

Національний університет «Полтавська політехніка
імені Юрія Кондратюка»

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та робототехніки

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра автоматичної, електроніки та телекомунікацій

(повна назва кафедри (предметів, циклових курсів))

Пояснювальна записка

до магістерської роботи

магістр

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему:

**«Розроблення та дослідження системи автоматичного керування для
термічної обробки металевих виробів»**

Виконав: студент 6 курсу, групи 601МЕ
спеціальності

141 – Електроенергетика, електротехніка
та електромеханіка

(цифра і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Федончук Д.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник Галай В.М.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Кислиця С.Г.

(прізвище та ініціали)

Інститут, факультет, відділення Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та робототехніки

Кафедра, циклова комісія автоматики, електроніки та телекомунікацій

Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр

Напрямок підготовки _____

(цифра і назва)

Спеціальність 141 - Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

(цифра і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
завідувач кафедри
автоматики, електроніки та
телекомунікацій

О.В. Шефер

"06" вересня 2025 року

ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Федончук Дмитру Володимировичу

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. **Тема проєкту (роботи)** Розроблення та дослідження системи автоматичного керування для термічної обробки металевих виробів".

керівник проєкту (роботи) Галай Василь Миколайович, к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по-батькові; науковий ступінь, місце роботи)

затверджена наказом вищого навчального закладу від № 1025-ф.а. від 03.09.25р.

2. **Строк подання студентом проєкту (роботи)** 13.12.25

3. **Вихідні дані до проєкту (роботи)** АСУ має забезпечувати такі показники призначення: отримання інформації про стан обладнання та параметри ТП від датчиків системи з інтервалом не більше 1с; відхилення маси деталей однієї порції деталей, що завантажуються в загартовану піч, від заданої, не повинно перевищувати - 0,5±2кг; відхилення температур не повинні перевищувати ± 5 °С від заданих значень; відхилення швидкостей конвеєрів, керованих частотними перетворювачами, повинні перевищувати ± 0,5% від заданого значення.

4. **Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)** 1. Призначення та мета створення АСУ. 2. Мета створення системи. 3. Характеристика об'єкта автоматизації. 4. Вимоги до системи. 5. Вибір методів керування. 6. Вибір технічного забезпечення. 7. Вибір програмного забезпечення та структури програмного забезпечення проєкту. 8. Розробка структурних схем. 9. Візуалізація технологічного процесу. 10. Дослідження теплових процесів у загартованій печі.

11. Дослідження систем керування електричних печей опору з нагрівачами.
 12. Дослідження регулятора температури електричної печі опору з обмеженням струму нагрівачів.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) 1. Схема функціональна електротермічної лінії; 2. Схема розподілу тепла в зоні нагрівання гартової печі; 3. Структурну схему зони нагрівання гартової печі; 4. Структурна схема САК температурою; 5. Графіки перехідних процесів; 6. Функціональна схема модернізованого регулятора температури; 7. Модель регулятора температури; 8. Перехідні процеси регулятора температури; 9. Мнемосхема електротермічної лінії; 10. Алгоритми роботи пристрою та програмна реалізація

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

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

7. Дата видачі завдання 06.09.25

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	1. Призначення та мета створення АСУ. 2. Мета створення системи. 3. Характеристика об'єкта автоматизації. 4. Вимоги до системи.	18.10.25	30%
2	5. Вибір методів керування. 6. Вибір технічного забезпечення. 7. Вибір програмного забезпечення та структури програмного забезпечення проекту. 8. Розробка структурних схем. 9. Візуалізація технологічного процесу.	17.11.25	60%
3	10. Дослідження теплових процесів у загартованій печі. 11. Дослідження систем керування електричних печей опору з нагрівачами. 12. Дослідження регулятора температури електричної печі опору з обмеженням струму нагрівачів.	13.12.25	100%

Студент


(підпис)

Федончук Д.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи)


(підпис)

Галай В.М.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

на кваліфікаційну роботу магістра
«Розроблення та дослідження системи автоматичного керування для
термічної обробки металевих виробів»

Робота містить 105 сторінок, 34 рисунків, 15 таблиць, 26 використаних джерел.

Ключові слова: автоматизована система керування, електротермічна лінія, термічна обробка, загартування, відпуск, математичне моделювання, регулювання температури, широтно-імпульсне регулювання, частотний перетворювач.

У роботі розроблено автоматизовану систему керування електротермічною лінією термічної обробки металевих виробів. Проведено аналіз технологічного процесу загартування та відпуску, визначено основні параметри, що впливають на якість готової продукції. Обґрунтовано доцільність застосування автоматизованого керування з метою підвищення точності підтримання температурних режимів, зниження впливу людського фактора та підвищення надійності роботи обладнання.

Виконано синтез структури автоматизованої системи керування, визначено її функціональні підсистеми та вимоги до технічного, програмного й інформаційного забезпечення. Розроблено математичну модель теплових процесів у загартовій печі, досліджено перехідні процеси та стійкість системи при дії збурювальних впливів. Запропоновано використання широтно-імпульсного регулювання для керування нагрівальними елементами та частотного регулювання для керування приводами конвєсєрів.

Отримані результати підтверджують ефективність запропонованих рішень та можливість забезпечення стабільних технологічних параметрів, що сприяє підвищенню якості термообробки виробів і ефективності функціонування електротермічної лінії.

ABSTRACT

For the Master's qualification thesis
"DEVELOPMENT AND RESEARCH OF AN AUTOMATIC CONTROL
SYSTEM FOR HEAT TREATMENT OF METAL PRODUCTS"

The thesis contains 105 pages, 34 figures, 15 tables, and 26 references.

Keywords: automated control system, electrothermal line, heat treatment, quenching, tempering, mathematical modeling, temperature control, pulse-width modulation, frequency converter.

The paper presents the development of an automated control system for an electrothermal line used in the heat treatment of metal products. The technological processes of quenching and tempering are analyzed, and the main parameters affecting product quality are identified. The feasibility of implementing automated control is substantiated in order to improve the accuracy of temperature control, reduce the influence of the human factor, and increase equipment reliability.

The structure of the automated control system is synthesized, and its functional subsystems as well as requirements for hardware, software, and information support are defined. A mathematical model of thermal processes in the quenching furnace is developed, transient processes and system stability under disturbance effects are investigated. The use of pulse-width modulation for heater control and frequency control for conveyor drives is proposed.

The obtained results confirm the effectiveness of the proposed solutions and the possibility of ensuring stable technological parameters, which leads to improved heat treatment quality and increased efficiency of the electrothermal line operation.

	Зміст	
Вступ		7
РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ		9
1.1 Призначення та мета створення АСУ		9
1.2 Мета створення системи		10
1.3 Характеристика об'єкта автоматизації		10
1.3.1 Загальні відомості про об'єкт автоматизації		10
1.3.2 Відомості про умови експлуатації		11
1.4 Вимоги до системи		11
1.4.1 Вимоги до структури та функціонування системи		11
1.4.2 Вимоги до функцій системи		17
1.4.3 Вимоги до видів забезпечення		21
РОЗДІЛ 2. ТЕХНІЧНА ПРОПОЗИЦІЯ		24
2.1 Вибір методів керування		24
2.2 Вибір технічного забезпечення		48
2.3 Вибір програмного забезпечення та структури програмного забезпечення проекту		51
2.4 Розробка структурних схем		53
2.5 Візуалізація технологічного процесу		54
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ СИНТЕЗ ТА ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ АЛГОРИТМІВ РОБОТИ		56
3.1 Дослідження теплових процесів у загартованій печі		56
3.1.1 Побудова моделі нагрівання гартової печі		56
3.1.2 Модель нагрівача гартової печі		63
3.1.3 Побудова САР температури для зони нагрівання		65
3.1.4 Визначення коефіцієнтів передавальних функцій моделі нагрівання гартової печі та моделі нагрівача		68
3.1.5 Визначення передавальної функції датчика температури		70
3.1.6 Передавальна функція перетворювача		71
		5

3.2 Дослідження систем керування електричних печей опору з нагрівачами	72
3.3 Дослідження регулятора температури електричної печі опору з обмеженням струму нагрівачів	78
ВИСНОВОК	81
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	83
ДОДАТКИ	86

Вступ

У зв'язку з підвищенням технічних вимог якості металевих деталей, що виробляються для автомобільної промисловості, збільшився відсоток виробів, які не задовольняють даним вимоги і, отже, належать до браку. У технологічному процесі їх виготовлення можна відзначити, що найбільша кількість браку з'являється на завершальній стадії технологічної операції, а саме в процесі загартування. Щоб визначити причини, що породжують це явище, необхідно розглянути технологічний процес. Процес загартування складається з наступних стадій: загартування, миття та сушіння, відпуск. Для того щоб забезпечити високу якість продукції, потрібно ретельне дотримання технологічного процесу. Час і температура нагрівання повинні витримуватися з точністю до відсотка, також потрібно ретельно відстежувати стан технічних засобів, на яких проводиться термічна обробка. Однак більшість систем, що застосовуються сьогодні, не здатні забезпечувати задану точність. Крім того, якість оброблюваної продукції залежить від людського фактора. Оператор, який контролює виконання технологічного процесу, не може відслідковувати все безліч параметрів від яких залежить процес, оскільки займаючись тривалою і монотонною роботою швидко стає неуважним.

Інша проблема швидке усунення несправностей технічних засобів, що виникають у процесі роботи, і тривале переналадження обладнання при необхідності внести зміни в процес.

Тим не менш, на сьогоднішній день вже створені технічні засоби, за допомогою яких можна вирішити зазначені проблеми.

Застосування АСУ може забезпечити нормальний хід безперервно протікаючих процесів у системі управління процесом термообробки, звільнити оператора від безпосереднього виконання функцій управління процесом за рахунок передачі цих функцій автоматичним пристроям. Системи автоматизації будуються переважно з урахуванням промислових контролерів. Це зумовлено їхньою високою надійністю, і можливістю організувати систему

візуалізації техпроцесу, що у свою чергу дозволяє ретельно контролювати процес, швидко виявляти та усувати несправності, що виникають у процесі роботи. Таким чином, впровадивши систему автоматизації на основі програмованого логічного контролера можна вирішити задачу підтримки сталості параметрів техпроцесу, знизити роль людського фактора в процесі термообробки, скоротити час необхідний для усунення несправностей, що виникають у процесі роботи системи.

РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

1.1 Призначення та мета створення АСУ

Призначенням автоматизованої системи керування електротермічною лінією є:

- забезпечення контролю стану устаткування;
- автоматичне управління та захист технологічного обладнання у процесі його роботи;
- автоматична підтримка стабільності заданих значень наступних параметрів:
 - час знаходження деталей у гартувальній печі (ЗП);
 - час знаходження деталей у відпускній печі (ВП);
 - температура в загартованій печі по зонах;
 - температура у відпускній печі по зонах;
 - температура мастила в гартовому баку;
 - температури миючого розчину в мийній машині;
 - температури знежирюючого розчину в мийній машині;
 - температури у зоні сушіння мийної машини;
 - рівня мастила в гартовому баку;
 - рівня знежирюючого розчину в мийній машині;
 - рівня миючого розчину в мийній машині;
 - ваги порцій деталей, що завантажуються;
 - контроль параметрів технологічного процесу (ТП);
 - візуалізація ТП на автоматизованому робочому місці (АРМ) оператора;
- світлозвукова сигналізація та видача повідомлень про аварійні ситуації на АРМ оператора;

1.2 Мета створення системи

Цілями створення АСУ є:

- автоматизація керування технологічними процесами відділення термообробки;
- підвищення надійності роботи устаткування;
- підвищення якості продукції;
- автоматизація збору та зберігання інформації про роботу лінії термообробки;
- зниження впливу помилок експлуатаційного персоналу на процес роботи лінії та якість продукції;

1.3 Характеристика об'єкта автоматизації

1.3.1 Загальні відомості про об'єкт автоматизації

Об'єктом автоматизації є електротермічна лінія, призначена для термічної обробки металевих кріпильних виробів.

Склад лінії:

- будову дозованого завантаження (завантажувальний пристрій);
- електропіч опору загартована;
- бак масляний загартований;
- машина мийна конвеєрна;
- електропіч опору відпускна;
- бак охолодження.

Завантажувальний пристрій подає деталі дозованими порціями із металевого контейнера на конвеєр гартової печі через завантажувальний шлюз. У загартованій печі повинні підтримуватися задана технологічною програмою температура в кожній із трьох зон нагріву, а також швидкість руху конвеєра. Деталі переміщуються конвеєром через гартову піч (у гартовій печі проводиться нагрівання виробів до температури аустенізації та витримка

виробів у печі протягом заданого часу) і подаються крізь масляну завісу в загартований бак, де відбувається процес загартовування та охолодження. Масляна завіса створюється для запобігання потраплянні газів, що утворюються при загартуванні деталей, в атмосферу загартованої печі.

Далі конвеєром гартувального бака деталі переміщуються в мийну машину, де піддаються знежиренню, мийці та сушінню. У мийній машині контролюється та підтримується сталість температури знежирювального та промивного розчинів, температури повітряного потоку для сушіння виробів, створюваного калорифером. Потім вироби навантажувальним пристроєм подаються на конвеєр відпускної печі. У відпускній печі необхідно підтримувати постійну температуру кожної з трьох зон нагріву відповідно до обраної технологічної програми. З відпускної печі вироби подаються до охолоджувача. Охолоджені деталі вивантажуються конвеєром у тару готової продукції для подальшого транспортування.

1.3.2 Відомості про умови експлуатації

Технічні засоби, розташовані у приміщенні цеху та операторної, повинні мати експлуатаційні характеристики, що відповідають таким умовам:

- температура $+15\div+45^{\circ}\text{C}$;
- відносна вологість трохи більше 90%;
- атмосферний тиск $0,84\div 1,07$ кгс/см²;
- вміст пилу до 1 мг/м³;
- режим експлуатації – цілодобовий.

1.4 Вимоги до системи

1.4.1 Вимоги до структури та функціонування системи

Структура системи

Відповідно до призначення в АСУ повинні входити такі підсистеми:

- Підсистема керування лінією термообробки;
- Підсистема керування завантаженням;
- Підсистема керування гартової піччю;
- Підсистема керування гартовим баком;
- Підсистема керування мийною машиною;
- Підсистема керування відпускною піччю;
- Підсистема керування баком охолодження;
- Підсистема відображення технологічних процесів (АРМ оператора).

Підсистеми II - VII призначені для перетворення сигналів від підсистеми керування лінією термообробки у безпосередній вплив на виконавчі механізми та видачі в підсистему керування лінією термообробки інформації про стан обладнання.

Підсистема управління лінією термообробки повинна включати:

- програмований логічний контролер (ПЛК) з модулями вводу-виводу та комунікаційними модулями, керуючий рештою підсистем відповідно до завантаженої в нього програмою;
- засоби гальванічної розв'язки ланцюгів контролера від силових ланцюгів;
- джерело безперебійного живлення;
- автоматичні вимикачі;
- проміжні реле;
- Джерела живлення 24VDC і т.д.

Підсистеми керування гартової та відпускної печами повинні включати:

- вторинні перетворювачі датчиків технологічних параметрів, що належать до печей;
- частотні перетворювачі (ПЧ) управління двигунами конвеєрів печей;

- блоки керування силовими ключами нагрівачів;
- комутаційну та захисну апаратуру всіх електричних виконавчих механізмів, що належать до даних печей.

Підсистеми управління завантаженням, управління гартовим баком, управління мийною машини, охолоджуючим баком повинні включати:

- вторинні перетворювачі датчиків технологічних параметрів,
- встановлених та/або належать до цих підсистем;
- частотні перетворювачі керування двигунами конвеєрів;
- блоки управління силовими ключами віброживильників та нагрівачів;
- комутаційну та захисну апаратуру всіх агрегатів та виконавчих механізмів, що належать до даних підсистем.

Підсистема відображення технологічних процесів повинна включати автоматизоване робоче місце (АРМ) оператора, що складається з панельного комп'ютера з встановленим на нього програмним забезпеченням, що виконує функції НМІ (human-machine interface - людино-машинний інтерфейс).

Структура АСУ представлена на рисунку 1.



Рис. 1. Структура АСУ

Вимоги до способів та засобів зв'язку для інформаційного обміну між компонентами системи

Інформаційний обмін між частотними перетворювачами (ПЧ) та ПЛК необхідно здійснювати по шині ProfiBus.

Для видачі аварійних сигналів на зупинку приводів та отримання сигналів стану приводу необхідно використовувати дискретні цифрові входи/виходи ПЧ.

Інформаційний обмін між ПЛК та АРМ оператора повинен здійснюватися по промисловій мережі на основі протоколів сімейства Simatic S7 PROTOCOL SUITE.

Вимоги до режимів функціонування системи

АСУ ТП електротермічної лінії має функціонувати у безперервному цілодобовому режимі. Повинне бути забезпечене керування лінією та окремими агрегатами у наступних режимах:

- автоматичний;
- налагоджувальний;
- черговий;
- сушіння.

Режим роботи «Автоматичний»: електротермічна лінія повинна працювати автоматично за заданою програмою, підтримуватись задані температурні режими, швидкості конвеєрів, виконувати автоматичне завантаження деталей.

Режим роботи «Налагоджувальний» призначений для перевірки працездатності, налаштування та регулювання виконавчих механізмів. У режимі роботи «Налагоджувальний» необхідно передбачити можливість включення та вимикання окремих елементів (електродвигунів, нагрівачів, насосів, вентиляторів тощо) за командами оператора.

Режим роботи «Черговий» призначений для підтримки електротермічної лінії при мінімально допустимій температурі в печах з метою економії енерговитрат при тривалій відсутності корисного завантаження. У цей режим лінія може бути переведена оператором. Параметри режиму можуть бути задані (змінені) технологом.

Режим роботи «Сушіння» призначений для підготовки печей до роботи за заданими режимами нагрівання після ремонту або тривалого простою з вимкненням нагрівачів. В даний режим роботи лінія може бути переведена оператором. Параметри режиму можуть бути задані (змінені) технологом.

Вимоги щодо діагностування системи

Система повинна забезпечувати безперебійне функціонування із високим ступенем надійності. У разі збою або відмови відновлення системи має забезпечуватись за короткої термін. Для цього система має забезпечувати такі можливості:

оперативну діагностику технічних засобів (для діагностування повинні використовуватися стандартні засоби діагностики обладнання підсистем автоматичного управління технологічними процесами та передачі даних); наявність вбудованої діагностики апаратних засобів.

Вимоги до показників призначення

АСУ має забезпечувати такі показники призначення:

- отримання інформації про стан обладнання та параметри ТП від датчиків системи з інтервалом не більше 1 с;
- повинна забезпечуватися автономна робота підсистеми управління електротермічною лінією від джерела безперебійного живлення протягом не менше 15 хвилин після відключення напруги живлення;
- відхилення маси деталей однієї порції деталей, що завантажуються в загартовану піч, від заданої, не повинно перевищувати $-0,5 \div 2$ кг;

- відхилення температур не повинні перевищувати ± 5 °С від заданих значень;
- відхилення швидкостей конвекторів, керованих частотними перетворювачами, повинні перевищувати $\pm 0,5\%$ від заданого значення;
- період опитування та оновлення технологічних даних ТП на екрані АРМ оператора – не більше 3 секунд;
- включення аварійної та попереджувальної сигналізації та видачу текстового повідомлення, що містить опис події, у разі виникнення аварійної ситуації, або про настання події, про яку необхідно попередити оператора;
- глибина архіву системи має бути не менше 3-х місяців.

Показники надійності

Для системи АСУ ТП мають бути встановлені такі показники надійності

- середнє напрацювання на відмову, годин;
- термін служби, років.

Вимоги до показників надійності

Система АСУ повинна мати такі значення показників надійності:

- середнє напрацювання на відмову – не менше 10 000 годин;
- термін служби за умови виконання регламентних робіт та заміни комплектуючих пристроїв не менше 10 років.

Вимоги щодо безпеки

Технічні засоби АСУ повинні відповідати вимогам «Міжгалузевим правилам з охорони праці під час експлуатації електроустановок» та «Правилами улаштування електроустановок» (ПУЕ-2019). Обладнання АСУ ТП має бути підключене до окремого контуру заземлення (СНіП 3.05.07-00).

Вимоги щодо захисту інформації від несанкціонованого доступу

Для забезпечення нормального функціонування системи, запобігання порушенню інформації від випадкових впливів з боку експлуатаційного та обслуговуючого персоналу, який не має доступу до окремих функцій системи, повинен бути передбачений захист інформації від несанкціонованого доступу. Це має бути досягнуто ідентифікацією особи користувача за допомогою пароля.

Повинна бути передбачена наступна градація за рівнем доступу: оператор; технолог; адміністратор системи (інженер-програміст).

Вимоги до стандартизації та уніфікації

Система має відповідати загальним принципам стандартизації та уніфікації:

- відкритість та здатність до нарощування;
- модульний принцип побудови технічних та програмних засобів;
- використання стандартних протоколів обміну;
- можливість нарощування апаратних та програмних засобів при зміні кількості та масштабів використовуваних підсистем;
- застосування стандартних засобів розробки програм.
- Для відображення інформації необхідно використовувати стандартні символічні позначення. При цьому умовні позначення, що використовуються в системі, повинні бути наближені до термінів та понять, що застосовуються персоналом Замовника, і не повинні викликати труднощів при їх сприйнятті.
- При розробці мають бути проаналізовані та використані прогресивні технічні рішення аналогічних систем.

