристикою є можливість регулювання інтенсивності горіння і розподілу тепла по довжині печі, що дає змогу створювати необхідний температурний профіль для випалу.

Однією з ключових систем є система подачі і розподілу повітря, яка виконує роль як подавання кисню для горіння, так і забезпечення правильного теплообміну з виробами. Повітря зазвичай подається в різні зони печі під контролем клапанів і вентиляторів, причому для кожної зони можуть бути задані

свої параметри витрати і температури. У деяких конструкціях використовується також рециркуляція повітря для економії енергії та забезпечення більш рівномірного розподілу тепла.

Система відведення відпрацьованих газів включає димоходи, витяжні вентилятори та елементи очищення викидів. Контроль за температурою і складом газів на виході є важливим для підтримки екологічних стандартів та енергоефективності. Крім того, витяжна система відіграє роль у створенні правильного тиску в камері печі, що впливає на якість теплообміну.

Важливим елементом є також система вимірювання параметрів процесу. У тунельній печі встановлюються численні температурні датчики, які фіксують температуру середовища в різних точках тунелю, а в деяких випадках — температуру самих виробів. Також можуть застосовуватись датчики тиску, витрати повітря і газів, датчики складу газового середовища. Отримані дані надходять у систему керування і використовуються для регулювання роботи пальників, вентиляторів, системи переміщення.

Автоматизована система керування інтегрує всі ці елементи в єдине ціле, забезпечуючи координовану роботу обладнання відповідно до заданого температурного графіка. Програмне забезпечення дозволяє задавати профіль температури у печі в залежності від характеристик виробу, оперативно вносити корективи у разі відхилення параметрів та здійснювати моніторинг стану системи у режимі реального часу.

Як бачимо, тунельна піч є об'єктом з розвиненою просторовою структурою, складними тепловими процесами та багатьма ступенями свободи для регулювання. Особливістю керування такою системою є необхідність не тільки підтримувати задану температуру в кожній зоні, але й забезпечити її правильний розподіл у просторі та часі, синхронізуючи рух виробів із режимами термічної обробки.

Одним із суттєвих аспектів роботи тунельної печі є взаємодія між температурними зонами. Хоча піч умовно поділена на окремі ділянки, фізично тепло активно передається між ними завдяки процесам теплопровідності,

конвекції та випромінювання. Це створює певну складність у керуванні, оскільки зміна теплового режиму в одній зоні може впливати на сусідні, що вимагає врахування просторової взаємодії в алгоритмах регулювання.

Ще однією особливістю об'єкта є велика теплова інерційність. Через масивність конструкцій самої печі та наявність великої кількості випалюваного матеріалу зміни температури відбуваються повільно, із затримкою у часі. Це обмежує швидкість реакції системи на регулюючі впливи і вимагає обережної побудови стратегій керування, що враховують динамічні характеристики процесу.

У тунельній печі важливу роль відіграє правильна організація процесу охолодження виробів після випалювання. Охолодження повинно бути поступовим і контрольованим, щоб уникнути тріщин та внутрішніх напружень у матеріалі. Зазвичай для цього в зону охолодження подають свіже або попередньо підігріте повітря, витрату і температуру якого регулюють відповідно до температури виробів і швидкості їх руху.

Окрім теплових процесів, у тунельній печі відбуваються й хімічні перетворення матеріалу. У ході випалювання змінюється структура глини, зникають органічні включення, утворюються нові мінеральні сполуки. Ці перетворення чутливі до температурного режиму та тривалості перебування виробів у певних температурних інтервалах. Тому для забезпечення стабільної якості продукції необхідно дуже точно підтримувати необхідні температурні профілі у процесі випалювання.

Складність об'єкта керування посилюється ще й наявністю зовнішніх збурень. До них належать коливання характеристик палива, зміни температури навколишнього середовища, варіації у складі і вологості глиняної сировини. Усе це може призводити до відхилення температурних режимів, тому система автоматизації повинна мати можливість компенсувати вплив таких чинників.

Рівень автоматизації тунельних печей може бути різним, від найпростіших систем підтримання заданої температури до складних інтегрованих рішень з адаптивним регулюванням і прогнозуванням розвитку процесу. У сучасних

печах широко застосовуються мікропроцесорні системи, які забезпечують багатозонне регулювання температури, управління витратою повітря та газу, контроль руху візків, аналіз трендів зміни параметрів для запобігання аварійним ситуаціям.

Таким чином, описуючи тунельну піч як об'єкт керування, можна побачити складну сукупність теплових, механічних і хімічних процесів, що розгортаються у просторі й часі та піддаються впливу багатьох змінних факторів. Ефективне керування таким об'єктом потребує глибокого розуміння внутрішніх фізичних процесів, їх взаємодії, а також побудови гнучкої, стійкої і точної системи автоматизації.

## 2.2 Математичне моделювання процесу випалювання

Математичне моделювання процесу випалювання у тунельній печі є необхідним етапом для побудови ефективної системи автоматизації, оскільки дає змогу описати динамічну поведінку об'єкта у вигляді сукупності фізичних закономірностей і спрощених рівнянь. [9-10] Основним процесом, що визначає зміну температурного поля всередині печі та випалюваного матеріалу, є передача тепла шляхом теплопровідності, конвекції та випромінювання. Саме ці механізми визначають швидкість нагрівання виробів, стабільність температурного режиму та енергоефективність усього виробничого процесу.

Для спрощеного опису теплової поведінки тунельної печі часто використовується одновимірний модель теплопередачі, яка базується на рівнянні нестационарної теплопровідності:

$$\frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2}$$

де  $T(x, t)$  — температура у точці  $x$  у момент часу  $t$ ,  $\alpha$  — коефіцієнт температуропровідності матеріалу, що визначається як  $\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p}$ , де  $\lambda$  —

коефіцієнт теплопровідності,  $\rho$  — густина матеріалу,  $c_p$  — питома теплоємність при сталому тиску.

З огляду на велику протяжність тунельної печі та відносно стабільний процес транспортування виробів, можна також розглядати перехід до моделі з рухомими координатами, де розгляд температури ведеться відносно виробу, що рухається зі швидкістю  $v$ . У цьому випадку рівняння теплопередачі набуває вигляду:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + v \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

Таке рівняння є класичним прикладом конвективно-дифузійної задачі і добре описує поведінку температурного поля всередині печі за умови рівномірного руху візків.

Окрім теплопередачі через тверді тіла, важливим є опис теплообміну між газовим середовищем печі та поверхнею виробів. Цей процес можна змодельовати за допомогою умов третього роду:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = h(T_{\text{пов}} - T_{\text{газ}})$$

де  $h$  — коефіцієнт тепловіддачі конвекцією,  $T_{\text{пов}}$  — температура поверхні виробу,  $T_{\text{газ}}$  — температура газового середовища,  $\frac{\partial T}{\partial n}$  — градієнт температури у напрямку нормалі до поверхні.

Суттєвим у моделюванні є врахування теплового випромінювання, яке в тунельних печах має значний вплив, особливо у високотемпературних зонах. Потужність теплового потоку через випромінювання описується законом Стефана-Больцмана:

$$q_{\text{рад}} = \varepsilon \sigma (T_{\text{пов}}^4 - T_{\text{газ}}^4)$$

де  $\varepsilon$  — коефіцієнт випромінювання поверхні,  $\sigma$  — стала Стефана-Больцмана ( $5.67 \times 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{К}^4)$ ).

Таким чином, для повного опису теплової взаємодії у печі необхідно враховувати комбінацію трьох основних механізмів: теплопровідності, конвекції та випромінювання. В умовах практичного моделювання повна система рівнянь може бути надто складною для використання у системах керування в реальному часі, тому часто вдаються до спрощення моделі.

Одним із поширених методів є використання так званої ланцюгової теплової моделі, в якій піч поділяється на умовні секції або "зони", кожна з яких описується простою лінійною або квазілінійною динамічною моделлю. Кожна зона може бути подана у вигляді передатної функції першого або другого порядку:

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1}$$

де  $K$  — коефіцієнт підсилення системи,  $\tau$  — стала часу, що характеризує інерційність зони.

Динамічна поведінка тунельної печі як об'єкта керування характеризується великою інерційністю, що проявляється у повільній реакції температурного поля на зміни вхідних впливів, таких як подача палива чи повітря. Це обумовлено значною теплоємністю системи — великим об'ємом нагрітої маси (стінки печі, вогнетривкі матеріали, самі вироби), яка здатна акумулювати тепло і повільно змінювати свій тепловий стан.

З погляду систем автоматичного керування, поведінку тунельної печі часто зручно описувати моделями із затримкою. Така затримка ( $T_d$ ) відображає час, що проходить між зміною вхідного сигналу і початком помітної реакції об'єкта. У простому вигляді динаміка печі може бути змодельована передатною функцією вигляду:

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-T_d s}$$

де  $K$  — коефіцієнт підсилення,  $\tau$  — стала часу,  $T_d$  — часова затримка.

Така передатна функція є типовою для процесів із великою інерційністю і є основою для проектування регуляторів температури у тунельних печах. Практично це означає, що навіть після зміни подачі газу або повітря оператор або автоматична система фіксує зміну температури тільки через певний час, що ускладнює процес керування і вимагає використання спеціальних методів компенсації затримок.

