

Національний університет «Полтавська політехніка
імені Юрія Кондратюка»
(повне найменування вищого навчального закладу)

Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та робототехніки
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра автоматичної, електроніки та телекомунікацій
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

Пояснювальна записка

до магістерської роботи

магістр

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему:

**«Розроблення та дослідження системи автоматичного керування
процесом закалки в вакуумній печі»**

Виконав: студент 6 курсу, групи 601МЕ
спеціальності

141 – Електроенергетика, електротехніка
та електромеханіка

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Степа В.М.

(прізвище та ініціали)

Керівник Галай В.М.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Леві Л.І.

(прізвище та ініціали)

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
(повне найменування вищого навчального закладу)

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

Кафедра, циклова комісія автоматики, електроніки та телекомунікацій

Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр

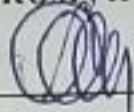
Напрямок підготовки _____

(шифр і назва)

Спеціальність 141 - Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
завідувач кафедри
автоматики, електроніки та
телекомунікацій

 О.В. Шефер
"02" 09 2024 року

ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Степі Валерію Михайловичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. **Тема проекту (роботи)** Розроблення та дослідження системи автоматичного керування процесом закалки в вакуумній печі.

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

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

затверджена наказом вищого навчального закладу від № 818-фа від 09.08.2024.

2. **Строк подання студентом проекту (роботи)** 19.12.2024

3. **Вихідні дані до проекту (роботи)** розробити уточнені моделі ВЕПО; дослідити систему електроживлення та управління ВЕПО; САК процесом закалки реалізувати на сучасному ПЛК; передбачити роботу системи в автоматичному та ручному режимі; матеріали переддипломної практики.

4. **Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)** Опис вакуумних технологій у металургії; постановка завдання розробки уточнених моделей; розробка моделі електричної печі опору; регулятор температури ВЕПО з обмеженням температури нагрівальних елементів; регулятор температури ВЕПО із компенсацією різниці температур у теплових зонах печі; дослідження систем електроживлення та управління вепо для термообробки виробів; дослідження впливу місця встановлення датчика температури; опис роботи панелі оператора та контролера.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Основні вузли ВЕПО; Функціональна схема системи регулювання температури ВЕПО; Структурна безперервного регулювання температури з ПІД-законом регулювання; Структурна схема регулятора температури, що враховує неоднорідність ВЕПО; Імітаційна модель регулятора температури ВЕПО; Структурна схема регулятора температури ВЕПО з обмеженням температури нагрівальних елементів; Імітаційна модель регулятора температури ВЕПО з обмеженням температури нагрівальних елементів; Динамічні характеристики температури нагрівача та футерування, отримані на імітаційній моделі; Дослідження впливу місця встановлення датчика температури; Функціональна схема регулятора температури ЕПО із компенсацією потужності в теплових зонах; Імітаційна модель регулятора температури ВЕПО; Інтерфейс панелі оператора.

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

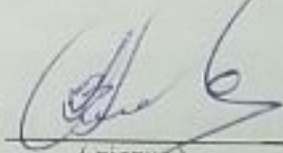
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 06.08.2024

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Вступ. Розділ 1. Вакуумні технології в металургії. Слайди 1-3.	16.10.24	30%
2	Розділ 2. Розроблення уточнених моделей ВЕПО для термообробки виробів, Розділ 3. Дослідження систем електроживлення та управління ВЕПО для термообробки виробів, Слайди 4-6.	19.11.24	60%
3	Розділ 4. Опис роботи панелі оператора та контролера Висновки. Слайди 7-11.	19.12.24	100%

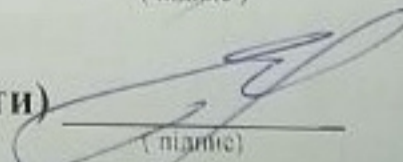
Студент


(підпис)

Степа В.М.

(прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи)


(підпис)

Галай В.М.

(прізвище та ініціали)

Перелік умовних скорочень

АСУ	– автоматизована система управління;
САК	– система автоматичного керування;
САУ	– система автоматичного управління;
АСУ ТП	– автоматизована система управління технологічним процесом;
САУ НУ	– система автоматичного управління насосною установкою;
ПЗ	– програмне забезпечення;
ПЛК	– програмований логічний контролер;
П	– пропорційний регулятор;
ПІ	– пропорційно-інтегральний регулятор;
ПІД	– пропорційно-інтегральний диференціальний регулятор;
ККД	– коефіцієнт корисної дії;
ВЕПО	– вакуумна електрична піч опору;
ТКП	– термокомпенсаційний пристрій
КЕН	– карбідокремновий нагрівач

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. ВАКУУМНІ ТЕХНОЛОГІЇ В МЕТАЛУРГІЇ	9
1.1 Вакуумні електропечі.....	9
1.2 Дистиляція у вакуумі.....	12
1.3 Зварювання та паяння у вакуумі.....	13
1.4 Спікання у вакуумі.....	15
1.5 Нагрівачі електричних печей опору для термообробки виробів.....	17
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБЛЕННЯ УТОЧНЕНИХ МОДЕЛЕЙ ВЕПО ДЛЯ ТЕРМООБРОБКИ ВИРОБІВ	25
2.1. Постановка завдання розробки уточнених моделей.....	25
2.2. Розробка моделі електричної печі опору.....	28
2.3. Регулятор температури ВЕПО з обмеженням температури нагрівальних елементів.....	34
2.4 Регулятор температури ВЕПО із компенсацією різниці температур у теплових зонах печі.....	39
2.5 Регулятор температури електричної печі опору з обмеженням струму нагрівачів.....	42
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ ТА УПРАВЛІННЯ ВЕПО ДЛЯ ТЕРМООБРОБКИ ВИРОБІВ	46
3.1. Дослідження впливу місця встановлення датчика температури.....	46
3.2. Дослідження систем управління ВЕПО з обмеженням температури нагрівальних елементів.....	50
3.3 Дослідження системи управління ВЕПО із компенсацією різниці температур у теплових зонах печі.....	52
3.4. Дослідження систем керування електричних печей опору з нагрівачами з дисіліциду молібдену.....	57
Висновки за розділом.....	62
РОЗДІЛ 4. ОПИС РОБОТИ ПАНЕЛІ ОПЕРАТОРА ТА КОНТРОЛЕРА	63
4.1. Вибір параметрів роботи та режиму керування.....	63
4.2. Автоматичний режим роботи.....	64
4.3. Ручний режим роботи.....	68
4.4. Налаштування програми технолога.....	69

4.5. Налаштування ПД-регулятора.....	73
4.6. Запис технологічного процесу.....	77
4.7. Система водоохолодження.....	79
4.8. Екран перегляду аварійної сигналізації.....	80
4.9. Налаштування сенсорної панелі оператора.....	81
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	84
ДОДАТКИ.....	86
Додаток А.....	87
Додаток Б	94

ВСТУП

У різних галузях промисловості набули поширення вакуумні електричні печі опору (ВЕПО) періодичної дії для термообробки виробів.

Хімічні та фізичні процеси, що протікають при випалюванні матеріалів, зумовлюють склад і характеристику фаз, що утворюються, їх співвідношення, розмір, форму і взаємне розташування структурних елементів (включаючи пори), зміна маси та об'єму виробу.

Цикл випалу виробів складається з періодів нагрівання, витримки в області максимальних температур та охолодження. Кінцева температура випалу та тривалість витримки обумовлюється комплексом вимог до властивостей виробу. Швидкість процесів спікання у випаленні зростає з температурою. Цю залежність у ряді випадків можна використовувати, варіюючи співвідношення температури та тривалості витримки, отримуючи зрештою бажаний технологічний результат.

Період нагріву є дуже складною стадією випалу. Основне завдання полягає в тому, щоб нагріти виріб до необхідної максимальної температури, уникнувши при цьому його руйнування (пошкодження). Небезпека руйнування виробів викликається переважно об'ємними змінами при нагріванні й часом інтенсивними процесами масообміну.

Період витримки виробу при випаленні в ВЕПО періодичної дії залежить від умов вирівнювання температури в об'ємі печі.

Технологічний процес термообробки виробів вимагає забезпечення високої рівномірності нагріву в робочій камері печі для підвищення якості виробів, що обробляються.

При цьому величина припустимого перепаду температури лімітує швидкість нагрівання у всьому діапазоні температур.

З метою покращення енергетичної ефективності електричних печей опору та отримання виробів із заданими характеристиками та формами, термообробки виробів необхідно підвищувати рівномірність нагріву у робочій камері печі.

Одним із способів підвищення рівномірності нагріву ВЕПО є поділ

нагрівального блоку на теплові зони.

Однак, при такому способі підвищення рівномірності нагріву навіть при однаковій уставці температури в кожному регуляторі може спостерігатися істотна різниця температур у різних теплових зонах в процесі нагрівання внаслідок відмінності теплових постійних часу, і потужностей, що вводяться в кожен з теплових зон.

Для зниження різниці температур різних теплових зон у процесі нагрівання пропонується вводити автоматичну корекцію потужності, що надходить у теплову зону, залежно від різниці температур.

Враховуючи перераховані вище особливості, слід зазначити, що застосування загальнопромислових печей для ряду процесів випалу виробів призводить до зниження характеристик виробу, що обробляється. У зв'язку з цим необхідно розробляти спеціальні ВЕПО з модернізованими конструкціями нагрівальних камер і систем автоматичного управління для підвищення якості виробу, що обробляється.

В даний час заводи-виробники пропонують широкий ряд типорозмірів ВЕПО для термообробки виробів. При цьому набули поширення установки як з прямокутною, так і циліндричною робочою камерою, а також муфельні ВЕПО. Однак актуальним питанням залишається необхідність модернізації системи автоматичного керування (САУ) установкою. Застосування нових алгоритмів управління в сукупності з елементною базою, що постійно розвивається, дозволяє підвищити кількісні і якісні показники регулятора потужності і всієї установки в цілому.

Основним вузлом будь-якої електричної печі опору є нагрівач. Робота нагрівачів відбувається зазвичай у дуже важких температурних умовах, часто за гранично-допустимих температур для матеріалу, з якого вони виконані [15, 17].

Термін служби нагрівачів залежить від багатьох факторів: матеріалу нагрівачів, його конструкції і печі в цілому, режиму роботи, способу регулювання температури, а також багатьох інших.

У стандартних регуляторах температури відсутній контроль температури на нагрівальних елементах печі. Це призводить до їх перегріву та суттєвого

зниження терміну служби. Для вирішення цієї проблеми доцільно розробляти моделі, що дозволяють заощадити час на добірці оптимальних динамічних характеристик, а також налаштування регулятора з обмеженням температури нагрівальних елементів.

Як матеріали нагрівачів у середньо- та високотемпературних ВЕПО, призначених для термообробки виробів застосовують: ніхром (до 1200 °С), фехраль (до 1350°С), kanthal A1(1400°С), карбід кремнію SiC (до 1600°С), дисиліцид молібдену (до 1800°С).

У зв'язку з тим, що будь-який із матеріалів нагрівачів для високотемпературних ВЕПО накладає ряд особливостей на побудову системи живлення та управління, необхідно розробляти уточнені моделі, що враховують ці особливості та дозволяють проектувати систему управління з необхідними властивостями.

У ряді ВЕПО для термообробки виробів на температури понад 1400°С застосовуються нагрівачі з дисиліциду молібдену.

Характерною особливістю таких нагрівачів є високе значення температурного коефіцієнта електричного опору. Це призводить до того, що електричний опір нагрівача, виконаного з дисиліциду молібдену, при нагріванні та охолодженні змінюється в 10 разів, а, отже, у стільки ж разів змінюється і потужність, що виділяється в нагрівачі. З метою спрощення системи управління, а також підвищення якості перехідних процесів при розігріванні печі доцільно використовувати різні способи обмеження струму на нагрівачах з використанням струмових відсічок.

На підставі вищевикладеного завдання пошуку нових алгоритмів управління ВЕПО для термообробки виробів та створення САУ, що дозволяє підвищити рівномірність розподілу температури в робочій камері ВЕПО, на сьогоднішній день є актуальною.

РОЗДІЛ 1. ВАКУУМНІ ТЕХНОЛОГІЇ В МЕТАЛУРГІЇ

Розвиток практично всіх галузей металургійної промисловості пов'язані з інтенсивним використанням вакуумної техніки. У металургії – печей та засобів позапічної обробки у технологічних процесах, що забезпечують виплавку і закалку високочистих металів та сплавів. У порошковій металургії вакуумна технологія знаходить застосування для завершальної стадії компактування - спікання твердих сплавів, постійних магнітів та ін.

1.1 Вакуумні електропечі

Вакуумні електропечі набули широкого поширення у зв'язку з виникненням таких галузей промисловості, як атомна, ракетна та ін. значно покращити фізико-механічні властивості металу.

За принципом пристрою та призначення вакуумні електропечі поділяються на такі типи: дугові, індукційні, електроннопроменеві та опору.

Вакуумні дугові печі - використовуються для виплавки якісних сталей – нержавіючих, конструкційних, електротехнічних, шарикопідшипникових; жароміцних сплавів, тугоплавких та високореакційних металів. Електрод, що розходить, кріпиться на штоку, до якого приєднаний негативний полюс джерела постійного струму. Шток електрода вводиться у вакуумний простір печі. Між кінцем електрода та прокладкою піддону кристалізатора виникає електрична дуга. Матеріал електрода під впливом тепла дуги розплавляється і стікає в кристалізатор, де твердне і з нього поступово формується злиток. Електрод, що служить одним полюсом дуги, може бути витратним і невитратним. Невитратний електрод бере участь у процесі лише як провідник струму.

Інший принципово відмінний тип вакуумної дугової печі, піч для плавки в гарнісажі, особливістю якої є наявність тигля, що охолоджується, заповненого металом. Стіни тигля покриті оболонкою застиглому металу, що відокремлює рідкий метал від стінок тигля. Завдяки цій оболонці (гарнісажу) метал, що виплавляється, не контактує з матеріалом тигля і тому не забруднюється ним. У

плавильному просторі за допомогою системи вакуумних насосів (форвакуумних ротаційних або бустерних, або високовакуумних паромасляних, послідовно з'єднаних з бустерним) підтримується тиск порядку $10 \cdot 10^{-1}$ Па [7].

Вакуумні індукційні печі застосовуються для плавки та розливання різних металів і сплавів, причому найбільшого поширення набули плавильні печі з нахилиєм тиглем усередині стаціонарного кожуха [7, 8]. Принцип роботи печей полягає в тому, що у вогнетривкому тиглі, встановленому у вакуумній камері, за допомогою високочастотного індуктора розплавляють тверду шихту (відходи спеціальної заготовки, чисті метали та феросплави) і рафінують рідкий метал; печі можуть працювати і на рідкому садку. Печі відкачуються дифузійними насосами, що забезпечують досить низькі тиск менше 10 Па. В останні роки ведуться інтенсивні розробки щодо створення промислової вакуумної плазмово-індукційної печі. Застосування плазмотрона прискорює процес розплавлення шихти і дозволяє більш раціонально організувати його, так як з'являється можливість підтримання постійної потужності печі, яка не залежить від габаритів та щільності укладання шихтових матеріалів.

Електронно-променеві печі використовуються для отримання особливо чистих металів. У печах цього типу нагрівання здійснюється завдяки бомбардуванню поверхні електронами, що швидко рухаються. Так як створити спрямований потік електронів і передати достатню енергію можна тільки в умовах високого вакууму, в електронно-променевих печах підтримується тиск порядку $10^{-3} \cdot 10^{-4}$ Па. Основним елементом печі є нагрівальний елемент або гармата, з електромагнітним фокусуєчим пристроєм і системою розгортки променя, що дозволяє отримати пляму діаметром 5-10 мм на відстані 1,5-2 м від катода і переміщувати його по поверхні зливка. Слід зазначити, що електронно-променеві печі використовуються не тільки для плавки, але і для різних процесів, пов'язаних з нагріванням матеріалів, наприклад, при вирощуванні та зонному очищенні монокристалів, термічній обробці стрічкових та дротяних матеріалів, випаровуванні металів з метою нанесення покриттів, для зварювання, лиття тощо.

Вакуумні електропечі опору є найбільш універсальними, так як мають

багато областей застосування, наприклад, їх використовують для нагрівання довгомірних виробів, великих і важких садок, деталей у підвішеному стані для запобігання їх деформації, для відпалу трансформаторної сталі тощо. Принцип пристрою печей полягає в наявності герметичної, теплоізолюваної камери, всередині якої розташовані нагрівальні елементи, що виділяють тепло за рахунок протікання ними електричного струму. Печі відкачуються дифузними насосами, що забезпечують залишкові тиски менше 10^{-7} Па [8, 9]. За типом вакуумні електропечі опору діляться на садочні та методичні. У садочних електропечах садка залишається нерухомою протягом усього часу нагрівання і в них не можна зробити чергове завантаження, попередньо не розвантаживши піч. Ці печі відрізняються відносно низькою продуктивністю. Найбільшого поширення набули такі садочні вакуумні електропечі, як камерні, шахтні, ковпакові, елеваторні. Високопродуктивні методичні вакуумні електропечі включають в себе завантажувальну і розвантажувальну шлюзові камери, камери нагрівання та охолодження, систему пристроїв для переміщення садки в печі та систему відкачування. За принципом переміщення садки знайшли застосування такі різновиди методичних печей: штовхальні, печі з кроком, багатокамерні печі з перекатним візком і печі для термічної обробки стрічки і дроту.