1.4.2 Вимоги до функцій системи

Вимоги до функцій підсистеми керування лінією термообробки

Підсистема повинна виконувати такі функції:

- збирання значень температури гартувального середовища в електропечах, температури масла в гартовому баку та знежирюючого розчину в мийній машині;
- збір значень тиску та витрати еногазу та азоту;
- отримання сигналів про стан завантажувального пристрою та сигналів з пульта керування завантажувальним пристроєм;
- вироблення сигналів управління клапанами, що регулюють подачу газів, вентиляторами та електронагрівачами у печах;
- вироблення сигналів керування приводами конвеєрів;
- включення аварійної звукової та світлової сигналізації;
- Сигнали контролю та управління повинні надходити до ПЛК.

Обробку вхідних сигналів від датчиків та від технологічного обладнання, вироблення керуючих впливів на обладнання, а також захисне відключення обладнання та закриття регулюючих клапанів необхідно здійснювати відповідно до опису технологічного процесу.

- Значення діапазонів вимірювання датчиків, порогів спрацьовування аварійної та попереджувальної сигналізації, а також перелік аварійних захистів та відключень мають бути надані Замовником у вигляді «Карти технологічних уставок» до початку пусконаладжувальних робіт. Для організації обміну даними між АРМ оператора та ПЛК мають використовуватися стандартні протоколи сімейства Simatic S7 PROTOCOL SUITE.

Вимоги до функцій підсистеми керування завантаженням

Підсистема керування пристроєм завантаження повинна виконувати такі функції:

- забезпечувати виконання сигналів керування від підсистеми керування лінією термообробки;

- формувати сигнали для ПЛК про стан устаткування;
- дозувати завантаження деталей у загартовану піч.

Вимоги до функцій підсистеми керування гартової піччю

Підсистема керування гартової піччю повинна виконувати такі функції:

- забезпечувати отримання та виконання сигналів керування від підсистеми керування лінією термообробки;
- формувати сигнали про стан устаткування;
- підтримувати задані температури в загартованій печі по зонах нагріву;
- підтримувати задану швидкість конвеєра;
- підтримувати рівномірність температури між зонами.

Вимоги до функцій підсистеми керування гартовим баком

Підсистема керування гартовим баком повинна виконувати такі функції:

- забезпечувати отримання та виконання сигналів керування від підсистеми керування лінією термообробки;
- формувати сигнали про стан устаткування;
- підтримувати задану температуру мастила;
- підтримувати рівень мастила;
- підтримувати задану швидкість конвеєра.

Вимоги до функцій підсистеми керування мийною машиною

Підсистема керування мийною машиною повинна виконувати такі функції:

- забезпечувати отримання та виконання сигналів керування від підсистеми керування лінією термообробки;
- формувати сигнали про стан устаткування;

- підтримувати задані температури знежирювального та миючого розчинів, повітряного потоку сушіння;
- підтримувати рівень миючого та знежирюючого розчинів;
- підтримувати задану швидкість конвеєра.

Вимоги до функцій підсистеми керування відпускнуою піччю

Підсистема керування відпускнуою піччю повинна виконувати такі функції:

- забезпечувати отримання та виконання сигналів керування від підсистеми керування лінією термообробки;
- формувати сигнали про стан устаткування;
- підтримувати задані температури в загартованій печі по зонах нагріву;
- підтримувати задану швидкість конвеєра;
- підтримувати рівномірність температур між зонами.

Вимоги до функцій підсистеми керування баком охолодження

Підсистема керування баком охолодження повинна виконувати такі функції:

- забезпечувати отримання та виконання сигналів керування від підсистеми керування лінією термообробки;
- формувати сигнали про стан устаткування;
- підтримувати задану температуру розчину;
- підтримувати рівень розчину;
- підтримувати задану швидкість конвеєра.

Вимоги до функцій підсистеми відображення технологічних процесів

- АРМ оператора має виконувати такі функції:
- забезпечувати віконний інтерфейс керування;
- забезпечувати вибір режиму роботи з допомогою меню;
- забезпечувати введення технологічних процесів для різних деталей;
- забезпечувати вибір технологічних процесів та типу оброблюваних деталей із сформованої бібліотеки;
- квітування оператором передаварійних та аварійних повідомлень.

1.4.3 Вимоги до видів забезпечення

Вимоги до математичного забезпечення

Математичне забезпечення системи має забезпечувати реалізацію функцій системи та містити алгоритми, розроблені на основі опису технологічного процесу.

Повинні бути розроблені такі алгоритми:

- алгоритми керування роботою завантажувального пристрою;
- алгоритми управління роботою нагрівальних елементів у загартовій та відпускній печач;
- алгоритми керування роботою приводів конвексів;
- алгоритми керування роботою насосів масляної завіси, циркуляції мастила, водяної завіси, циркуляції охолоджуючого розчину;
- алгоритми управління роботою клапанів подачі води на охолодження, підживлення знежирюючого та мийного розчинів у мийній машині, подачі ендогазу та азоту.

Вимоги щодо інформаційного забезпечення

У системі має використовуватися єдина система класифікації та кодування. У той же час повинна забезпечуватися підтримка існуючих у

замовника класифікаторів з метою сумісності з прийнятою у нього нормативно-довідковою базою та комплексування з суміжними системами.

Інформаційне забезпечення системи має включати опис таких масивів даних:

- перелік спостережуваних системою АСУ технологічних даних та станів обладнання;
- список керуючих впливів;
- перелік використовуваних у додатках текстових та графічних вікон;
- перелік повідомлень;
- Список звітів.

Вимоги до лінгвістичного забезпечення

До лінгвістичного забезпечення системи АСУ пред'являються такі вимоги:

- стандартизація позначень змінних, що застосовуються в АСУ ;
- зручність та однозначність спілкування користувачів із засобами АСУ;
- використання стандартних мов програмування;
- перелік звітів для програмування контролерів повинні використовуватись мови, сумісні зі стандартом IEC 6113-03, що входять до складу Simatic Step7;
- Для програмування додатків АРМ оператора мають бути використані стандартні мови програмування, що входять до складу WinCC 6.0.

Вимоги до програмного забезпечення

Програмування ПЛК має здійснюватися з урахуванням програмного пакета Simatic Step7.

АРМ оператора має програмуватися за допомогою SCADA –пакета WinCC v6.0.

На АРМ оператора має бути встановлена операційна система MS Windows 8.

Вимоги до технічного забезпечення

До складу обладнання АСУ повинні входити:

- програмований логічний контролер, нормалізатори аналогових сигналів, проміжні реле, джерело безперебійного живлення, клемні з'єднувачі, лотки;

- блоки керування силовими ключами нагрівачів ВП та ЗП;

- частотні перетворювачі та комутаційна апаратура приводів, клапанів та вентиляторів, нагрівачів;

- панельні комп'ютери промислового виконання, що мають клавіатуру, маніпулятор (Track Ball, Touch Pad), кольоровий екран із діагоналлю не менше 12”;

- засоби аварійної сигналізації.

- Для забезпечення зв'язку між АРМ оператора та ПЛК по промисловій шині мають бути передбачені спеціальні комунікаційні модулі. Обладнання комплексу технічних засобів АСУ має бути змонтоване в електротехнічні шафи. У шафах повинні бути передбачені системи контролю температури та вентиляція.

- Прокладання кабелів та проводів усередині шаф повинно здійснюватися у пластикових кабель-каналах. Проводи ланцюгів управління 24VDC і 220/380 VAC повинні прокладатися окремо.

- Частотні перетворювачі (ПЧ) повинні комплектуватися базовою панеллю оператора (BOP-Basis Operator Panel) та комунікаційними модулями ProfiBus, які встановлюються безпосередньо на ЧП.

- Повинна бути передбачена гальванічна розв'язка між силовими ланцюгами та ланцюгами контролера.

РОЗДІЛ 2. ТЕХНІЧНА ПРОПОЗИЦІЯ

2.1 Вибір методів керування

Процес термічної обробки залежить від цілої групи різних за своїм фізичним змістом, але взаємопов'язаних параметрів, що впливають на якість продукції, що виготовляється.

Як об'єкт управління електротермічна лінія розділяється на безліч менших об'єктів, кожен із яких пов'язаний з іншими.

Електротермічну лінію складно однозначно віднести до дискретних або безперервних систем, оскільки в електротермічній лінії протікають дискретні процеси, так і безперервні. Зазначимо, що безперервними процесами в системі є лише процеси, пов'язані зі зміною температур та швидкостей, тобто робота двигунів конвеєрів та нагрівачів у печах. Всі інші процеси (відкриття/закриття клапанів, заслінок гартової печі, включення/відключення будь-яких пристроїв електротермічної лінії) є дискретними.

Більшість процесів, що протікають у пристроях електротермічної лінії, є дискретними. Очевидно, що для керування пристроями лінії слід застосувати дискретно-логічне керування, оскільки для будь-якого пристрою електротермічної лінії є група дискретних станів, в яких може знаходитися, а переходи між станами відбуваються за умовами, які можна представити тільки як дискретні сигнали.

Залежно від розв'язуваної задачі синтезу логічного апарату можна застосувати такі методи логічного синтезу: метод синтезу дискретно-логічних систем управління з урахуванням циклограм роботи механізмів і метод орієнтованих графів [6, 17]. Будемо застосовувати як основний - метод орієнтованих графів та теорію кінцевих автоматів [20], оскільки при синтезі логічного апарату на основі циклограм неможливо врахувати аварійні стани об'єкта і отже отримати повні алгоритми роботи пристроїв для будь-яких можливих ситуацій в роботі.

Система логічного управління реалізована за допомогою двох взаємодіючих моделей: моделі керованої системи (у разі пристроїв електротермічної лінії) моделі системи управління (АСУ). Алгоритм логічного управління синтезується за моделлю поведінки об'єкта управління. Можна використовувати наступну послідовність синтезу алгоритму управління:

- моделювання поведінки об'єкта управління;
- опис зв'язку змінних моделі поведінки об'єкта та пристрої управління;
- синтез алгоритму логічного управління як моделі поведінки устрою управління.

Виберемо як апарат моделювання поведінки ОК теорію кінцевих автоматів, в якій кінцевий автомат представляється кортежем множин:

$$\langle X, S, Y, f_{\text{перех}}, f_{\text{вих}} \rangle; \quad (2.1)$$

де X - безліч вхідних змінних; S – безліч внутрішніх змінних станів; Y – безліч вихідних змінних; $F_{\text{перех}}$ – функція переходів; $F_{\text{вих}}$ – функція виходів.

Таким чином, моделювання поведінки об'єкта управління зведеться до перерахування множин X, Y, S та визначення функцій переходів та виходів.

Стан елементів електротермічної лінії залежать від внутрішніх станів пристроїв та вхідних змінних, для опису таких об'єктів застосовується кінцевий автомат четвертого роду – автомат Міллі.

Структура автомата Міллі представлена рисунку 2.1.

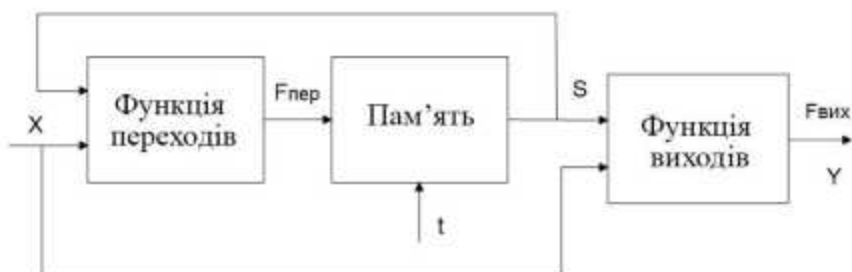


Рис. 2.1 – Автомат Міллі

Використовуємо поняття «стан», «підстан» і «спостережуваність» при складанні алгоритмів, щоб наочно представляти поведінку автоматів і композицій з них. У роботі розглядатимемо два види станів:

- бажані, тобто стани пов'язані з нормальною роботою системи;
- аварійні, пов'язані із порушенням алгоритмів нормальної роботи електротермічної лінії.

Найбільш важливим завданням при проектуванні системи автоматизації електротермічною лінією є керування температурою, так як якість оброблюваної продукції, безпосередньо пов'язана з точністю підтримання температури в загартованій та відпускній печах. Для того щоб визначити характер процесів нагріву, що протікають у печах та оцінити їхню якість, необхідно побудувати математичну модель нагріву.

Для побудови моделі розглянемо гартувальну піч як об'єкт управління. Гартувальна піч складається з трьох зон нагріву, у кожній з яких повинна підтримуватись постійна температура. У кожній із зон нагріву розташовується нагрівач, спіралі якої розташовуються на стінах печі. Через усі зони печі рухається конвеєр. Кожна із зон нагріву гартової печі можна представити як теплову систему, що складається з нагрівача, атмосфери зони, стінок печі. Оскільки зони нагрівання гартової печі майже ідентичні, досить побудувати модель однієї зони гартової печі.

З курсів фізики та математичного моделювання систем [12] відомо, що основними фізичними властивостями технічних об'єктів будь-якої фізичної природи є інерційні, пружні та дисипативні. Вони відображаються в динамічних моделях відповідно інерційними, пружними та дисипативними елементами. Однак теплова система, яку ми розглядаємо, не має інерційних властивостей, це випливає з того, що падіння температури вздовж дискретного елемента не залежить від швидкості зміни теплового потоку, а залежить лише від його абсолютної величини. Отже, модель зони нагрівання електричної печі можна уявити групою взаємопов'язаних простих елементів: пружних та дисипативних. Стан простого елемента характеризується однією змінною типу потоку та однією змінною типу потенціалу. Для теплової системи змінної типу потік є Φ - тепловий потік, а змінної типу потенціал T -температура. Залежність між цими змінними називають компонентним рівнянням. Компонентне рівняння пружного елемента теплової системи у випадку виглядає так:

$$\Phi_1 dt = C_T \cdot dT, \quad (2.1)$$

де C_T - питома теплоємність речовини, в якій поширюється тепловий потік, $\frac{Дж}{кг \cdot ^\circ C}$; Φ_1 - тепловий потік, що витрачається на нагрівання речовини, $Дж/с$.

Компонентне рівняння дисипативного елемента для теплової системи у випадку виглядає так:

$$\Phi_d = \mu_T \cdot T_d, \quad (2.2)$$

де T_d - різниця між температурою тіла, що нагрівається, і температурою в яку розсіюється тепла енергія, $^\circ C$; μ_T - коефіцієнт конвективного теплообміну, $\frac{Дж}{с \cdot ^\circ C}$; Φ_d - тепловий потік, що розсіюється нагрітим тілом, $Дж/с$.

На поверхнях контакту твердого тіла з рідинним або газовим середовищем здійснюється конвективний теплообмін. Для конвективного теплообміну коефіцієнт теплового опору μ_T визначається за формулою:

$$\mu_T = \alpha A, \quad (2.3)$$

де α - коефіцієнт конвективного теплообміну, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$; A - площа контакту твердого тіла з газом чи рідиною, м^2 .

Для отримання повної математичної моделі технічної системи необхідно поєднати всі компонентні рівняння елементів у загальну систему рівнянь. Об'єднання складає основи фізичних законів виражають, умови рівноваги і безперервності фізичних змінних. Рівняння цих законів називають топологічними рівняннями. Вони описують характер взаємодії між простими елементами, встановлюючи співвідношення між однотипними змінними.

Умови рівноваги записуються для фазової змінної типу потенціалу (в системі, що розглядається, температура)

$$\sum_k T_k = 0, \quad (2.4)$$

Умови безперервності – для змінних типу потоку (для аналізованої системи тепловий потік):

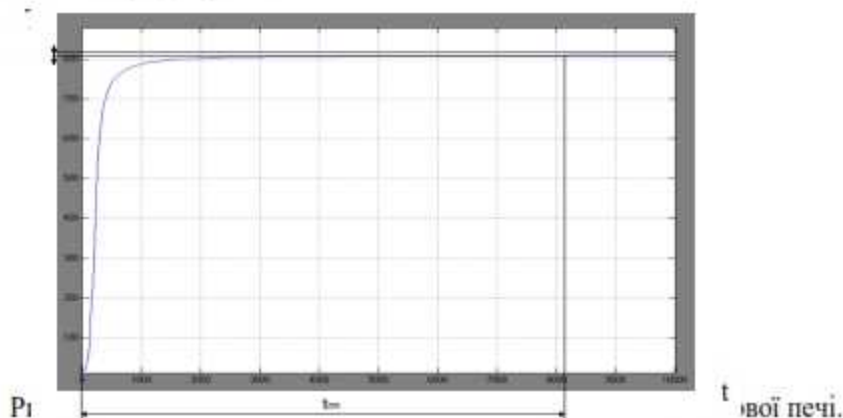
$$\sum_i \Phi_i = 0. \quad (2.5)$$

Для побудови моделі скористаємося методом електроаналогії [12, 16]. Метод електроаналогії – це один із методів імітаційного моделювання, що спирається на однаковість фізичних законів. Оскільки саме електричні схеми мають найбільшу наочність і вивченість, то завдяки єдності форми рівнянь математичного представлення об'єктів різної фізичної природи, дослідження явищ у неелектричній системі може бути замінене дослідженням процесів в електричному ланцюзі. Порівнюючи компонентні та топологічні рівняння, можна відзначити очевидність динамічних аналогій між тепловою та електричною системами. Для топологічних рівнянь теплової системи аналогами є закони Кірхгофа. Для компонентних рівнянь теплової системи - закон Ома та рівняння конденсатора:

$$U_y = \frac{1}{C} \cdot \int i_y dt, \quad (2.6)$$

де U_y - напруга, В; I - струм, А; C – ємність, мкФ.

В результаті моделювання були отримані графіки перехідного процесу регулювання температури в зоні нагріву гартової печі, що протікає в замкнутому контурі, при нагріванні від температури цеху до мінімальної робочої (810 °C). Графік перехідного процесу у системі при нагріванні представлений рисунку 2.2.



З графіка можна визначити, що час нагрівання печі від початкової температури (температура атмосфери цеху) до мінімальної робочої температури становить близько двох з половиною годин. Перерегулювання відсутнє.

Розглянемо також перехідні процеси, які виникають у системі у разі збурювальних впливів. В якості впливів, що збурюють, виступають зниження температури в печі, пов'язані з втратою тепла при відкритті заслінок шлюзування, з метою завантаження деталей в піч. Втрати тепла при одноразовому відкритті заслінок шлюзування малі, але оскільки відкриття заслінок шлюзування відбувається багаторазово, слід переконатися в тому, що температура в печі не вийде за допустимі межі ($\pm 5^{\circ}\text{C}$ від встановленого значення). Процеси, які у системі під час подачі таких збурень, представлені рисунку 2.3.

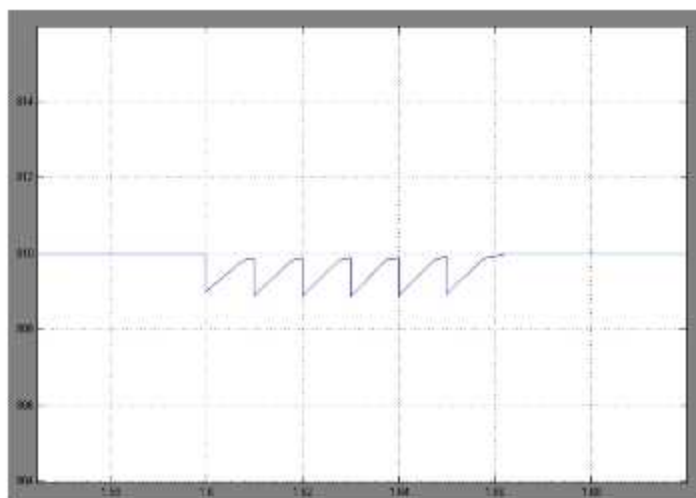


Рис. 2.3 – Перехідний процес, що протікає у системі при появі впливів, що збурюють.

Зазначимо, що з появою серії стрибкоподібних обурень температура печі не вийшла межі допустимих значень, ($\pm 5^{\circ}\text{C}$ від значення).

Спираючись на отримані характеристики, можна зробити висновок, що система не потребує застосування додаткового регулятора, оскільки показники якості процесу цілком задовольняють вимогам, зазначеним у технічному завданні [14].

Для керування температурою доцільно буде застосувати широтно-імпульсне регулювання, оскільки широтно-імпульсне регулювання дозволяє забезпечити високу плавність регулювання [1].

Імпульсні методи регулювання ґрунтуються на зміні кількості енергії, що підводиться до об'єкта управління (у нашому випадку до нагрівача). У цьому випадку до нагрівача підводиться послідовність імпульсів постійної напруги (U) і робота нагрівача складається з періодів T (нагрів - охолодження). Необхідний нагрів повинен відповідати середньому значенню за період T і визначатиметься відносною тривалістю включення (шпаруватістю) імпульсів γ :

$$\gamma = \frac{t_I}{t_I + t_{II}} = \frac{t_I}{T}, \quad (2.7)$$

де t_I - тривалість імпульсу; t_{II} - тривалість паузи.