Ще одним підходом для моделювання є використання рівнянь балансу енергії для окремих ділянок печі. Записуючи баланс теплоти, можна описати зміну температури з урахуванням притоку тепла, тепловтрат і теплообміну між виробами та середовищем:

$$\rho V c_p \frac{dT}{dt} = Q_{\text{вх}} - Q_{\text{втрати}} - Q_{\text{обмін}}$$

де  $Q_{\text{вх}}$  — потужність тепла, що подається у зону,  $Q_{\text{втрати}}$  — теплові втрати через стінки печі та інші шляхи витоку,  $Q_{\text{обмін}}$  — передача тепла від газу до виробів.

У деяких випадках також використовується дискретне моделювання, де простір печі поділяється на окремі елементи (комірки), для яких складаються алгебраїчні або різницеві рівняння на кшталт:

$$T_i(t + \Delta t) = T_i(t) + \Delta t \left( \alpha \frac{T_{i-1}(t) - 2T_i(t) + T_{i+1}(t)}{(\Delta x)^2} + S_i \right)$$

де  $S_i$  — джерело тепла у комірці  $i$ , яке може враховувати подачу палива або теплові втрати.

Такі підходи дозволяють отримати чисельні рішення для розподілу температури у просторі та часі, що є особливо важливим для симуляції роботи печі при розробці систем автоматизації.

Під час побудови моделей важливо обирати рівень деталізації залежно від задачі. Для регулювання температури в реальному часі зазвичай достатньо

моделей першого порядку з урахуванням затримки. Якщо ж ставиться завдання прогнозування якості випалу або оптимізації процесу, може знадобитись складніша модель із урахуванням нерівномірностей потоку газу, випаровування вологи із виробів, складних хімічних перетворень.

Таким чином, математичне моделювання процесу випалювання у тунельній печі формує базу для розробки ефективної системи автоматизації, дозволяючи точно враховувати особливості теплових процесів, інерційність об'єкта та можливі зовнішні збурення. Саме через грамотне моделювання можна досягти стабільної якості випалу при мінімальних витратах енергії та часу.

### 2.3 Особливості об'єкта керування

Особливості тунельної печі як об'єкта керування визначаються насамперед великою інерційністю, затримками у реагуванні на керуючі впливи та суттєвим впливом зовнішніх і внутрішніх збурень. Ці фактори суттєво ускладнюють процес побудови системи автоматизації і пред'являють до неї особливі вимоги.

Велика інерційність системи означає, що будь-які зміни у подачі тепла або повітря в піч не призводять до миттєвих змін температури середовища чи виробів. Причиною цього є висока теплоємність конструкцій печі, цегли, а також повільні процеси теплопередачі всередині матеріалів. На практиці це проявляється у тому, що між моментом зміни вхідного впливу та початком змін температури може проходити значний час. Така поведінка є класичним прикладом об'єкта з великим часовим запізненням.

Затримки в системі погіршують керованість процесу і можуть спричинити проблеми зі стабільністю регулювання. Якщо система автоматичного регулювання діє занадто агресивно, не враховуючи затримку, це може призвести до перерегулювання, коливань температури і навіть до нестійкості всього процесу. З іншого боку, надто інертне керування уповільнює досягнення заданого режиму і знижує продуктивність печі. Таким чином, при проєктуванні

САР тунельної печі необхідно обов'язково враховувати наявність затримок, наприклад, використовуючи адаптивні або спеціально налаштовані регулятори.

Збурення в системі випалювання можуть мати різний характер. Внутрішні збурення включають нерівномірність якості вихідної сировини, неоднорідність вкладення виробів у піч або коливання вологості. Зовнішні збурення пов'язані зі змінами температури зовнішнього середовища, коливаннями тиску газу або змінною ефективністю роботи пальників. Усі ці фактори змінюють тепловий баланс печі і вимагають, щоб система керування була здатна швидко компенсувати такі впливи.

Особливо небезпечним є так зване збурення запізненням: коли зміна вхідного параметра або зовнішнього середовища спочатку не помітна, а потім різко проявляється. Це робить традиційні методи регулювання менш ефективними. У таких випадках можуть використовуватися методи передбачення, наприклад, предиктивне керування на основі моделей (Model Predictive Control, MPC), де система аналізує прогнозований стан печі наперед і обирає найкращу дію з урахуванням майбутнього розвитку подій.

З математичної точки зору, поведінка об'єкта характеризується наявністю суттєвого запізнення між керуючим впливом і відповіддю системи, а також великою сталою часу динаміки. Це означає, що при зміні вхідних сигналів температура в печі реагує повільно і з відстрочкою, що значно ускладнює процес стабільного регулювання. При моделюванні таких систем необхідно враховувати і інерційність, і затримки, оскільки саме їх наявність визначає типові труднощі при налаштуванні автоматичного керування. Спрощені математичні моделі описують цей вплив через відповідні часові характеристики без заглиблення у точні формули, натомість акцентуючи увагу на їхніх фізичних проявах у реальному технологічному процесі.

Ще однією особливістю є так звана розподілена інерційність об'єкта: температура змінюється не миттєво у всьому об'ємі печі, а поступово поширюється від гарячих зон до холодних. Тобто система є не просто інерційною, а ще й просторово розподіленою. Це додає складності при контролі

якості випалу вздовж довжини печі, адже однакове керуюче зусилля може викликати різний ефект у різних місцях печі.

Зазначені особливості обумовлюють необхідність застосування спеціальних методів у проектуванні системи автоматизації. Для боротьби з інерційністю часто використовуються уповільнені зміни завдання або введення фільтрів на керуючі дії. Для компенсації затримок можуть застосовуватися предиктори Сміта або інші методи попереднього коригування. У разі значних збурень можливе впровадження систем багатоконтурного керування, де окремі регулятори працюють на стабілізацію різних параметрів процесу.

Розуміння та правильний облік інерційності, затримок і збурень у процесі випалювання є критично важливими для досягнення стабільної якості продукції, мінімізації енергетичних витрат та забезпечення безпеки експлуатації тунельної печі.

Загалом процес випалювання в тунельній печі як об'єкт керування вимагає особливо уважного ставлення до особливостей його динаміки. Велика теплова інерційність означає, що температура змінюється повільно навіть за значних змін керуючих параметрів. Це накладає обмеження на швидкість регулювання та потребує попередження перегріву або переохолодження за рахунок заздалегідь передбачених коригувальних дій. Затримки у передачі тепла й енергетичні збурення обумовлюють потребу в стійких алгоритмах керування, здатних забезпечити заданий температурний профіль незалежно від внутрішніх і зовнішніх змін.

Важливим також є те, що вплив збурень не завжди миттєво проявляється у зміні температури матеріалу або середовища. Через це ефективна система автоматизації повинна не лише реагувати на поточні відхилення, але й мати здатність до передбачення розвитку ситуації. У багатьох випадках це досягається впровадженням механізмів прогнозування або адаптивного налаштування параметрів регулювання.

Оскільки в тунельній печі одночасно присутні декілька зон з різними температурними режимами, додатковим ускладненням є взаємний вплив зон

одна на одну. Наприклад, зміна витрати повітря в зоні випалювання може призвести до зниження температури в зоні попереднього нагрівання. Тому систему керування слід проектувати з урахуванням багатозонності процесу і можливості координації дій у різних частинах печі.

Таким чином, тунельна піч є типовим прикладом об'єкта з високою інерційністю, значними затримками у реакції на впливи та складною багатозонною структурою. Всі ці особливості вимагають від системи автоматизації гнучкості, адаптивності та здатності працювати в умовах нестабільного середовища. Розуміння цих характеристик є основою для подальшого визначення вимог до системи керування і вибору відповідних методів реалізації автоматизації.

## 2.4 Визначення вимог до системи автоматизації

Ефективне керування процесом випалювання в тунельній печі потребує чіткого визначення вимог до системи автоматизації. Враховуючи особливості об'єкта керування, такі як велика інерційність, наявність затримок і вплив зовнішніх збурень, система повинна забезпечувати не тільки стабільність температурних режимів у всіх зонах печі, але й гнучке пристосування до змін умов процесу.

Основною метою автоматизації є підтримання оптимального температурного профілю випалювання протягом усього проходження матеріалу через піч. Температурний профіль має відповідати технологічним вимогам виробництва цегли, де кожен етап — нагрівання, випалювання, охолодження — вимагає точно визначених температурних інтервалів і швидкостей зміни температури. Будь-яке відхилення від заданого профілю може призвести до дефектів у готовій продукції, таких як тріщини, деформації або зниження міцності.

Система керування повинна забезпечувати високу точність регулювання температури, мінімізуючи як перевищення, так і недогрів відносно заданого

значення. Це вимагає використання регуляторів зі здатністю компенсувати інерційність об'єкта і зменшувати вплив запізнень у дії. Для досягнення таких характеристик можуть використовуватися ПІД-регулятори з корекцією параметрів, адаптивні системи або моделі прогнозування, що враховують тенденції зміни температури на основі поточних і минулих даних.

Важливою вимогою є також стійкість системи до збурень, зокрема до змін зовнішньої температури повітря, складу палива або коливань у витраті газу чи повітря для горіння. Система повинна оперативно виявляти відхилення і вносити коригування, що забезпечить підтримання стабільності процесу без ручного втручання.