Призначення вакуумних електропечей опору:

- для термообробки, відпалу, загартування та паяння;
- для спікання та дегазації;
- для нагрівання під обробку тиском;
- для спеціальних хіміко-технологічних процесів.

Відпал у вакуумі (при тиску 10^{-1} - 10^{-3} Па) – термовакuumний процес обробки металів і сплавів, що полягає в їх нагріванні, витримці та охолодженні для зняття наклепу, підвищення пластичності, зміни структури у потрібному напрямку, надання певних електричних, магнітних та інших властивостей, а також для очищення від газових та неметалевих включень. У вакуумі піддаються відпалу: листи, дріт, заготовки для подальшої обробки тиском, деталі із різних металів. Наприклад, відпал танталу і ніобію рекомендується проводити протягом однієї години при 1300 - 1400 ° С і тиску не більше 10^{-3} Па [10]. Ніобій обробляється

методом вакуумної прокатки при 1100-1250°C, а після руйнування литої структури легко обробляється тиском при кімнатній температурі. Після відпалу при 1700-1730°C у вакуумі твердість металу Брінель зростає до 800-900 Н/мм², межа міцності до 300-400 Н/мм², відносне подовження 30%. Розрізняють наступні види відпалу: високотемпературний, знегажуючий, зневуглецевий, рекристалізаційний та ін. Наприклад, при виробництві ртутних випрямлячів здійснюється в печах знегажуючий відпал деталей, що виготовляються з низьковуглецевих сталей. Він забезпечує знегажування та отримання світлої поверхні, що при розігріванні деталей під час експлуатації виключає утворення або відшаровування окисної плівки та зменшує газовиділення, завдяки чому запобігає замиканню та пробою. Високотемпературний відпал у печах покращує магнітні властивості та підвищує відсоток виходу вищих марок трансформаторної сталі [10].

Загартування у вакуумі – термовакuumний процес обробки сталі та деяких сплавів (наприклад, латуні, бронзи та ін.) шляхом нагрівання і потім швидкого охолодження. міцності, твердості при зниженій в'язкості, зменшення деформації та короблення тощо; у деяких сталей і сплавів загартування призводить тільки до підвищення в'язкості.

Електропечі для вакуумного загартування поділяють на печі для загартування в газі та для загартування в рідких середовищах. Загартування в газі після нагрівання у вакуумі проводиться в шахтних та камерних печах. Ці печі широко застосовуються для гартування великих виробів, медичного та точного інструменту, деталей приладів та ін.

1.2 Дистиляція у вакуумі

Дистиляція металів та сплавів у вакуумі – один із технологічних процесів вакуумної плавки, призначений для видалення з металу шкідливих домішок у газоподібному стані з метою отримання чистого металу для ракетної техніки, атомної енергетики та інших галузей промисловості [1, 9] вакуумних дугових та індукційних печах при тиску нижче 10⁻¹ Па.

Процес вакуумної дистиляції полягає у випаровуванні домішків і подальшої

їх конденсації.

Вакуумна дистиляція сірки створює сприятливі умови для десульфурзації чавуну. Вакуумної дистиляції можна піддавати такі метали, як кальцій, берилій, цирконій, титан та ін. Вакуумна дистиляція застосовується для очищення губчастого титану та цирконію після відновлення, у виробництві чистих металів: цинку, селену та рідкісноземельних металів, при збагаченні брухту легких металів.

1.3 Зварювання та паяння у вакуумі

Зварювання у вакуумі призначене для отримання нероз'ємних з'єднань елементів приладів, деталей (вузлів) конструкцій машин, що використовуються в точному машинобудуванні, мікроелектроніці, при створенні атомних реакторів тощо [12] та термодифузійне зварювання (зварювання тиском).

Електронно-променеве зварювання здійснюється у вакуумі при тиску залишкових газів 10^{-1} - 10^{-3} Па за допомогою установки, що включає в себе вакуумну робочу камеру, електронно-оптичну систему, що формує електронний промінь. Установка дозволяє виконувати лінійне та кругове аксіальне зварювання у вакуумі при робочому тиску у вакуумній камері $5 \cdot 10^{-1}$ – $5 \cdot 10^{-3}$ Па [13].

Починаючи з 60-х років, електронно-променеве зварювання використовують у виробництві рухових установок ракетно-космічних комплексів. Її застосування для отримання нероз'ємних з'єднань у поєднанні з новими міцними матеріалами дозволило створити двигуни нового покоління з високими експлуатаційними характеристиками. Нова перспективна сфера застосування електронно-променевого зварювання – роботи в умовах космічного простору [14]. Електронно-променеве зварювання широко застосовується у технології мікроелектроніки, а також при герметизації металостекляних корпусів електронних вакуумних приладів, для зварювання тугоплавких, хімічно активних та різномірних матеріалів, виробів із сталі.

Термодифузійне зварювання виконується у вакуумі при розрідженні 10^{-3} - 10^{-2} Па з нагріванням місця зварювання до 0,4-0,8 від температури плавлення

матеріалів, що зварюються; при зварюванні різнорідних матеріалів температурне нагрівання визначається за температурою менш тугоплавкого матеріалу. У такий спосіб можна зварювати більшість твердих матеріалів – як однорідних, і різнорідних [15, 16]. При з'єднанні пари матеріалів, що важко зварюється, використовується проміжна прокладка.

Дифузійне зварювання забезпечує вакуумні, термостійкі та вібростійкі сполуки при збереженні високої точності, форми та геометричних розмірів виробу; широко застосовується при зварюванні термокомпенсаторів кристалів, катодних ніжок, сповільнювальних систем та інших вузлів та елементів електронних приладів.

Зварювальні термодифузійні установки зазвичай складаються з наступних основних вузлів: вакуумна система для отримання вакууму в камері, де відбувається зварювання, а також для підйому та опускання камери; – використання технологічних процесів із застосуванням термокомпресійних пристроїв (ТКП), що дозволяють здійснювати зварювання у вакуумних печах загальнопромислового призначення.

Принцип дії ТКП заснований на використанні різниці коефіцієнтів термічного лінійного розширення матеріалів деталей, що зварюються, і елементів оснащення для створення і передачі зусилля на деталі, що зварюються. При нагріванні пристрою виникає здавлююче зусилля, яке і передається на деталі, що зварюються. Після закінчення зварювання деталі спільно з пристроєм охолоджують, розвакуумують камеру, витягують пристрій з готовими виробами, потім розбирають пристрій і видаляють зварені деталі. Розроблене ТКП застосовується для дифузійного з'єднання у вакуумі виробів з магнітних та немагнітних сталей, алюмінію, міді, нержавіючої сталі, бронзи та ін.

Основні переваги дифузійного зварювання: відпадає необхідність застосовувати припої, електроди, флюси, захисне газове середовище; не відбувається короблення деталей та зміна властивостей металу в зоні з'єднання. Дифузійне зварювання можна застосовувати для отримання конструкцій різноманітної форми. Можна зварювати деталі не тільки по площині, а й по конічній, сферичній, криволінійній, складній рельєфній поверхні тощо.

Паяння у вакуумі – процес отримання нероз'ємного з'єднання шляхом нагрівання місця паяння та заповнення зазору між деталями, що з'єднуються (з металу та сплавів, скла, кераміки та ін.) розплавленим припоєм з його подальшим затвердінням. При паянні деталей із різнорідних матеріалів для забезпечення міцного з'єднання підбирають матеріали з близькими значеннями коефіцієнта термічного розширення або використовують високопластичні припої. Вакуумне паяння може бути поєднане з дегазаційним відпалом. Розрізняють два способи паяння у вакуумі: паяння з локальним джерелом нагріву дуговим розрядом та високотемпературне паяння.

Технологічний процес високотемпературного паяння шаруватих конструкцій у вакуумних печах для використання їх у сучасних літальних апаратах [18]. Застосування, наприклад, вакуумного паяння для виготовлення багатошарових теплообмінників з алюмінієвих сплавів забезпечує отримання паяних сполук, що не поступаються за міцністю та корозійною стійкістю основного матеріалу, що дозволяє значно збільшити ресурс роботи та експлуатаційну надійність вузлів. Процес здійснюється у вакуумній печі періодичної дії, в якій можна виконувати одночасне паяння (3-5) шарових теплообмінників. Потужність печі 200 кВт, тиск 10^{-2} - 10^{-3} Па, максимальна робоча температура 750 °С.

Процес дугового паяння поєднує переваги способів зварювання плавленням та високотемпературної пайки із загальним нагріванням у вакуумі та контрольованою атмосферою [17]. Отримані таким чином нероз'ємні сполуки мають підвищену жароміцність і термостійкість і можуть застосовуватися при виготовленні та ремонті деталей газотурбінних двигунів з високоміцних ливарних сплавів [19].

1.4 Спікання у вакуумі

Спікання металевих та керамічних порошкових матеріалів є однією з найважливіших технологічних операцій, що застосовуються у порошковій металургії. Методом спікання виготовляються конструкційні деталі машин та механізмів; фільтри для очищення рідин і газів, ущільнювальні матеріали для

газових турбін, вакуумного та іншого обладнання, контакти, магніти, ферити для виробів електро-радіотехнічної промисловості та ін. [20].

У вакуумі переважно виконується спікання твердих сплавів, твердих матеріалів, постійних магнітів, тугоплавких металів та танталових конденсаторів.

В електроніці широко використовуються пористі компактні структури, утворені спіканням у вакуумі порошку гідриду ніобію, як металеві обкладки ніобієвих оксидно-напівпровідникових конденсаторів (ОПК). Наприклад, спікання у вакуумі дрібнодисперсного порошку гідриду ніобію замість ніобієвого порошку дозволяє підвищити питомих значення ємності ніобієвих ОПК [21].

Цікавим є високотемпературне спікання плазмохімічних порошоків на основі ZrO_2 , оскільки така кераміка має високу в'язкість руйнування, і може знайти застосування як конструкційну [22]. Досягнення високої температури спікання $1800\text{ }^\circ\text{C}$ дозволило отримати високощільний матеріал з механічними хорошими властивостями.

Поряд з такими вакуумними процесами, як спікання, виплавка та інше, широке застосування металургії знаходить процес витягування кристалів з розплаву. Цей процес здійснюється у вакуумних електропечах для одержання металів високої чистоти, наприклад, міді, нікелю, танталу, золота; кристалів $NaCl$, CaF_2 ; напівпровідникових матеріалів, зокрема, кремнію, германію, арсеніду галію; тугоплавких оксидів, наприклад, сапфіру, гранатів.

1.5 Нагрівачі електричних печей опору для термообробки виробів

Нагрівач є основним вузлом будь-якої електричної печі опору. Робота нагрівачів відбувається зазвичай у дуже важких температурних умовах, часто за гранично-допустимих температур для матеріалу, з якого вони виконані.

Термін служби нагрівачів залежить від багатьох факторів: матеріалу нагрівачів, його конструкції і печі в цілому, режиму роботи, коливань температури, способу регулювання температури, а також багатьох інших.

Як матеріали нагрівачів у середньо- та високотемпературних ЕПО, призначених для термообробки виробів застосовують: ніхром (до 1200⁰С), фехраль (до 1350⁰З), kanthal А1(1400⁰С), карбід кремнію SiC (до 1600⁰С), кульгає лантану (до 1750⁰С), дисиліцид молібдену (до 1800⁰С) [11].

У середньотемпературних печах опору нагрівачі виготовляються із сплавів опору. До сплавів опору відносяться ніхроми та безнікелеві сплави опору. Ніхроми застосовуються при температурах до 1200⁰С на нагрівачі в залежності від марки сплаву, безнікелеві сплави - до 1400⁰С.

Кордона між середньо- та високотемпературними печами визначається максимально допустимою температурою застосування найбільш жаростійких зі сплавів опору.

Нагреватели середньотемпературних ЕПО, як правило, виготовляються у вигляді дротяного або стрічкового зигзагу або дротяної спіралі, що розміщується на трубках.

На рис.1.3 наведені нагрівачі з фехралі у вигляді дротяної спіралі.



Рис.1.3 Нагрівачі із фехралі

Сплави опору характеризуються високим питомим опором та його малою температурною залежністю (значення опору при кімнатній температурі та при 1100°C різняться лише на 3–11% для різних марок сплавів).

Карбідокремнієві нагрівачі (КЕН) широко застосовуються у високотемпературних ЕПО. У порівнянні з нагрівачами зі сплавів опору КЕН мають низку відмінних властивостей: вищу температуру застосування (до 1450 - 1600⁰С) на поверхні нагрівачів), більш високою питомою поверхневою потужністю, можливістю заміни нагрівачів, що вийшли з ладу, без тривалої зупинки печі.

Висока питома поверхнева потужність нагрівальних елементів дозволяє досягти задану температуру в печі при малих розмірах робочого простору. На рис. питомої поверхневої потужності нагрівача, збільшується швидкість набору опору та знижується термін його служби. Тому, при проектуванні печей з нагрівачами з карбиду кремнію, слід вибирати нагрівачі з мінімально можливою питомою поверхневою потужністю.

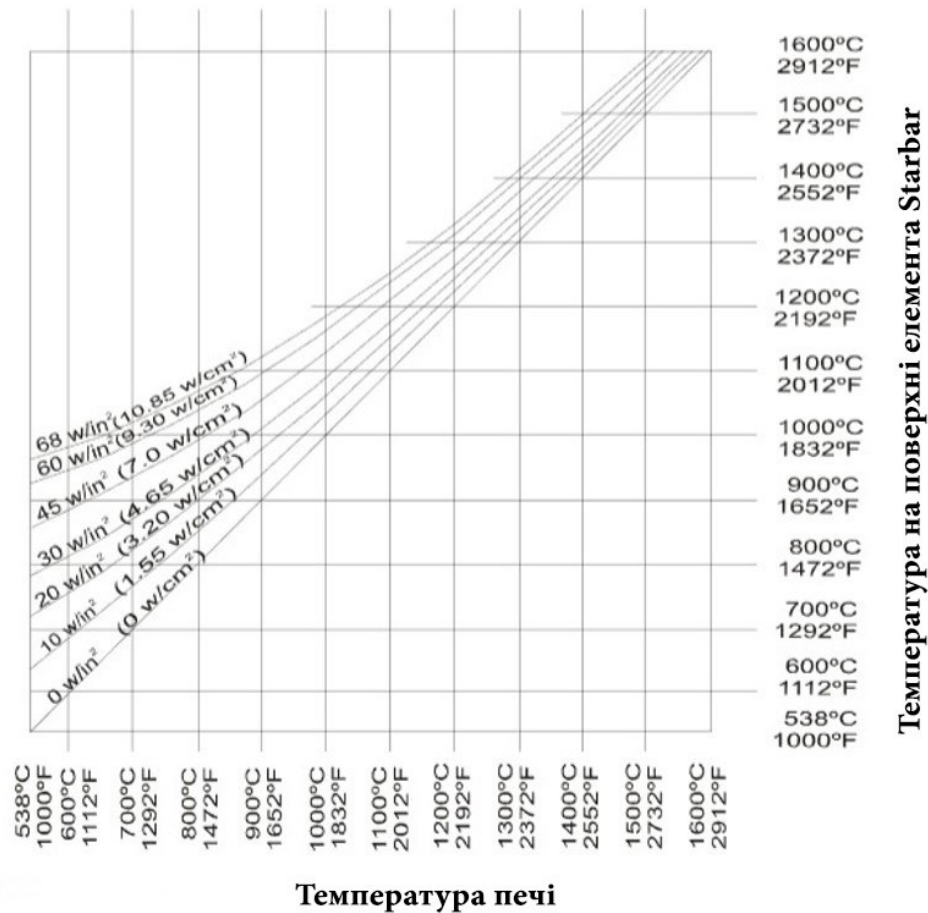


Рис.1.4 Температура поверхні нагрівача Starbar в залежності від температури печі при різних значеннях питомої поверхневої потужності

Один із недоліків карбідокремнієвих нагрівачів – великий (у 2–3 рази) розкид опорів одного і того ж типорозміру, тому заводи-виробники підбирають партії по 6-12 нагрівачів з приблизно однаковим опором. Розкид опорів не дозволяє включати карбідокремнієві нагрівачі послідовно, так як нагрівач з більш високим опором перегріватиметься і швидше вийде з ладу.

У холодному стані опір карбідокремнієвих нагрівачів у 4-5 разів більший за мінімальне значення, яке досягається при 900°C.

Потім опір з підвищенням температури починає повільно зростати і при 1400°C перевищує мінімальне значення на 25-30%. Для карбідокремнієвих нагрівачів характерно виражене старіння: у процесі експлуатації опір стрижнів збільшується в кілька разів, зазвичай допускається чотириразове збільшення. Це призводить до необхідності використовувати систему управління з можливістю регулювання напруги від 0,3 до 2 номіналів.

Виразене старіння карбідокремнієвих нагрівачів не дозволяє замінити один стрижень, що вийшов з ладу новим, оскільки опір нового і вживаного стрижнів будуть різко відрізнятися, необхідно замінювати всі нагрівачі печі.

На швидкість прояву старіння впливають багато чинників, такі як питома поверхневе навантаження, робоча температура, атмосфера, режим роботи (циклічний чи постійний) та метод контролю температури.

Перевагою нагрівачів з карбиду кремнію є їх відносна дешевизна, однак, істотні недоліки, такі, як крихкість в холодному і, особливо, в гарячому стані, розкид електричних параметрів і виражене старіння, робить їх досить незручними в експлуатації та обмежує їх застосування. В даний час карбідокремнієві нагрівачі поступово витісняються в нижній частині їх температурного діапазону (1300-1350°C) нагрівачами із залізохромоалюмінієвих сплавів опору (X23Ю5Т, Cantal та ін), а у верхній частині температурного діапазону - нагрівачами з хроміту лану.