Імпульсне регулювання нагріву може бути здійснено за допомогою різних перетворювачів: широтно-імпульсних, частотно-імпульсних та широтно-частотно-імпульсних.

При імпульсному керуванні миттєве значення теплового потоку безперервно коливатиметься у певних межах. При цьому розмах коливань буде тим меншим, чим більше теплоємності до періоду прямування імпульсів. Отже, зі зростанням частоти керуючих імпульсів розмах коливань теплового потоку зменшується. Зазначимо, що середнє теплове значення при цьому залишається незмінним, що найбільш важливо з точки зору підтримки температури печі. Воно може бути змінено лише шляхом зміни шпаруватості імпульсів за рахунок зміни їхньої тривалості (2.7). Зі зростанням шпаруватості імпульсів, що подаються на нагрівач, середнє значення температури в печі також зростає.

У технічному завданні поставлена задача регулювання швидкостей двигунів конвексрів електротермічної лінії. В електротермічній лінії застосовуються асинхронні двигуни, це обумовлено рядом переваг асинхронних двигунів, таких як висока надійність, низька вартість, простота виготовлення та експлуатації [1].

З теорії електроприводу відомо, що швидкість обертання валу асинхронного двигуна залежить від конструктивних параметрів електродвигуна, моменту навантаження і частоти напруги мережі живлення, це впливає з рівнянь механічної характеристики асинхронного двигуна (3.1) і формули (3.2):

$$M = \frac{3 \cdot U^2 \cdot \Phi \cdot R'_2}{\omega_0 [(R_1 + R'_2/s)^2 + (X_1 + X'_2)^2] \cdot s}, \quad (3.1)$$

де ω_0 – синхронна кутова швидкість (швидкість холостого ходу), рад/с; U_ϕ -первинна фазна напруга, В; X_1 - первинний наведений реактивний опір, Ом; X'_2 – вторинне наведене реактивне опір, Ом; R_1 – первинний наведений активний опір, Ом; R'_2 - Вторинне наведене активний опір, Ом;

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p}, \quad (3.2)$$

де s- ковзання; p- число пар полюсів асинхронного двигуна; f- частота мережі живлення, Гц.

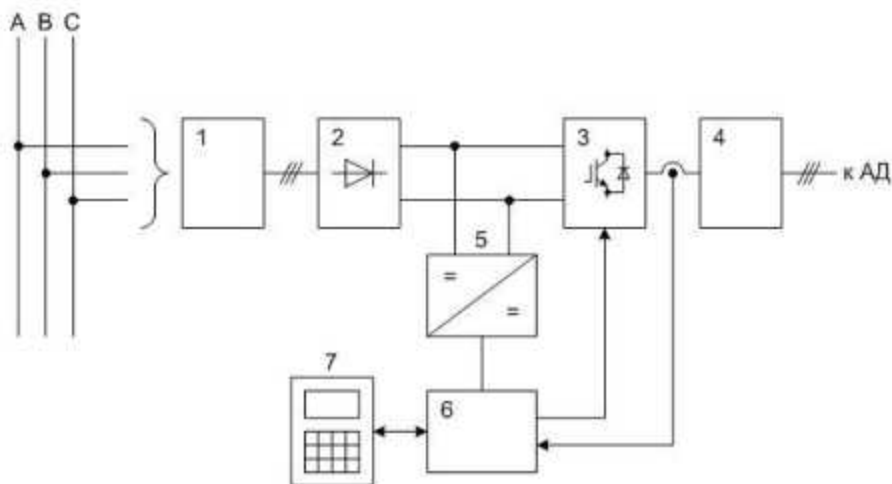
Вочевидь, щоб одержати якісного регулювання необхідно змінювати останній параметр, тобто частоту живлення. З цією метою застосовуються перетворювачі частоти. Перетворювач частоти - це пристрій, що перетворює електричну енергію з параметрами U_1, f_1 (у нашому випадку 380, 50 Гц) в електричну енергію з параметрами U_2, f_2 . Частотні перетворювачі можна розділити на перетворювачі частоти зі скалярним та векторним керуванням. Такий поділ обумовлений необхідністю керувати не тільки частотою на виході перетворювача, але і напругою. Алгоритм обчислення значення напруги визначає спосіб управління. У перетворювачах частоти зі скалярним керуванням значення напруги визначається залежно від $U(f)$, яка, як правило, розраховується методом лінійної інтерполяції по декількох базових точках. Є можливість змінювати значення цих точок.

У перетворювачах частоти з векторним керуванням значення напруги розраховується методом моделювання процесів, що проходять в асинхронному двигуні. У цьому випадку користувачеві необхідно встановити параметри двигуна. Очевидно, що другий спосіб керування дозволяє здійснювати більш якісне керування електродвигуном. Однак налаштування такого перетворювача частоти вимагає досить глибоких знань у галузі електроприводу та електричних машин. Скалярний спосіб управління забезпечує досить гарну якість регулювання, навіть із використанням заводських налаштувань частотного перетворювача. Використання

векторного управління електроприводами конвеєрів навряд чи дасть суттєвий вигравш у порівнянні зі скалярним. Отже, застосування векторного управління в нашому випадку є недоцільним. Для керування швидкостями конвеєрів будемо використовувати скалярне керування.

Розглянемо докладніше структурну схему перетворювача частоти з ланкою постійного струму. Структурна схема перетворювача частоти представлена на рисунку 2.2. Основу перетворювача становить трифазний інвертор напруги (АІН) із широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ). Система управління перетворювача виконана з урахуванням програмованого мікропроцесорного контролера (МК). В АІН перетворення постійної напруги трифазне змінне здійснюється в мостовому транзисторному інверторі, зібраному на трьох транзисторно-діодних модулях. Кожен модуль містить два IGBT-транзистори з шунтуючими зворотними діодами. IGBT-транзистори перемикаються багаторазово протягом періоду вихідної частоти відповідно до ШІМ-алгоритмом МК.

Алгоритм ШІМ-управління підтримує необхідне регулювання частоти і значення основної гармоніки вихідної напруги, що діє, забезпечуючи при цьому синусоїдальність форми струму навантаження.



1 – фільтр вхідний; 2 – випрямляч; 3 – інвертор (АІН); 4 – фільтр вихідний;
5 – джерело живлення; 6 – мікроконтролер (МК); 7 – пульт керування.

Рис. 2.3 – Структурна схема перетворювача частоти

Сучасні перетворювачі частоти є інтелектуальними пристроями, що використовують мікроконтролери досить високої продуктивності, у сучасних перетворювачах є ряд додаткових опцій та розширень, що дозволяють створювати нескладні системи автоматичного керування без використання контролерів.

Розглянемо докладніше низку таких розширень, які є у всіх сучасних перетворювачах частоти.

Аналогові входи - дозволяють отримати значення якогось параметра. Однак використання їх у системах автоматизації недоцільно, оскільки вони, як правило, мають малу потужність та незадовільну якість.

Аналогові виходи дозволяють подавати сигнали від датчиків безпосередньо в перетворювач частоти, без використання будь-яких додаткових пристроїв. Як правило, використовуються уніфіковані типи сигналів (0 – 5, 0 – 10, 4 – 20 мА), так що узгоджувальні пристрої не потрібні. Крім того, є можливість використання внутрішнього живлення перетворювача для підключення потенціометра, наприклад, завдання частоти обертання.

Дискретні входи – дозволяють керувати перетворювачем частоти з кнопок, встановлених на лицьовій панелі шафи, або з поста керування.

Дискретні виходи - використовуються сигналізації режимів роботи перетворювача.

У сучасних перетворювачах передбачено можливість підключення їх у промислову мережу. Зазвичай використовується протокол RS-485. З'єднання перетворювачів у мережу дозволяє побудувати складнішу систему автоматичного управління технологічними процесами з використанням контролерів та промислових комп'ютерів.

До переваг сучасних частотних перетворювачів можна віднести нижче перелічені фактори.

Плавне регулювання швидкості обертання електродвигуна дозволяє здебільшого відмовитися від використання редукторів, варіаторів, дроселів та іншої регулюючої апаратури, що значно спрощує керовану механічну (технологічну) систему, підвищує її надійність та знижує експлуатаційні витрати.

Частотний запуск керованого двигуна забезпечує його плавний без підвищених пускових струмів та механічних ударів розгін, що знижує навантаження на двигун та пов'язані з ним передавальні механізми, збільшує термін їх експлуатації. При цьому з'являється можливість щодо умов пуску зниження потужності приводних двигунів навантажених механізмів.

Вбудований мікропроцесорний ПД-регулятор дозволяє реалізувати системи регулювання швидкості керованих двигунів та пов'язаних з ним технологічних процесів.

Застосування зворотного зв'язку в системі з частотним перетворювачем забезпечує якісну підтримку швидкості двигуна або регульованого технологічного параметра при змінних навантаженнях та інших впливах, що збурюють.

Частотний перетворювач у комплекті з асинхронним електродвигуном може застосовуватись для заміни приводів постійного струму.

Частотний перетворювач у комплекті з програмованим мікропроцесорним контролером може застосовуватися для створення багатофункціональних систем управління електроприводами, зокрема з резервуванням механічних агрегатів. Таким чином, можна досягти точної підтримки швидкості двигуна, використовуючи тільки можливості мікропроцесорного частотного перетворювача.

Пристрої електротермічної лінії працюють відповідно до наведених нижче алгоритмів.

Алгоритм блоку керування клапаном.

Блок призначений для: керування клапаном; формування слова стану клапана.

На рисунку 2.4 представлена модель блоку керування клапаном типу "чорний ящик".

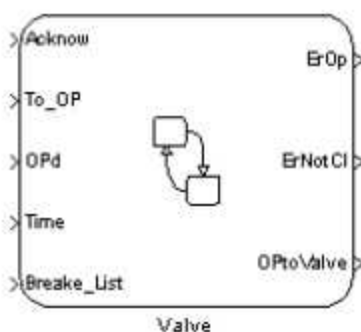


Рис. . 2.4 – Модель блоку керування клапаном типу «чорна скринька»

Вхідною інформацією для цього блоку є змінні подані у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Вхідні дані блоку керування клапаном

Змінна	Тип	Опис
1	2	3
Acknow	boolean	Квитовані
To_OP	boolean	Команда "Відкрити" від алгоритму верхнього рівня
OPd	boolean	"Клапан відкритий" сигнал з кінцевого вимикача клапана
Time	real	Час, що відводиться на відкриття/закриття

Граф формує можливі стани клапана. Опис станів наводиться у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Стан клапана

Ім'я	Опис	Примітка
1	2	3
Closed_Normal	Клапан закритий	1- стан активно, 0- стан неактивний
Opened_Normal	Клапан відкритий	1- стан активно, 0- стан неактивний
Closed_Error	Аварія клапан – закритий.	1- стан активно, 0- стан неактивний
Opened_without reason	Клапан відкрився з невідомої причини	1- стан активно, 0- стан неактивний
Don't_Closed	Клапан не закрився	1- стан активно, 0- стан неактивний
Closing	Клапан закривається	1- стан активно, 0- стан неактивний
Opening	Клапан відкривається	1- стан активно, 0- стан неактивний
Closing_Error	Закривається через помилку	1- стан активно, 0- стан неактивний

Алгоритм блоку керування конвесром.

Блок призначений для: керування конвесром; формування слова стану конвесра

На рисунку 2.6 представлена модель блоку керування конвесром типу «Чорна скринька».

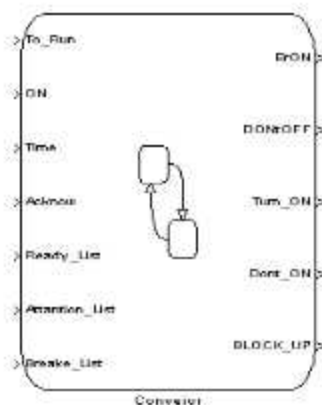


Рис. . 2.6 – Модель блоку керування конвєсром типу «чорна скринька»
Вхідною інформацією для цього блоку є змінні подані у таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 - Вхідні дані блоку керування конвєсром

Змінна	Тип	Опис
1	2	3
Acknow	boolean	Квітовано
To_Run	boolean	Команда "Відкрити" від алгоритму верхнього рівня
ON	boolean	«конвєср увімкнений» сигнал з кінцевого вимикача клапана
Time	Real	Час, що відводиться на увімкнення/вимкнення конвєсра
Ready_List	boolean	Готовність конвєсра до роботи
Attantion_List	boolean	Попередження
Breake_List	boolean	Аварія

Вихідною інформацією є змінні подані у таблиці 2.5

Таблиця 2.5 - Вихідні дані блоку керування конвеєром

Змінна	Тип	Опис
1	2	3
ErON	boolean	Змінна стани – «конвеєр увімкнувся з невідомої причини», передача в алгоритм вищого рівня
DontOFF	boolean	Змінна стани – «конвеєр не відключився», передача в алгоритм вищого рівня
Turn_ON	boolean	"Включить конвеєр" команда на пускач
BLOCK_UP	boolean	Блокувати конвеєр
Don't_ON	boolean	Змінна стани - «Конвеєр не ввімкнувся» передача в блок обробки аварій

Формування слова стану та керування конвеєром здійснюється відповідно до графа його станів представленого на рисунку 2.7.

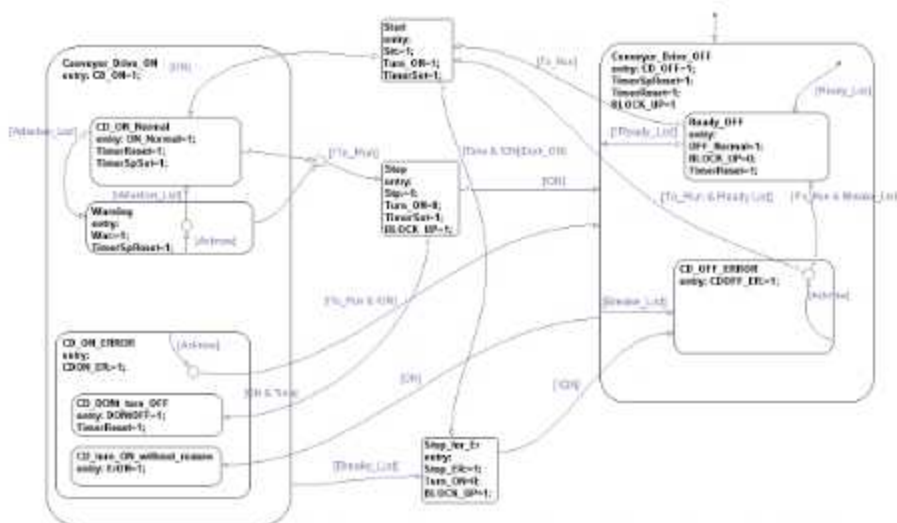


Рис. 2.7 – Граф алгоритм роботи блоку керування конвеєром

Граф формує можливі стани конвеєра. Опис станів наводиться у таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 - Стану конвеєра

Ім'я	Опис	Примітка
1	2	3
Conveyor_Drive OFF	Конвеєр вимкнено	1- стан активно, 0- стан неактивний
Ready_OFF	Конвеєр готовий до запуску	1- стан активно, 0- стан неактивний
CD_OFF_Error	Аварія, конвеєр – вимкнено.	1- стан активно, 0- стан неактивний
CD_ON_Normal	Конвеєр включений – норма	1- стан активно, 0- стан неактивний
Warning	Конвеєр увімкнено – попередження	1- стан активно, 0- стан неактивний
Stop	Конвеєр відключається	1- стан активно, 0- стан неактивний
Start	Конвеєр вмикається	1- стан активно, 0- стан неактивний
Stop_for_Er	Вимикається по аварії	1- стан активно, 0- стан неактивний
CD_ON_ERROR	Конвеєр увімкнений – аварія	1- стан активно, 0- стан неактивний

Таблиця 2.6 – продовження

Ім'я	Опис	Примітка
1	2	3
CD_Dont_turn_OFF	Конвеєр не відключився	1- стан активно, 0- стан неактивний
CD_turn_ON Without_reason	Конвеєр увімкнувся з невідомої причини	1- стан активно, 0- стан неактивний

Алгоритм блоку керування вентилятором.

Блок призначений для:

управління вентилятором;

формування слова стану вентилятора

На рисунку 2.8 представлена модель блоку управління вентилятором типу «Чорна скринька».

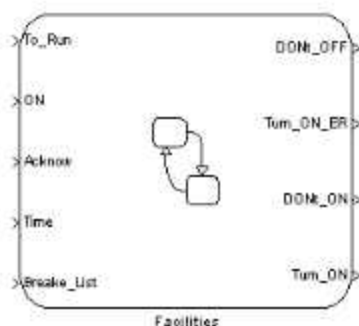


Рис. 2.8 – Модель блоку управління вентилятором типу «чорна скринька»

Вхідною інформацією для цього блоку є змінні подані у таблиці 2.7.

Таблиця 2.7 – Вхідні дані блоку керування вентилятором

Змінна	Тип	Опис
1	2	3
Acknow	boolean	Квітовано
To_Run	boolean	Команда "Увімкнути" від алгоритму верхнього рівня
OPd	boolean	«Вентилятор включений» сигнал із кінцевого вимикача клапана
Time	real	Час, що відводиться на увімкнення/вимкнення
Breake_List	boolean	Аварія

Вихідною інформацією є змінні подані у таблиці 2.8.

Таблиця 2.8 – Вихідні дані блоку керування клапаном

Змінна	Тип	Опис
1	2	3
ErON	boolean	Змінна стан – «вентилятор включився з невідомої причини», передача в алгоритм вищого рівня
DontOFF	boolean	Змінна стан – «вентилятор не відключився», передача в алгоритм вищого рівня
Turn_ON	boolean	"Включить вентилятор" команда на пускач
Don't_ON	boolean	Змінна стани - "Вентилятор не ввімкнувся" передача в блок обробки аварій

Формування слова стану та управління вентилятором провадиться відповідно до графа його станів представлено на рисунку 2.9.

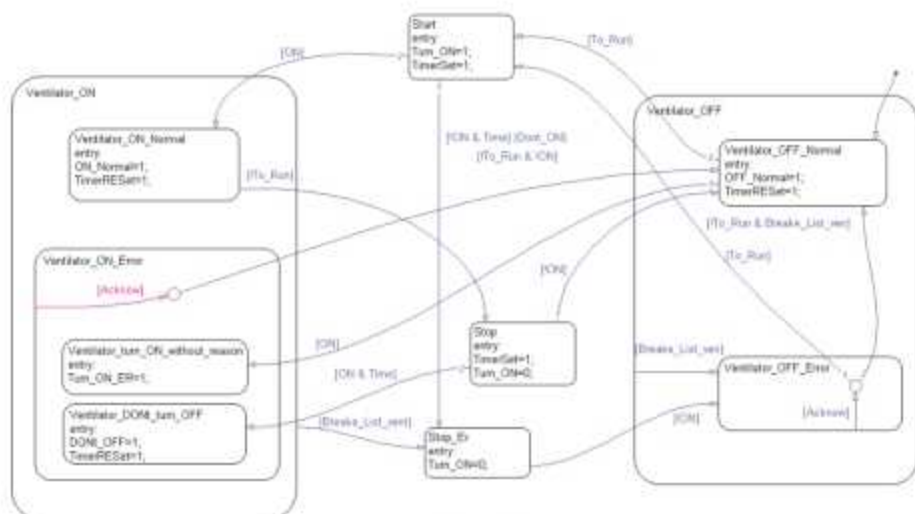


Рис. 2.9 – Граф алгоритм роботи блоку керування вентилятором

Граф формує можливі стани вентилятора. Опис станів наводиться у таблиці 2.9.

Таблиця 2.9 – Стан вентилятора

Ім'я	Опис	Примітка
1	2	3
Ventilator_OFF Normal	Вентилятор вимкнено	1- стан активно, 0- стан неактивний
Ventilator_ON Normal	Вентилятор увімкнено	1- стан активно, 0- стан неактивний

Ventilator_OFF Error	Аварія вентилятор – вимкнено	1- стан активно, 0- стан неактивний
Ventilator_turn_ON Without_reason	Вентилятор увімкнувся з невідомої причини	1- стан активно, 0- стан неактивний

Таблиця 2.9 – продовження

Ventilator_Don't Turn_OFF	Вентилятор не вимкнувся	1- стан активно, 0- стан неактивний
Start	Вентилятор вмикається	1- стан активно, 0- стан неактивний
Stop	Вентилятор вимикається	1- стан активно, 0- стан неактивний
Stop_Er	Вентилятор відключається після аварії	1- стан активно, 0- стан неактивний

Алгоритм блоку широтно-імпульсної модуляції.

Блок ШІМ призначений для генерування послідовності імпульсів заданої тривалості відповідно до завдання.

На рисунку 2.10 представлена модель блоку управління ШІМ типу «Чорна скринька».