Не менш істотною є вимога до енергоефективності процесу. Режими випалювання мають бути організовані так, щоб забезпечувати мінімальні витрати енергоносіїв при гарантованій якості продукції. Це означає, що система повинна оптимізувати роботу пальників, вентиляційних установок і механізмів переміщення матеріалу залежно від реальних умов процесу і завантаження печі.

Ще однією важливою вимогою є забезпечення рівномірності температурного поля в поперечному перерізі печі. Нерівномірне нагрівання матеріалу може призвести до появи внутрішніх напружень і дефектів. Для досягнення рівномірності потрібна система багатоточкового вимірювання температури і можливість локальної корекції режимів у різних зонах печі.

Ще однією обов'язковою вимогою є забезпечення високої надійності та безперервності функціонування системи. Зупинка тунельної печі через збої в системі керування може призвести до значних виробничих втрат і необхідності повторного випалювання матеріалу або його списання. Тому система повинна мати вбудовані механізми самодіагностики, сигналізації про несправності й автоматичного переходу в безпечний режим у випадку відхилень, що виходять за межі допустимих.

Умови роботи в тунельній печі вимагають від системи автоматизації здатності працювати в агресивному середовищі з високими температурами, запиленістю й вібраціями. Це накладає вимоги до вибору сенсорів, виконавчих

механізмів і обчислювальних пристроїв, що мають бути захищеними від зовнішніх впливів і мати тривалий термін служби.

Крім того, сучасні тенденції розвитку промислових систем автоматизації передбачають інтеграцію системи керування тунельною піччю у загальнозаводські інформаційні мережі. Це відкриває можливість централізованого моніторингу, збору статистичних даних про процес, аналізу енерговитрат і технічного стану обладнання. Таким чином, ще однією вимогою є можливість комунікації системи автоматизації за допомогою стандартних протоколів передачі даних, а також підтримка функцій архівації і віддаленого керування.

Необхідно передбачити також можливість налаштування системи під різні режими роботи печі залежно від виду продукції, що випалюється, і технологічних вимог конкретного виробництва. Гнучкість у зміні температурних профілів, налаштувань швидкості транспортування виробів і режимів вентиляції має забезпечуватися через зручний інтерфейс оператора або автоматичне завантаження попередньо підготовлених рецептів.

Окрему увагу слід приділити вимогам до швидкодії системи. З огляду на великі часові константи тунельної печі, надмірно швидке чи, навпаки, запізнile регулювання може призвести до виникнення нестабільних режимів або зниження ефективності випалювання. Тому алгоритми регулювання повинні бути налаштовані на врахування динаміки об'єкта таким чином, щоб уникати як перерегулювань, так і тривалих процесів виходу на заданий режим.

Підсумовуючи, система автоматизації випалювання в тунельній печі повинна відповідати комплексним вимогам точності, стабільності, енергоефективності, надійності й гнучкості. Її успішна реалізація є ключовим чинником забезпечення високої якості продукції, оптимізації виробничих витрат і підвищення конкурентоспроможності підприємства.

## РОЗДІЛ 3

### РОЗРАХУНКИ ТА ВИБІР ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ

#### 3.1 Моделювання об'єкта автоматизації

Автоматичний регулятор - це технічний пристрій, призначений для підтримки заданого температурного діапазону в тунельній печі конвеєрного типу. Для виконання поставленого завдання регулятор формує керуючий вплив, покликаний компенсувати вплив збурень на режим роботи системи. На рис.3.1 показана схема температури САР в тунельній печі конвеєрного типу для випалювання цегли.

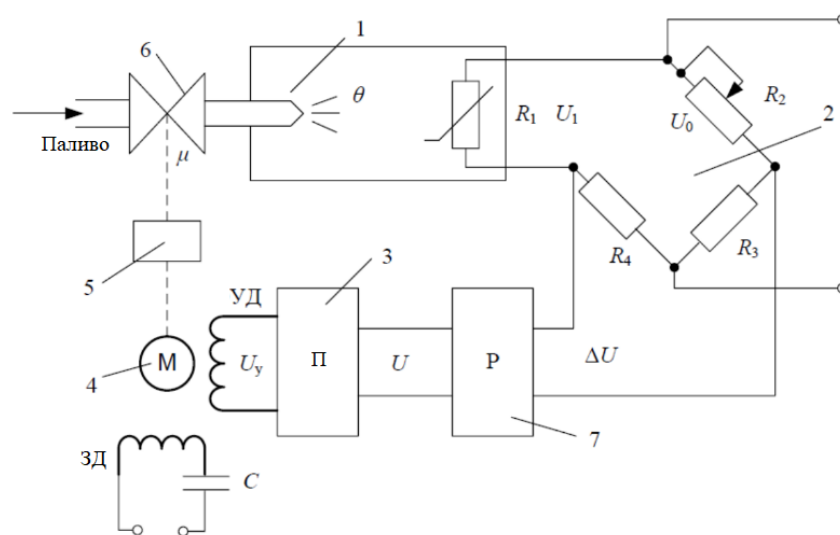


Рисунок 3.1 - Схема САР

На цьому рисунку цифрами позначені: 1 - піч; 2 - схема вимірального моста; 3 - диференціальний магнітний підсилювач; 4 - двофазний електродвигун; 5 - редуктор; 6 - клапан; 7 - регулятор.

В даній системі тунельна піч є об'єктом управління, регульованим значенням якого є температура  $\theta$ , а регулюючим (керуючим) впливом є лінійний рух  $\mu$  клапана, величина якого визначає кількість палива, що подається в форсунку (кількість тепла). Зовнішній збурюючий ефект  $f$  являє собою

сукупність різних факторів: початкової вологості, температури обпаленої цегли, зміни температури і вологості атмосферного повітря.

При вивченні системи можна обмежитися врахуванням впливу початкової вологості цегли на об'єкт регулювання, розглядаючи його як основний збурюючий вплив. Мостова схема порівнює напругу  $U_1$ , пропорційну температурі в тунельній печі конвеєрного типу  $\theta$ , з задаючою напругою  $U_0$ .

Крім функцій ведучого органу, він виконує функції порівняльного органу (елемента). На регулятор (Р) подається напруга небалансу мостового ланцюга  $\Delta U$  (сигнал неузгодженості), синтез якого треба виконати в процесі роботи.

Керуюча дія  $U$  посилюється підсилювачем (П), вихідна напруга якого управляється виконавчим двигуном (М). Останній переміщує клапан через редуктор, тобто змінює регулюючу дію  $\mu$ , на вході в об'єкт регулювання.

Динамічні властивості регульованого об'єкта і елементів САР описуються наступними рівняннями:

$$T_0 \frac{d\theta}{dt} + \theta = k_0 \mu - k_1 f - \text{об'єкт регулювання};$$

$$U = k_2 \theta - \text{датчик температури};$$

$$T_1 \frac{dU_y}{dt} + U_y = k_3 U - \text{магнітний підсилювач};$$

$$\Delta U = U_0 - U_1 - \text{порівняльний орган}$$

$$T_2 \frac{d^2\mu}{dt^2} + \frac{d\mu}{dt} = k_4 U - \text{виконавчий двигун з редуктором і клапаном}.$$

Тут  $T_0, T_1, T_2$  - постійні часу, с;  $\theta$  - значення температури печі, °С;  $k_0, k_1, k_2, k_3, k_4$  - коефіцієнти передачі;  $\mu$  - лінійне переміщення клапана, см;  $f$  - збурюючий вплив на об'єкт регулювання;  $U_1$  - падіння напруги на терморезисторі, В;  $U_0$  - падіння напруги на головному резисторі  $R_2$ , В;  $\Delta U$  - сигнал розбалансу мостової схеми (сигнал розбіжності), В;  $U_y$  - вихідна напруга підсилювача, В. Значення параметрів САР наведені в табл.3.1. Вихідна напруга магнітного підсилювача обмежена 200 В. Задане значення температури в тунельній печі конвеєрного типу становить 950°С.