Широкого поширення набули карбідокремнієві нагрівачі фірми I Squared R Elements. На рис.1.5 наведено фотографії карбідокремнієвих нагрівачів Starbar американської фірми I Squared R Elements.

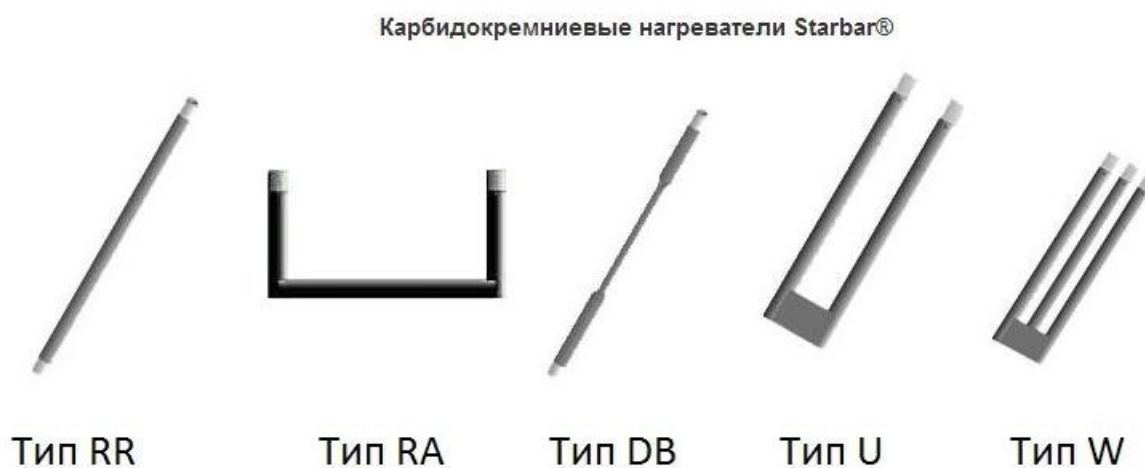


Рис.1.5 Карбідокремнієві нагрівачі Starbar фірми I Squared R Elements

Керамічні нагрівачі з хроміту лантану (LaCrO_3) застосовуються у високотемпературних ВЕПО з повітряним середовищем при температурах до 1700-1800°C, короткочасно до 1850°C, розраховані на напругу.

Їх позитивними властивостями є стабільність електричних властивостей протягом терміну служби (відсутність старіння), завдяки чому старі та нові нагрівачі можуть встановлюватися разом. У порівнянні з карбідокремнієвими, нагрівачі з хроміту лантану менше бояться парів води, тому футерування печі може сушитися штатними нагрівачами, без застосування додаткових нагрівальних пристроїв.

Під час виробництва нагрівальних елементів використовуються два склади на основі хроміту лантану, склад з меншим питомим опором використовується для виготовлення кінцевих частин (висновків) нагрівача, а з більшим – для виготовлення активної частини.

Опір нагрівачів з хроміту лантану значно знижується зі зростанням температури. Найбільш істотне зниження опору, більш ніж на один десятковий порядок, спостерігається при зміні температури від кімнатної до 1000 °С, при подальшому збільшенні температури до 1700 °С опір незначно змінюється (в 2-2,5 рази).

Розкид опорів у партії нагрівачів вбирається у 20%, що значно менше, ніж в карбїду кремнію, і забезпечує досить рівномірний розподіл потужності.

Конструкції карбідокремнієвих нагрівачів та нагрівачів з хроміту лантану подібні, а їх електричні характеристики дуже близькі. Це дає можливість прямої заміни карбідокремнієвих нагрівачів на нагрівачі відповідного типорозміру з хроміту лантану у вже існуючих печах, за винятком печей з горизонтальним розташуванням нагрівачів.

Нагрівачі з хроміту лантану в даний час витісняють карбідокремнієві при температурах понад 1300 °С, оскільки забезпечують багаторазове збільшення тривалості безвідмовної роботи. Крім того, хромїт лантану практично не схильний до старіння, властивого карбїду кремнію, що покращує рівномірність температурного поля і забезпечує відтворюваність технологічного процесу в печі. Досвід експлуатації хромїтлантанових нагрівачів показує, що при «помірних» (до 1500°С) температурах термін їхньої служби дуже великий і становить 3-5 років при збереженні відтворюваності процесу.

Хромтантанові нагрівачі також можуть бути альтернативою нагрівачам з

дисіліциду молібдену. Маючи аналогічний термін служби, вони значно дешевші і завдяки вищому питому опору не вимагають використання знижуючих трансформаторів. Єдиний суттєвий мінус хроміту лантану в порівнянні з дисіліцидом молібдену – знижена стійкість до різких термоударів, наприклад, при відкриванні дверцят розігрітої печі.

Великою перевагою нагрівачів з хроміту лантану є можливість їх тривалої експлуатації при циклічному характері роботи з охолодженням від робочої до кімнатної температури. Однак, для запобігання появі мікротріщин у нагрівачі та зниження терміну служби не рекомендується нагрівання та охолодження їх зі швидкістю вище $10^{\circ}\text{C}/\text{хв}$.

При високих температурах відбувається випаровування матеріалу нагрівачів з хроміту лантану, що проявляється у фарбуванні виробу та футерування. За даними [4] втрата маси зразка при 1600°C при роботі протягом 20 год становить 0,6 %. Це необхідно враховувати при застосуванні печей із нагрівачами з хроміту лантану для термообробки чистих матеріалів [17]. Так, при термообробці кераміки відбувається фарбування поверхні керамічного виробу у рожевий колір.

Нагрівач на основі дисіліциду молібдену широко застосовуються у високотемпературних ВЕПО. В окисній атмосфері такі нагрівачі можуть працювати при температурі до 1700°C . У порівнянні з карбідокремнієвими нагрівачі на основі дисіліциду молібдену мають ряд переваг: більш високою робочою температурою на активній частині нагрівачів за рахунок утворення захисної оксидної плівки зі склоподібного SiO_2 та оксидів молібдену; здатністю до швидкого розігріву за рахунок зростання електричного опору з підвищенням

температури; стабільністю електричного опору протягом усього терміну служби нагрівачів, що дозволяє з'єднати їх послідовно і замінювати нагрівачі, що вийшли з ладу без урахування їх початкового електричного опору.

Особливістю нагрівачів на основі дисіліциду молібдену є висока питома поверхнева потужність при високих температурах. Це дозволяє концентрувати велику кількість енергії у малому обсязі печі. До недоліків нагрівачів на основі дисіліциду молібдену відносяться: низька механічна міцність; низька термостійкість; низький початковий електричний опір, що обумовлює необхідність використання потужного силового обладнання; висока початкова пластичність в інтервалі температур 1400-1650°C.

Електричний опір нагрівачів, низький при кімнатній температурі з підвищенням температури різко зростає і далі в процесі експлуатації при постійній температурі практично не змінюється. При низькому початковому опорі нагрівачів потрібно плавне або ступінчасте підвищення напруги живлення до робочого значення. При цьому струм, що протікає через кожен нагрівач, не повинен перевищувати 200А, оскільки інакше можливе механічне руйнування нагрівачів за рахунок електромагнітних сил.

Висока гаряча пластичність матеріалу нагрівачів, що виявляється при їх початковому нагріванні, може призвести до деформації робочої частини нагрівачів за рахунок електромагнітних сил, що виникають при перебігу струму нагрівачам. Тому електричний опір двох сусідніх нагрівачів повинен забезпечити взаємно протилежний напрямок струму, що протікає по них, а відстань між нагрівачами рекомендується вибирати не менше відстані між гілками U-подібного нагрівача обраного типорозміру.

До основних факторів, що визначають термін служби нагрівачів, відносяться: температурно-часовий режим роботи електропечі, значення питома поверхнева потужність нагрівачів, спосіб регулювання температури печі типу атмосфери.



Рис.1.7 Нагрівачі з дисіліциду молібдену

Нагрівателі на основі дисіліциду молібдену мають більш тривалий термін служби при їх експлуатації в безперервному режимі.

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБЛЕННЯ УТОЧНЕНИХ МОДЕЛЕЙ ВЕПО ДЛЯ ТЕРМООБРОБКИ ВИРОБІВ

2.1. Постановка завдання розробки уточнених моделей

Системи управління ВЕПО для термообробки виробів забезпечують стабілізацію та регулювання температури всередині печі, тобто є по суті регуляторами температури.

В даний час промисловий регулятор температури печі опору [1,14] виконується у вигляді набору наступних функціональних елементів (рис. 2.1):

- Задаючого пристрою З, який служить для ручного або автоматичного введення заданого значення регульованої температури;
- обчислювального пристрою ВП, що виконує функції порівняння дійсного та заданого значення температури та виробляє необхідний закон регулювання;
- виконавчого елемента (регулятора потужності) РП, що змінює потужність, що вводиться в піч;
- Датчика температури печі ДТ.

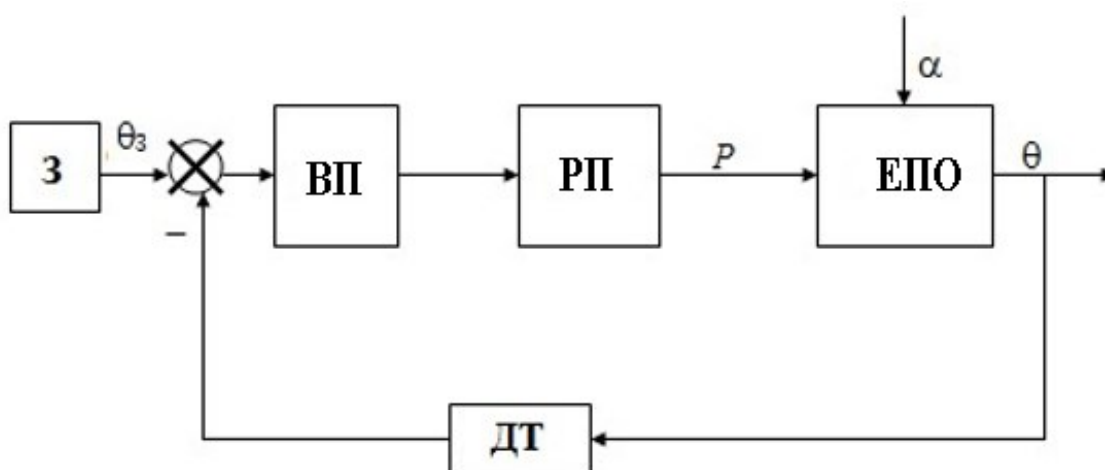


Рис.2.1 Функціональна схема системи регулювання температури ВЕПО

На рис. 2.2 представлена структурна схема безперервного регулювання температури з ПД-законом регулювання.

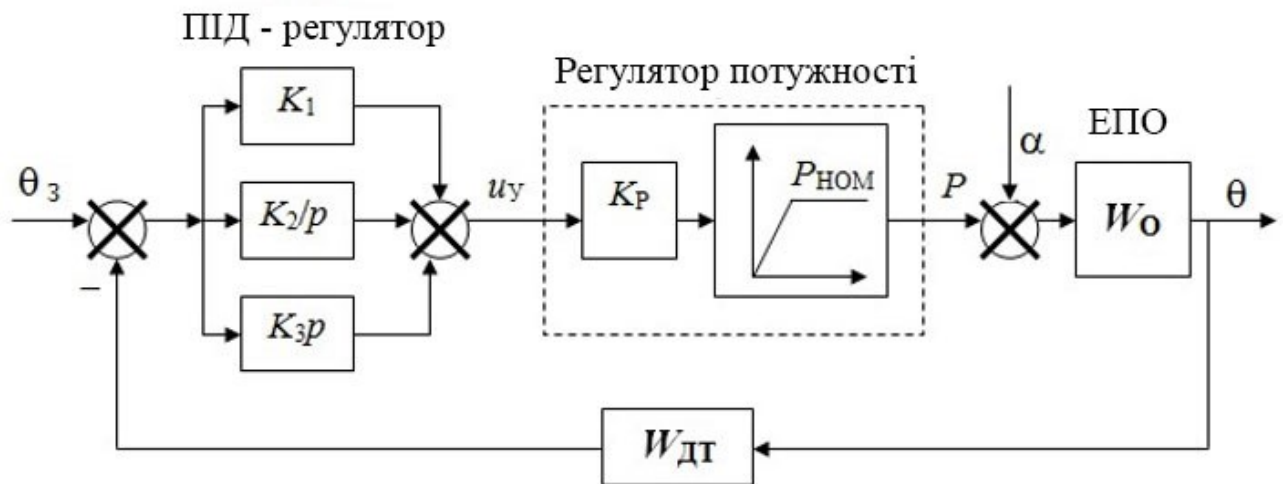


Рис.2.2. Структурна схема системи безперервного регулювання температури ВЕПО із ПДД-законом регулювання

Незважаючи на те, що ВЕПО є складним неоднорідним об'єктом управління, регулятор температури зазвичай виконується одноканальним, тобто містить один виконавчий елемент – тиристорний регулятор напруги, один регулюючий (обчислювальний) пристрій – спеціалізований програмований контролер (регулятор температури) та один датчик температури [1]. У той же час неоднорідність ВЕПО як об'єкта управління проявляється в тому, що він включає кілька взаємопов'язаних умов теплопередачі елементів з різними теплотехнічними параметрами.

Таке подання ВЕПО як об'єкта управління при дослідженні, проектуванні та налаштуванні регулятора температури дозволяє вирішувати ряд завдань, що не вимагають високої точності підтримки температури на виробі. Однак, з підвищенням вимог до точності та якості регулювання температури, особливо у складних та прецизійних технологічних процесах, виникає необхідність урахування розподілу температур усередині печі. Очевидно, що такий аналіз може бути здійснений лише на основі деталізованого подання ВЕПО як неоднорідного об'єкта управління. Спрощене подання ВЕПО у вигляді однорідного теплотехнічного елемента створює певні проблеми при проектуванні та налаштуванні регулятора температури. Вирішення цієї задачі при використанні традиційної спрощеної моделі ВЕПО неможливе.

Технологічний процес термообробки виробів вимагає забезпечення високої рівномірності нагріву у робочій камері печі. При цьому нерівномірний розподіл температури викликає необхідність зниження в цілому швидкості нагрівання та охолодження для того, щоб температурні криві, що розрізняються в окремих частинах печі, не призводили до пошкодження (руйнування) виробів. Однак, збільшення часу технологічного процесу призводить до зниження продуктивності та економічної ефективності установки.

Одним із способів підвищення рівномірності нагріву ВЕПО є поділ нагрівального блоку на теплові зони. Теплова зона ВЕПО є ділянкою печі з незалежним живленням і апаратурою для включення, управління та регулювання температури. У класичному виконанні, кожна теплова зона ВЕПО включає тиристорний регулятор напруги, підключений до групи нагрівачів і з датчиком температури. При цьому регулювання температури кожної теплової зони забезпечується від окремого одноканального регулятора температури - програмованого контролера або одного багатоканального.

Однак, при такому способі підвищення рівномірності нагріву навіть при однаковій уставці температури в кожному регуляторі може спостерігатися суттєва різниця температур у різних теплових зонах в процесі нагрівання внаслідок відмінності теплових постійних часу, і потужностей, що вводяться в кожен з теплових зон.

Дослідження систем управління ВЕПО, що знижують різницю температур різних теплових зон печі, за допомогою традиційної спрощеної моделі ВЕПО неможливе.

Окрім цього, матеріали нагрівачів для високотемпературних ВЕПО накладають ряд особливостей на побудову системи живлення та управління, що призводить до необхідності розробляти моделі, що відображають дані особливості.

Враховуючи все вищесказане, розробка моделей ВЕПО зручних для вирішення різних завдань управління є актуальним завданням.

2.2. Розробка моделі електричної печі опору

Електрична піч опору з точки зору управління являє собою складну систему, що складається, в загальному випадку, з нагрівача, на який надходить потужність від джерела живлення через регулятор напруги, футеровки, що забезпечує теплоізоляцію від навколишнього середовища, виробу (садки), що нагрівається, і термоперетворювача (датчика температури, що встановлюється у просторі печі), що характеризуються різними теплотехнічними параметрами та пов'язаних один з одним процесами теплопередачі. Ця обставина надзвичайно ускладнює розрахунок теплових перехідних процесів та аналіз динаміки процесів регулювання. Управління на основі мікропроцесорних засобів виникає необхідність розробки моделей ВЕПО та регулятора температури, які б більшою мірою враховували особливості процесів теплопередачі та теплотехнічні параметри окремих елементів печі.

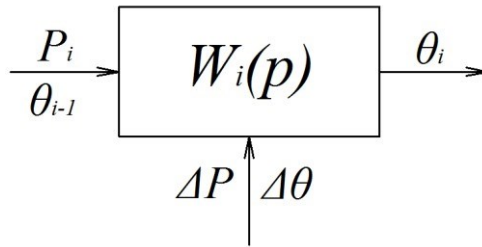
Тр ВЕПО в регуляторах температури подають у вигляді лінеаризованої ланки з передавальною функцією [1]:

$$W_{п}(p) = \frac{k_{п}}{T_{п}p + 1} \quad (2.1)$$

де $K_{п}$ - коефіцієнт передачі печі; $T_{п}$ - постійна часу печі.