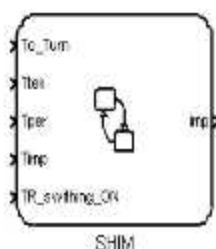


Рис. 2.10 – модель блоку ШІМ типу «чорна скринька»

Вхідною інформацією для цього блоку є змінні подані у таблиці 2.10.

Таблиця 2.10 – Вхідні дані блоку керування клапаном

Змінна	Тип	Опис
1	2	3
To_Turn	boolean	Команда «Включити» сформована в алгоритмі нагрівача
TR_swithing_ON	boolean	"Трансформатор струму включений" сигнал з трансформатора
Ttek	real	Значення часу в даний момент зчитується з таймера
Timp	real	Тривалість імпульсу
Tper	real	Період

Вихідною інформацією є змінні подані у таблиці 2.11.

Таблиця 2.11 – Вихідні дані блоку керування клапаном

Змінна	Тип	Опис
1	2	3
imp	boolean	Імпульс

Блок ШІМ функціонує відповідно до графа його станів, представленим на рисунку 2.11

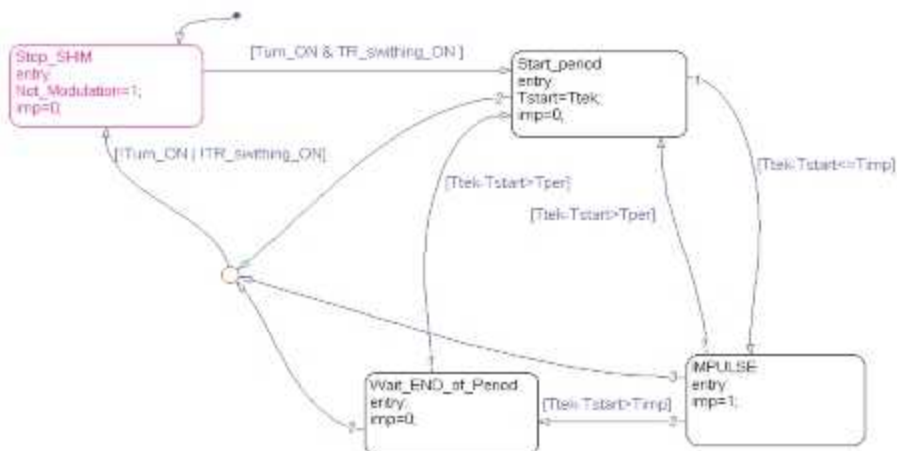


Рис. 2.11 – Граф алгоритм роботи блоку керування широтно-імпульсною модуляцією.

Граф формує можливі стани блоку ШІМ. Опис станів наводиться у таблиці 2.12.

Таблиця 2.12 - Стану ШІМ

Ім'я	Опис	Примітка
1	2	3
Stop_SHIM	Видача імпульсів зупинена	1- стан активно, 0- стан неактивний
Start_period	Початок періоду	1- стан активно, 0- стан неактивний
IMPULSE	Видача імпульсу	1- стан активно, 0- стан неактивний
Wait_END_of період	Очікування завершення періоду	1- стан активно, 0- стан неактивний

2.2 Вибір технічного забезпечення

Нині автоматизація будь-яких виробничих процесів виконується з урахуванням універсальних мікропроцесорних контролерних засобів [5]. Це зумовлено такими факторами:

- використання готових технічних засобів усуне необхідність їх проектування;
- мікропроцесорні системи вирізняються високою надійністю;
- скорочується час проектування системи;
- уніфікується елементна база систем керування
- Існують такі варіанти технічних рішень під час побудови системи управління з урахуванням мікропроцесорної техніки:
 - система управління з урахуванням персонального комп'ютера;
 - система управління з урахуванням локального контролера PLC (programmable logic controller – програмований логічний контролер);
 - мережевий комплекс контролерів (PLC, Network);
 - повномасштабні розподілені системи керування (DCS, Full Scale).

Для побудови системи управління електротермічною лінією доцільно використовувати система управління на базі локального контролера PLC, це пов'язано з тим, що система управління на базі персонального комп'ютера не має достатніх можливостей для управління електротермічною лінією, мережевий комплекс і розподілена система управління навпаки застосовуються для більш складних об'єктів і занадто дорогі.

Оскільки система розташовуватиметься в термічному цеху, контролери повинні бути придатними для роботи при температурі до 45 °С. Так як для керування температурою вирішено застосувати широтно-імпульсне управління, потрібно щоб на основі застосовуваного контролера можна було організувати керований широтно-імпульсний модулятор.

Можна відзначити, що російський ринок на сьогоднішній день пропонує досить широкий діапазон контролерів серед них можна назвати контролери компаній Siemens і Advantech, Mitsubishi.

Для побудови системи управління доцільно застосувати контролери Siemens [18]. Це зумовлено їх високою надійністю, простотою програмування, прийнятною вартістю та доступністю. Для наших цілей застосовні контролери серій S-300 та S-400.

Для об'єктів автоматизації середньої складності, можна обрати один з контролерів серії S-300, контролери серії S-400, коштують дорожче, і застосовуються в основному для складних об'єктів (об'єктів з великою кількістю сигналів), в нашому випадку їх застосування було б необґрунтованим. Контролери S-300 мають модульну побудову і можуть включати до свого складу наступні компоненти:

- стійки (RACK), що служать для розміщення модулів та з'єднання їх між собою;
- блок електроживлення (Power Supply, PS), забезпечує подачу енергії до внутрішніх пристроїв;
- центральний процесорний пристрій (Central Processing Unit, CPU), зберігає та обробляє програму користувача;
- сигнальні модулі (Signal Modules), адаптують системні сигнали до внутрішнього рівня сигналу або керують приводами за допомогою цифрових або аналогових сигналів;
- функціональні модулі (Function Modules, FM) виконують складну або критичну обробку за часом незалежно від CPU;
- комунікаційні процесори (Communication Processor, CP);
- встановлює з'єднання з допоміжними мережами (підмережами);
- підмережі (Subnets).

Раніше зазначеним вимогам до контролера (працездатність при температурі до 45 °С, можливість програмної реалізації блоку ШІМ) задовольняє контролер Siemens S-317 2DP.

Для регулювання швидкостей конвеєрів у проєкті застосовані частотні перетворювачі серії MicroMaster (представлені на рисунку 2.12) вироблені компанією Siemens (технічні характеристики перетворювачів MicroMaster представлені у додатку Б). Це пов'язано з тим, що ці приводи, що задовольняють вимогам технічного завдання, легко інтегруються в будь-які сучасні системи, дозволяють керувати ними промисловими обчислювальними мережами (PROFIBUS).



Рис. 2.12 Перетворювачі серії MicroMaster (зліва направо MicroMaster 410, MicroMaster 420, MicroMaster 440).

Застосуємо частотні перетворювачі MicroMaster 440, так як вони мають найбільші можливості в даній серії, в тому числі: наявність аналогового входу 4...20 А; можливість зміни оператором вольт-частотної характеристики, що полегшує його переналадження.

Підсистему візуалізації (АРМ оператора) можливо реалізувати за допомогою наступних технічних засобів:

- панель оператора, що вбудовується;
- панельний комп'ютер промислового виконання;
- настільний комп'ютер.

Для технічної реалізації підсистеми візуалізації технологічного процесу застосуємо панельний комп'ютер промислового виконання. Це зумовлено тим, що жодна з існуючих моделей вбудованих панелей оператора не здатна

забезпечити виконання всіх функцій, зазначених у технічному завданні, а настільний комп'ютер займає дуже багато місця і його неможливо розмістити в цеху.

2.3 Вибір програмного забезпечення та структури програмного забезпечення проекту

Для забезпечення нормального функціонування системи необхідно, щоб програмне забезпечення вирішувало два завдання:

- формування керуючих сигналів для електротермічної лінії відповідно до алгоритмів її роботи;
- подання інформації про стан системи у формі зрозумілої оператору та забезпечення взаємодії між оператором та об'єктом управління, можливість керувати процесом.

Програмне забезпечення, що вирішує зазначені завдання, складається з програмного забезпечення НМІ (Human-Machine Interface – людино-машинного інтерфейсу) та програмного забезпечення контролера, інтерфейсу зв'язку між АРМ та ПЛК, а також інтерфейсу зв'язку між контролером та об'єктом управління.

Так як в якості обладнання системи був обраний контролер Siemens, то очевидно, що найбільш доцільним використовувати програмне забезпечення також розроблене компанією Siemens і пристосоване для найбільш повної та ефективної взаємодії з контролерами того ж виробника.

Для організації людино-машинного інтерфейсу обрали систему виконання SCADA WinCC 6.0. Фактично керування здійснюється контролером.

WinCC дозволяє здійснювати обмін інформацією між оператором та контролером [19].

Розробку проекту будемо здійснювати, використовуючи стандартні засоби WinCC6.0 у тому числі:

- графічну систему, редактор створення кадрів (Graphics Designer);

- система повідомлень, редактор конфігурування повідомлень (Alarm Login);
- система архівування, редактор для визначення даних, що архівуються (Tag Logging);
- система звітів, редактор для створення шаблонів звітів (Report Designer);
- бібліотека програмних модулів, що використовуються в проекті (Scripts);
- система адміністрування.

Для створення програмного забезпечення контролера скористаємося програмним пакетом SIMATIC STEP7 [2]. Цей пакет дозволяє так само налаштувати застосовуване обладнання. STEP7 дозволяє об'єднати всі підсистеми, які використовуються у вирішенні задач автоматизації від польового рівня, до рівня управління процесом – у рамках однорідної системної архітектури. У SIMATIC STEP7 відповідно до стандарту IEC 1131-3 надаються такі мови програмування:

- STL (список інструкцій);
 - SCL (структурований текст);
 - LAD (мова контактних елементів);
 - FBD (мова діаграм функціональної логіки).
- До складу програмного забезпечення контролера входять:
- система конфігурування устаткування;
 - організаційні блоки;
 - функціональні блоки;
 - блоки процедур;
 - блоки даних.

Для організації інтерфейсу обміну даними між контролером та автоматизованим робочим місцем скористаємося стандартним протоколом сімейства Simatic S7 PROTOCOL SUITE.

Як операційну систему на АРМ оператора застосуємо Windows.

Структура програмного забезпечення представлена рисунку 2.13.

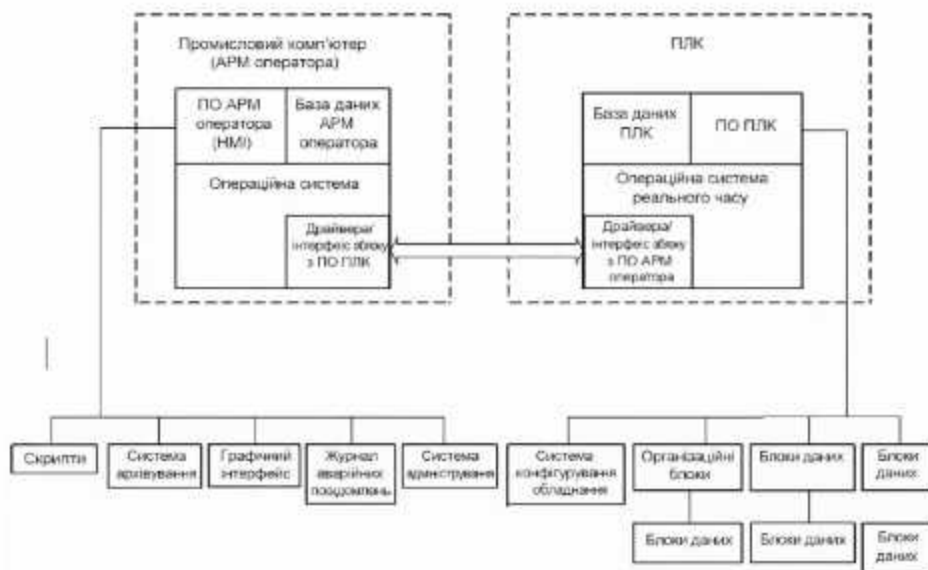


Рис. 2.14 – Структура програмного забезпечення АСУ

2.4 Розробка структурних схем

Структурна схема включає наступні елементи:

А 1.0– модуль введення дискретних сигналів у контролер;

А 2.0– модуль виведення дискретних сигналів контролера;

В1 - Оптисемістор, виконує функції гальванічної розв'язки між ланцюгом контролера та ланцюгом нагрівача;

ЕК1...ЕК3 - Нагрівальні елементи;

КМ 1 - котушка контактора, виконує функцію комутації ланцюга нагрівача;

КМ 1:1...4 – контакти контактора КМ 1;

К 1 - котушка реле, призначена для гальванічної розв'язки силових ланцюгів та ланцюгів керування;

К 1:1 – контакт реле К 1 при замиканні даного контакту на дискретний вхід надходить сигнал;

QF 1 – автоматичний вимикач, що виконує функцію захисту ланцюга нагрівача;

R 1- резистор;

ТА 1...ТА 3- Вимірювальні трансформатори струму;

TV 1- Знижувальний трансформатор напруги 380/42 В;

X 1:1 – X 2:6- Клемні контакти;

VS 1 – VS 3 – семістори, призначені для керування нагрівачами.

Структурна схема включає наступні елементи:

A 3.0 – модуль введення аналогових сигналів у контролер;

A 4.0 – модуль виведення аналогових сигналів із контролера;

A 5.0 – блок управління семісторами та тиристорами;

R 2 - резистор, призначений для перетворення сигналу на вході в БУСТ;

SF 1 – автоматичний вимикач вібратора, виконує функцію захисту живильного ланцюга;

X 2:1...X 6:2 - Клемні контакти;

Y 1 - котушка електромагніта вібратора 3;

VS 4 - Семістор управління вібратором;

UA 1 – нормалізатор сигналу, що перетворює сигнал $0 \div 5$ А у вхідну величину модуля аналогових входів $4 \div 20$ мА.

2.5 Візуалізація технологічного процесу

Візуалізація технологічного процесу дозволить відобразити роботу пристроїв системи в зручній для оператора наочній формі. Для цього застосовні мнемосхеми лінії із зображенням основних пристроїв. На екрані

панелі оператора доцільно відображати поточні значення параметрів системи: швидкості конвеєрів у печах, температури та рівні рідин у гартувальному баку та баку охолодження, час до завершення обробки партії, дату та інформацію про оператора.

На рисунку 2.15 представлена мнемосхема електротермічної лінії, реалізована у складі пакету WinCC 6.0.

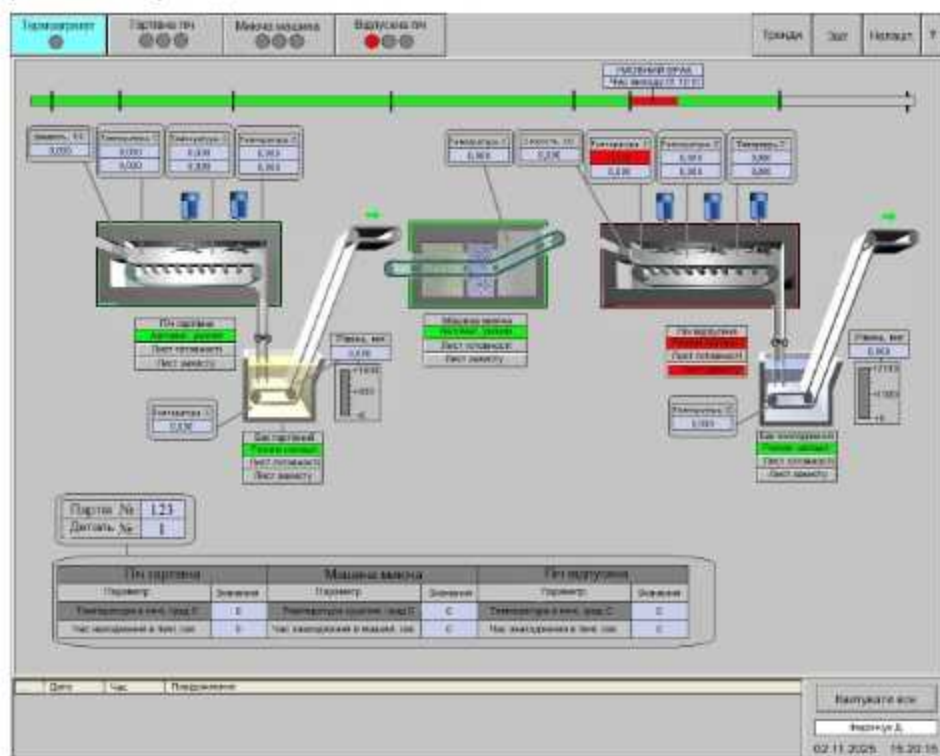


Рис. 2.15 – мнемосхема електротермічної лінії.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ СИНТЕЗ ТА ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ АЛГОРИТМІВ РОБОТИ

3.1 Дослідження теплових процесів у загартованій печі

3.1.1 Побудова моделі нагрівання гартової печі

Як зазначалося, зони нагріву в печах організовані ідентично, тому немає необхідності розглядати кожен зону, достатньо розглянути одну з зон нагріву.

Подамо модель зони нагріву у вигляді «чорної скриньки», представлену на рисунку 3.1. На вході чорного ящика тепловий потік Φ_1 , на виході температура гартової печі. Збуренням є ΔQ - відносно малі втрати теплової енергії при відкриванні заслінок шлюзування гартової печі. Зазначимо, що заслінки шлюзування є частиною шлюзової камери гартової печі, яка призначена для мінімізації теплових втрат при завантаженні. Це здійснюється за рахунок того, що одна із заслінок камери шлюзування завжди закрита і, отже, відсутня безпосередній контакт між атмосферою печі та атмосферою цеху.

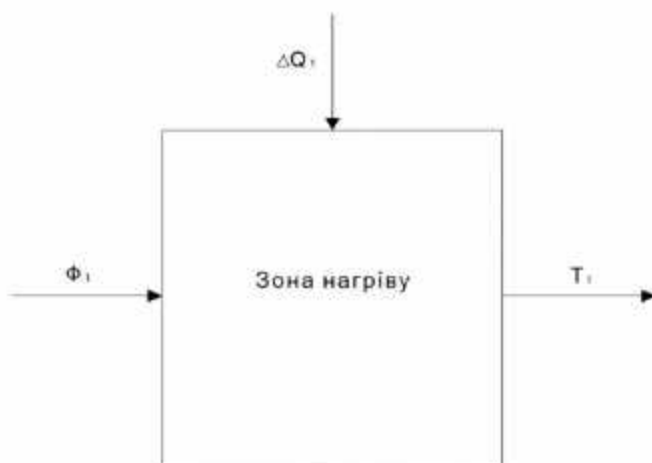


Рис. 3.1 – Модель зони нагріву

Температура в зоні нагріву залежить від наступних параметрів: теплового потоку від нагрівача зони нагріву, втрати тепла через стінки печі, які в свою чергу визначаються тепловим потоком між зовнішніми стінками

печі та атмосферою цеху, і тепловим потоком, що йде на нагрівання стінок печі, теплоємністю атмосфери печі, теплоємністю. Розподіл теплового потоку від нагрівачів представлено схематично на рисунку 3.2.

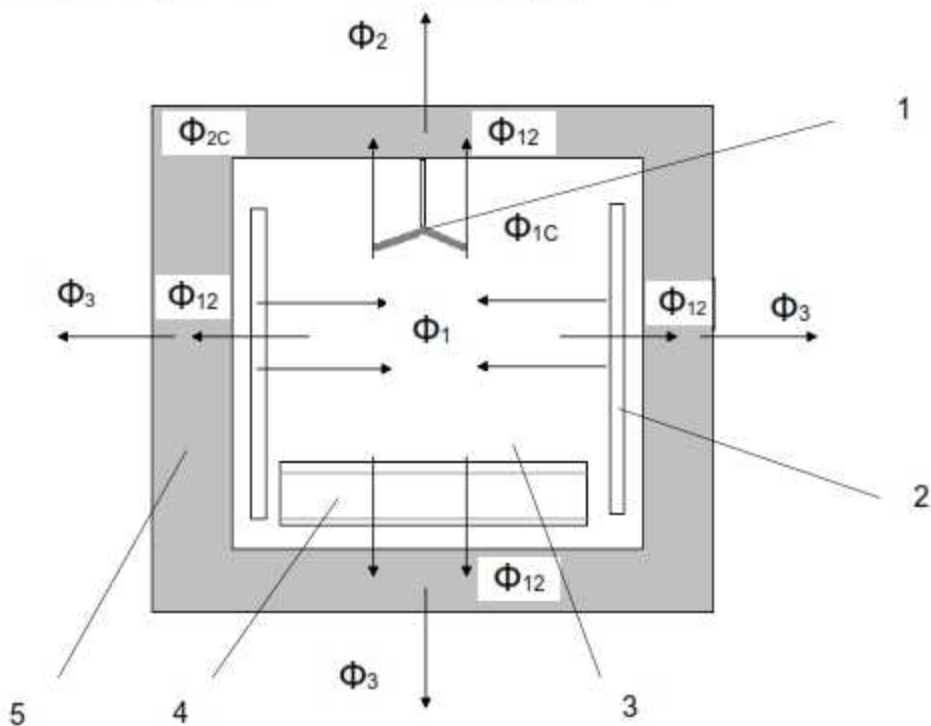


Рис. 3.2 –Схема розподілу тепла в зоні нагрівання гартової печі.