Таблиця 3.1 - Основні параметри САР

| $T_0, \text{с}$ | $k_0, \frac{\text{°C}}{\text{см}}$ | $k_1, \frac{\text{°C}}{\%}$ | $k_2, \frac{\text{В}}{\text{°C}}$ | $k_3$ | $T_2, \text{с}$ | $k_4, \frac{\text{см}}{\text{В с}}$ | $f, \%$ | $T_1, \text{с}$ | $v, \%$ | $\sigma, \%$ |
|-----------------|------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|-------|-----------------|-------------------------------------|---------|-----------------|---------|--------------|
| 4,5             | 10                                 | 15                          | 1,4                               | 2     | 0,026           | 0,01                                | 45      | 0,06            | 0,5     | 30           |

Якщо взяти рівняння, що описує об'єкт управління, та перетворити його, прийнявши  $\frac{d}{dt} = p$ , то отримаємо

$$(T_0 p + 1)\theta = k_0 \mu - k_1 f.$$

У цьому випадку власний оператор виглядає так:

$$Q(p) = T_0 p + 1.$$

Оператор впливу по входу  $\mu$ :

$$P_1(p) = k_0$$

Оператор впливу по входу  $f$ :

$$P_2(p) = -k_1$$

Тоді передавальна функція по входу  $\mu$  така:

$$W_{об}(p) = \frac{P_1(p)}{Q(p)} = \frac{k_0}{T_0 p + 1}$$

А передавальна функція по збудженню:

$$W_{зб}(p) = \frac{P_2(p)}{Q(p)} = -\frac{k_1}{T_0 p + 1}.$$

Аналогічно робимо з магнітним підсилювачем. Його передавальна функція по входу  $U$ :

$$W_{му}(p) = \frac{P(p)}{Q(p)} = \frac{k_3}{T_1 p + 1}$$

По аналогії можна отримати й інші передавальні функції. Зокрема передавальна функція датчику температури має вигляд:

$$W_{\theta}(p) = k_2.$$

Передавальна функція виконавчого двигуна з редуктором та клапаном має такий вигляд:

$$W_{двиг}(p) = \frac{k_4}{T_2 p^2 + p}$$

Якщо створити передавальну функцію розімкнутої системи по управляючому впливу, то треба перемножити між собою відповідні передавальні функції окремих елементів:

$$W_{u\theta p}(p) = W_{my} W_{опис} W_{об} = \frac{k_0 k_3 k_4}{(T_1 p + 1)(T_2 p^2 + p)(T_0 p + 1)} = \frac{k_0 k_3 k_4}{T_1 T_2 T_0 p^4 + (T_2 T_0 + T_1 T_2 + T_1 T_0) p^3 + (T_2 + T_0 + T_1) p^2 + p}$$

Для замкнутої системи передавальна функція має такий вигляд:

$$W_{u\theta z}(p) = \frac{W_{u\theta p}}{1 - W_{конт}}$$

$$W_{конт}(p) = -W_{my} W_{опис} W_{об} W_{\delta} = -W_{\delta} W_{u\theta p} = -\frac{k_0 k_2 k_3 k_4}{T_1 T_2 T_0 p^4 + (T_2 T_0 + T_1 T_2 + T_1 T_0) p^3 + (T_2 + T_0 + T_1) p^2 + p}$$

$$W_{u\theta z}(p) = \frac{k_0 k_3 k_4}{T_1 T_2 T_0 p^4 + (T_2 T_0 + T_1 T_2 + T_1 T_0) p^3 + (T_2 + T_0 + T_1) p^2 + p + k_0 k_2 k_3 k_4}$$

Для розімкнутої системи по збуджуючому впливу:

$$W_{f\theta p}(p) = -\frac{k_1}{T_0 p + 1}$$

В замкнутому вигляді:

$$W_{f\theta z}(p) = \frac{W_{f\theta p}(p)}{1 - W_{конт}(p)}$$

$$W_{конт}(p) = -W_{my} W_{опис} W_{об} W_{\delta} = -W_{\delta} W_{u\theta p} = -\frac{k_0 k_2 k_3 k_4}{T_1 T_2 T_0 p^4 + (T_2 T_0 + T_1 T_2 + T_1 T_0) p^3 + (T_2 + T_0 + T_1) p^2 + p}$$

$$W_{f\theta z}(p) = -\frac{k_1 (T_1 T_2 p^3 + (T_2 + T_1) p^2 + p)}{T_1 T_2 T_0 p^4 + (T_2 T_0 + T_1 T_2 + T_1 T_0) p^3 + (T_2 + T_0 + T_1) p^2 + p + k_0 k_2 k_3 k_4}$$

### 3.2 Дослідження стійкості системи

Спробуємо оцінити значення коефіцієнта підсилювача. У разі, коли є змінні параметри, від цих параметрів залежать корені характеристичного рівняння системи, а простір параметрів можна розділити на області, які відповідають фіксованому числу лівих коренів. Тому для визначення залежності стійкості системи від значень цього параметра скористаємося методом D-розбиття.

Візьмемо рівняння замкнутої системи без регулятора, позначимо коефіцієнт підсилювача ( $k_3$ ) як  $\mu$  та підставимо в передавальну функцію по управляючому впливу коефіцієнти з табл.3.1:

$$W_{u\theta z}(p) = \frac{0,1\mu}{0,00702 p^4 + 0,38856 p^3 + 4,586 p^2 + p + 0,14\mu}$$

Составимо характеристичний поліном замкнутої системи:

$$Q(\lambda) = 0,00702\lambda^4 + 0,38856\lambda^3 + 4,586\lambda^2 + \lambda + 0,24\mu$$

Оскільки коріння переходять з однієї півплощини в іншу через уявну вісь, то рівняння кривої D-розбиття виводимо з характеристичного рівняння  $Q(\lambda)=0$ , шляхом заміни  $\lambda = i\omega$ :

$$Q(i\omega) = 0,00702(i\omega)^4 + 0,38856(i\omega)^3 + 4,586(i\omega)^2 + (i\omega) + 0,24\mu = 0$$

Розв'язавши це рівняння щодо комплексного параметра  $\bar{\mu} = \mu + \mu'$  отримаємо:

$$\begin{aligned}\mu &= -0.3\omega^4 + 19,11041667\omega^2 \\ \mu' &= 1,679416667\omega^3 - 4,166666667\omega\end{aligned}$$

Проведемо моделювання в середовищі MatLab, для чого складемо програму для побудови кривої D-розбиття. Код представлено на рис.3.2.

```
mu=[]; mu1=[];
omega=0; i=1;
while omega <1000
mu(i)=-0.3*omega^4+19.11041667*omega^2;
mu1(i)=1.679416667*omega^3-4.166666667*omega;
omega=omega+0.01;
i=i+1;
end
plot(mu,mu1,mu,-mu1),grid on
```

Рисунок 3.2 - Програмний код для побудови кривої D-розбиття

В результаті виконання коду отримаємо графік кривої D-розбиття (представлений на рис.3.3). Бачимо, що система стійка при  $\mu > 0$ .

Припустимо, що коефіцієнт посилення дорівнює  $\mu = 5$ , проаналізуємо стійкість за критерієм Гурвіца:

$$Q(\lambda) = 0,00702\lambda^4 + 0,38856\lambda^3 + 4,586\lambda^2 + \lambda + 1,2$$

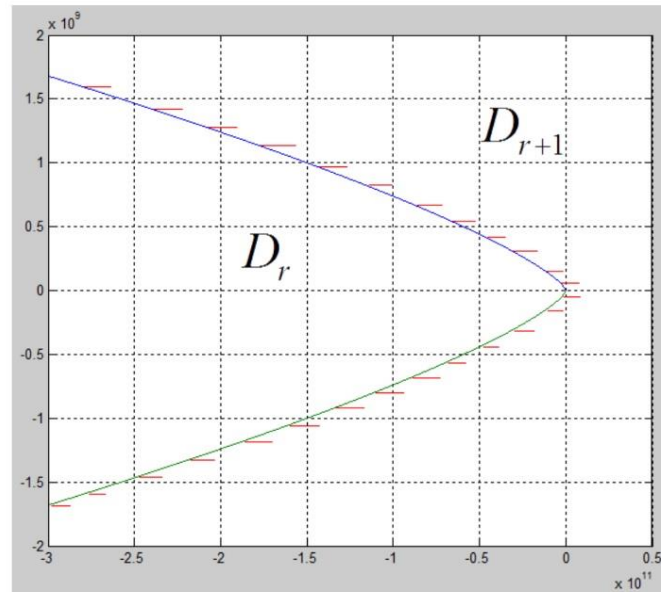


Рисунок 3.3 - Графік кривої D-розбиття

Оскільки всі коефіцієнти позитивні, то виконується необхідна умова стійкості. Відповідно до умов достатньо обчислити визначник  $\Delta_3$ :

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0,38856 & 1 & 0 \\ 0,0702 & 4,586 & 1,2 \\ 0 & 0,38856 & 1 \end{vmatrix} = 1,530561512 > 0$$

Отже, замкнута система є стійкою.

Тепер проаналізуємо стійкість на коефіцієнті  $\mu = -1$ :

$$Q(\lambda) = 0,00702\lambda^4 + 0,38856\lambda^3 + 4,586\lambda^2 + \lambda - 0,24$$

Оскільки коефіцієнт  $a_4 < 0$ , то необхідна умова стійкості не виконується, отже, при коефіцієнті  $\mu = -1$  система нестійка. Таким чином, підтверджується, що система стійка при значеннях коефіцієнта  $\mu > 0$ .

### 3.3 Розрахунок параметрів регулятора

Якщо підставити в рівняння передавальної функція системи в замкнутому вигляді значення коефіцієнтів з вхідних даних, то отримаємо таку передавальну функцію:

$$W_{\text{зв'яз}} = \frac{0,2}{0,00702p^4 + 0,38856p^3 + 4,586p^2 + p}$$

Для вирішення задачі синтезу, а саме, що перевищення регулювання не перевищує 30% і похибка як в керуючому, так і в збурюючому впливі дорівнює нулю, необхідно прийняти за нормалізовану ПФ, функцію з астатизмом третього порядку, так як він повинен відповідати нашим вимогам. Порядок астатизму 3, тобто  $\nu=3$ , і наш об'єкт містить одне інтегруючу ланку, тобто  $\nu_0 = 1$ , отримуємо, що степінь астатизму буде дорівнювати  $r = 3 - 1 = 2$ .