Отже подання ВЕПО, як об'єкта управління дозволяє вирішувати ряд завдань, при моделюванні систем управління і регулятора температури. З урахуванням того, що налаштування параметрів регуляторів температури ВЕПО для кожної нової печі вручну трудомістка та фінансово-витратна операція. Це доцільно розробку таку моделі печі, що враховує теплотехнічні параметри окремих елементів печі та зв'язку між ними.

Кожен елемент печі опору може бути графічно представлений як ланка рис. 2.3, на яку надходить керуючий вплив - вводиться потужність (для нагрівача печі) або температура (для завантаження і теплоізоляції), інтегральний вплив, що обурює або , що змінює керуючий вплив.



Структурна схема елемента печі опору як об'єкта управління. Вихідною величиною є температура [1]. Для розроблюваної моделі елемента печі опору, як об'єкта управління, скористаємося такими припущеннями [1]:

- нехтуємо неоднорідністю всередині елемента печі, тобто використовуємо його усереднені теплотехнічні параметри;

- вважаємо нагрівач, футерування та виріб теплотехнічно тонкими тілами.

Ці припущення є досить грубими, проте дозволяють отримати моделі елементів печі у формі, зручної для подальшого дослідження системи регулювання температури.

Використовуючи розглянутий вище традиційний підхід до опису печі як об'єкта управління стосовно кожного з виділених елементів печі, можна уявити регулятор температури з урахуванням нелінійної характеристики регулюючого пристрою та узагальненою моделлю ВЕПО у вигляді структурної схеми рис. 2.4.

Приведена на рис. 2.4 структурна схема включає наступні блоки: ВЕПО, що враховує неоднорідність печі, джерело живлення - тиристорний регулятор напруги, регулюючий пристрій, що виробляє пропорційно-інтегрально-диференціальний закон управління і датчик зворотного зв'язку (датчик температури). Пропоновану модель можна розглядати як універсальну, придатну для дослідження різних типів ВЕПО та схемотехніки системи регулювання температури. Зокрема, зазначена модель дозволяє досліджувати вплив зворотного зв'язку за температурою, як від окремих елементів печі, так і від їх сукупності. Зворотні зв'язки показані на рис. 2.4 штриховими лініями.

напруги k_{pH} і нелінійної ланки типу «обмеження», що враховує, що значення напруги на виході регулятора, що діє, завжди додатне і не повинно перевищувати номінального значення. На відміну від загальноприйнятого уявлення регулятора потужності [5] у вигляді лінійної ланки тут враховано, що регулятора потужності, як такого в системі немає, оскільки регулювання потужності, що вводиться в піч, здійснюється регулятором напруги. Потужність, що вводиться в піч, визначається за допомогою блоку множення, на виході якого виробляється величина U^2 , та ланки з коефіцієнтом передачі $1/R_H$. На виході ланки $1/R_H$ виробляється величина, пропорційна напрузі що подається на нагрівач потужності $P = U_{п}/R_H$.

Модель регулюючого пристрою, що реалізується в сучасних регуляторах температури у вигляді спеціалізованих мікропроцесорних контролерів, представлена в структурній схемі трьома паралельно з'єднаними ланками з передаточними функціями відповідно k_1 , k_2/p і k_3p . Висока швидкодія мікропроцесорного контролера дозволяє знехтувати його інерційністю, що обумовлена цифровою обробкою інформації.

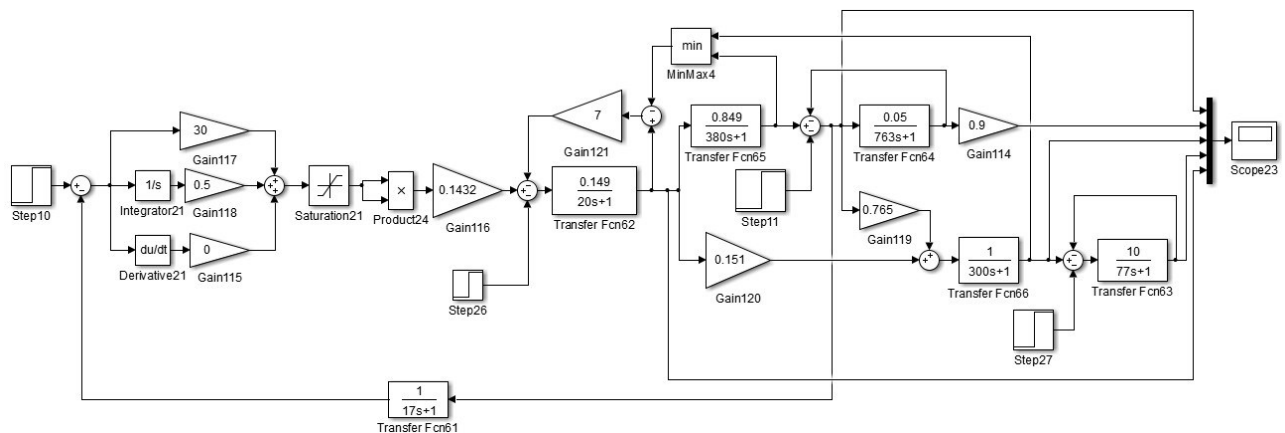
Як впливає із структурної схеми рис. 2.4 регулятор потужності, що використовується для живлення ВЕПО, є нелінійною системою регулювання, що впливає як на якість регулювання температури, так і на використовувані методи дослідження системи.

Модель регулятора температури ВЕПО у формі структурної схеми представленої на рис. 2.4, дозволяє проводити аналіз та синтез регулятора температури, розраховувати розподіл температур усередині печі, як у динаміці, так і у статиці, і навіть здійснювати порівняння різних варіантів виконання регулятора температури.

Представлена на рис. 2.4 система є нелінійною та не дозволяє отримати аналітичне рішення. Для її дослідження доцільно використовувати чисельні методи структурного моделювання, розроблені для аналізу та синтезу систем автоматичного керування. Найбільш зручним в даний час можна вважати пакет прикладних програм Simulink Matlab/Simulink [8], що має велику бібліотеку

типових елементів і дозволяє проводити аналіз та синтез лінійних та нелінійних систем практично необмеженої складності.

Імітаційна модель системи регулювання температури була розроблена в середовищі Matlab/ Simulink, рис. 2.5.



2.5 Імітаційна модель регулятора температури ВЕПО.

Імітаційна модель рис. 2.5 дозволяє проводити дослідження системи регулювання температури так само, як і на реальному об'єкті, задаючи різні дії та варіюючи параметри елементів системи в бажаному діапазоні. Однак, функціональні можливості імітаційної моделі набагато ширші за реальну систему, оскільки дозволяють розраховувати величини, вимір яких неможливий при натурному експерименті. Імітаційну модель також зручно використовувати для ідентифікації об'єкта управління шляхом порівняння вихідних величин, розрахованих на моделі та отриманих експериментально.

На рис.2.6 наведені часові діаграми, що ілюструють можливості запропонованої моделі. у динаміці (рис. 2.6).

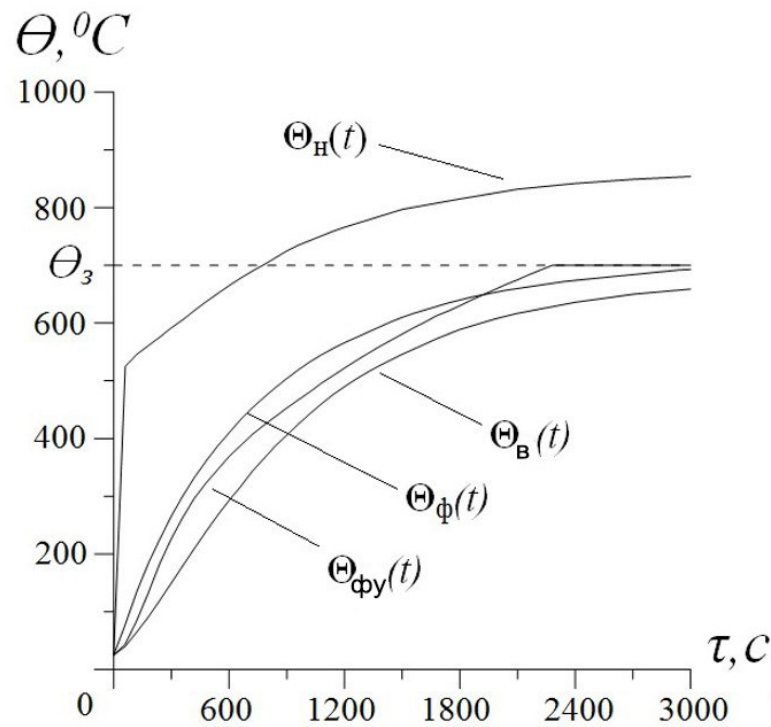


Рис. 2.6. Динамічні характеристики температури нагрівача, виробу та футерування, отримані на імітаційній моделі, та динамічна характеристика температури футерування, отримана експериментально

Дослідження системи регулювання температури ВЕПО з використанням імітаційної моделі рис. 2.5 зручно проводити шляхом розрахунку перехідних функцій температури $\Theta(t)$ різних елементів печі при варіюванні параметрів елементів системи, керуючих та збурювальних впливів. Для ілюстрації методик дослідження системи з використанням імітаційної моделі на рис. 2.6 наведено осцилограми перехідних функцій температур футерування печі $\Theta_\phi(t)$, нагрівачів $\Theta_H(t)$, виробу $\Theta_B(t)$ та заданого значення температури $\Theta_3(t)$ при використанні в якості сигналу зворотного зв'язку температури футерування $\Theta_\phi(t)$. Для порівняння наведено осцилограму температури футерування $\Theta_{\phi y}(t)$, отримана експериментально для печі, параметри якої наведені нижче. Осцилограми, наведені на рис. 2.6 розраховувалися на імітаційній моделі рис. 2.5 при налаштуванні ПІД-регулятора на близький до аперіодичного характер перехідного процесу для камерної печі що має номінальну потужність $P_{\text{ном}} = 7$ кВт, номінальну температуру $\Theta_{\text{ном}} = 900^\circ\text{C}$ та об'єм робочої камери $V = 37$ л.

Задана робоча температура печі приймалася рівною $\Theta_3 = \Theta_{\text{НОМ}} = 700^{\circ}\text{C}$. Коефіцієнти теплопередачі між елементами печі та постійні часу розраховувалися за загальноприйнятою методикою, викладеною в [5].

Як впливає з аналізу наведених на рис. 2.6 залежностей, крива розігріву печі $\Theta_{\text{ф}}(t)$, розрахована на моделі рис. 2.5, узгоджується з експериментальною $\Theta_{\text{ф}}(t)$, тобто, адекватно відповідає процесам у печі. Розбіжність залежностей зміни температур на окремих елементах печі наочно ілюструє переваги розробленої моделі, яка дозволяє оцінювати розподіл температур як у статиці, так і в динаміці.

Дана модель (рис. 2.6) дозволяє вирішувати низку актуальних завдань, таких як: визначення місця встановлення датчика температури; вибір значення перевищення потужності у регуляторі; налаштування системи управління ВЕПО та відпрацювання можливих збурюючих впливів.

2.3. Регулятор температури ВЕПО з обмеженням температури нагрівальних елементів

Робота нагрівачів електричних печей опору відбувається звичайно в дуже важких температурних умовах, часто при гранично допустимих температурах для матеріалу, з якого вони виконані [5, 2]. У стандартних регуляторах температури відсутній контроль температури на нагрівальних елементах печі. Це призводить до їх перегріву та суттєвого зниження терміну придатності. У зв'язку з цим у роботі було запропоновано регулятор з обмеженням температури нагрівальних елементів.

Використання розробленої вище моделі, що враховує неоднорідність ВЕПО, дозволяє провести дослідження та вирішити завдання оцінки впливу температури нагрівачів на процес термообробки та тривалість їх роботи.

Однім із способів обмеження температури нагрівальних елементів та підвищення їх терміну придатності у системах управління ВЕПО є введення каналу обмеження температури нагрівальних елементів.

У зв'язку з цим було розроблено регулятор температури з обмеженням

температури нагрівальних елементів.

На рис. 2.7 представлена функціональна схема регулятора з обмеженням температури нагрівальних елементів.

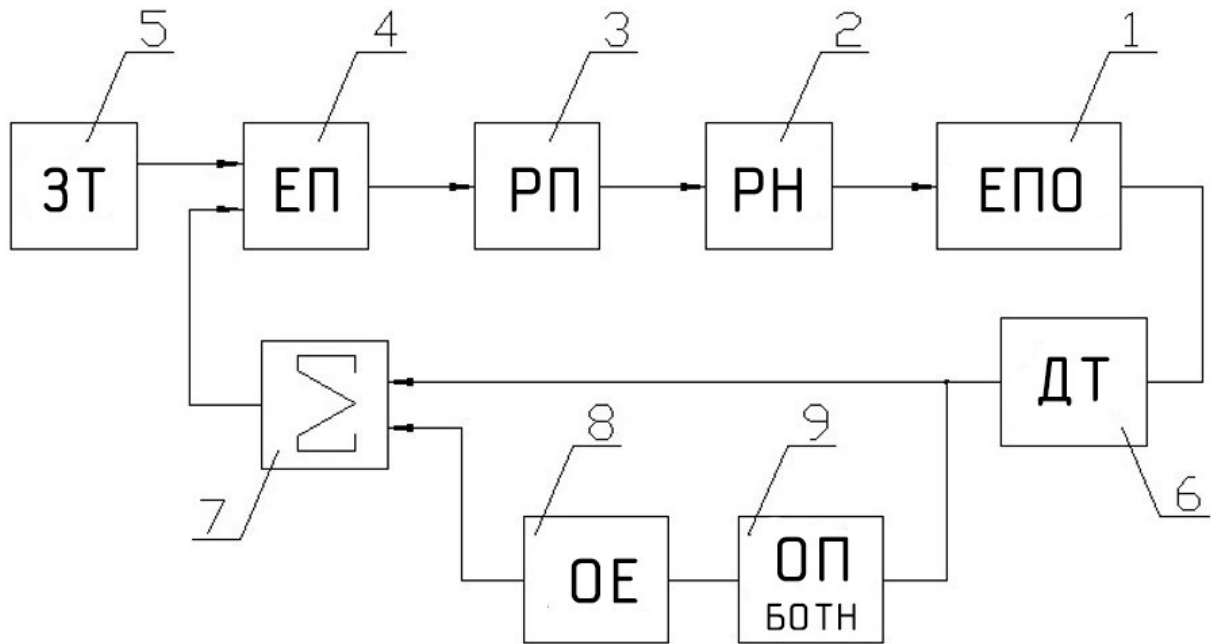


Рис.2.7. Функціональна схема регулятора температури з обмеженням температури нагрівальних елементів.

де 7 - суматор, пороговий елемент; 8 - обчислювальний пристрій - блок обчислення температури нагрівача 9.

Регулятор працює в такий спосіб. За допомогою задатчика температури 5, формується (ручним або автоматичним способом) задане значення регульованої температури θ_3 . Цей сигнал θ_3 оступає на елемент порівняння 4, де порівнюється з сигналом, пропорційним температурі θ , що вимірюється з об'єкта управління 1 (нагрівачі електричної печі опору) датчиком температури 6. Регулюючий пристрій 3 в залежності від значення $\Delta\theta = \theta_3 - \theta$ і знаку його відхилення формує регулюючий вплив на виконавчій механізм (регулятор напруги 2), який безпосередньо впливає на об'єкт керування 1.