1 – вентилятор зони нагріву печі; 2 – секції нагрівача; 3 – внутрішній простір печі; 4 – конвеєр печі; 5 – стінки печі.

На рисунку Φ_1 - теплові потоки від нагрівача, Φ_{12} - тепловий потік з робочого простору гартової печі в її корпус, Φ_2 - тепловий потік від стінок печі в атмосферу цеху, Φ_{1C} - тепловий потік, що йде на нагрівання атмосфери печі, Φ_{2C} - тепловий потік, що йде на нагрівання стінок печі.

При побудові моделі прийнято такі припущення:

- витік тепла з печі через заслінки відсутня;

- розподіл температури у зоні нагрівання рівномірно з допомогою вентилятора;
- температура у всіх зонах печі однакова;
- теплообмін між сусідніми зонами нагріву дуже малий;
- процеси, що протікають у симісторах швидкоплинні, в порівнянні з процесом нагріву тому для моделі можна прийняти, що перетворення сигналу завдання величину вхідного струму нагрівача відбувається за лінійним законом.

Вихідні дані для побудови математичної моделі зони нагрівання гартової печі представлені у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Вихідні дані для побудови моделі зони нагрівання гартової печі

Найменування параметра	Позначення параметра	Одиниця виміру	Значення
1	2	3	4
Довжина зони нагрівання	l1	м	1.5
Висота зони нагріву	h1	м	0.8
Ширина зони нагріву	l2	м	1.2
Висота печі	h2	м	1.2
Ширина печі	l3	м	1.8
Питома теплоємність енодогазу	c_1	$\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$	$1.051 \cdot 10^3$
Щільність енодогазу	ρ_e	$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	1.4

Таблиця 3.1 – продовження

1	2	3	4
Коефіцієнт теплопередачі між матеріалом (шамотна цегла/піношамот) та атмосферою печі	α_2	$\frac{Вт}{м^2 \cdot ^\circ C}$	10÷12,5
Питома теплоємність піношамота	c_2	$\frac{Дж}{кг \cdot ^\circ C}$	$0,58 \cdot 10^3$
Щільність піношамота	$\rho_{ш}$	$\frac{кг}{м^3}$	$0,83 \cdot 10^3$

Застосовуючи метод електроаналогій [16], розподіл тепла в зоні нагріву печі можна подати електричною схемою, представленою на рисунку 3.3.

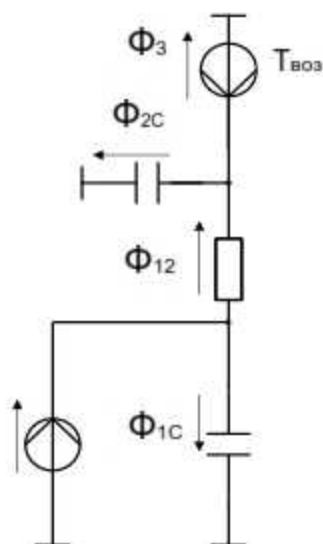


Рис. 3.3 Еквівалентна електрична схема зони нагрівання гартової печі

Для цієї електричної схеми можна записати таку систему топологічних рівнянь:

$$\{\Phi_1 - \Phi_{12} = \Phi_{1c}; \quad \{\Phi_{12} - \Phi_2 = \Phi_{2c}; \quad \{T_{\text{наг}} - T_1 = T_{\Delta 1}; \quad \{T_1 - T_2 = T_{\Delta 2}; \quad (3.1)$$

де $T_{\text{наг}}$ – температура нагрівача у зоні нагріву, °С; T_1 – температура у зоні нагріву печі, °С; T_2 – Температура матеріалу печі, °С; $T_{\text{возд}}$ – Температура повітря в цеху, в якому розташовується піч, °С; $T_{\Delta 1}$ – різниця між температурою нагрівача та температурою атмосфери печі, °С; $T_{\Delta 2}$ – різниця між температурами атмосфери печі та температури матеріалу корпусу печі, °С; $T_{\Delta 3}$ – різниця між температурою матеріалу корпусу печі та температурою повітря в цеху, °С.

З системи рівнянь (3.1) побудуємо алгебраїзований граф зв'язків між топологічними рівняннями системи.

Граф зв'язків між топологічними рівняннями системи представлено рисунку 3.4.

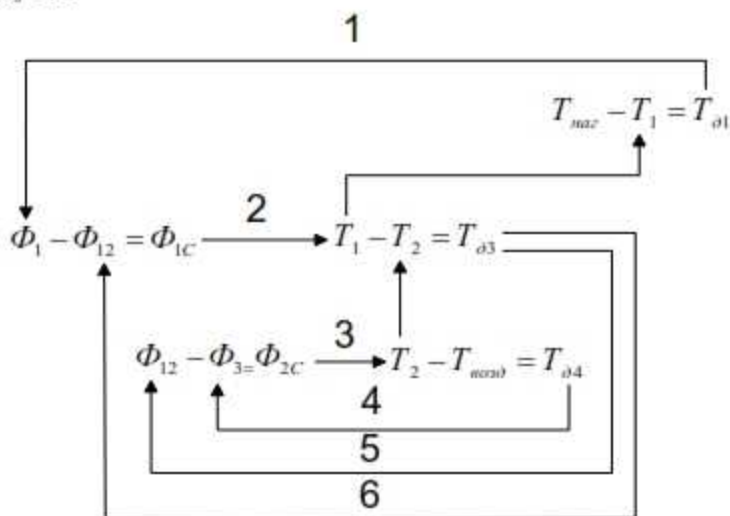


Рис. 3.4.- Алгебраїзований граф зв'язків між топологічними рівняннями системи

Компонентні рівняння та відповідні їм передавальні функції, представлені в таблиці 3.2, визначають кількісні взаємозв'язки фізичних величин.

Таблиця 3.2 – Фізичні рівняння та передавальні функції теплової системи

Фізичні залежності	Передавальні функції
1	2
$\Phi_1 = \alpha_1 \cdot A_1 \cdot T_{д1}$	$W1 = \alpha_1 \cdot A_1$
$\Phi_{1c} = C_1 \cdot \frac{dT_1}{dt}$	$W_3 = \frac{1}{C_1 \cdot p}$
$\Phi_{2c} = C_2 \cdot \frac{dT_2}{dt}$	$W_4 = \frac{1}{C_2 \cdot p}$
$\Phi_2 = \alpha_2 \cdot A_4 \cdot T_{д4}$	$W5 = \alpha_2 B \cdot A_4$
$\Phi_{21} = \alpha_2 \cdot A_3 \cdot T_{д3}$	$W6 = \alpha_2 B \cdot A_3$
$\Phi_{21} = \alpha_2 \cdot A_3 \cdot T_{д3}$	$W7 = \alpha_2 B \cdot A_3$

де A_1 - площа нагрівача зони гартової печі, м²; A_2 - Площа внутрішньої поверхні печі, м²; A_3 - Площа зовнішньої поверхні печі, м²; α_1 – коефіцієнт теплопередачі між повітрям та матеріалом печі, $\frac{Вт}{м^2 \cdot ^\circ C}$; α_2 – коефіцієнт теплопередачі між матеріалом нагрівача та атмосферою печі, $\frac{Вт}{м^2 \cdot ^\circ C}$; C_1 – теплоємність атмосфери однієї зони печі, $\frac{Дж}{^\circ C}$; C_2 – теплоємність матеріалу печі однієї зони нагріву, $\frac{Дж}{^\circ C}$.

На основі таблиці можна побудувати структурну схему зони нагрівання гартової печі (Рис. 3.5).

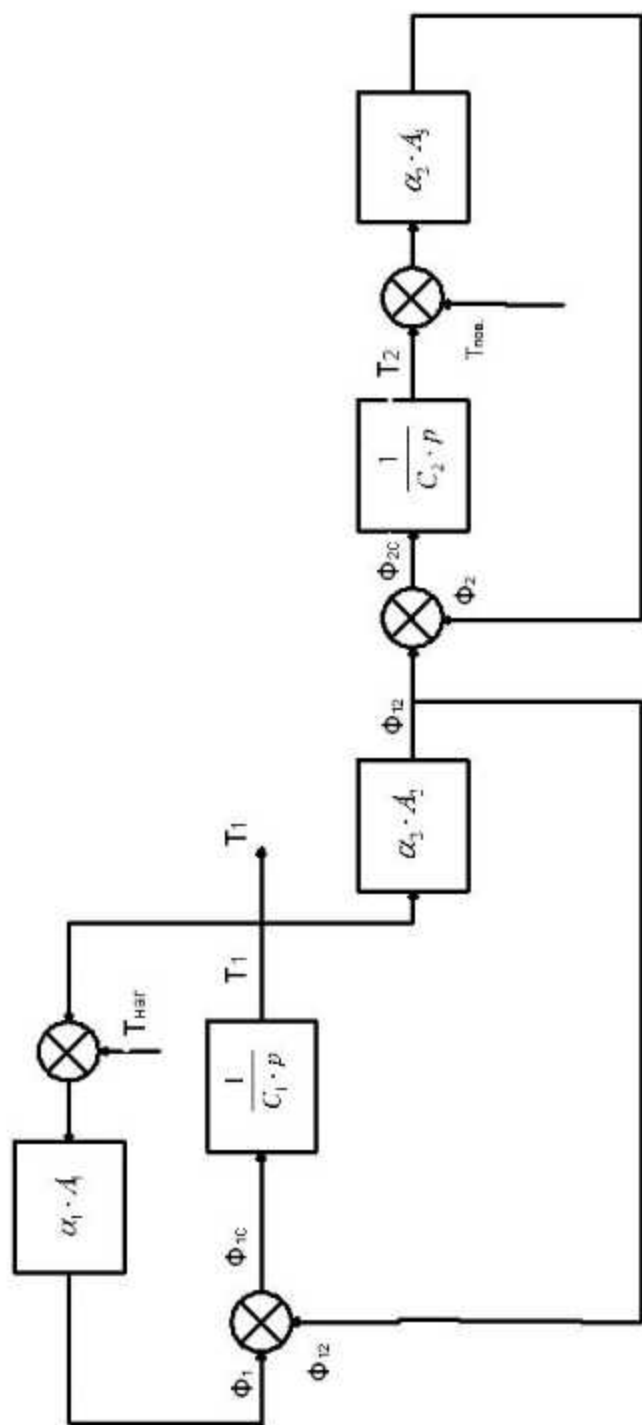


Рис. 3.5 – Структурна схема зони нагрівання

3.1.2 Модель нагрівача гартової печі

Вихідні дані для побудови математичної моделі нагрівача в зоні нагріву гартової печі представлені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Вихідні дані для побудови математичної моделі нагрівача

Найменування параметра	Позначення параметра	Одиниця виміру	Значення
1	2	3	4
Довжина провідника нагрівача, що нагрівається, в зоні нагріву.	l_3	м	9
Діаметр провідника нагрівача, що нагрівається.	D	м	0.04
Маса нагрівача	m	кг	64
Питома теплоємність матеріалу нагрівача (ніхром)	z	$\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$	$0.4 \cdot 10^3$
Питомий опір ніхрому	ρ	$\frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$	110
Номінальний струм нагрівача	I_n	А	35
Температурний коефіцієнт опору ніхрому	α_e	$^\circ\text{C}^{-1}$	$0.1 \cdot 10^{-3}$
Коефіцієнт теплопередачі між матеріалом нагрівача та атмосферою печі	α_1	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$	7.5-11

Нагрівач являє собою пристрій, що перетворює електричну енергію на теплову [11]. Для секції нагрівача можна записати рівняння електричної потужності:

$$P = I^2 \cdot R_{\text{нар}} \cdot \eta, \quad (3.2)$$

де I - струм нагрівача, А; $R_{\text{наг}}$ - опір секції нагрівача, Ом; η – коефіцієнт корисної дії.

Потужність, що виділяється секцією нагрівача, не є постійною величиною, оскільки при зміні температури нагрівача змінюється опір. Ця зміна описується наступним виразом:

$$R = R_0 \cdot (1 + \alpha_e \cdot \Delta T_{\text{наг}}), \quad (3.3)$$

де R_0 - опір секції нагрівача при температурі 20 С, Ом; α_e - температурний коефіцієнт опору матеріалу нагрівача, °С⁻¹; $\Delta T_{\text{наг}}$ – зміна температури нагрівача, °С.

Опір провідника нагрівача можна визначити з формули:

$$R_0 = \rho \cdot \frac{l_3}{S}, \quad (3.4)$$

де ρ – питомий опір матеріалу нагрівача, $\frac{\text{Ом}\cdot\text{мм}^2}{\text{м}}$; l_3 – довжина нагрівача, м; S - площа поперечного перерізу нагрівача, м².

Потужність, що виділяється в нагрівачі, можна як тепловий потік, що надходить в нагрівач.

Якщо проінтегрувати рівняння за часом, можна отримати кількість енергії, що виділилося в нагрівачі:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot \eta \cdot dt, \quad (3.5)$$

Енергія, що виділилася в нагрівачі, витрачається на нагрівання нагрівача та на нагрівання атмосфери печі.

Для енергії матеріалу, що витрачається на нагрівання нагрівача, можна записати таку формулу:

$$Q_{\text{наг}} = c \cdot m \cdot \Delta T_{\text{наг}}, \quad (3.6)$$

де $Q_{\text{наг}}$ – енергія, що витрачається на нагрівання нагрівача, Дж, c – питома теплоємність речовини нагрівача, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot^\circ\text{C}}$; $\Delta T_{\text{наг}}$ - Зміна температури матеріалу нагрівача при передачі йому енергії $Q_{\text{наг}}$; m – маса секції нагрівача, кг.

Енергія, що виділяється нагрівачем в атмосферу печі, можна визначити за формулою:

$$Q_1 = \Phi_1 \cdot dt, \quad (3.7)$$

де Q_1 - енергія, що виділилася в атмосферу печі.

Виходячи з розглянутого вище, можна скласти структурну схему нагрівача. Структурна схема нагрівача представлена на рисунку 3.6.

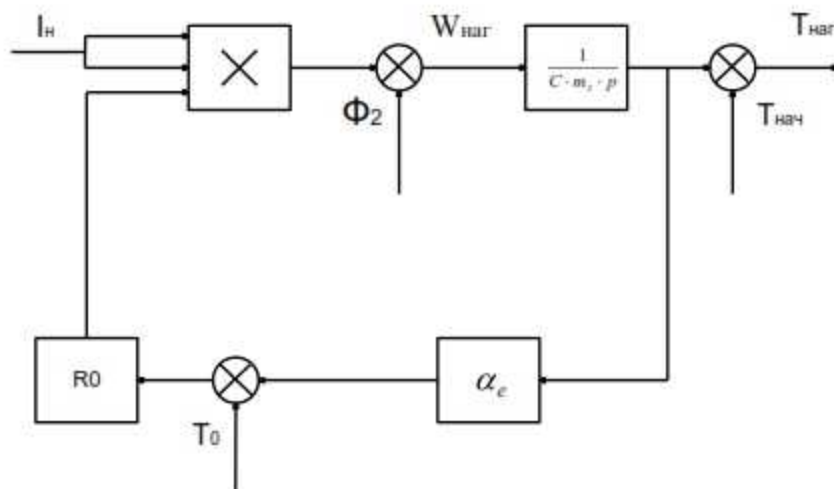


Рис. 3.6 – Структурна схема нагрівача

Застосовуючи формули (3.6) і (3.7) можна записати вираз для передавальної функції нагрівача:

$$W_{\text{наг}} = \frac{1}{c \cdot m \cdot p}, \quad (3.8)$$

де c – питома теплоємність матеріалу нагрівача, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$; m - маса нагрівача, кг.

3.1.3 Побудова САР температури для зони нагрівання

Структурна схема САР температури для зони нагріву представлена на рисунку 3.7.

$W_{з.н.}$ - Передатна функція зони нагріву гартової печі;

$W_{\text{наг}}$ - Передатна функція нагрівача;

$W_{\text{ШИМ}}$ - передавальна функція широтно-імпульсного модулятора;

$W_{\text{рег.}}$ - Передатна функція регулятора температури;

$U_{\text{зап.}}$ – пристрій керування, що видає сигнал завдання;

$W_{\text{дат.тем.}}$ – передатна функція датчика температури.

Пристрій управління, ШІМ та регулятор температури реалізовані у схемі на базі програмованого логічного контролера.

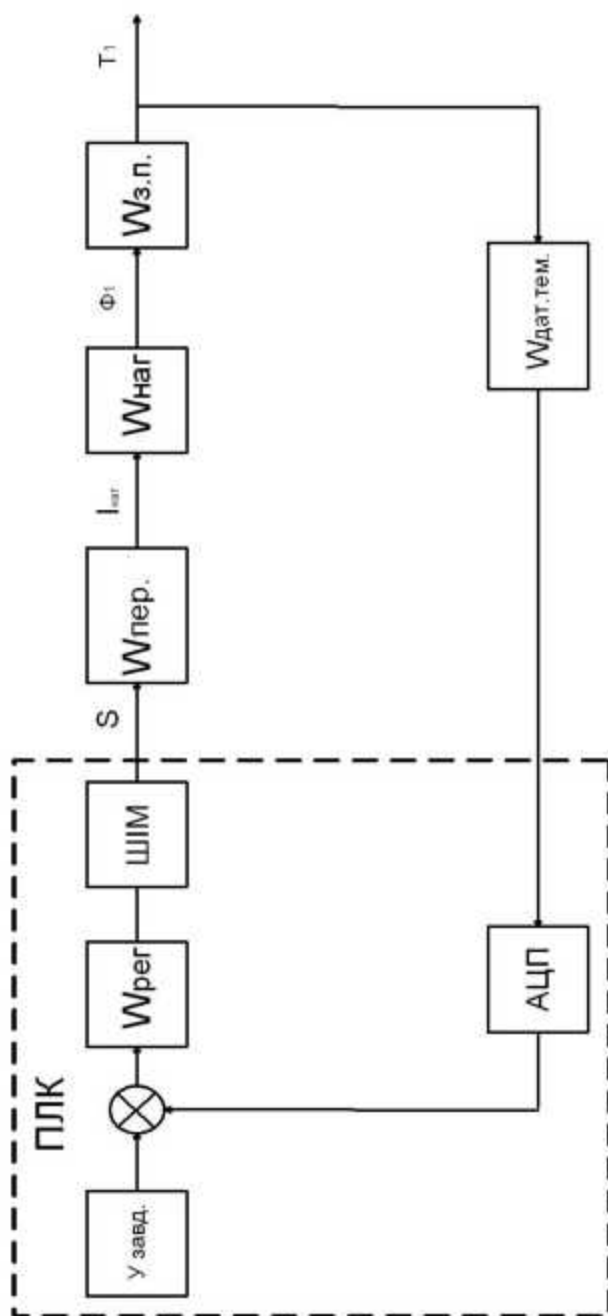


Рис. . 3.7 – Структурна схема САК температури

3.1.4 Визначення коефіцієнтів передавальних функцій моделі нагрівання гартової печі та моделі нагрівача

Площа поверхні нагрівача визначається за такою формулою:

$$A_1 = l_3 \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2, \quad (3.9)$$

де l_3 - довжина нагрівача в зоні нагріву, м; D - діаметр провідника нагрівача, м; A_1 - площа нагрівача, м².

Підставляючи у формулу значення таблиці 3.3 отримаємо:

$$A_1 = 9 \cdot \left(\frac{0.04}{2}\right)^2 = 0.0036, \text{ м}^2.$$

Площу внутрішньої поверхні зони нагріву печі можна визначити таким чином:

$$A_2 = 2 \cdot l_1 \cdot h_1 + 2 \cdot l_1 \cdot l_2, \quad (3.10)$$

де l_1 - довжина зони нагріву, м; l_2 - ширина зони нагріву, м; h_1 - висота зони нагріву, м; A_2 - площа внутрішньої поверхні зони нагріву, м².

Підставляючи значення таблиці 3.1 отримаємо:

$$A_2 = 2 \cdot 1.5 \cdot 0.8 + 2 \cdot 1.5 \cdot 1.2 = 6 \text{ м}^2.$$

Площу зовнішньої поверхні зони нагріву печі можна визначити таким чином:

$$A_3 = 2 \cdot l_1 \cdot h_2 + 2 \cdot l_1 \cdot l_3, \quad (3.11)$$

де l_1 - довжина зони нагріву, м; l_2 - ширина зони нагріву, м; h_2 - висота печі, м; l_3 - довжина нагрівача в зоні нагріву, м.м.

Підставляючи значення таблиці 3.1 визначимо площу зовнішньої поверхні:

$$A_3 = 2 \cdot 1.5 \cdot 1.2 + 2 \cdot 1.5 \cdot 1.8 = 9, \text{ м}^2.$$

Визначимо теплоємність атмосфери зони гартової печі, для цього скористаємося такою формулою:

$$C_1 = c_1 \cdot \rho_3 \cdot V_1, \quad (3.12)$$

де V_1 – обсяг зони нагріву печі, м³; c_1 - питома теплоємність ендогазу, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$;

ρ_3 - щільність ендогазу, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; C_1 – теплоємність атмосфери печі, $\frac{\text{Дж}}{^\circ\text{C}}$.