Візьмемо поліном знаменника шостої степені.

$$G_6(q) = q^6 + 36q^5 + 251q^4 + 485q^3 + 251q^2 + 26q + 1$$

Потрібна функція набуває вигляду:

$$W_n(q) = \frac{1}{q^6 + 36q^5 + 251q^4 + 485q^3 + 251q^2 + 26q + 1}$$

Чисельник і знаменник передавальної функції об'єкта розкладаються на множники:

$$W_{\text{об}}(s) = \frac{P(s)}{R(s)} = \frac{P^-(s)P^+(s)}{R^-(s)R^+(s)}$$

Поліноми з лівими нулями:

$$P^-(s) = 1, R^-(s) = 0,00702s^3 + 0,38856s^2 + 4,586s + 1$$

Поліноми з правими та нейтральними нулями:

$$P^+(s) = 0,2, R^+(s) = s$$

Степені всіх многочленів дорівнюють:

$$n_G = 6, n_{p^-} = 0, n_{p^+} = 0, n_{R^-} = 3, n_{R^+} = 1$$

Умови розв'язності мають вигляд:

$$\begin{cases} n_G \leq n_M + n_N + 1 \\ n_G = n_{R^+} + n_N + r \\ n_{R^-} + n_M \leq n_{p^-} + n_N + r \end{cases} \begin{cases} 6 \leq n_M + 3 + 1 \\ 6 = 1 + n_M + 2 \\ 3 + n_M \leq 0 + 3 + 2 \end{cases} \begin{cases} n_M \geq 2 \\ n_N = 3 \\ n_M \leq 2 \end{cases}$$

Ці умови виконуються, відповідно, при  $n_N = 3, n_M = 2$ :

$$N(s) = a_0 s^3 + a_1 s^2 + a_2 s + a_3,$$

$$M(s) = b_0 s^2 + b_1 s + b_2$$

При підстановці цих многочленів в поліноміальне рівняння воно набуває вигляду:

$$0,2(b_0 s^2 + b_1 s + b_2) + s^3(a_0 s^3 + a_1 s^2 + a_2 s + a_3) = q^6 + 36q^5 + 251q^4 + 485q^3 + 251q^2 + 26q + 1$$

Прирівнявши коефіцієнти при однакових степенях, отримаємо:

$$a_0 = 1, \quad b_0 = 1255,$$

$$a_1 = 36, \quad b_1 = 130,$$

$$a_2 = 251, \quad b_2 = 5.$$

$$a_3 = 485.$$

Отже:

$$N(s) = s^3 + 36s^2 + 251s + 485, \quad M(s) = 1255s^2 + 130s + 5$$

Підставляючи ці поліноми, отримаємо передавальну функцію регулятора:

$$W_p(s) = \frac{8,81010s^5 + 488,55540s^4 + 5805,97790s^3 + 1853,12280s^2 + 152,930s}{s^5 + 36s^4 + 251s^3 + 485s^2}$$

Зробимо модель системи в пакеті Simulink (рис.3.4).

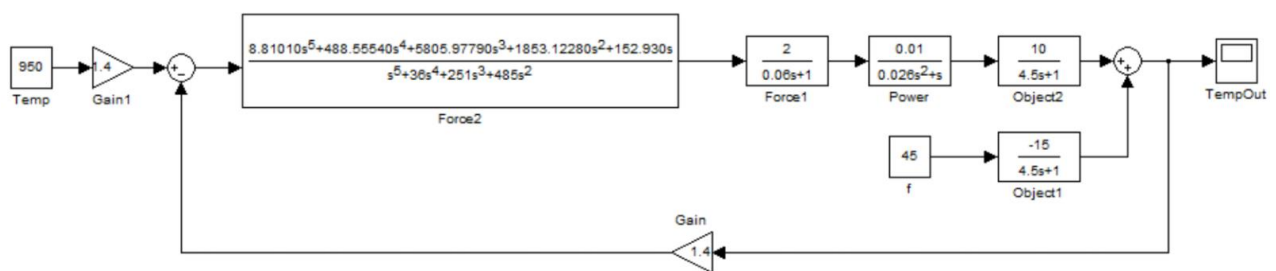


Рисунок 3.4 - Модель системи в Simulink

В зв'язку з тим, що регулятор є занадто складним, спробуємо спростити його, використовуючи пакет Python Control Systems Library. Є багато методів спрощення регуляторів, ми використовуємо метод підбору коефіцієнтів зі зберіганням точності. Код та результат його роботи наведені на рис. 3.5.

```

import control as ctrl

# Задаємо чисельник і знаменник передатної функції
num = [8.81010, 488.55540, 5805.97790, 1853.12280, 152.930, 0]
den = [1, 36, 251, 485, 0, 0]

# Створення передатної функції
G = ctrl.tf(num, den)

# Спрощення за допомогою minreal()
Gmin = ctrl.minreal(G, tol=5)

# Виведення результату
print("Спрощена передатна функція:")
print(Gmin)

```

3 states have been removed from the model  
Спрощена передатна функція:  
<TransferFunction>: sys[263]  
Inputs (1): ['u[0]']  
Outputs (1): ['y[0]']

$$\frac{8.81 s^2 + 485.7 s + 5648}{s^2 + 27.52 s}$$

Рисунок 3.5 - Код для спрощення регулятора

Таким чином, ми отримали спрощену передавальну функцію регулятора

$$W_p(s) = \frac{8.81s^2 + 491.5s + 5643}{s^2 + 27.52s}$$

Вона майже відповідає ПІД-регулятору, за виключенням знаменнику. Ми можемо перейти до ПІД-регулятора з фільтрацією похідної. Загальна формула в такому випадку має вигляд

$$G_{PID}(s) = \frac{K_d T_i T_f s^2 + K_d T_i s + K_i}{T_i T_f s^2 + T_i s}$$

Порівнюємо чисельники і знаменники з коефіцієнтами в нашому регуляторі. В чисельнику:

$$K_d T_i T_f = 8.81$$

$$K_d T_i = 491.5$$

$$K_i = 5643$$

В знаменнику:

$$T_i T_f = 1$$

$$T_i = 27.52$$

Через нескладні операції знаходимо значення коефіцієнтів:

$$K_i = 5643$$

$$K_d = 17.86$$

$$T_i = 27.52$$

$$T_f = 0.0363$$

Загальний коефіцієнт підсилення можемо визначити

$$K_p \cdot T_i = 5643 \Rightarrow K_p = \frac{5643}{27.52} \approx 205.11$$

Підставляємо коефіцієнти в загальну формулу і після обчислень отримаємо реалізацію у стандартному вигляді ПД-регулятора з фільтрацією похідної:

$$G_{PID}(s) = 205.11 + \frac{7.45}{s} + \frac{0.0871 \cdot s}{0.0363s + 1}$$

Поставимо цей регулятор в схему і спробуємо отримати перехідну характеристику системи при управляючому впливі 950 та збуренні 45. Результат розрахунків наведений на рис. 3.6.

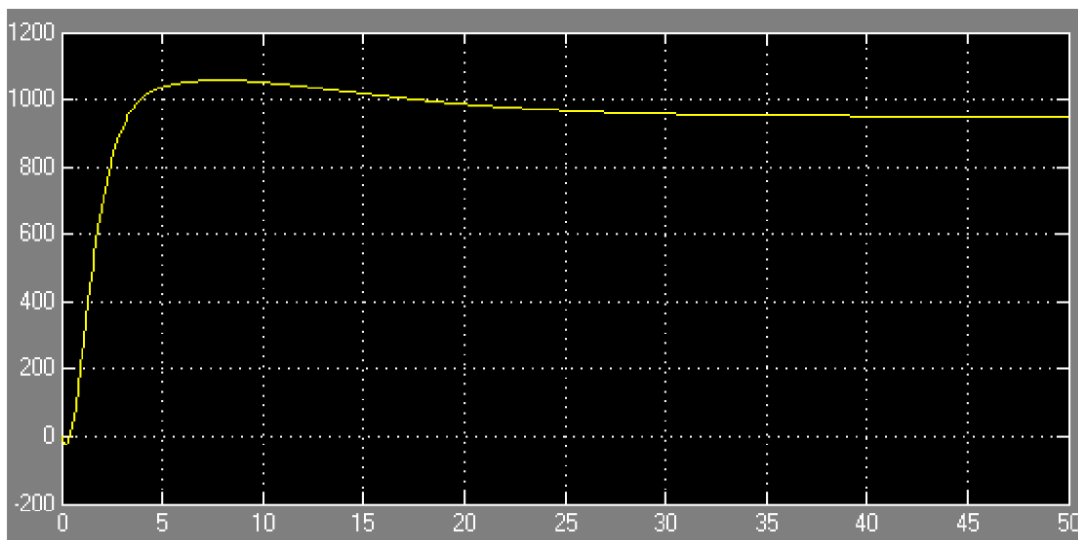


Рисунок 3.6 - Перехідна характеристика

Як бачимо - збурення вплинуло тільки на початковий момент управління. Потім система повністю нівелювала його вплив. Перерегулювання (максимум графіка) не перевищує  $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , тобто модуль різниці між  $950$  та  $1100$  складає менше, ніж  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  (менше  $15\%$ ). Час входу в стійкий режим ( $5\%$  від заданого) складає приблизно  $17\text{--}18\text{ с}$ .