У порівнянні з прототипом запропонований пристрій забезпечує обмеження температури нагрівальних елементів. Це забезпечується за рахунок подачі додаткового зворотного зв'язку, що надходить з датчика температури 6 через порівняльний пристрій 7 на елемент порівняння 4. Даний зворотний зв'язок

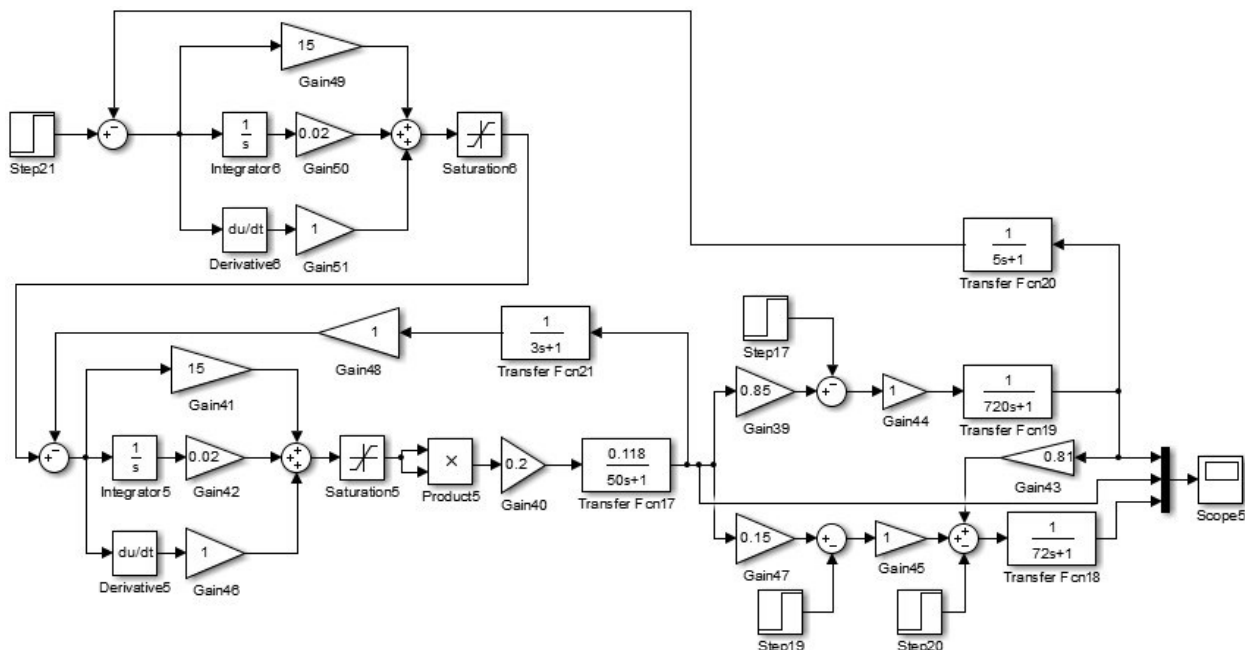
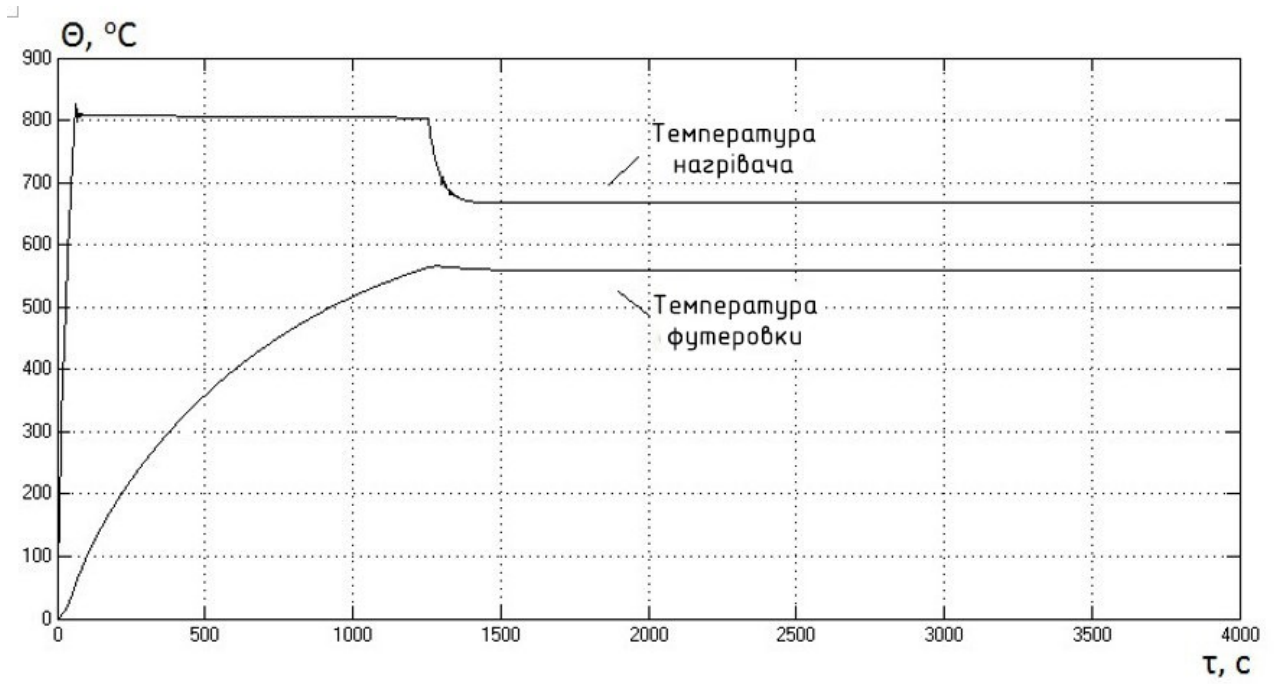
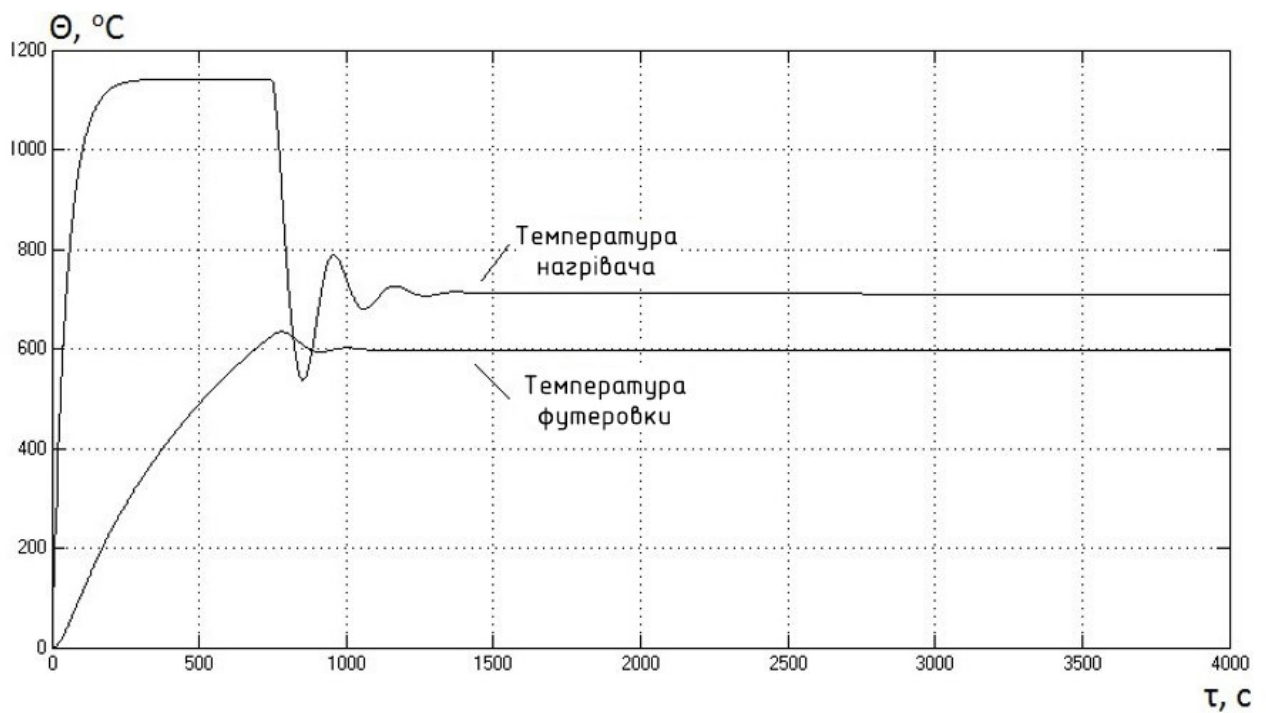


Рис.2.9 Імітаційна модель регулятора температури ВЕПО з обмеженням температури нагрівальних елементів серед Matlab/Simulink

На рис. 2.10 наведено часові діаграми, що ілюструють роботу запропонованої двоконтурної моделі (рис.2.9) зі зворотними зв'язками за температурою нагрівача і температурою футерування (рис.2.10 а) і одноконтурної моделі, що має один зворотний зв'язок тільки за температурою футерування (рис.2.10). Для зручності аналізу отриманих залежностей зміни температури (нагрівача, виробу та футерування) під час розігріву печі характеристики виводяться на загальний віртуальний осцилограф Scope, що дозволяє користувачеві отримати єдину картину розподілу температури у просторі печі в динаміці (рис. 2.10).



а)



б)

Рис. 2.10 (а, б) Динамічні характеристики температури нагрівача, виробу та футерування, отримані на імітаційній моделі з двома контурами зворотного зв'язку а) та з одним контуром зворотного зв'язку б)

2.4 Регулятор температури ВЕПО із компенсацією різниці температур у теплових зонах печі

У п.2.1 було виділено проблему під час проектування системи у багатозонної ВЕПО періодичної дії для термообробки виробів, пов'язана з необхідністю забезпечення високої рівномірності нагріву в робочій камері печі в процесі нагрівання.

Для зниження різниці температур різних теплових зон у процесі нагрівання пропонується вводити автоматичну корекцію потужності, що надходить в теплову зону, залежно від різниці температур.

Такий підхід до організації управління зонами печі дозволяє знизити різницю температур між ними та підвищити, тим самим, рівномірність розподілу температури в робочому просторі печі.

Для компенсації різниці температур в ВЕПО з двома тепловими зонами в процесі нагрівання розроблено систему управління, функціональну схему якої наведено на рис.2.11.

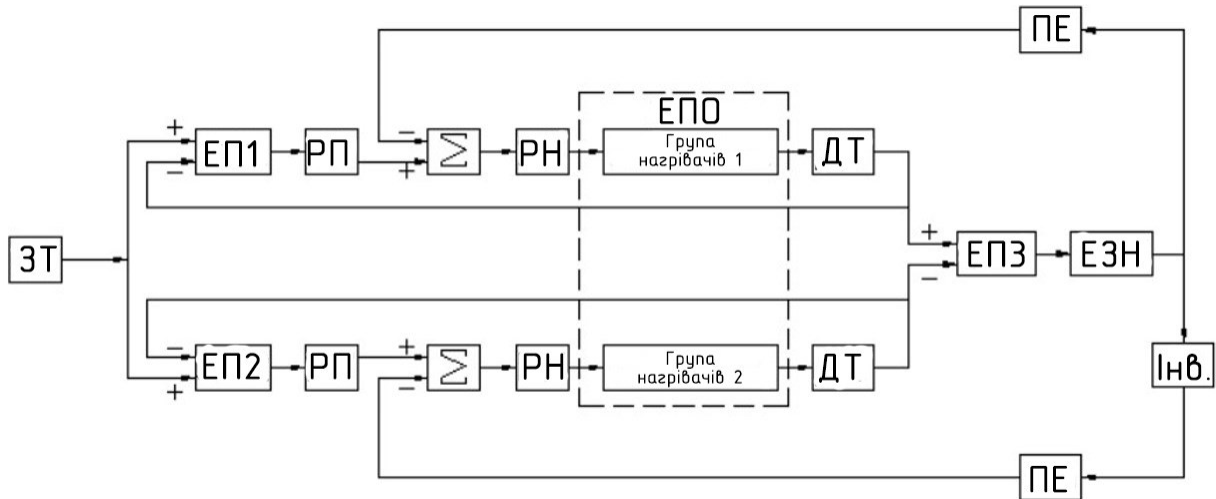


Рис. 2.11. Функціональна схема регулятора температури ЕПО із компенсацією потужності в теплових зонах

Під час виникненні різниці температур теплових зон печі, на виході елемента порівняння ЕПЗ виробляється сигнал неузгодженості, який, надходячи на входи суматорів, призведе до зниження потужності нагрівача теплової зони, що має випередження за температурою і збільшення потужності нагрівання, що

має відставання за температурою. Таким чином, забезпечуватиметься вирівнювання температур у зонах печі.

При певних поєднаннях параметрів каналів регулювання у системі можуть виникнути коливання температур у процесі їх вирівнювання, що небажано. Для виключення коливань температур близько рівноважного значення, систему регулювання може бути введений елемент з зоною нечутливості ЕЗН, який буде відключати коригувальні сигнали, що надходять на входи суматорів при величині неузгодженості температур менше допустимої.

При компенсації різниці температур в ВЕПО із кількістю теплових зон більше двох слід вибрати теплову зону з еталонною кривою нагріву, а криві нагріву інших теплових зон попарно порівняти з еталонною.

Використовуючи розглянутий вище традиційний підхід (п.2.2) до опису печі як об'єкта управління до кожної з теплових зон печі, можна представити регулятор температури з компенсацією різниці температур теплових зонах у процесі нагрівання у вигляді структурної схеми рис.2.12.

Представлена на рис. 2.12 система є нелінійною та не дозволяє отримати аналітичне рішення. Для її дослідження доцільно використовувати чисельні методи структурного моделювання, розроблені для аналізу та синтезу систем автоматичного керування. Найбільш зручним в даний час можна вважати пакет прикладних програм Simulink Matlab/Simulink [8], що має велику бібліотеку типових елементів і дозволяє проводити аналіз та синтез лінійних та нелінійних систем практично необмеженої складності.

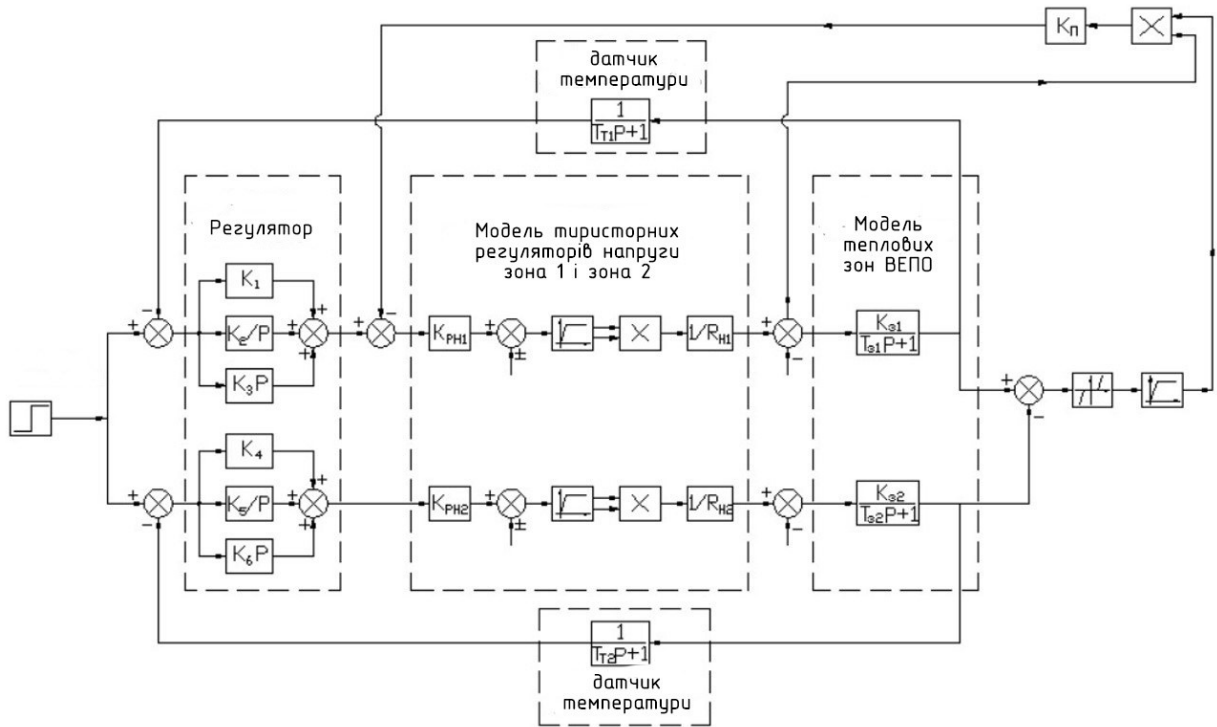


Рис.2.12 Структурна схема регулятора температури ВЕПО із компенсацією потужності в теплових зонах

Для дослідження системи управління ВЕПО з компенсацією потужності в теплових зонах в середовищі Matlab/Simulink була розроблена імітаційна модель регулятора температури двозонної печі, в якій здійснюється добавка потужності нагрівача зони, що має температурну криву, що відстає. Схема імітаційної моделі наведено на рис.2.13.

Імітаційна модель рис. 2.13 дозволяє проводити дослідження системи регулювання температури так само, як і на реальному об'єкті, задаючи різні дії та варіюючи параметри елементів системи в бажаному діапазоні. Однак, функціональні можливості імітаційної моделі набагато ширші за реальну систему, оскільки дозволяють варіювати параметри об'єкта управління і впливи, що вводяться в ширшому діапазоні.

(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.2.14 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.

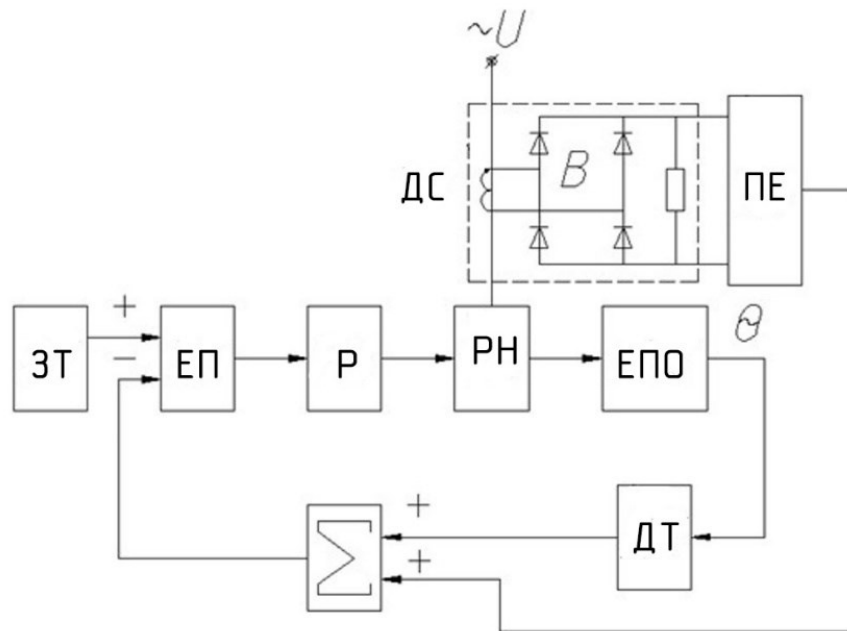


Рис.2.14. Функціональна схема розробленого регулятора температури електропечі опору

Для дослідження розробленої системи управління було побудовано модель регулятора температури у середовищі Simulink Matlab (рис. 2.15). При побудові цієї моделі було використано традиційну спрощену модель ВЕПО, 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.2.15), що включає два способи організації «струмової» відсічки. Штриховою лінією на рис. 2.15 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 Score і Score1. Такий прийом дозволяє наочно подати результати порівняння традиційного регулятора та запропонованого регулятора (п.3.4). Обидва регулятори температури, представлені на рис.2.15, 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 з дисіліциду молібдену.