Обсяг можна визначити з геометричних розмірів зони печі, зазначених у таблиці 3.1:

$$V_1 = l_1 \cdot h_1 \cdot l_2, \quad (3.13)$$

де l_1 - довжина зони нагріву, м; l_2 - ширина зони нагріву, м; h_1 - висота зони нагріву, м.м.

Підставляючи значення з таблиці 3.1 до формули (3.12, 3.13) розрахуємо значення теплоємності атмосфери в зоні нагрівання печі:

$$V_1 = 1.5 \cdot 0.8 \cdot 1.2 = 1.44, \text{ МЗ};$$

тоді теплоємність атмосфери зони печі:

$$C_1 = 1051 \cdot 1,4 \cdot 1,44 = 2118.82, \frac{\text{Дж}}{^\circ\text{C}}.$$

Аналогічно можна визначити теплоємність частини корпусу, яка розташована навколо зони нагрівання печі:

$$C_2 = c_2 \cdot \rho_{\text{ш}} \cdot V_2, \quad (3.14)$$

де V_2 - об'єм займаний матеріалу корпусу печі в зоні нагріву, м^3 ; c_2 - питома теплоємність матеріалу печі, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$; $\rho_{\text{ш}}$ - щільність матеріалу печі, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; C_2 - теплоємність стінок печі, що межують із зоною нагріву, $\frac{\text{Дж}}{^\circ\text{C}}$.

Об'єм можна визначити з геометричних розмірів зони печі, зазначених у таблиці 3.1:

$$V_2 = l_1 \cdot h_2 \cdot l_3 - V_1, \quad (3.15)$$

де V_1 – обсяг зони нагріву печі, м^3 ; l_1 - довжина зони нагріву, м; h_2 - висота печі, м; l_3 - довжина нагрівача в зоні нагріву, м.м.

Підставляючи значення таблиці 3.1 у формулі (3.15) визначимо теплоємність матеріалу корпусу печі в зоні нагріву:

$$V_2 = 1.5 \cdot 1.2 \cdot 1.8 - 1.44 = 1.8, \text{ МЗ};$$

тоді теплоємність корпусу (3.14):

$$C_2 = 580 \cdot 1290 \cdot 1.8 = 1336320, \frac{\text{Дж}}{^\circ\text{C}}.$$

При підстановці значень з таблиці 3.1 і вище розрахованих значень математичні вирази передавальних функцій зазначені в таблиці 3.2, передавальні функції набудуть вигляду:

$$W_1 = 0.0018 \cdot 14 = 0.0504;$$

$$W_3 = \frac{1}{2118.82 \cdot p};$$

$$W_4 = \frac{1}{1336320 \cdot p};$$

$$W_5 = 12.5 \cdot 9 = 112,5;$$

$$W_6 = 12.5 \cdot 6 = 75;$$

$$W_7 = 12.5 \cdot 6 = 75.$$

Передатна функція нагрівача при підстановці у формулу (3.8) даних таблиці 3.3 набуде вигляду:

$$W_{\text{наг1}} = \frac{1}{400 \cdot 64 \cdot p} = \frac{1}{25600 \cdot p}.$$

3.1.5 Визначення передавальної функції датчика температури

Пристрій, що вимірює температуру в печі, є термопарою. На виході датчика формуються сигнал уніфікованого у вигляді сигналу 4÷20 мА.

Діапазон вимірювання датчика ($DT_{\text{вим}}$) 0÷1000 °С.

Сигнал з датчика надходить у програмований логічний контролер, на вході якого знаходиться аналого-цифровий перетворювач (АЦП). АЦП перетворює сигнал датчика з аналогового значення значення температури (T_k) в діапазоні 0 ÷ 1000 °С. Тому якщо розглядати термопару спільно з АЦП як єдиний датчик, отримаємо передатну функцію датчика.

$$W_{\text{дат.тсм.}} = \frac{T_k}{T_{\text{вим.макс}}}, \quad (3.16)$$

де T_k - максимальне значення температури, що визначається контролером, °С;
 $T_{\text{вим.макс}}$ - максимальне значення температури, що вимірюється датчиком, °С.

Підставляючи у формулу (3.16) отримаємо:

$$W_{\text{дат.тем.}} = \frac{1000}{1000} = 1.$$

3.1.6 Передавальна функція перетворювача

Доцільним буде розглядати блок-ШИМ (широтно-імпульсний модулятор), реалізованих на базі контролера, і симісторний перетворювач як єдиний пристрій, далі іменується «Перетворювач».

ШИМ видає послідовність імпульсів, тривалість яких залежить від величини помилки на вході перетворювача. Струм, що подається на нагрівач, пропорційний шпаруватості імпульсів. Запишемо вираз для шпаруватості імпульсу:

$$S = \frac{t_{\text{имп}}}{T}, \quad (3.17)$$

де $t_{\text{имп}}$ - тривалість імпульсу, с; T - період імпульсу, з.

Симісторний перетворювач перетворює тривалість імпульсу у вхідний струм нагрівача.

Таким чином, передатна функція перетворювача виглядає так:

$$W_{\text{пер.}} = \frac{I_n}{T_{\text{зад.макс}}}, \quad (3.18)$$

де I_n - номінальний струм нагрівача, А; $T_{\text{зад.макс}}$ - максимальна величина завдання температури.

Підставляючи значення номінального струму (таблиця 3.3) та діапазону завдання температури отримаємо:

$$W_{\text{пер.}} = \frac{35}{1000} = 0.035, \text{ A}^\circ\text{C}.$$

Програмну реалізацію алгоритмів роботи пристроїв електротермічної лінії див. додаток А.

3.2 Дослідження систем керування електричних печей опору з нагрівачами

У ряді гартованих печей для термообробки виробів при температурах понад 1400°C застосовуються нагрівачі з дисіліциду молібдену.

Наступним етапом досліджень систем електроживлення та управління печі стало порівняння характеристик регуляторів температури з різним способом обмеження струму.

Регулятори температури досліджувалися на розробленій в Simulink Matlab моделі стосовно типової електричної печі опору періодичної дії для термообробки виробів з параметрами: номінальна температура, 1460°C ; матеріал нагрівачів дисіліцид молібдену опір нагрівача змінюється в залежності від температури номінальний струм, 140А Можна було очікувати, що зворотний зв'язок по внутрішньому контуру струму традиційного регулятора температури має кращі характеристики. Проте, як свідчить аналіз рис. 3.8, 3.9:

- Обидві схеми забезпечують необхідну якість перехідного процесу; обмеження струму призводить до зниження швидкості зміни температури порівняно з регулятором без обмеження струму;

- перехідні функції струму та температури, досліджуваних регуляторів, схожі між собою;

- перерегулювання та точність перехідної функції температури краще, при використанні запропонованого регулятора (крива 2 на рис. 3.8);

- стрибок струму на нагрівачах (при однаковому значенні струмової відсічки – 210 А) менший у запропонованому регуляторі (крива 2 на рис. 3.9), що позитивно впливає термін служби нагрівача.

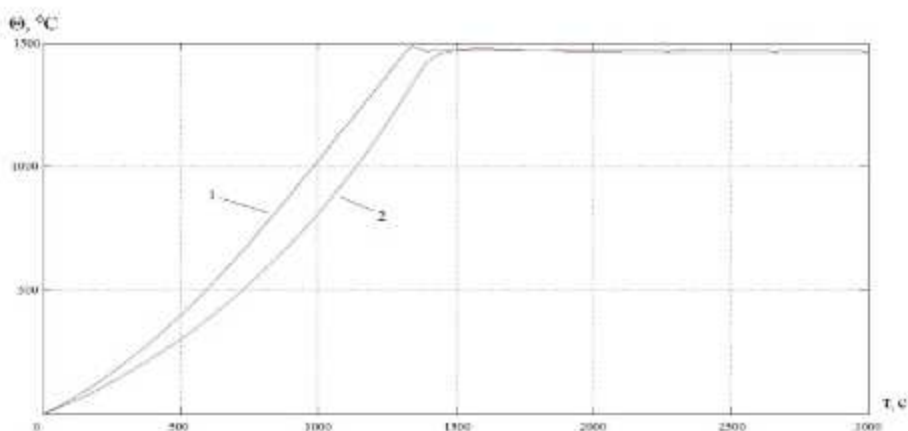


Рис. 3.8. Залежності температури на нагрівачах від часу: 1 – з струмовою відсічкою у регуляторі; 2 - з додатковим зворотним зв'язком по струму

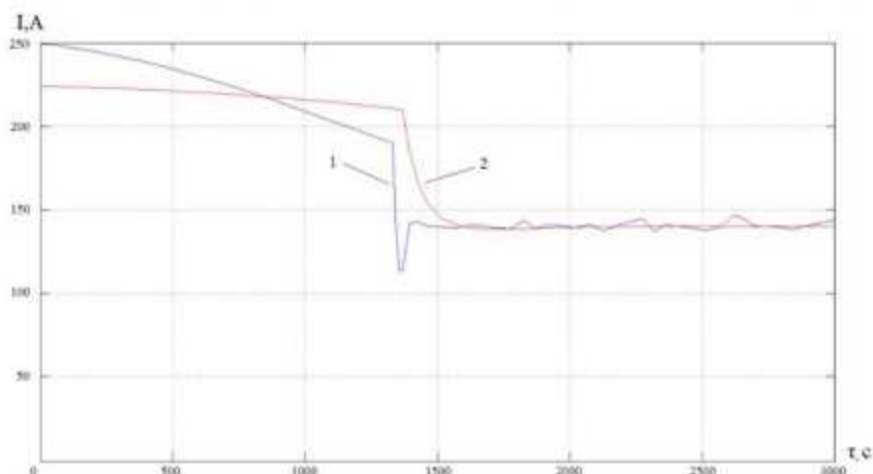


Рис. 3.9. Залежності струму нагрівачів від часу: 1 – з струмовою відсічкою у регуляторі

Як свідчить рис. 3.9 розроблений регулятор температури електропечі опору (крива 2) дозволяє організовувати плавний пуск печі, обмежуючи стрибок струму, що продовжує термін служби нагрівачів з високим значенням температурного коефіцієнта електричного опору.

Порівняно з регулятором температури, в якому закладено зворотний зв'язок по струму в самому регуляторі потужності, розроблений регулятор температури має кращі характеристики перехідних функцій, що дозволяє: знизити стрибок струму, при однакових значеннях «струмової відсічки» на 30% (рис. 3.9).

Необхідно відзначити, що традиційний регулятор вимагає додаткового ретельного налаштування коефіцієнта підсилення «струмової відсічки» $Gain_4$, а також параметрів ПІ-регулятора (рис. 3.14).

Наступним етапом досліджень запропонованого регулятора було визначення залежності часу виходу на номінальний режим нагрівачів, а також налаштування параметрів ПІ-регулятора, при різних значеннях відношення струмової відсічки до номінального струму. Ці дослідження проводилися також на моделі (рис.3.14) шляхом зміни значення струмової відсічки в блоці $DeadZone1$ і наступним налаштуванням параметрів ПІ-регулятора.

Слід зазначити, що «струмова відсічка» може бути використана для регулювання швидкості нагрівання.

На рис. 3.10 представлена залежність швидкодії виходу на режим нагрівачів печі від відношення струмової відсічки до номінального струму, при використанні розробленого регулятора температури.

Як впливає із залежності (рис. 3.10), збільшення «струмової відсічки» вище $2,5 \times I_{ном}$ не має особливого сенсу у зв'язку з мінімальним збільшенням швидкості виходу на режим нагрівачів. З використанням запропонованого регулятора температури, встановлювати значення струмової відсічки в діапазоні від $1,5$ до $2,5 I_{ном}$.

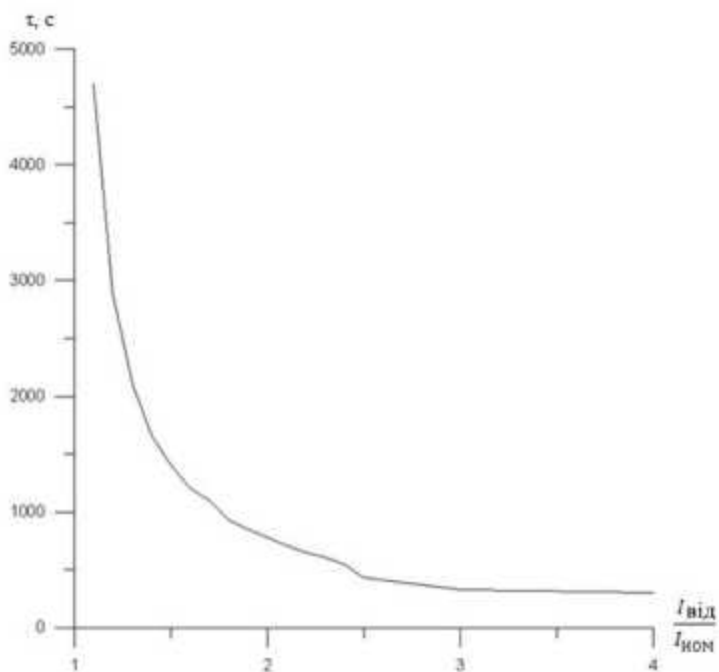


Рис. 3.10. Залежність швидкодії нагрівача від відношення струму «відсічки» до номінального струму

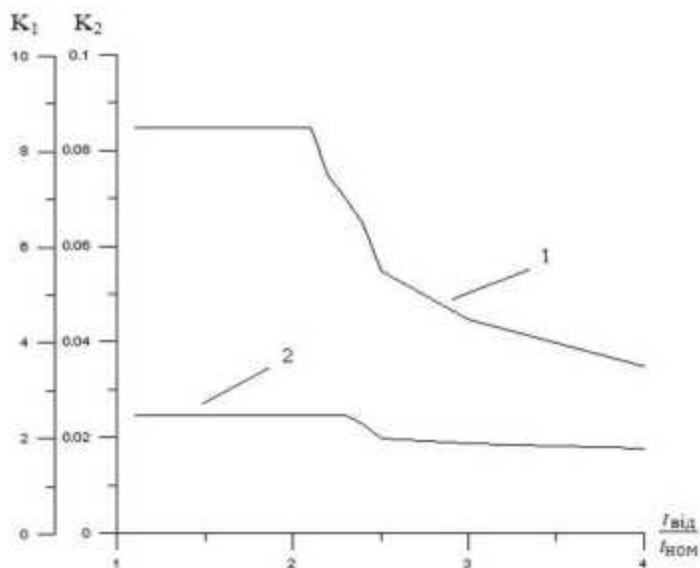


Рис. 3.11. Параметри ПІ-регулятора залежно від відношення струму «відсічки» до номінального струму: 1 – пропорційна; 2 – інтегральна.

На рис. 3.11 відображено залежність пропорційної та інтегральної складової ПІ-регулятора. Стосовно $I_{\text{від}}/I_{\text{ном}} \leq 2$, значення пропорційної складової при налаштуванні ПІ-регулятора є постійним (рис. 3.11, крива 1). Стосовно $I_{\text{від}}/I_{\text{ном}} \geq 3$, значення пропорційної складової плавно зменшується $I_{\text{від}}/I_{\text{ном}} < 2,5$ (крива 1, рис. 3.11). Інтегральна складова ПІ-регулятора, при зміні струмової відсічки, практично не змінюється (крива 2, рис. 3.11).

Порівняння варіантів виконання систем керування нагрівачами із тугоплавких металів

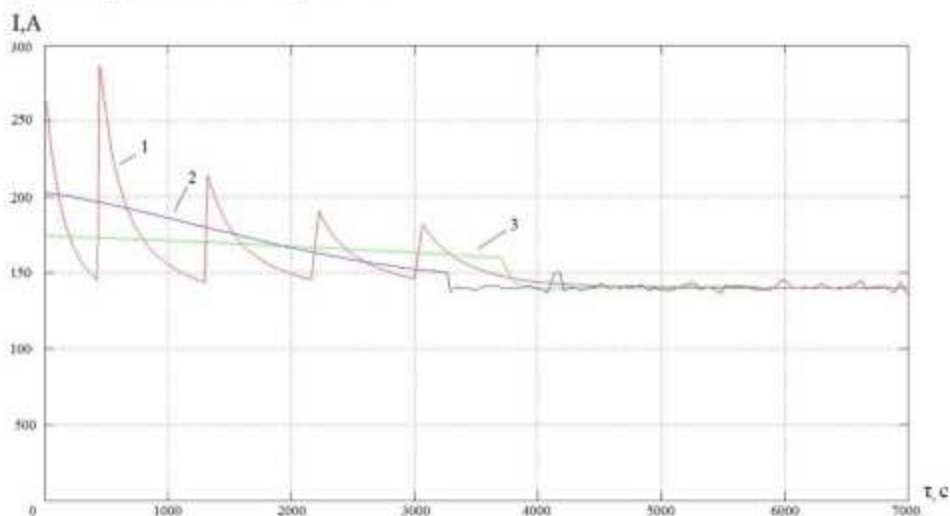
На закінчення наводиться порівняння струмових характеристик (рис. 3.11) для системи управління з перемиканням ступенів напруги трансформатора (крива 1), а також з регуляторами температури з струмовими відсічками всередині регулятора (крива 2) та з додатковим каналом зворотного зв'язку по струму (крива 3). Як видно з аналізу рис. 3.11:

- усі способи організації живлення нагрівачів дозволяють забезпечити плавний пуск печі;

- застосування регулятора з додатковим каналом струму дозволяє знизити стрибок струму на нагрівачах: на 30% порівняно з «струмовою відсічкою» у внутрішньому контурі регулятора; на 70% - з перемиканням ступенів напруги трансформатора;

- для низки технологічних процесів, коли не потрібно обмеження швидкості нагріву, використання регуляторів з «струмовою відсічкою» дозволяє регулювати (збільшувати) швидкість нагріву в порівнянні з системою управління з перемиканням ступенів напруги трансформатора;

- Крім того, система керування з додатковим каналом струму більш проста і зручна в налаштуванні.



3.12. Залежності струму на нагрівачах від часу: 1 – зі зміною ступенів напруги; 2 – із внутрішнім контуром струму; 3 – з додатковим зворотним зв'язком за струмом.

Таким чином, при проектуванні системи управління печі з нагрівачами з високим значенням коефіцієнта електричного опору можна рекомендувати застосування регулятора температури з обмеженням струму в каналі

зворотного зв'язку за температурою. У зв'язку з тим, що такий спосіб організовує найбільш «плавний пуск» нагрівачів, що в кінцевому підсумку позитивного впливає на продовження терміну служби всього комплексу нагрівальних елементів.

3.3 Дослідження регулятора температури електричної печі опору з обмеженням струму нагрівачів

У ряді печей для термообробки виробів при температурі понад 1400⁰С застосовуються нагрівачі з дисіліциду молібдену. Одним із способів зниження стрибка струму в системах керування нагрівачами з дисіліциду молібдену, є реалізація струмової відсічки, що обмежує струм на нагрівачах в процесі нагрівання печі є застосування струмової відсічки, що обмежує струм на нагрівачах в процесі розігріву печі.

У ряді спеціалізованих виконавчих елементів - тиристорних регуляторів змінної напруги, вводять нелінійний негативний зворотний зв'язок по струму (струмове відсікання), що обмежує струм навантаження допустимими для тиристорів значеннями. У більшості виконань тиристорних регуляторів потужності струмове відсікання не застосовують. Більш того, введення струмової відсічки можливе тільки при використанні фазоімпульсного способу управління тиристорами регулятора потужності, у той час як для печей опору застосовують імпульсне (релейне) управління тиристорами, що дозволяє зменшити вартість при збереженні якості та точності регулювання. Однак, як показали дослідження, у релейних регуляторах температури вводити струмове відсічення не можна.

Про відсутність контролю струму в стандартному регуляторі температури призводить до збільшення встановленої потужності тиристорів та регулятора.

Таким чином, відсутність у стандартних програмованих регуляторах температури зовнішніх входів для введення від'ємного зворотного зв'язку по струму обмежує їх застосування для високотемпературних печей, що вимагають контролю струму нагрівачів, при включенні холодної печі.

Для розширення можливостей стандартних програмованих регуляторів температури пропонується вводити зворотний струм по каналу зворотного зв'язку температури.

На рис.3.13 наведено функціональну схему модернізованого регулятора температури.

Даний пристрій відрізняється від промислового регулятора, описаного вище, тим, що між джерелом живлення та силовим входом регулятора напруги РН встановлено датчик струму ДС. Датчик струму може бути виконаний у вигляді трансформаторів струму вторинними обмотками, підключеними до випрямляча, пов'язаного своїм виходом із входом порогового елемента.

Сигнал струму, що знімається датчиком струму ДС, через пороговий елемент ПЕ подається до суматора Σ спільно з сигналом температури ДТ. Результуючий сигнал струму та температури подається на порівнюючий пристрій ЕП.