Модель дозволяє проводити чисельні експерименти з різними вхідними сигналами. Так, моделювання системи з управляючим впливом  $700$  та збуренні  $30$  наведено на рис. 3.7.

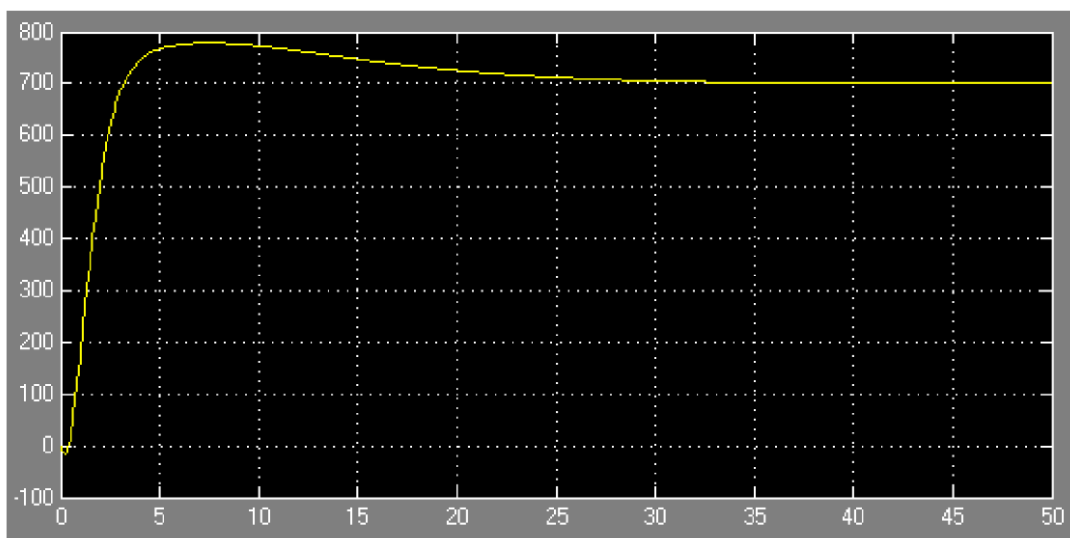


Рисунок 3.7 - Моделювання системи з іншими сигналами

Аналізуючи результати моделювання замкнутої системи в різних режимах, можна сказати, що похибки швидкості і положення дорівнюють нулю, перерегулювання не перевищує  $30\%$ . Синтезований регулятор відповідає вимогам, що пред'являються до нього.

### 3.4 Вибір датчиків та виконавчих механізмів

Автоматизація процесу випалювання в тунельній печі вимагає ретельного підбору відповідних датчиків і виконавчих механізмів, що забезпечують надійне та точне регулювання технологічного процесу. Система автоматичного

регулювання передбачає підтримання температури печі на заданому рівні 950°C за допомогою замкненого контуру керування, в основі якого лежить вимірювальна схема мостового типу, диференціальний магнітний підсилювач, двофазний електродвигун із редуктором і регулюючий клапан.

Вибір температурного датчика є критичним етапом, оскільки він безпосередньо впливає на точність і стабільність усієї системи. Для контролю температури до 950°C оптимальним рішенням є використання промислової термопари типу K або S. Такі термопари мають широкий робочий діапазон температур і забезпечують необхідну довготривалу стабільність. Такі термопари, наприклад Stainless Steel EGT Temperature Sensors Thermocouple K Type for Motor Exhaust Gas Temp Probe 1/8" NPT (рис.3.8), дозволяють працювати в середовищі з температурами до 1250°C, що створює достатній запас на випадок короткочасних перевищень температури в печі. [11]



Рисунок 3.8 - Термопара типу K до 1250°C

Вимірювальна схема базується на принципі мостового з'єднання резисторів. Одним із ключових елементів є терморезистор, що змінює свій опір залежно від температури печі. Щоб забезпечити необхідну чутливість і мінімізувати похибки, для побудови моста доцільно використовувати прецизійні дровові резистори з високою стабільністю, наприклад серії Vishay Dale RS (рис.3.9). Ці резистори мають дуже низький коефіцієнт температурного дрейфу, що є особливо важливим при експлуатації в умовах змінних температур і

електричних навантажень. Величина сигналу розбалансу мосту визначатиме вхідний сигнал для наступного каскаду підсилення. [12]



Рисунок 3.9 - Резистори з високою стабільністю

Диференціальний магнітний підсилювач у традиційній схемі мав би забезпечувати посилення сигналу до рівня, необхідного для керування електродвигуном. У сучасних умовах замість класичних магнітних підсилювачів доцільніше використовувати тиристорні регулятори або IGBT-модулі. Це пояснюється значно кращими показниками енергоефективності, швидкодії та надійності таких пристроїв. Наприклад, модулі Siemens Sirius 3RW (рис.3.10) забезпечують плавне керування асинхронними двигунами із мінімальними втратами потужності й високою надійністю комутації, що ідеально відповідає вимогам тунельних печей, де плавність регулювання потоку палива безпосередньо впливає на рівномірність нагріву виробів. [13]



Рисунок 3.10 - Пристрій плавного пуску Siemens Sirius 3RW

Двофазний електродвигун є основним виконавчим елементом, який приводить у дію регулюючий клапан подачі палива. Для такої задачі слід обирати двигуни, здатні забезпечити високу точність позиціонування і працювати у режимі безперервної експлуатації в умовах підвищеної температури навколишнього середовища. Ідеальним варіантом є двофазні серводвигуни серії КІІ виробництва Oriental Motor (рис.3.11), які характеризуються стабільною роботою, високим моментом на валу і можливістю керування малими кутами повороту. [14]



Рисунок 3.11 - Двофазні серводвигуни серії КІІ Oriental Motor

Для зменшення швидкості обертання і забезпечення плавності регулювання застосовується редуктор. Враховуючи специфіку процесу випалювання, де потрібні не тільки плавні, але й дуже точні зміни положення клапана, оптимальним є використання планетарних або черв'ячних редукторів із передавальним відношенням у межах 30:1–50:1. Такі редуктори, наприклад продукції Nord Drivesystems (рис.3.12), забезпечують високу ефективність передачі моменту при мінімальних вібраціях і зносі. [15] Їх конструкція дозволяє надійно працювати в умовах підвищених навантажень і температур.

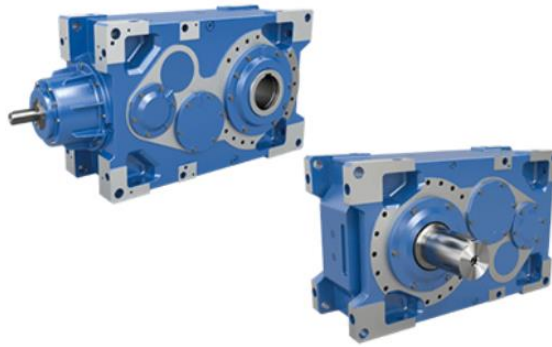


Рисунок 3.12 - Редуктори Nord Drivesystems

Регулюючий клапан у системі є одним із найважливіших виконавчих механізмів, оскільки безпосередньо впливає на подачу палива в піч і, відповідно, на температуру всередині робочої зони. З огляду на завдання точного регулювання витрати палива при роботі в умовах високої температури навколишнього середовища, найбільш придатними є клапани з електроприводом, що мають модульоване керування. Для цієї задачі доцільно вибрати електропривідні кульові або дискові клапани компаній Belimo або Siemens (наприклад, серія Siemens SKD – рис.3.13). [16] Вони забезпечують високу точність позиціонування, мають широкі можливості інтеграції з автоматизованими системами керування і стійкі до зносу при тривалій роботі.



Рисунок 3.13 - Клапан серії Siemens SKD

Конструктивно клапан повинен бути сумісним із застосованим типом палива і забезпечувати стабільну характеристику "витрата – відхилення штока". Враховуючи постійний режим роботи печі, важливо також передбачити можливість ручного дублювання керування клапаном у разі аварійних ситуацій

або виходу з ладу виконавчого механізму. У реальних умовах це часто реалізується за допомогою вбудованого ручного регулювання або можливості швидкого переключення на байпасний контур.

Що стосується вибору регулятора для замикання контуру автоматичного регулювання температури, класичний аналоговий регулятор може бути замінений сучасним мікропроцесорним терморегулятором, який має вбудовані ПД-алгоритми з можливістю налаштування параметрів. Непоганим варіантом для таких умов є контролери типу Siemens RWD68 (рис.3.14) або Omron E5CC. Вони здатні підтримувати температуру з мінімальним відхиленням, мають розширені функції діагностики і збереження налаштувань у разі збоїв живлення. [17]



Рисунок 3.14 - Контролер Siemens RWD68

Оскільки система повинна працювати з постійно діючими збуреннями, такими як зміни тиску або складу палива, важливо, щоб регулятор мав адаптивні функції або функції автоналаштування. Це дозволить мінімізувати відхилення температури навіть за змінних умов експлуатації. Крім того, в сучасних системах печей важливо передбачити можливість інтеграції регулятора в загальну систему диспетчеризації через інтерфейси Modbus або BACnet для централізованого контролю і збору даних про роботу печі.