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

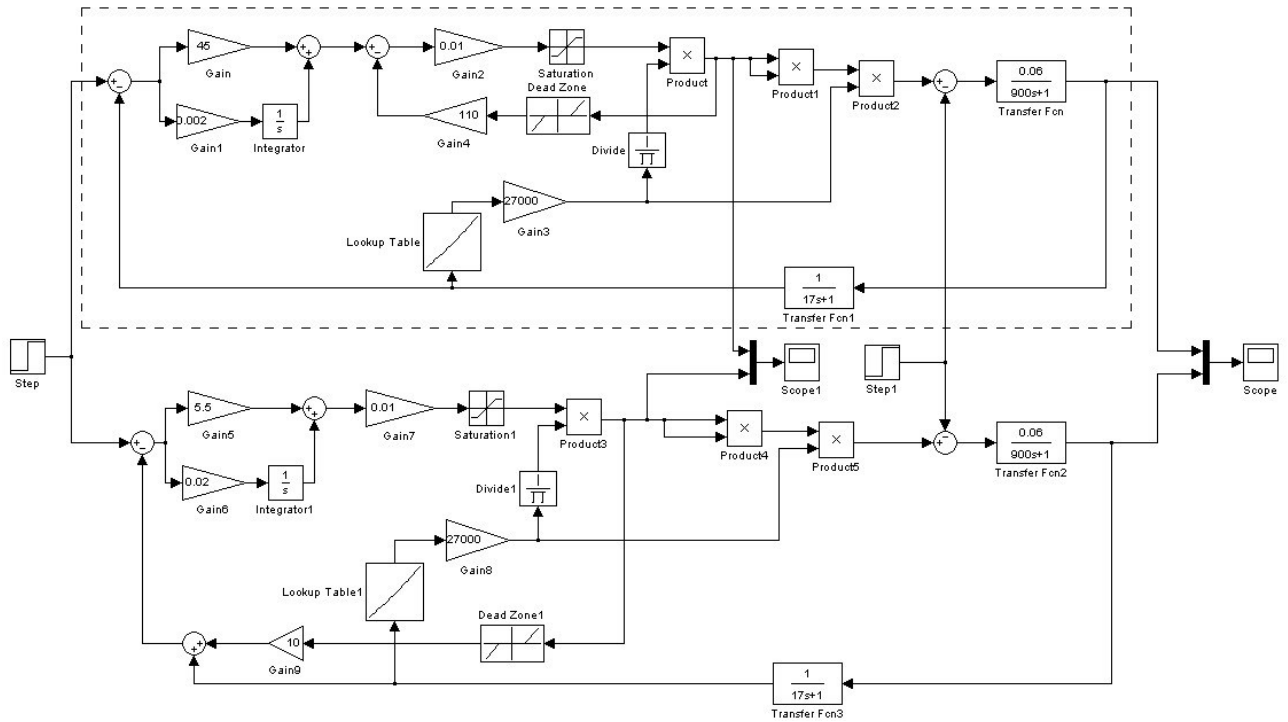


Рис. 2.15. Моделі регуляторів температури, реалізовані в середовищі Simulink Matlab: 1 – з струмовою відсічкою у регуляторі; 2 – з додатковим зворотним зв'язком по струму

РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ ТА УПРАВЛІННЯ ВЕПО ДЛЯ ТЕРМООБРОБКИ ВИРОБІВ

3.1. Дослідження впливу місця встановлення датчика температури

Проаналізуємо характеристики регуляторів ВЕПО при встановленні датчика температури поблизу нагрівачів, виробу або футерування.

Дослідження системи регулювання температури ВЕПО зручно проводити з використанням імітаційної моделі, представленої на рис. 2.5 шляхом розрахунку перехідних функцій температури $\Theta(t)$ різних елементів печі при варіюванні параметрів елементів системи. Для ілюстрації методик дослідження системи з використанням імітаційної моделі на рис. 2.5 наведено осцилограми перехідних функцій температур футерування печі $\Theta_{\text{ф}}(t)$, нагрівачів $\Theta_{\text{н}}(t)$, виробу $\Theta_{\text{в}}(t)$ та заданого значення температури $\Theta_{\text{з}}(t)$ при використанні в якості сигналу зворотного зв'язку температури футерування $\Theta_{\text{ф}}(t)$. Для порівняння наведено осцилограму температури футерування $\Theta_{\text{фе}}(t)$, отримана експериментально для печі, параметри якої наведені нижче. Осцилограми, наведені на рис. 2.6 розраховувалися на імітаційній моделі рис. 2.5 при налаштуванні ПІД-регулятора на близький до аперіодичного характер перехідного процесу для камерної печі, що має номінальну потужність $P_{\text{ном}} = 7$ кВт, номінальну температуру $\Theta_{\text{ном}} = 900^{\circ}\text{C}$ та об'єм робочої камери $V = 37$ л. Задана робоча температура печі приймалася рівною $\Theta_{\text{з}} = \Theta_{\text{ном}} = 700^{\circ}\text{C}$. Коефіцієнти теплопередачі між елементами печі та постійні часу розраховувалися за загальноприйнятою методикою.

Як впливає з аналізу наведених на рис. 2.6 залежностей, крива розігріву печі $\Theta_{\text{ф}}(t)$, розрахована на моделі рис. 2.5, узгоджується з експериментальною $\Theta_{\text{фе}}(t)$, тобто, адекватно відбиває процеси, які відбуваються у печі. Розбіжність залежностей зміни температур на окремих елементах печі наочно ілюструє переваги розробленої моделі, яка дозволяє оцінювати розподіл температур як у статичі, так і в динаміці. Цей висновок узгоджується з результатами досліджень.

У літературі відсутні рекомендації щодо місця розміщення датчика температури в нагрівальній камері ВЕПО. Розроблена імітаційна модель ВЕПО (рис.2.5) дозволяє досліджувати вплив місця встановлення датчика температури на основні показники роботи системи.

З цією метою моделі рис. 2.5 були розраховані перехідні функції температури $\Theta(t)$ (так звані криві розігріву) окремих елементів печі при розміщенні датчика температури поблизу нагрівача $\Theta_H(t)$, виробу $\Theta_B(t)$ та футерування $\Theta_F(t)$ печі, при варіюванні параметрів елементів у діапазоні, характерному для печей з об'ємами камери від 5 до 200 л.

На рис.3.1 наведено осцилограми перехідних функцій температур футерування печі $\Theta_F(t)$, нагрівачів $\Theta_H(t)$, виробу $\Theta_B(t)$ та заданого значення температури $\Theta_3(t)$ при використанні сигнал зворотного зв'язку температури нагрівача $\Theta_H(t)$.

Проведений аналіз показує, що при встановленні датчика температури поблизу нагрівача система стабілізує температуру нагрівачів, що призводить до стабілізації потужності, що вводиться в піч. При цьому температура футерування і виробу не стабілізується і впливи, що впливають на їх температуру, не компенсуються. Основним недоліком такого регулятора є необхідність урахування значної різниці температур нагрівача $\Theta_H(t)$ та виробу $\Theta_B(t)$, розрахувати яку практично неможливо. Як правило, її визначають емпіричним шляхом. Така система регулювання температури по суті еквівалентна простішій реалізації системи регулювання потужності нагрівачів, тому для загальнопромислових печей не може бути рекомендована.

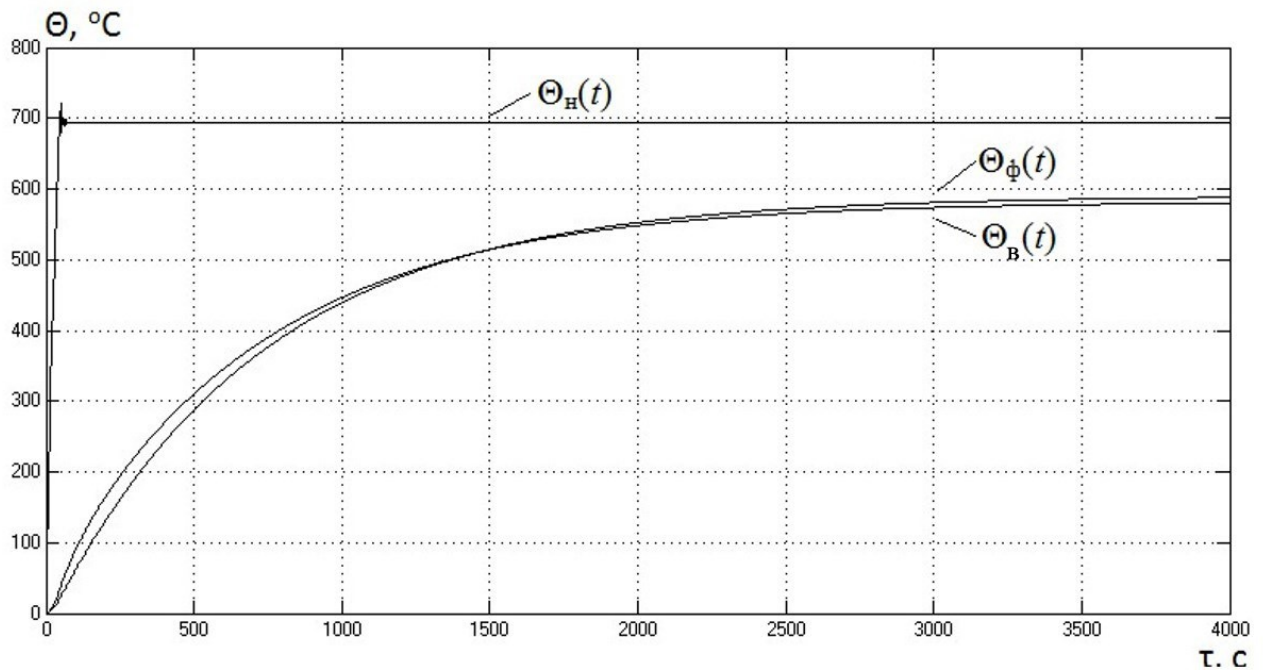


Рис.3.1 Осцилограми перехідних функцій температур футерування печі $\Theta_{\phi}(t)$, нагрівачів $\Theta_H(t)$, виробу $\Theta_B(t)$ при використанні як сигналу зворотного зв'язку температури нагрівача $\Theta_H(t)$.

На рис.3.2 наведено осцилограми перехідних функцій температур футерування печі $\Theta_{\phi}(t)$, нагрівачів $\Theta_H(t)$, виробу $\Theta_B(t)$ та заданого значення температури $\Theta_3(t)$ при використанні в якості сигналу зворотного зв'язку температури футерування $\Theta_{\phi}(t)$.

Підчас встановлення датчика температури поблизу виробу система безпосередньо стабілізує температуру виробу. Це особливо важливо для технологічних процесів, при яких зміна температури в малому діапазоні здатна вплинути на якість виробу, що обробляється. У той же час позитивною властивістю системи зі стабілізації температури виробу $\Theta_B(t)$ і те, що завдання температури збігається з температурою виробу. Проте, з експлуатаційної погляду, така система мало придатна для загальнопромислових печей, у яких практично неможливо розміщувати датчики поблизу виробу, тобто її можна рекомендувати для проведення спеціальних технологій.

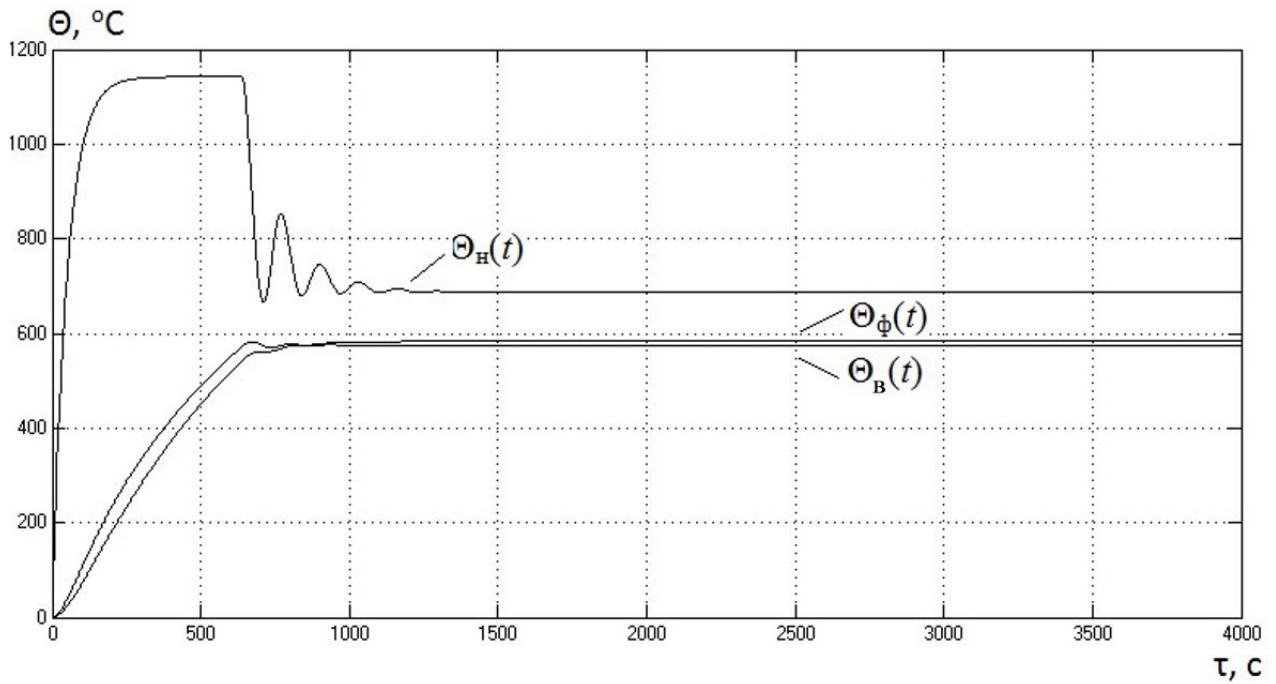


Рис.3.2 Осцилограми перехідних функцій температур футерування печі $\Theta_\Phi(t)$, нагрівачів $\Theta_H(t)$, виробу $\Theta_B(t)$ при використанні сигналу зворотного зв'язку температури виробу $\Theta_B(t)$.

На рис.3.3 наведено осцилограми перехідних функцій температур футерування печі $\Theta_\Phi(t)$, нагрівачів $\Theta_H(t)$, виробу $\Theta_B(t)$ та заданого значення температури $\Theta_3(t)$ при використанні в якості сигналу зворотного зв'язку температури футерування $\Theta_\Phi(t)$.

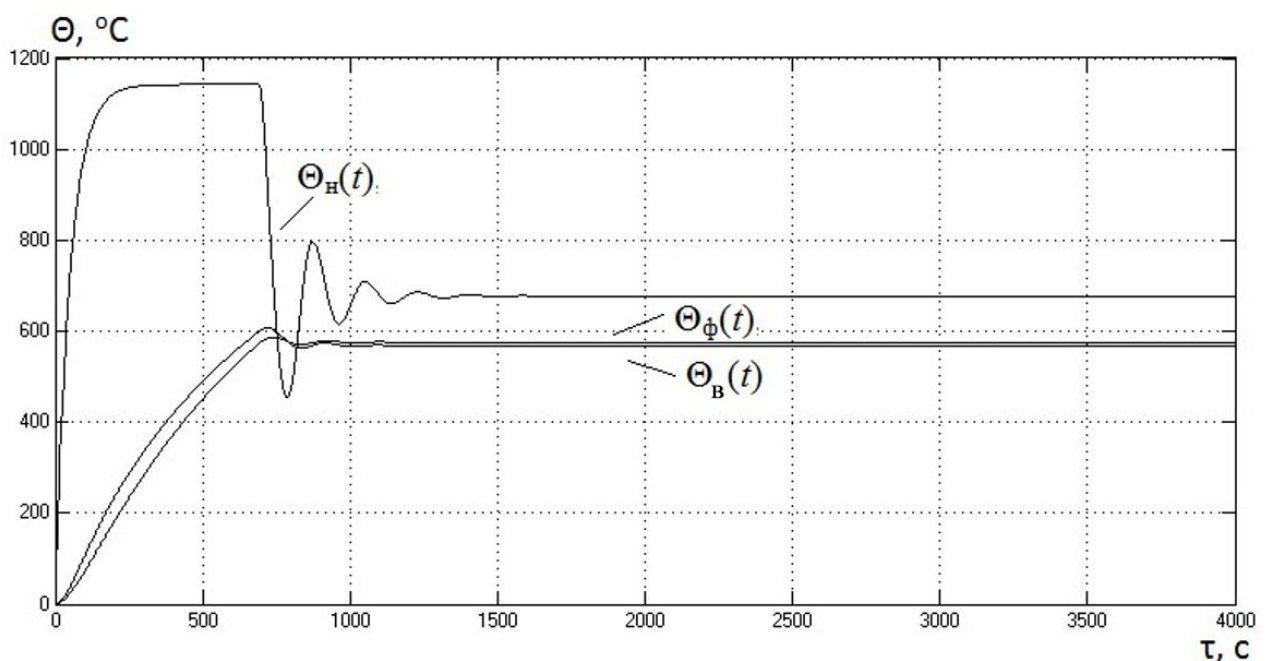


Рис.3.3 Осцилограми перехідних функцій температур футерування печі $\Theta_{\phi}(t)$, нагрівачів $\Theta_{H}(t)$, виробу $\Theta_{B}(t)$ при використанні сигналу зворотного зв'язку температури футерування $\Theta_{\phi}(t)$

При встановленні датчика поблизу футерування система забезпечує стабілізацію температури футерування, що сприятливо позначається на її експлуатаційних характеристиках. Оскільки футерування має найбільшу інерційність, коливання температури при збуреннях відбуваються з низькою частотою, що також покращує умови експлуатації. При цьому основний внесок у нагрівання виробу робить футеровка, стабілізація температури якої опосередковано забезпечує стабільні умови нагрівання виробу. Характерно також, що у такій системі регулювання різниці температур між завданням $\Theta_3(t)$ та виробом $\Theta_B(t)$ буде мінімальною. Отже, для ВЕПО загальнопромислового призначення найбільшу перевагу слід віддати системі регулювання температури, в якій датчик встановлюється поблизу футерування. Цей висновок узгоджується з відомим з теорії автоматичного регулювання положенням, згідно з яким у системі з неоднорідним об'єктом датчик зворотного зв'язку доцільно встановлювати на виході найбільш інерційної ланки.