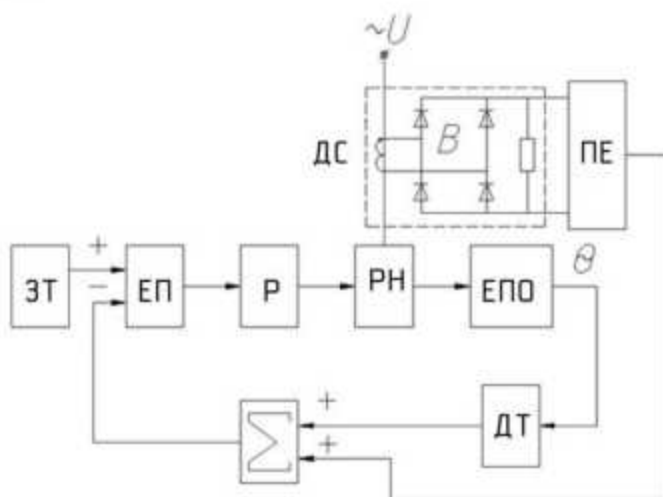


Рис.3.13. Функціональна схема розробленого регулятора температури електропечі опору

Для дослідження розробленої системи управління було побудовано модель регулятора температури у середовищі Simulink Matlab (рис. 3.14). При

побудові цієї моделі було використано традиційну спрощену модель ЕПО, як об'єкта управління з перехідною функцією, розрахованою за (2.1). Для зручності дослідження регуляторів температури з обмеженням струму розроблена модель, реалізована в пакеті прикладних програм Simulink Matlab (рис.3.14), що включає два способи організації «струмової» відсічки. Штриховою лінією на рис. 3.14 показано схему регулятора температури з внутрішнім контуром струму (традиційне схемотехнічне рішення). Запропоноване схемотехнічне рішення відповідає схемі, що розташована нижче традиційної схеми. Для зручності порівняння на обидві моделі надходить той самий сигнал від одного блоку Step, а для графічного представлення вихідних сигналів використовуються також загальні віртуальні осцилографи Scope і Scope1. Такий прийом дозволяє наочно подати результати порівняння традиційного регулятора та запропонованого регулятора (п.3.4). Обидва регулятори температури, представлені на рис.3.14, включають блок Lookup Table (Simulink Matlab), який відповідає за зміну опору нагрівача в залежності від температури.

Розроблений регулятор температури електричної печі опору з введенням додаткового зворотного зв'язку струму в канал зворотного зв'язку за температурою, забезпечує «плавний» пуск нагрівачів.

Приведена імітаційна модель дозволяє оцінити стрибок струму на нагрівачах залежно від способу обмеження струму нагрівачів.

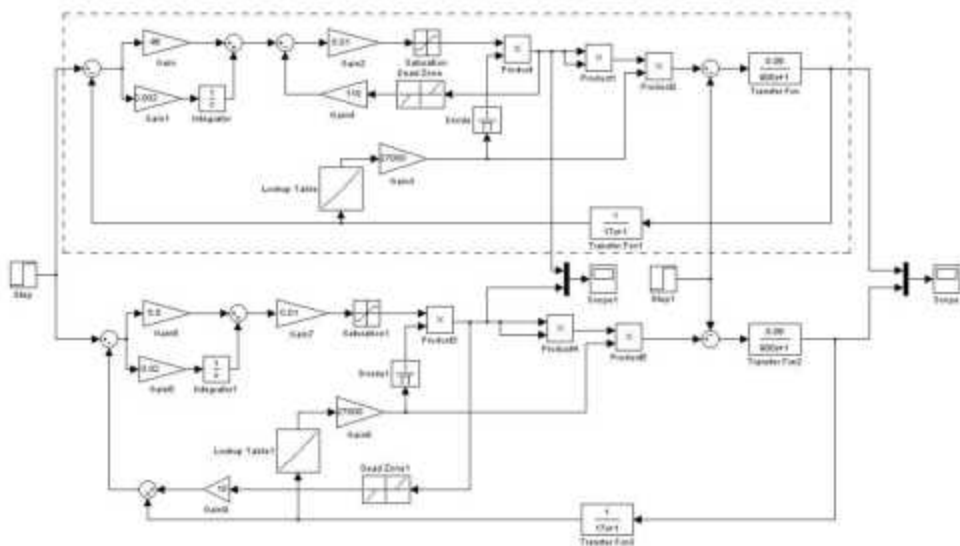


Рис. 3.14. Моделі регуляторів температури, реалізовані в середовищі Simulink Matlab: 1 – з струмовою відсідкою у регуляторі; 2 – з додатковим зворотним зв'язком по струму

ВИСНОВОК

У магістерській роботі розроблена АСУ електротермічної лінії, призначена для управління процесом загартування металевих виробів автомобільної промисловості.

У проєкті проведено аналіз проблемної ситуації, аналіз технологічного процесу як об'єкта управління, розроблено структуру АСУ та складено технічне завдання. Було проаналізовано теплові процеси у печах електротермічної лінії. У розділі технічна пропозиція були обрані принципи керування пристроями електротермічної лінії, керування температурою в печах та керування швидкостями конвеєрів електротермічної лінії, а також технічне та програмне забезпечення для їх реалізації. Зроблено синтез алгоритмів логічного управління пристроями лінії, реалізовано систему

візуалізації технологічного процесу у SCADA WinCC 6.0. Результати розроблення системи відповідають вимогам ТЗ.

У роботі використані такі програмні пакети: Simatic Step 7, Scada WinCC 6.0. Для технічної реалізації використано обладнання виробництва компанії Siemens.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Трегуб В.Г. Проектування систем автоматизації: Навчальний посібник / В.Г. Трегуб. – К.: Видавництво Ліра-К, 2014.
2. Ладанюк А.П. Теорія автоматичного керування технологічними об'єктами: навчальний посібник / А.П. Ладанюк, Архангельська К.С., Власенко Л.О.— К.: НУХТ, 2014.
3. Трегуб В.Г. Автоматизація об'єктів періодичної дії: підручник / В.Г. Трегуб. – Київ: Видавництво Ліра-К, 2017.
4. Автоматизація виробничих процесів: підручник/ І.В. Ельперін, О.М. Пупена, В.М. Сідлецький, С.М. Швед. – Вид. 2-ге, виправлене. – К.: Видавництво Ліра-К, 2015.
5. Кованько В.В., Древецький В.В., Христюк А.О. Загальнотехнічні вимірювання і прилади. Навчальний посібник. – Рівне: НУВГП, 2013. – 189 с.
6. Шефер О.В. Електропривод та автоматизація загальнопромислових механізмів: конспект лекцій. – Полтава: ПолтНТУ, 2011. – 154 с.
7. Методичні вказівки до виконання практичних робіт із дисципліни “Електропривод і автоматизація верстатів автоматів” для студентів спеціальності “Електромеханічні системи автоматизації та електропривод” денної та заочної форм навчання. – Полтава: ПолтНТУ, Укладач: М.В. Пугач, к.т.н., доцент 2013. – 52 с.
8. Моделювання електромеханічних систем: Підручник / Чорний О.П., Луговой А.В., Д.Й.Родькін, Сисюк Г.Ю.,Садовой О.В.– Кременчук, 2001. – 410с.
9. Моделювання електромеханічних систем. Математичне моделювання систем асинхронного електроприводу: навчальний посібник / О. І. Толочко. – Київ, НТУУ «КПІ», 2016. – 150 с.
10. Проектування трифазних асинхронних двигунів з короткозамкненою обмоткою ротора: навч. посібник [для студ. електротехн. спеціальностей] / В. І. Мілих. – Харків: НТУ «ХПІ», 2009. – 99 с.

11. Кузін О.А. Металознавство та термічна обробка металів : підручник / О.А. Кузін, Р.А. Яцюк. — Львів : Афіша, 2002. — 528 с.
12. Теленик С.Ф. Металознавство : підручник / С.Ф. Теленик, І.М. Дорошенко. — Київ : Каравела, 2010. — 368 с.
13. Євгенов О.В. Металознавство та технологія конструкційних матеріалів : навч. посіб. / О.В. Євгенов, С.М. Сеньков. — Київ : Ліра-К, 2018. — 352 с.
14. Посилка Н.В. Металознавство і технологія конструкційних матеріалів : навчальний посібник / Н.В. Посилка. — Харків : ХНТУСГ, 2016. — 240 с.
15. Мазур М.П. Технологія конструкційних матеріалів : підручник / М.П. Мазур. — Львів : Львівська політехніка, 2017. — 380 с.
16. Verhoeven J.D. Steel Metallurgy for the Non-Metallurgist / J.D. Verhoeven. — 2nd ed. — Materials Park : ASM International, 2007. — 300 p.
17. Porter D.A. Phase Transformations in Metals and Alloys / D.A. Porter, K.E. Easterling, M.Y. Sherif. — 3rd ed. — Boca Raton : CRC Press, 2009. — 520 p.
18. Гавриш А.П. Вплив режимів термічної обробки на структуру і властивості конструкційних сталей / А.П. Гавриш, І.В. Матвієнко // Металознавство та обробка металів. — 2019. — №3. — С. 15–22.
19. Килимник І.М. Особливості фазових перетворень у вуглецевих сталях при різних швидкостях охолодження / І.М. Килимник // Вісник КНУТД. — 2020. — №4. — С. 45–53.
20. Савчук В.І. Оптимізація режимів відпуску для підвищення зносостійкості інструментальних сталей / В.І. Савчук, О.О. Левченко // Фізико-хімічна механіка матеріалів. — 2018. — Т. 54, №6. — С. 58–64.
21. Гринь В.А. Дослідження структури та властивостей борованих сталей після термохімічної обробки / В.А. Гринь, М.М. Онопрієнко // Вісник ДонНТУ. — 2021. — №2. — С. 72–80.

22. Шаповалов Ю.О. Вплив параметрів нагрівання на формування мартенситу в легованих сталях / Ю.О. Шаповалов // Наукові праці НУК. — 2022. — №3. — С. 101–109.
23. Akhtar S. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of medium-carbon steel / S. Akhtar, M. Ahmad, T. Hussain // *Materials Research Express*. — 2020. — Vol. 7, No. 4. — P. 1–12.
24. Li J. Influence of quenching temperature on the bainite formation in low-alloy steels / J. Li, K. Wang // *Journal of Materials Engineering and Performance*. — 2021. — Vol. 30. — P. 5392–5403.
25. Rana R. Heat treatment optimization of tool steels for enhanced wear resistance / R. Rana, B. Singh // *Materials Science and Engineering A*. — 2019. — Vol. 766. — P. 138325.
26. Zhang Y. Microstructural evolution during tempering of martensitic steel: correlation with mechanical behavior / Y. Zhang, D. Chen // *Metallurgical and Materials Transactions A*. — 2022. — Vol. 53. — P. 247–259.

ДОДАТКИ

Додаток А. Програмна реалізація алгоритмів роботи пристроїв електротермічної лінії алгоритми наведено у розділі технічна пропозиція.

Програма написана мовою SCL, програмний пакет Simatic Step 7:

```
FUNCTION_BLOCK FB1
// Block Parameters
VAR_INPUT
OPd:BOOL; // клапан відкрився (з пускача)
Acknow: BOOL; // Квітовано
To_OP:BOOL; // команда відкритий від верхнього алгоритму
Breake_List:BOOL; // сигнал настання аварії
END_VAR

VAR_IN_OUT
// I/O Parameters
END_VAR

VAR_OUTPUT
OPtoValve:BOOL; // Відкрити клапан (команда на пускач)
Dont_OP:BOOL; // клапан не відкрився
END_VAR

VAR_TEMP
// Temporary Variables
cur_time:DATE_AND_TIME;

re_val: INT;
END_VAR

VAR
// Static Variables
ErNotCl:BOOL; // клапан не закрився
ErOp:BOOL // клапан відкрився з невідомої причини
Closed_Error:BOOL; // клапан закритий та в аварії
OPd_Er:BOOL; // клапан відкритий помилка
NormalOP:BOOL; // клапан відкритий і в нормі
NormalCL:BOOL; // клапан закритий та в нормі
Cl_ing:BOOL; // клапан відкривається
Op_ing:BOOL; // клапан закривається
Cl_ing_ER:BOOL; // сигнал завдання знімається помилково
timer1: BOOL; //TIMER
timer1_start:DATE_AND_TIME;
interval:TIME; //INTERVAL
```

```

END_VAR

BEGIN
  interval:=T#0s;
  re_val:=READ_CLK(CDT:=cur_time);
  interval:=SB_DT_DT(DT1 :=cur_time,
  dt2:=timer1_start);
  IF interval>T#5s THEN
    timer1:=true;
  END_IF;
  IF NOT To_OP AND NOT OPd AND NOT Closed_Error AND NOT
  OPd_ER THEN
    OPtoValve:=0;
    NormalCL:=1;
  END_IF;
  IF To_OP AND (NormalCL OR Closed_Error) THEN
    Op_ing:= 1;
    NormalCL:=0;
    Closed_Error:=0;
    OPtoValve:=1;
  END_IF;

  IF OPtoValve AND OP_ing THEN
    timer1_start:=cur_time; timer1:=false;
  END_IF;

  IF Op_ing AND OPd THEN
    NormalOP:=1;
    Op_ing:= 0;
  END_IF;

  IF Op_ing AND NOT OPd AND timer1 THEN
    Cl_ing_ER:=1;
    Op_ing:= 0;
    OPtoValve:=0;
    Dont_OP:=1;
  END_IF;

  IF NormalOP AND NOT To_OP THEN
    Cl_ing:=1;
    NormalOP:=0;
    OPto_Valve:=0;

```

```

END_IF;

IF NOT OPtoValve AND Cl_ing THEN
    timer1_start:=cur_time; timer1:=false;
END_IF;

IF (Cl_ing AND OPd AND timer1) THEN
    ErNotCl:=1;
    Cl_ing:=0;
END_IF;

IF NormaCl AND OPd THEN
    NormalCL:=0;
    ErOp: = 1;
END_IF;

IF ErOp OR ErNotCl THEN
    OPd_Er: = 1;
    ErOp: = 0;
    ErNotCL:=0;
END_IF;

IF OPd_Er AND NOT OPd AND Acknow THEN
    OPd_Er:=0;
END_IF;

IF (Cl_ing_ErR AND NOT OPd THEN
    Closed_Error:=1;
    Cl_ing:=0;
END_IF;

IF Closed_Error AND NOT Breake_List AND Acknow THEN
    Closed_Error:=0;

END_IF;

END_FUNCTION_BLOCK

FUNCTION_BLOCK FB2
VAR_INPUT
TR_swithing_ON:BOOL;//трансформатор включений
Turn_ON:BOOL; // команда включити від алгоритму нагрівача
time1:S5TIME; // час імпульсу

```

```

END_VAR

VAR_IN_OUT
// I/O Parameters
END_VAR

VAR_OUTPUT
timer1:BOOL; // видати імпульс
timer2:BOOL // очікувати дозволу на наступний імпульс
timer1_start:BOOL; // змінна запуску таймера 1
timer2_start:BOOL; // змінна запуску таймера 2
END_VAR

VAR_TEMP
// Temporary Variables
cur_time:DATE_AND_TIME;
re_val: INT;

END_VAR
VAR
// Static Variables
timer1_start:DATE_AND_TIME;

timer2_start:DATE_AND_TIME; // змінні дозволи роботи таймерів
interval:TIME;
interval1:TIME; //стандартні змінні функцій таймера
END_VAR

BEGIN
END_IF;
interval:=T#0s;
re_val:=READ_CLK(CDT:=cur_time);
interval:=SB_DT_DT(DT1 :=cur_time,
dt2:=timer1_start);
IF interval<time1 THEN
timer1:=true;
interval1:=T#0s;
re_val:=READ_CLK(CDT:=cur_time);
interval1:=SB_DT_DT(DT1 :=cur_time,
dt2:=timer2_start);
IF interval<time1 THEN
timer2:=true;
END_IF;

```

```
IF TR_swithing_ON AND Turn_ON AND NOT timer2 THEN
    timer1_start:=cur_time; timer1:=false;
    timer2_start:=cur_time; timer2:=false;
END_IF;
END_FUNCTION_BLOCK

ORGANIZATION_BLOCK OB1
VAR_TEMP
    // Reserved
    Info: ARRAY[0..19] OF BYTE;
    // Temporary Variables

END_VAR

// Instructions
FB1.DB1;
FB2.DB2;
END_ORGANIZATION_BLOCK
```

1

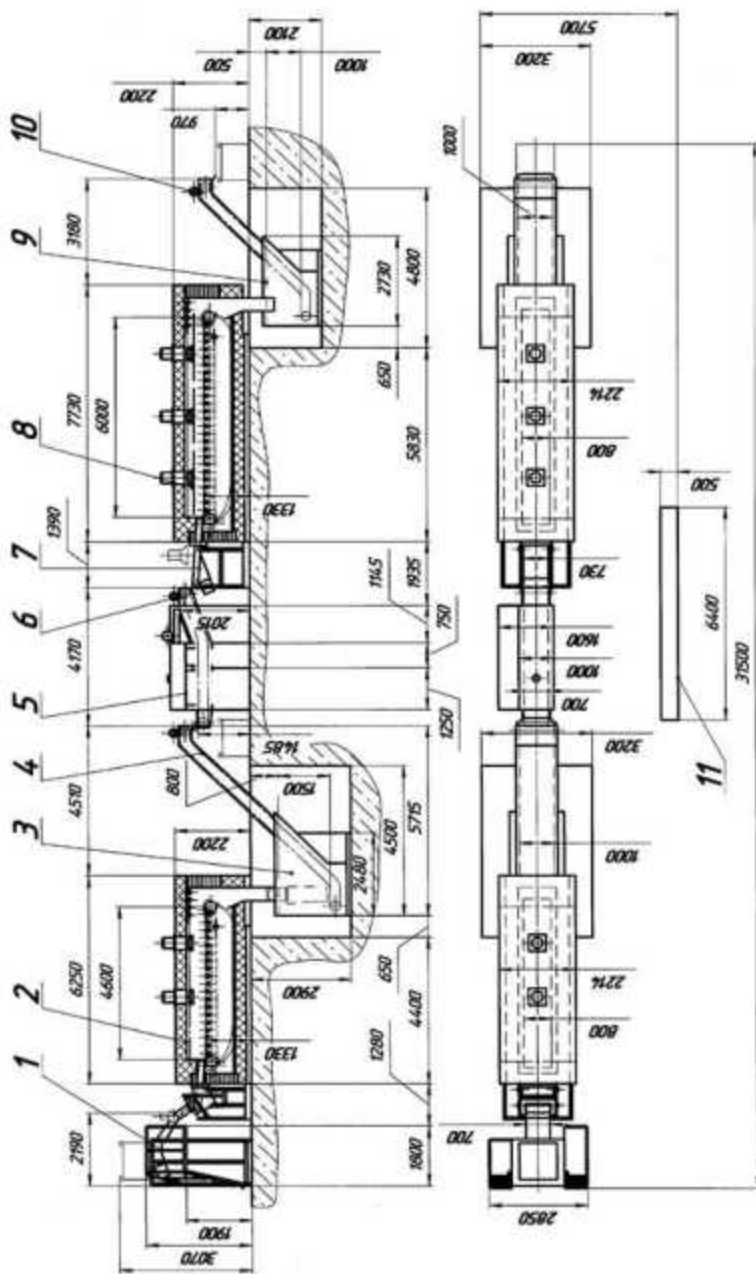
Метою роботи є підвищення якості продукції та надійності технологічного процесу за рахунок автоматизації керування нагрівальними агрегатами, конвєсрами та допоміжним обладнанням.

Об'єктом дослідження є електротермічна лінія термічної обробки металевих виробів як складній технологічній об'єкт автоматизованого управління.

Предметом дослідження є процеси автоматичного керування температурними режимами та роботою виконавчих механізмів електротермічної лінії, а також методи і алгоритми їх реалізації в автоматизованій системі управління

Актуальність теми зумовлена зростанням вимог до якості металевих виробів, що виготовляються методами термічної обробки. Найбільша кількість браку виникає на етапах загартування та відпуску через нестабільність температурних режимів і значний вплив людського фактора. Впровадження автоматизованої системи управління електротермічною лінією дозволяє забезпечити точне підтримання технологічних параметрів, підвищити якість продукції, надійність обладнання та ефективність виробництва.