Особливу увагу також необхідно приділити підсилювальному каскаду між мостовою схемою і електродвигуном. У випадку використання сучасних цифрових підсилювачів варто орієнтуватися на моделі, які мають вхідну

напругу, сумісну з сигналами  $\pm 10$  В або 4–20 мА, що є стандартом для промислової автоматизації. Це дозволить мінімізувати перешкоди та забезпечити стійкість сигналу в усьому діапазоні навантажень.

Інтеграція всіх підібраних елементів у загальну систему автоматичного регулювання тунельної печі повинна бути спрямована на досягнення максимальної точності та стабільності температурного режиму. На основі аналізу об'єкта керування видно, що найважливішими ланками, що визначають динаміку системи, є терморезистор як датчик температури, мостова вимірювальна схема, підсилювач, виконавчий механізм із клапаном і сам регулятор.

Параметри САР, наведені в табл. 3.1, визначають характер процесів у печі: відносно велика постійна часу об'єкта (4,5 с) і наявність інтегруючої ланки в моделі вимагають від регулятора компенсувати інерційність системи без надмірного перерегулювання. З огляду на значення коефіцієнтів передачі та відносно невеликі збурення (до 0,5 %), сучасні ПД-регулятори зі здатністю до тонкої настройки забезпечать належний рівень автоматизації. Використання термопари типу К та ПД-регулятора з функцією автонастройки дозволить системі адаптуватися до змін робочих умов, що особливо важливо для печей із непостійними характеристиками тепловіддачі.

Вибраний електродвигун і редуктор повинні забезпечити точне позиціонування клапана відповідно до команди з регулятора. При цьому двофазний двигун із системою керування типу "current vector control" дасть змогу досягти більшої точності і плавності регулювання навіть при малих переміщеннях штока клапана. Важливим аспектом є і час реакції виконавчого механізму: оскільки загальна постійна часу процесу не надто велика (4,5 с), затримка на спрацювання клапана не повинна перевищувати 0,5–1 с, що легко досягається сучасними електроприводами з хорошими характеристиками регулювання.

Система повинна бути спроектована таким чином, щоб мінімізувати вплив шумів і спотворень сигналу. Для цього слід використовувати диференційні входи

у підсилювачах та екрановані кабелі для датчиків температури. Крім того, потрібно передбачити правильне заземлення всіх елементів для захисту від імпульсних перешкод.

Отже, обрані елементи забезпечують відповідність всім основним вимогам до САР тунельної печі: точність підтримки температури, надійність, стабільність роботи в умовах тривалих теплових навантажень і готовність до інтеграції в загальну систему моніторингу. Правильний вибір сенсорів, регуляторів і виконавчих механізмів дозволяє забезпечити якісне функціонування печі з мінімальними витратами на обслуговування і високу ефективність енергоспоживання.

## РОЗДІЛ 4

### ОХОРОНА ПРАЦІ ТА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

Забезпечення безпечних умов праці на підприємствах, пов'язаних із роботою тунельних печей, має надзвичайно важливе значення для збереження здоров'я працівників та стабільної роботи технологічних процесів. Особливості роботи із високотемпературним обладнанням обумовлюють підвищений рівень ризику, що вимагає впровадження системних заходів безпеки на всіх етапах виробництва. Важливою складовою є створення надійного температурного контролю, що дозволяє уникнути перегрівів та аварійних ситуацій, які можуть спричинити шкоду персоналу чи обладнанню.

У тунельних печах температура всередині камери досягає значних значень, тому безпечна експлуатація передбачає не тільки правильну організацію роботи обладнання, а й належну підготовку операторів. Вони повинні бути обізнані щодо небезпек, що виникають під час випалювання матеріалів, та методів мінімізації ризиків. Особливу увагу приділяють забезпеченню працівників засобами індивідуального захисту, такими як вогнетривкий одяг, захисні рукавиці, взуття та окуляри, здатні витримувати високі температури. Крім того, необхідна відповідна вентиляція робочої зони для видалення продуктів згоряння та забезпечення комфортного мікроклімату.

Згідно з вимогами охорони праці, приміщення, де встановлено тунельну піч, повинно бути обладнане системами пожежогасіння та аварійного відключення живлення. Своєчасне технічне обслуговування вузлів системи є обов'язковим для запобігання несправностям, які можуть призвести до надзвичайних ситуацій. Системи автоматичного контролю температури та сигналізації перевищення граничних значень мають бути інтегрованими у процес керування та відповідати сучасним стандартам безпеки.

Робочі процеси в зоні печей супроводжуються також фізичними навантаженнями, тому організація режиму праці й відпочинку, забезпечення

правильних інструктажів та контроль за дотриманням технологічної дисципліни є необхідними умовами підтримання нормальної працездатності персоналу. Особи, які працюють з печами, проходять обов'язковий медичний огляд та інструктажі з охорони праці перед допуском до виконання робіт.

Окрему увагу приділяють електробезпеці, оскільки системи автоматизації та електричні приводи в складі тунельної печі працюють під напругою. Усі електротехнічні пристрої повинні мати заземлення відповідно до вимог нормативних документів. Регулярна перевірка стану ізоляції, правильність підключення та справність автоматичних вимикачів є обов'язковими умовами безпечної експлуатації електричних мереж. Працівники, допущені до обслуговування електрообладнання, повинні мати відповідну кваліфікаційну групу з електробезпеки та проходити періодичне навчання.

Ще одним суттєвим аспектом є захист від механічних травм під час обслуговування приводних механізмів печі. Редуктори, клапани й двигуни повинні бути оснащені захисними кожухами та мати обмежений доступ сторонніх осіб. Під час проведення ремонтних чи налагоджувальних робіт необхідно застосовувати блокування електроживлення, щоб уникнути випадкового ввімкнення обладнання.

Для охорони навколишнього середовища треба зменшувати негативний вплив технологічного процесу на довкілля. Робота тунельних печей супроводжується викидом тепла, газів та пилу, тому потрібно впроваджувати системи очищення вихідних газів та мінімізувати втрати теплової енергії. Використання сучасних методів теплоізоляції та рекуперації тепла сприяє підвищенню енергоефективності процесу та знижує викиди в атмосферу.

Організація регулярного екологічного моніторингу, контроль за якістю повітря в робочій зоні та впровадження заходів енергоощадності стають важливими частинами екологічної політики підприємства. Усі заходи з охорони праці та захисту навколишнього середовища повинні бути закріплені в нормативно-технічній документації підприємства та регулярно переглядатися з урахуванням змін у законодавстві та розвитку технологій.

Забезпечення пожежної безпеки є ще одним важливим аспектом під час експлуатації тунельних печей та їхніх систем автоматизації. Враховуючи високі температури технологічного процесу та можливість накопичення горючих матеріалів у зоні печі, необхідно передбачити систему автоматичного пожежогасіння або, принаймні, оснащення робочої зони достатньою кількістю первинних засобів пожежогасіння. Всі працівники повинні бути ознайомлені з інструкціями з пожежної безпеки, проходити регулярні навчання щодо дій у випадку виникнення пожежі, а евакуаційні виходи повинні бути вільними і чітко позначеними.

Вентиляція робочої зони має забезпечувати ефективне видалення продуктів горіння та зниження концентрації шкідливих газів. Наявність локальних витяжних систем поблизу джерел тепла та відкрити нагрівальні поверхні допомагає підтримувати безпечний мікроклімат у робочому просторі. Температура в приміщенні повинна регулюватися таким чином, щоб уникати перегріву повітря і забезпечувати комфортні умови праці для персоналу.

Організація робочого місця повинна відповідати ергономічним вимогам, щоб знизити ризик виникнення професійних захворювань. Оператори, які працюють з автоматизованими системами керування, повинні мати достатню візуальну інформацію про стан об'єкта та зручний доступ до засобів управління. Робочі поверхні, пульти управління та екрани необхідно розташовувати на висоті, що відповідає фізіологічним параметрам працівників.

Таким чином, комплексна система заходів з охорони праці та навколишнього середовища в процесі експлуатації САР тунельної печі має будуватися на принципах безперервного вдосконалення, навчання персоналу, впровадження сучасних технологій захисту та постійного моніторингу виробничого середовища. Лише за таких умов можна досягти високого рівня безпеки праці, зменшити вплив на навколишнє середовище і підвищити загальну ефективність виробничого процесу.

## РОЗДІЛ 5

### ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

Економічна ефективність впровадження систем автоматизації у промисловому виробництві є одним із ключових чинників, що визначають доцільність модернізації технологічних процесів. У випадку тунельної печі конвеєрного типу, яка працює за складним термічним режимом і має високу енергоємність, застосування сучасної системи автоматичного регулювання температури дозволяє суттєво знизити витрати на енергоресурси, підвищити якість продукції, скоротити втрати та зменшити потребу в ручній праці.

Основними джерелами економічного ефекту від автоматизації є зменшення споживання електроенергії або палива, зниження відсотка браку, оптимізація витрат на заробітну плату персоналу, а також продовження ресурсу роботи обладнання за рахунок зменшення навантажень і стабілізації режимів. У сучасних умовах особливої актуальності набуває питання ефективного використання енергії, оскільки зростання її вартості безпосередньо впливає на собівартість продукції і рентабельність підприємства.