3.2. Дослідження систем управління ВЕПО з обмеженням температури нагрівальних елементів

Наступним етапом роботи стало дослідження на імітаційних моделях систем регулювання температури ВЕПО, що контролюють та підтримують теплові характеристики окремих внутрішніх елементів печі.

Робота нагрівачів ВЕПО відбувається зазвичай у дуже важких температурних умовах, часто за гранично-допустимих температур для матеріалу, з якого вони виконані. У зв'язку з цим у п.2.3 була розроблена система регулювання температури печі опору, що дозволяє контролювати та обмежувати температуру нагрівальних елементів [8]. Дослідження системи регулювання температури ВЕПО зручно проводити з використанням імітаційної моделі,

представленої на рис. 2.9 шляхом розрахунку перехідних функцій температури $\Theta(t)$ різних елементів печі при варіюванні керуючих та збурюючих параметрів елементів системи. Всі дослідження проводилися відповідно до нагрівачів камерних електричних печей опору. Часові залежності, що ілюструють методіку дослідження, наведено на рис.2.10.

Метою досліджень була перевірка функціонування системи та визначення залежностей часу нагріву печі від величини температурної відсічки нагрівальних елементів. Як вихідні дані було обрано задану температуру нагрівача, рівну $\theta_3 = 650^{\circ}\text{C}$. Варіюється параметром величина температурної відсічки нагрівальних елементів, значення якої варіювалося від 650°C до 1000°C . Графік залежності часу виходу печі на режим від температури нагрівальних елементів (рис.3.4) побудований у відносних одиницях стосовно камерної електропечі опору, по осі абсцис відкладено - відношення номінального значення температури нагрівачів до величини відсічення, по осі ординат - відношення часу виходу печі на режим при роботі без температурного відсікання до часу виходу на режим за наявності температурного відсікання.

Як впливає з отриманої кривої на рис.3.4 час розігріву печі змінюється за законом близьким до лінійного в діапазоні від 0,2 до температури нагрівача. Отриману залежність доцільно використовувати під час проектування ВЕПО для вибору типу нагрівачів та максимального значення температури печі. Ця залежність застосовна для проектування печей такого класу безпосередньо. Для печей іншого класу аналогічну залежність можна отримати на імітаційній моделі Рис. 2.9 за розглянутою вище методикою.

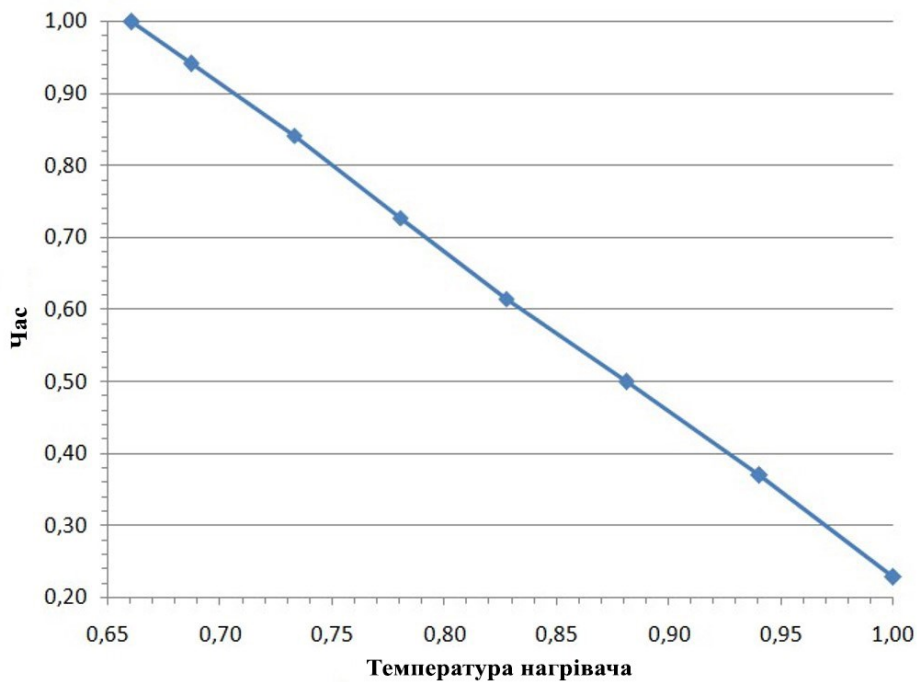


Рис.3.4 Залежність часу виходу печі на режим від температури нагрівальних елементів

3.3 Дослідження системи управління ВЕПО із компенсацією різниці температур у теплових зонах печі

Наступним етапом роботи є дослідження систем електроживлення та управління багатозонними ВЕПО з компенсацією різниці температур у теплових зонах печі.

Дослідження системи регулювання температури ВЕПО зручно проводити з використанням імітаційної моделі рис. 2.13 шляхом розрахунку перехідних функцій температури $\Theta(t)$ різних теплових зон печі при варіюванні параметрів елементів системи, керуючих та збурюючих впливів.

Метою досліджень є визначення величини додаткової потужності, необхідної для компенсації різниці температур теплових зонах ВЕПО до допустимого значення в процесі нагрівання варіювалися в діапазоні, характерному для стандартного ряду промислових печей для термообробки виробів, значення коефіцієнтів передачі печі вибиралися в діапазоні від 0,0164 до 0,0964 значення постійних часу - від 307 с до 4913 с.

Експериментальні дослідження проводилися для ВЕПО з варіюванням

потужностей, що вводяться в теплові зони, від 7 кВт до 75 кВт, при цьому різниця потужностей в теплових зонах становила від 0 Вт до 12 кВт. Діапазон досліджуваних температур 700°C - 1600°C . Значення допустимої різниці температур приймалися рівними 5°C , 15°C , 30°C та 50°C .

На основі проведених досліджень на імітаційній моделі було визначено відносну величину додаткової потужності, необхідну для компенсації різниці температур теплових зон у процесі нагрівання до допустимої різниці температур

$$\sigma = \frac{\Delta P}{P_{\text{ном}}},$$

де ΔP – додаткова потужність, що вводиться в теплову зону, що має відставання по температурі в процесі нагрівання; $P_{\text{ном}}$ - потужність, що вводиться в теплову зону, що має відставання за температурою в процесі нагрівання.

Величина необхідної додаткової потужності визначається різницею температур між тепловими зонами в процесі нагрівання, температурою нагрівання та заданою допустимою різницею температур між тепловими зонами. На рис.3.5 представлені залежності величини доданої потужності у відсотках від номінальної в теплову зону, що має відставання по температурі від різниці температур, що компенсується, між тепловими зонами в процесі нагрівання при температурах нагрівання від 700°C до 1600°C і допустимою різницею температур між тепловими зонами 15°C .

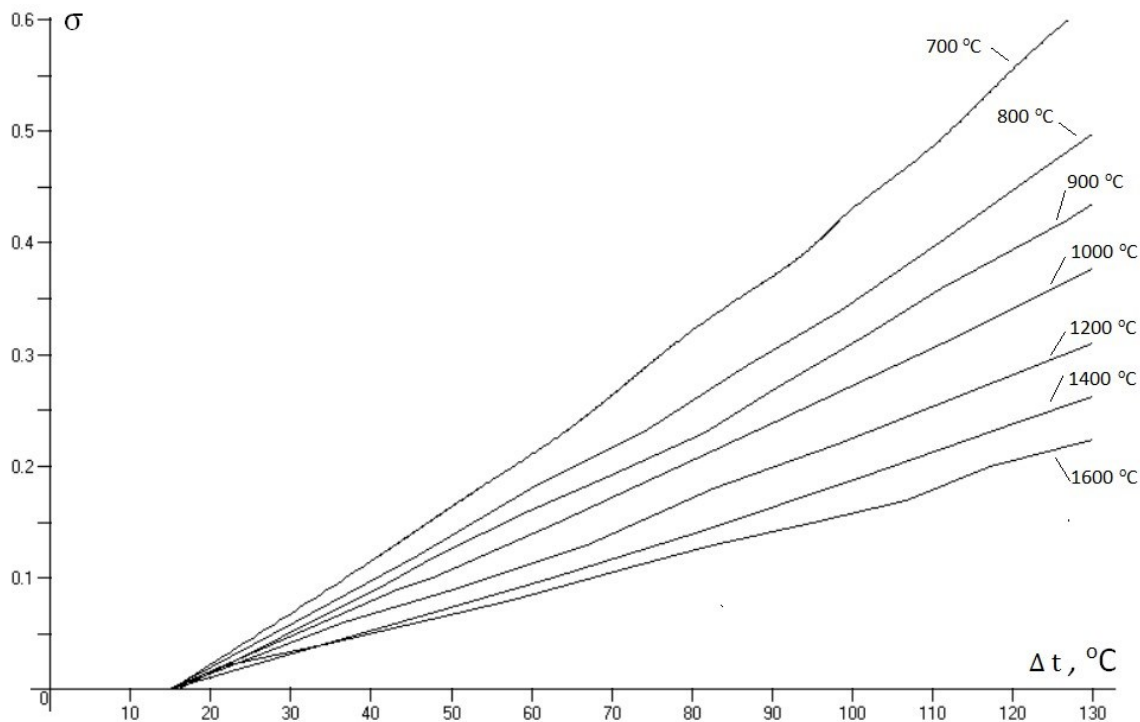


Рис. 3.5 Графік залежності відносної величини додаткової потужності від компенсованої різниці температур у діапазоні температур нагріву від 700⁰C до 1600⁰C при допустимій різниці температур 15⁰C.

При варіюванні допустимої різниці температур між тепловими зонами відбувається паралельне зміщення, отримані криві $\sigma(\Delta t)$ зміщуються вздовж осі абсцис, при цьому характер залежностей не змінюється.

На рис.3.6 представлені криві, отримані за допустимих різницях температур 15⁰C та 50⁰C, які ілюструють зроблений висновок.

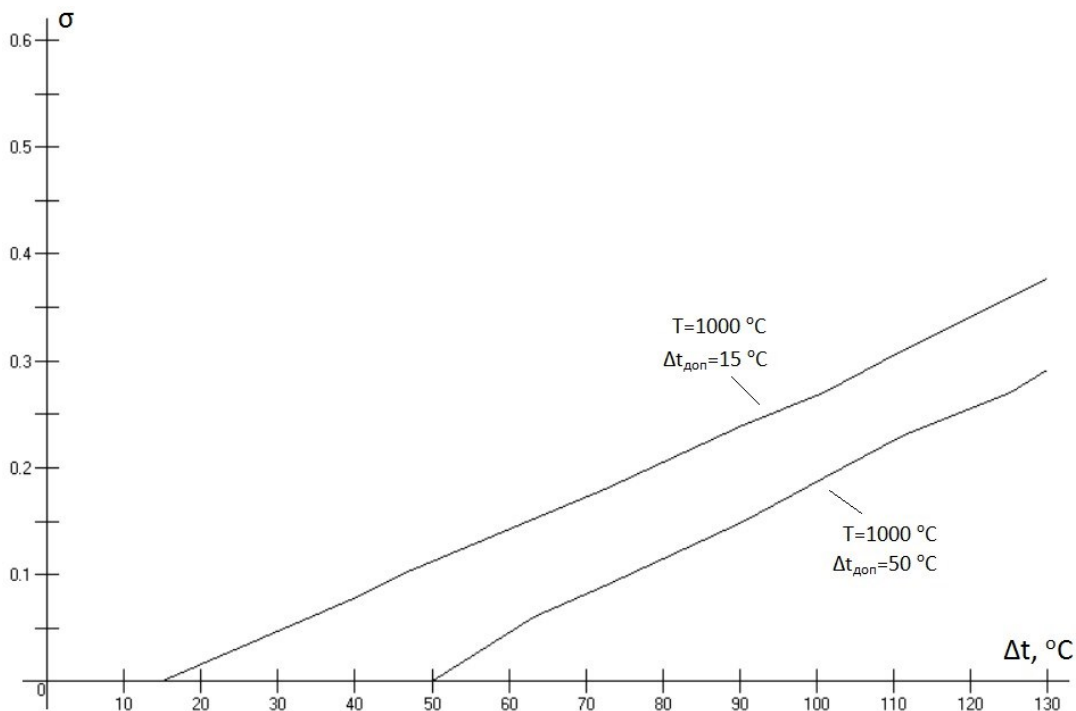


Рис.3.6 Графік залежності відносної величини додаткової потужності від компенсованої різниці температур при температурі нагрівання 1000°C при допустимій різниці температур 15°C та 50°C

Одержані залежності доданої потужності можуть бути апроксимовані поліномами другого ступеня.

На основі отриманих рівнянь залежностей розроблено адаптивну систему управління тепловими зонами ВЕПО (рис.3.7), а також методику проектування та налаштування, яка пройшла апробацію на системі управління та підтвердила достовірність проведених аналітичних досліджень.

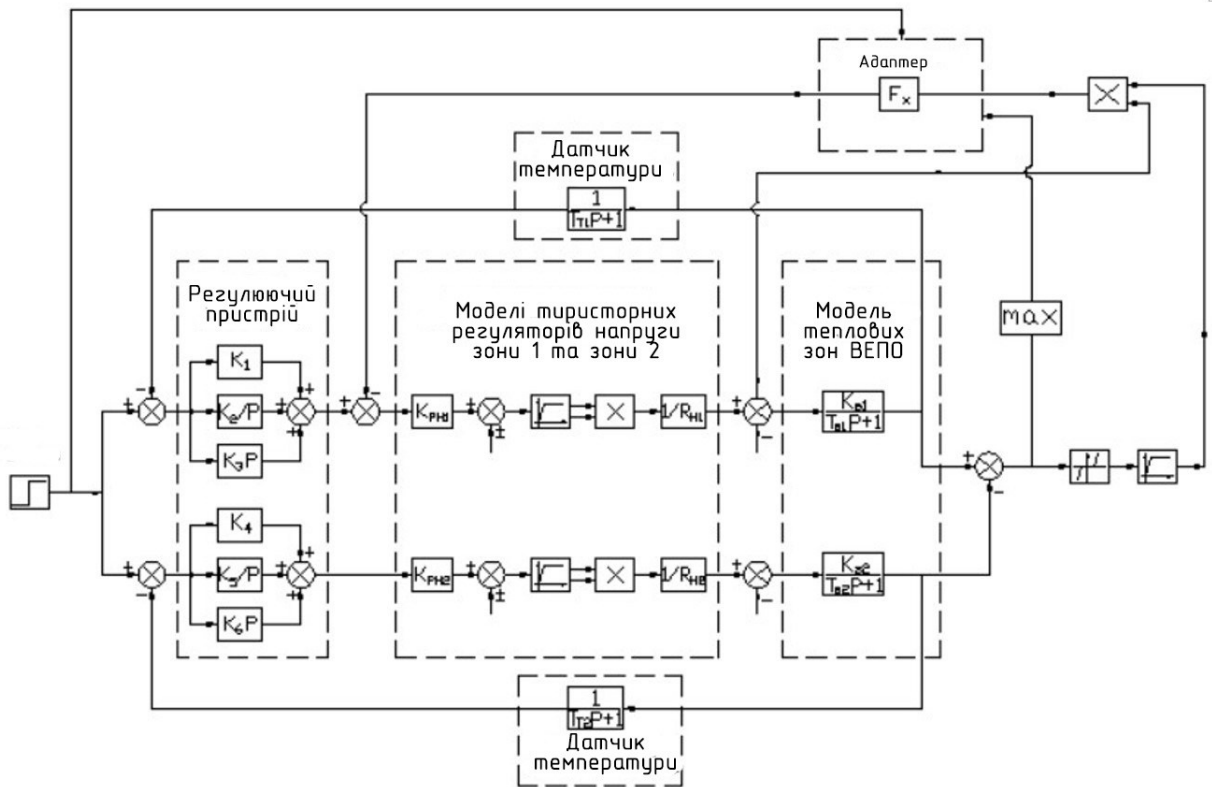


Рис.3.7 Адаптивна система управління тепловими зонами ВЕПО

Проведені дослідження показали, що запропонована система управління може бути реалізована і забезпечує необхідну для технологічного процесу різницю температур між тепловими зонами в процесі нагрівання.