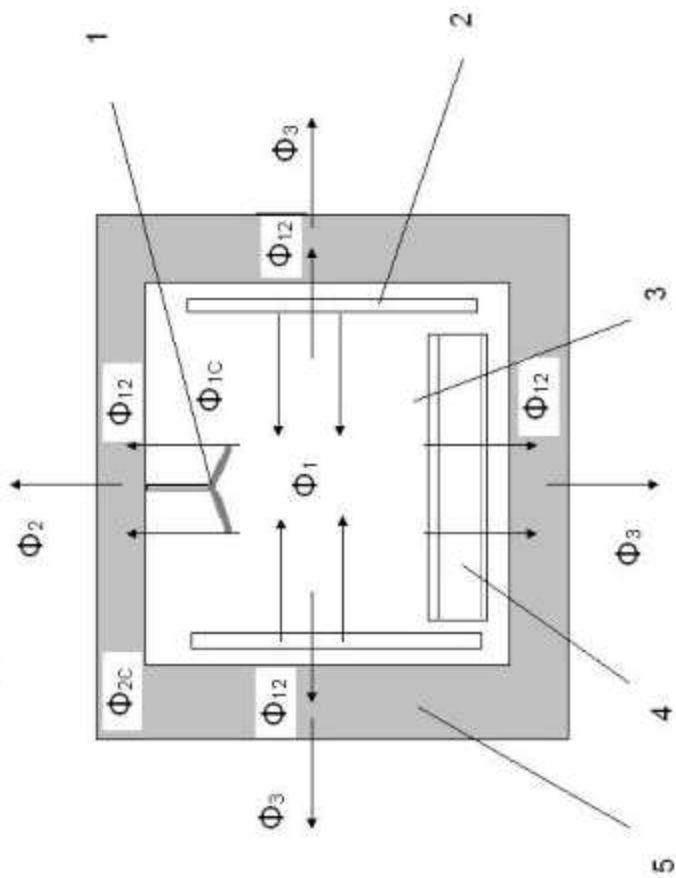
Схема функціональна електротермічної лінії



1. Пристрій завантажувальний; 2. Піч гартівна; 3. Бак гартівний; 4. Конвеєр; 5. Машина для мийки; 6. Конвеєр; 7. Завантаження відпускної печі; 8. Печь відпуску; 9. Бак охолодження; 10. Конвеєр; 11 Шафа керування

Схема розподілу тепла в зоні нагрівання гартової печі

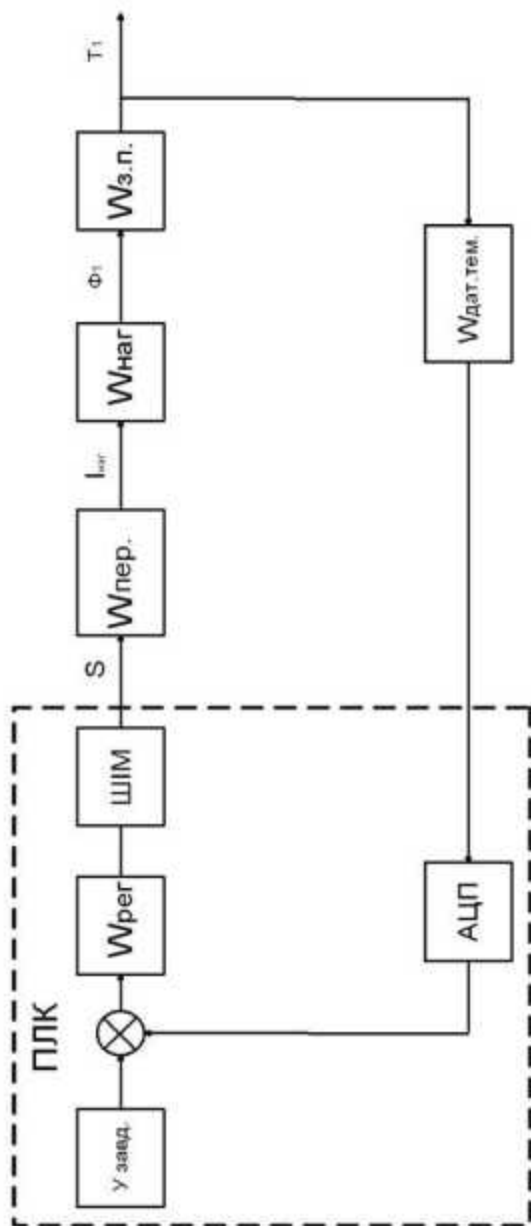
3



1 – вентилятор зони нагріву печі; 2 – секції нагрівача; 3 – внутрішній простір печі; 4 – конвекс печі; 5 – стінки печі.

Структурна схема САК температурою

5



$W_{з.п.}$ - Передатна функція зони нагріву гартової печі;

$W_{наг.}$ - Передатна функція нагрівача;

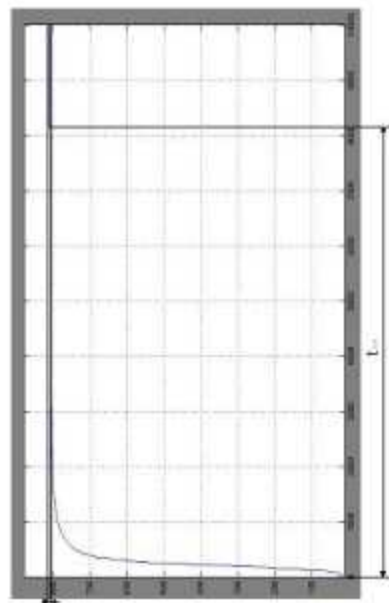
$W_{ШИМ}$ - передавальна функція широтно-імпульсного модулятора;

$W_{рег.}$ - Передатна функція регулятора температури;

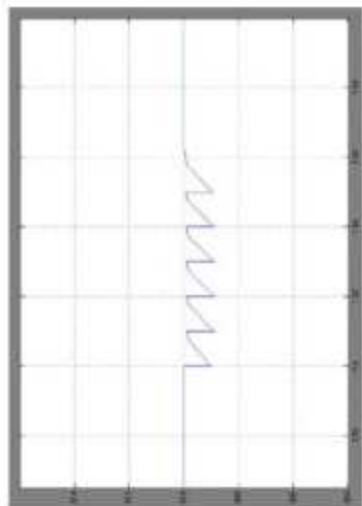
$U_{завед.}$ - пристрій керування, що видає сигнал завдання;

$W_{дат.тем.}$ - передатна функція датчика температури.

Графіки перехідних процесів

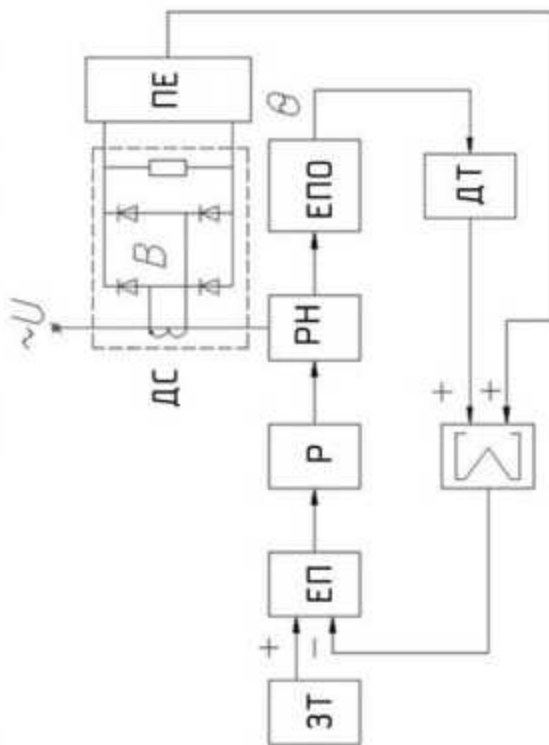


Перехідний процес у зоні
нагрівання гартової печі



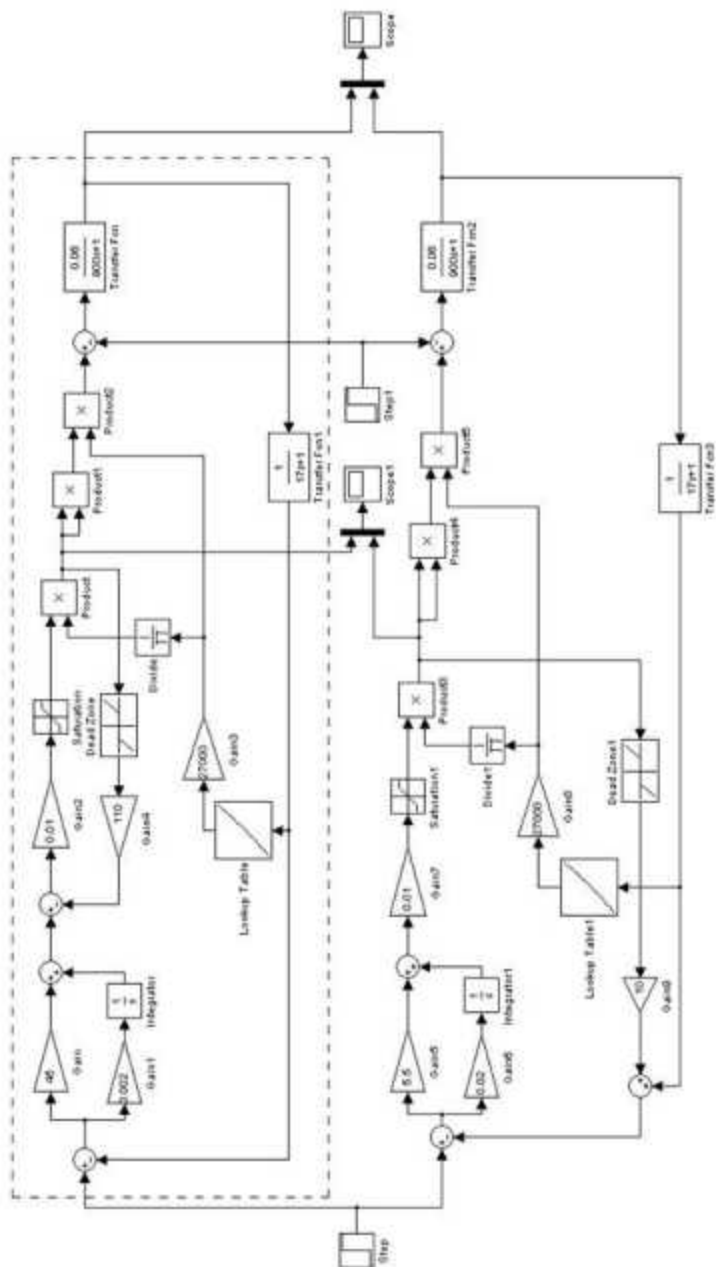
Перехідний процес, відносно
збурень

Функціональна схема модернізованого регулятора температури



ЗТ – задатчик температури; ЕП – елемент порівняння; Р – регулятор; РН – регулятор напруги; ЕПО – електроніч опору; ДТ – датчик температури; ДС – датчик струму; ПЕ – підсилювальний елемент.

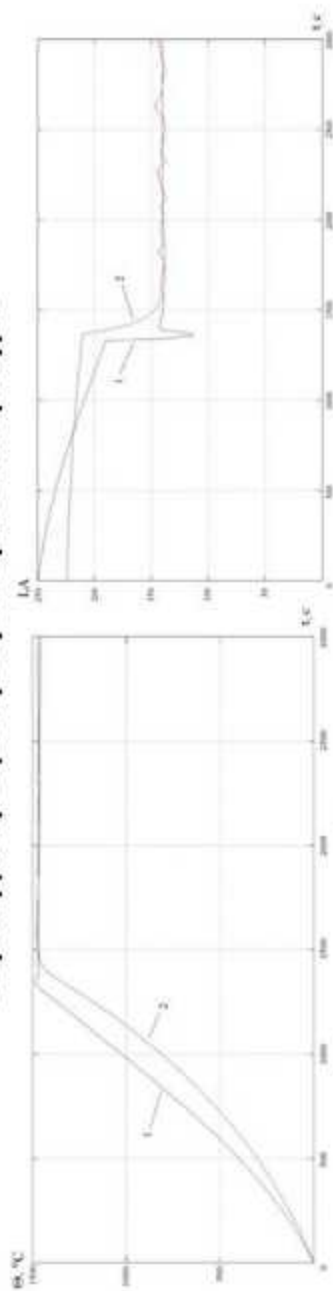
Модель регулятора температури



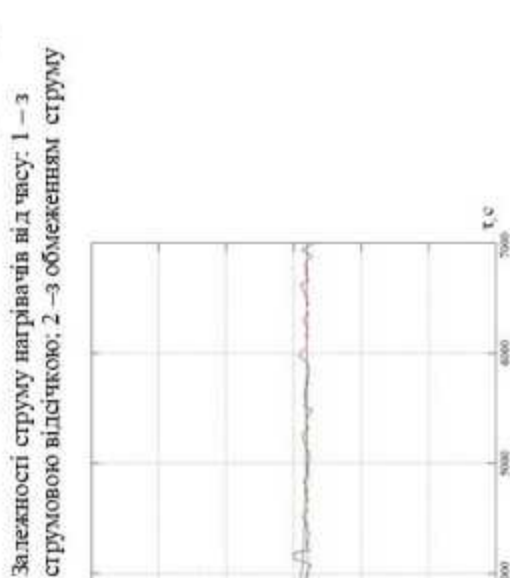
1 – з струмовою відсічкою у регуляторі; 2 – з додатковим зворотним зв'язком по струму

Перехідні процеси регулятора температури

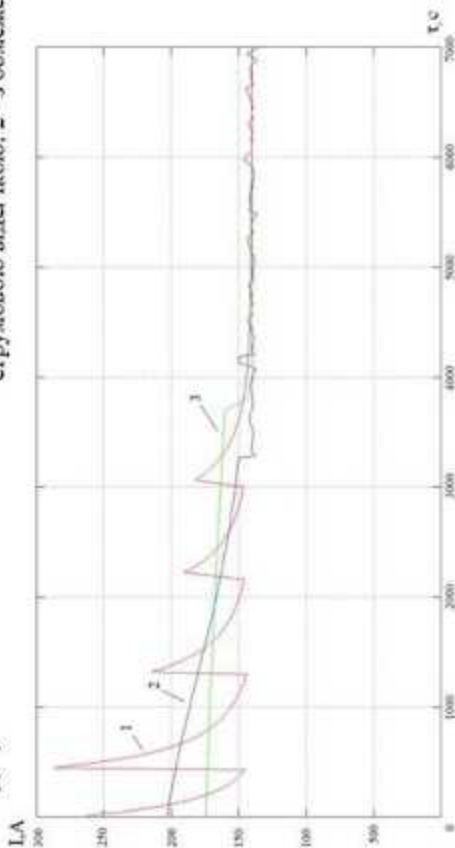
9



1 – з струмовою відсічкою у регуляторі; 2 – з додатковим зворотним зв'язком по струму

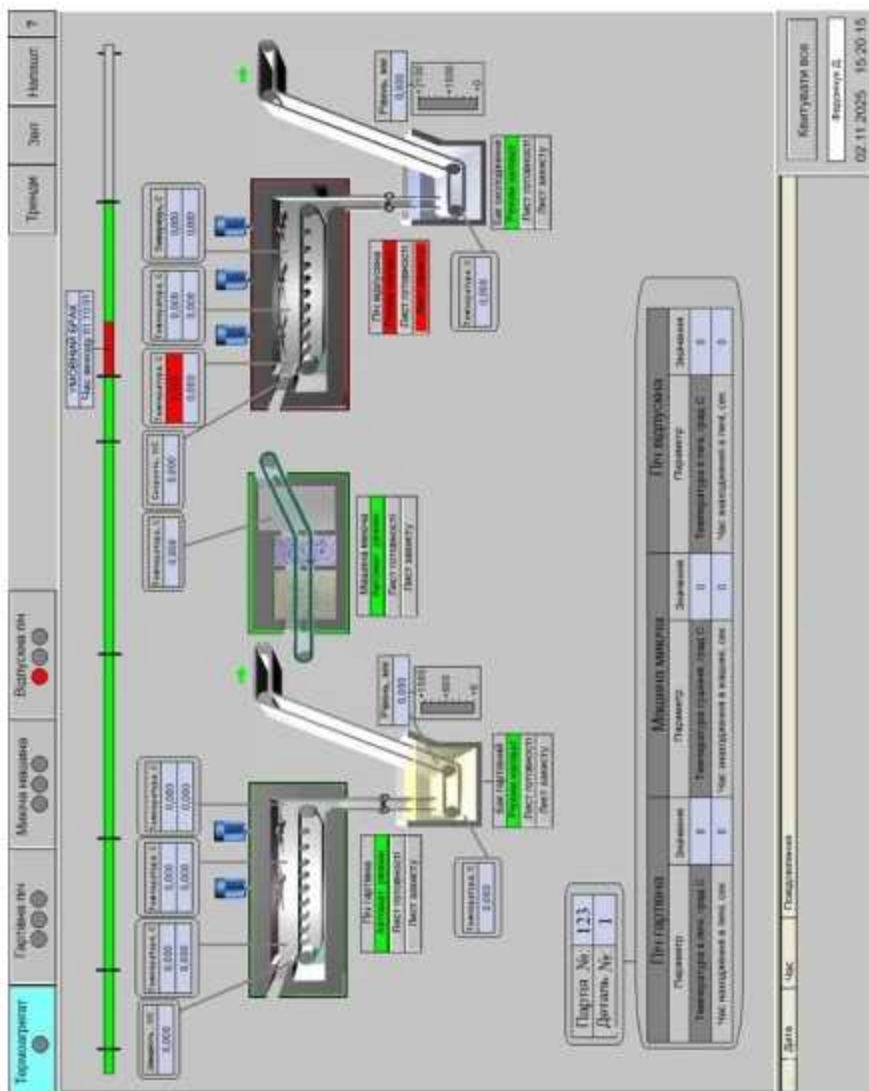


Залежності струму нагрівачів від часу: 1 – з струмовою відсічкою; 2 – з обмеженням струму



Залежності струму на нагрівачах від часу: 1 – зі зміною ступенів напруги; 2 – із внутрішнім контуром струму; 3 – з додатковим зворотним зв'язком за струмом.

Мнемосхема електротермічної лінії



Додаток В. Апробація результатів дослідження

УДК 621.78

В.М. Галай, к.т.н., доцент

Д.В. Федончук, магістрант

*Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія
Кондратюка»*

РОЗРОБЛЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОТЕРМІЧНОЮ ЛІНІЄЮ

Зростання точності термічної обробки, стабільності параметрів нагріву та повторюваності технологічних режимів зумовлює необхідність переходу до автоматизованих систем управління (АСУ) виробничими процесами.

Метою роботи є створення системи автоматичного керування електротермічною лінією, що включає гартівну піч, відпускну піч, гартівний бак, мийну машину, систему завантаження та допоміжні механізми. Задача АСУ полягає у забезпеченні підтримання стабільних температурних, часових і технологічних режимів, збиранні даних, візуалізації параметрів та оперативному реагуванні на аварійні ситуації. До основних цілей створення системи належать підвищення якості продукції, зниження впливу людського фактору, підвищення надійності обладнання та скорочення часу на діагностику та усунення несправностей. У роботі визначено вимоги до структури АСУ, яка має включати підсистеми керування лінією термообробки, завантаженням, гартівною піччю, гартівним баком, мийною машиною, відпускну піччю, баком охолодження та підсистемою візуалізації (АРМ оператора). Кожна підсистема виконує як локальні функції керування виконавчими механізмами, так і взаємодію з центральним контуром управління. Особливе місце відведено підсистемі збору та контролю значень температур, рівнів технологічних середовищ, що забезпечує повну інформаційну підтримку технологічного процесу. Для реалізації керування вибрано програмований логічний контролер (PLC) SIMATIC S7, який

забезпечує необхідну надійність. Програмне забезпечення створено у пакеті Step7 із застосуванням мов ST та SCL. Для організації візуалізації технологічного процесу використано SCADA WinCC 6.0. Обмін даними між APM оператора і контролером організовано за протоколом Simatic S7 Protocol Suite. Такий комплекс дозволяє реалізувати повноцінну інтегровану систему керування електротермічною лінією. У технічній частині розроблено алгоритми функціонування основних вузлів лінії: клапанів, конвеєрів, нагрівачів та системи широтно-імпульсної модуляції. Для кожного блоку побудовано моделі з визначенням вхідних і вихідних сигналів, а також графів можливих станів. Проаналізовано алгоритм роботи блоку ШІМ, необхідний для керування силовими ключами нагрівачів печей. Значну увагу в роботі приділено математичному моделюванню теплових процесів у гартівній печі. Побудовано модель нагрівання, що враховує інерційність об'єкта, динаміку роботи нагрівачів і вплив збурень. Визначено передавальні функції печі, нагрівача, температурного датчика та перетворювача. На основі моделі синтезовано систему автоматичного регулювання температури із застосуванням ПІД-регулятора. Досліджено особливості обмеження струму нагрівачів і розроблено варіанти структур регуляторів з додатковим зворотним зв'язком.

Результати моделювання підтвердили ефективність обраних принципів керування: запропонована САК забезпечує стабільність температур у печах, зменшує перерегулювання і прискорює вихід системи на робочий режим.

У результаті проєктована АСУ електротермічної лінії зменшує вплив людського фактора, підвищує надійність технологічного процесу, забезпечує стабільність температурних режимів і дозволяє своєчасно реагувати на аварійні ситуації. Це сприяє підвищенню якості продукції та оптимізації виробничого процесу термообробки.

Література

1. Ладанюк А.П. Теорія автоматичного керування технологічними об'єктами : навч. посібник. – К. : Ліра-К, 2016. – 312 с.
2. Dorf R.C., Bishop R.H. Modern Control Systems. – 13th ed. – Pearson, 2017. – 1104 p.
3. Siemens AG. SIMATIC S7 Automation System. System Manual. – Germany, 2019.