У традиційних умовах експлуатації печей без автоматизованої системи регулювання температура всередині печі змінюється нерівномірно, що призводить до неефективного споживання енергоресурсів. Часто оператор змушений завищувати температуру, аби компенсувати можливі відхилення і уникнути браку продукції. Це, у свою чергу, призводить до перевитрати електроенергії або палива, зростання зношування обладнання та погіршення умов праці. Крім того, ручне регулювання температури обмежує можливості оптимізації процесу в реальному часі.

Впровадження системи автоматичного регулювання температури, побудованої на основі використання точних датчиків, електронних підсилювачів, виконавчих механізмів із високою швидкістю та програмованих

регуляторів, забезпечує стаке підтримання заданого температурного профілю по довжині тунельної печі. Це дозволяє уникнути локальних перегрівів або недогрівів, забезпечуючи оптимальну якість випалу продукції при мінімальних витратах енергії.

Розглянемо базові розрахунки економічної ефективності. Вихідними даними для оцінки слугують встановлена потужність печі, вартість спожитої енергії, обсяг випуску продукції, середня кількість браку до автоматизації та після неї, а також витрати на персонал для обслуговування процесу випалу.

Припустимо, що встановлена потужність печі становить 500 кВт, середній час безперервної роботи – 24 години на добу, 30 діб на місяць. Вартість електроенергії для виробничих споживачів приймається на рівні 5 грн за кВт·год. За таких умов базове місячне споживання енергії становить:

$$500 \times 24 \times 30 = 360000 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

У разі перевитрати енергії на рівні 5% додаткові витрати енергії становитимуть:

$$360000 \times 0,05 = 18000 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

Фінансові втрати через перевитрату енергії складають:

$$18000 \times 5 = 90000 \text{ грн на місяць.}$$

При впровадженні автоматизації, коли перевитрата знижується до 1%, додаткові витрати становитимуть:

$$360000 \times 0,01 = 3600 \text{ кВт} \cdot \text{год,}$$

що дорівнює:

$$3600 \times 5 = 18000 \text{ грн на місяць.}$$

Таким чином, щомісячна економія на енергоресурсах становить:

$$90000 - 18000 = 72000 \text{ грн.}$$

Крім заощаджених коштів на енергоресурсах, важливо врахувати й інші аспекти, які можуть бути значними для підприємства. До впровадження автоматизації для підтримки температурного режиму у печі зазвичай необхідно витратити близько 2 годин на добу на контроль та регулювання параметрів температури. За умовною годинною ставкою праці персоналу 100 грн, витрати на оплату праці складатимуть:

$$2 \times 30 \text{ днів} \times 100 \text{ грн} = 6000 \text{ грн на місяць.}$$

Після впровадження автоматизації, завдяки точному контролю та програмованим налаштуванням, потреба в операторах знижується до 1 години на добу:

$$1 \times 30 \text{ днів} \times 100 \text{ грн} = 3000 \text{ грн на місяць.}$$

Таким чином, економія на заробітній платі персоналу складе:

$$6000 - 3000 = 3000 \text{ грн на місяць.}$$

Щомісячна загальна економія складе:

$$72\,000 + 3000 = 75\,000 \text{ грн.}$$

Річна економія (з урахуванням економії на енергоресурсах, праці та зниження зносу обладнання) складе:

$$75\,000 \times 12 = 900\,000 \text{ грн.}$$

Як бачимо, впровадження систем автоматизації у тунельній печі конвеєрного типу приносить значну економію для підприємства. Окрім прямої економії на енергоресурсах, що складає значну частину ефекту, автоматизація дозволяє знизити витрати на оплату праці персоналу, зменшити знос обладнання та оптимізувати процеси. Крім того, автоматизація підвищує якість продукції, знижує ймовірність браку та аварій, що також має позитивний вплив на загальну економіку підприємства, зменшуючи витрати на утилізацію або переробку дефектної продукції. Враховуючи ці фактори, автоматизація є вигідним і перспективним кроком для модернізації технологічних процесів.

Для розрахунку терміну окупності необхідно визначити початкові інвестиційні витрати на впровадження автоматизованої системи управління. Зазвичай це включає витрати на закупівлю обладнання, а також на монтаж і налаштування системи. Припустимо, що інвестиційні витрати на автоматизацію складають 500 000 грн. Тепер ми можемо обчислити термін окупності, який визначається за формулою:

$$\text{Термін окупності} = \text{Інвестиційні витрати} / \text{Щорічна економія}$$

Знаючи, що щорічна економія складає 900 000 грн, розрахунок буде виглядати наступним чином:

$$\text{Термін окупності} = 500000 / 900000 = 0,56 \text{ року} \approx 6,7 \text{ місяця}$$

Таким чином, термін окупності для впровадження автоматизованої системи управління тунельною піччю конвеєрного типу складає приблизно 6,7 місяця. Це свідчить про високу ефективність інвестицій, оскільки витрати на впровадження системи окупаються приблизно за півроку, що робить цей проект економічно вигідним для підприємства в короткостроковій перспективі.

## ВИСНОВКИ

В ході виконання кваліфікаційної роботи розроблена система автоматизованого керування процесом випалювання цегли в тунельній печі. Для цього вирішені наступні задачі:

1. Завдяки аналізу предметної області визначені особливості тунельних печей, схема їх роботи, розглянуті математичні моделі процесу випалювання, наведені вимоги до системи автоматизації.

2. По заданій схемі автоматичного регулятора температури побудована модель об'єкта автоматизації - розімкнутої та замкнутої системи, а також проведено дослідження стійкості системи.

3. Проведений синтез регулятора. Виявлено, що ПФ регулятора занадто складна, тому прийнято рішення про його спрощення. Спрощена модель регулятора є ПД-регулятором з фільтром похідної. Моделювання перехідної характеристики виявило, що поведінка системи задовільняє вимогам.

4. Обрані технічні засоби автоматики - датчики, виконавчі пристрої та мікроконтролерне обладнання.

5. Розроблені міри по охороні праці та навколишнього середовища, а також здійснений розрахунок економічної ефективності системи.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Тунельна піч. URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Тунельна\\_піч](https://uk.wikipedia.org/wiki/Тунельна_піч).
2. Тунельні печі. URL: <https://ekomakina.com.ua/ua/hlibopekarne-obladnannya/nove-obladnannya/obladnannya-dlya-vipichki/tunelni-pechi.html>.
3. Технологія виробництва цегли. URL: <https://cegla.if.ua/statiti/tekhnohiiia-vyrobnytstva-tsehly>.
4. Технологія виробництва червоної цегли. URL: <https://dom-kirpicha.com.ua/uk/tehnologiya-virobnictva-chervono%D1%97-cegli/>.
5. Які класифікації та принципи роботи тунельних печей. URL: <https://ua.superb-heater.com/info/what-are-the-classifications-and-working-princ-94284631.html>.
6. Сфера застосування та характеристики тунельної печі. URL: <https://ua.foodextrudermachine.com/news/the-scope-and-characteristics-of-tunnel-furnac-27506497.html>.
7. Будник А.Ф. Типове обладнання термічних цехів та діляниць: Навчальний посібник. – Суми: Вид-во СумДУ, 2008. - 212 с.
8. Частини тунельної печі. URL: <https://ua.superb-heater.com/info/what-are-the-parts-of-the-tunnel-furnace-40411418.html>.
9. С. М. Москвіна, Д. О. Ковалюк. Моделювання процесу випалювання цегли. Вісник ВПІ, вип. 6, с. 214–219, Листоп. 2010. URL: <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/287>.
10. Веселовський В. Б, Дреус А. Ю., Сяєв А. В. Математичне моделювання та методи розрахунку теплотехнологічних процесів: Навч. посіб. – Д.: Вид-во Дніпропетр. ун-ту, 2004. – 248 с.. URL: [https://mmf.dnu.dp.ua/wp-content/uploads/2020/01/text\\_pgd\\_posibnik.pdf](https://mmf.dnu.dp.ua/wp-content/uploads/2020/01/text_pgd_posibnik.pdf).
11. -100~1250°C Датчики температури EGT з нержавіючої сталі. Термопара типу К. URL: <https://vamplaza.com.ua/magazine/priladi-dlya-vimiryuvannya-ta-analizu/100-1250-c-datchiki-temperaturi-egt-z-17227127.html>.
12. Резистори SMD. URL: <https://silad.com.ua/ua/g105530721-rezistory-smd>.

13. Пристрої плавного пуску SIRIUS 3RW. URL: <https://www.siemens.com/ua/uk/produkty/avtomatyzatsiya-promyslovesti/puskorehulyuyucha-aparatura-sirius/sirius/sirius-hybrid/3rw-soft-starter.html>
14. Standard AC Motor KII Series. URL: <https://www.orientalmotor.com/products/pdfs/2012-2013/C/KII-Series-Brochure.pdf>
15. Мотор-редуктори Nord. URL: <https://galp.com.ua/motor-reduktori-nord>
16. SKD32.51 Електрогідравлічний привід. URL: <https://simat.com.ua/product-sk32-51>
17. RWD68 Універсальний контролер. URL: <https://simat.com.ua/product-rwd68>