На основі проведених досліджень було визначено залежності відносної величини додаткової потужності від різниці температур між тепловими зонами при температурах нагрівання 700°C , 800°C , 900°C , 1000°C , 1100°C , 1200°C , 1300°C , 1400°C , 1500°C і 1600°C та допустимих різницях температур між тепловими зонами 5°C , 15°C , 30°C та 50°C , які дозволяють розрахувати необхідний запас потужності регулятора при проектуванні та виборі тиристорного регулятора напруги.

В роботі показана можливість і доцільність побудови адаптивної системи управління тепловими зонами ВЕПО, процес параметричної адаптації якої здійснюється автоматично на основі розроблених поліномів.

3.4. Дослідження систем керування електричних печей опору з нагрівачами з дисіліциду молібдену

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

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

Регулятори температури досліджувалися на розробленій в Simulink Matlab моделі (рис. 2.15) 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.

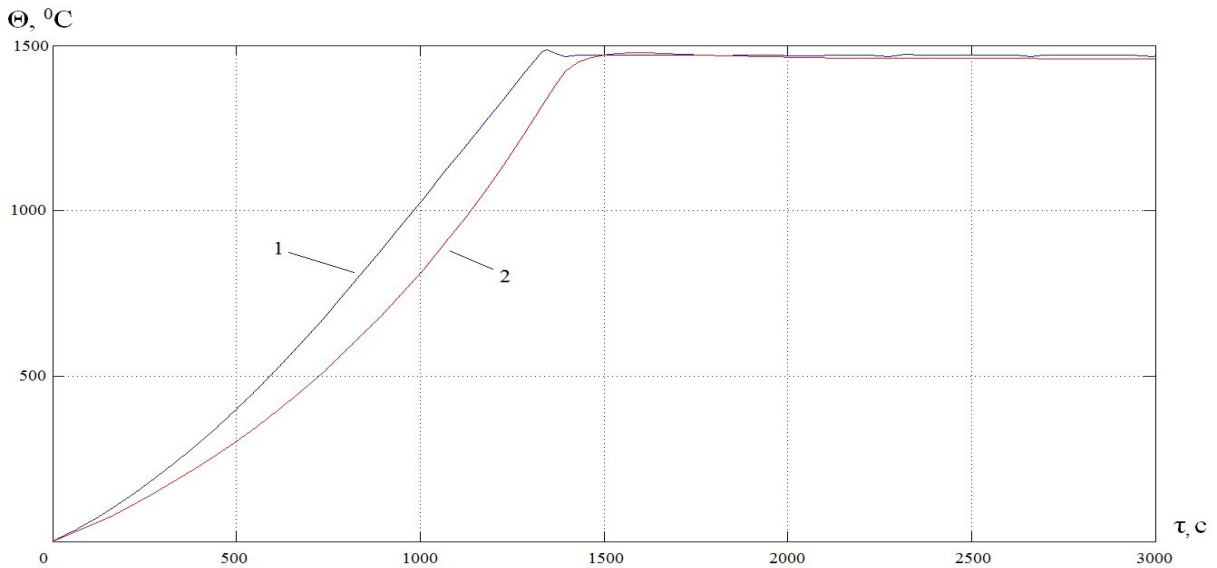


Рис. 3.8. Залежності температури на нагрівачах від часу: 1 – з струмовою відсічкою у регуляторі; 2 - з додатковим зворотним зв'язком по струму

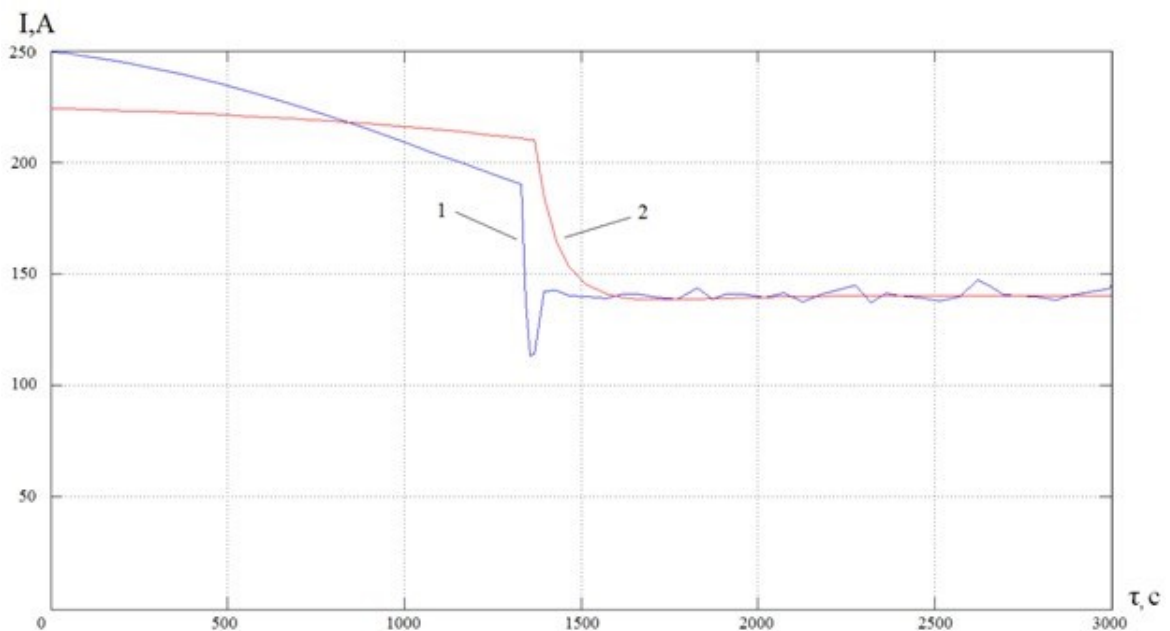


Рис. 3.9. Залежності струму нагрівачів від часу: 1 – з струмовою відсічкою у регуляторі

Як свідчить рис. 3.9 розроблений регулятор температури електропечі опору (крива 2) дозволяє організувати 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. 2.15).

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.2.15) 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 $2,5 I_{ном}$.

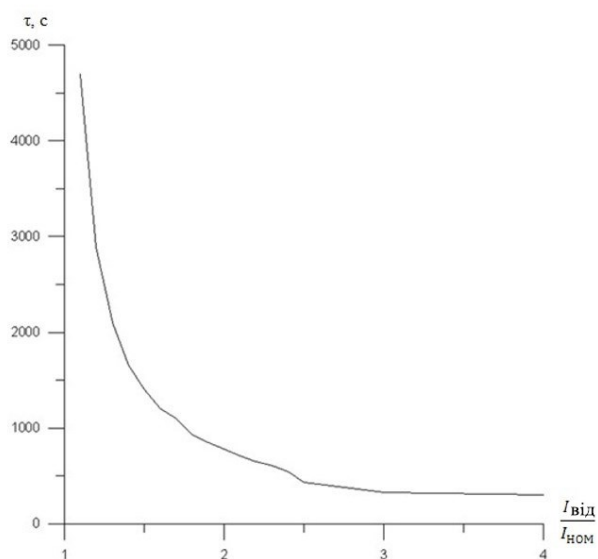


Рис. 3.10. Залежність швидкодії нагрівача від відношення струму

«відсічки» до номінального струму

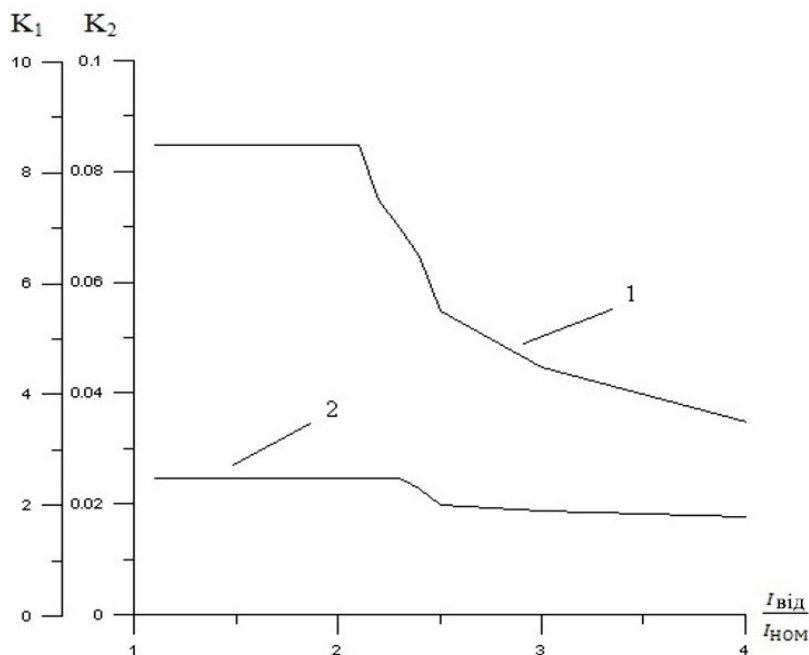


Рис. 3.11. Параметри ПІ-регулятора залежно від відношення струму «відсічки» до номінального струму: 1 – пропорційна; 2 – інтегральна.

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

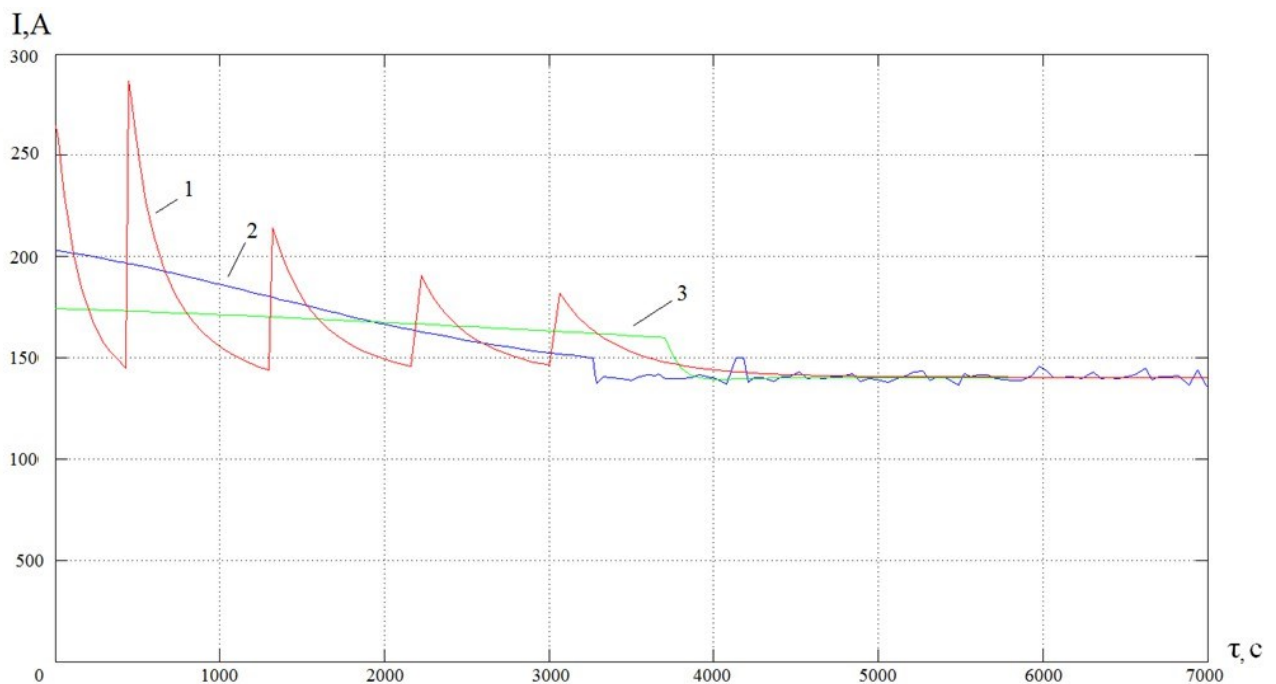
На закінчення наводиться порівняння струмових характеристик (рис. 3.11) для системи управління з перемиканням ступенів напруги трансформатора (крива 1), а також з регуляторами температури з струмовими відсічками всередині регулятора (крива 2) та з додатковим каналом зворотного зв'язку по струму (крива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

Висновки за розділом

1. Встановлено, що для ВЕПО загальнопромислового призначення найбільшу перевагу слід віддати системі регулювання температури, в якій датчик встановлюється поблизу футерування.

2. Визначені залежності для розрахунку додаткової потужності, необхідної для компенсації різниці температур між тепловими зонами. Представлені у поліноміальній формі.

3. Показана можливість і доцільність використання адаптивної системи управління тепловими зонами ВЕПО, процес параметричної адаптації якої здійснюється автоматично на основі розроблених поліномів.

4. Показано, що застосування розробленого 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.

РОЗДІЛ 4. ОПИС РОБОТИ ПАНЕЛІ ОПЕРАТОРА ТА КОНТРОЛЕРА

Система автоматичного управління є комплексом, що виконує завдання управління технологічним процесом та захист обладнання від аварійних та позаштатних ситуацій. Для запобігання помилкам у дії оператора при запуску технологічного процесу.

Підготовка до роботи. Перед подачею напруги живлення переконатися в тому, що кабель (КС2) підключений до панелі оператора (DA6) і контролера ПЛК110 (DA1), а блоки розширення (DA2-DA5, DA7) з'єднані між собою витю парю інтерфейсу RS-485. Після подачі напруги живлення на панель оператора (DA6) вона автоматично починає відлік п'ятнадцяти секунд для повноцінного завантаження контролера. Потім перетворюється на робочий режим. При цьому на моніторі з'явиться перший екран завантаження (див. рис. 1). **«УВАГА! Недотримання вимог, викладених в інструкціях, може призвести до збою в роботі печі або поломки обладнання.»** Вибір параметрів роботи та режиму керування.

4.1. Вибір параметрів роботи та режиму керування

Для продовження роботи з панеллю оператора натиснути кнопку « Далі>> ». Панель оператора перейде на наступний екран (див. рис. 2).

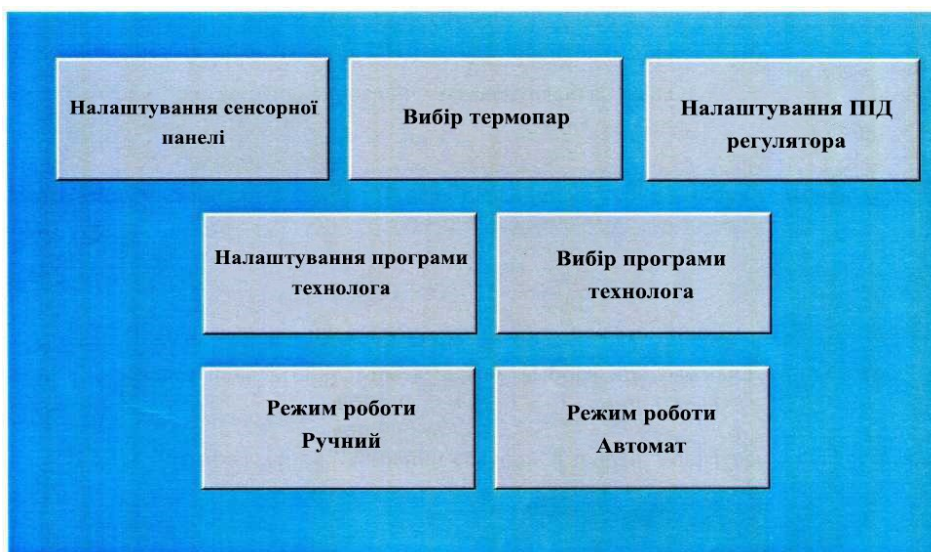


Рис. 2 Екран вибору режиму керування та параметрів роботи.

Цей екран призначений для вибору режиму роботи печі або налаштувань

контролера. Щоб перейти в автоматичний режим роботи, натисніть кнопку « **Ружим роботи автомат** » та панель оператора перейде на екран для роботи в автоматичному режимі (див. Рис. 3).

Щоб перейти в ручний режим роботи, натисніть кнопку « **Режим роботи ручний** » і панель оператора перейде на екран для роботи в ручному режимі (див. Рис. 4).

Для переходу в режим налаштування параметрів технологічного процесу натиснути кнопку «**Налаштування програми технолога** » і панель оператора перейде на екран налаштувань робочих параметрів (див. Рис. 6).

Для введення коефіцієнтів ПД-регулятора натиснути кнопку « **Налаштування ПД регулятора** » панель перейде на екран завдання ПД-коефіцієнтів (див. рис. 10).

Для конфігурування вимірювальних каналів термопарного входу натиснути кнопку « **Вибір термопар** » Панель перейде на екран вибору термопар (див. Рис. 12).

Для вибору програми технолога натиснути кнопку « **Вибір програми технолога** » яка переведе панель оператора на екран вибору програми технолога (див. Рис. 15).

Для пересування по «меню» вікна необхідно використовувати кнопки « < » і « > ». Для зміни чисельного значення необхідно використовувати кнопки « + , - ». Щоб зберегти введені значення, натисніть кнопку « **Save** ».

4.2. Автоматичний режим роботи

Цей екран призначений для роботи в автоматичному режимі. Екран дозволяє вести моніторинг стану всіх вузлів та механізмів печі під час її роботи в цьому режимі та забезпечує наступну індикацію:

- стани клапанів, насосів та затвора (VT1);
- стану дверей (відчинені, зачинені);
- залишкового тиску у вакуумній системі та в камері печі;
- вихідний потужності у відсотках на нагрівачах;

- температури у камері печі;
- стани поточної програми;
- часу та дати;
- наявності аварійних ситуацій.

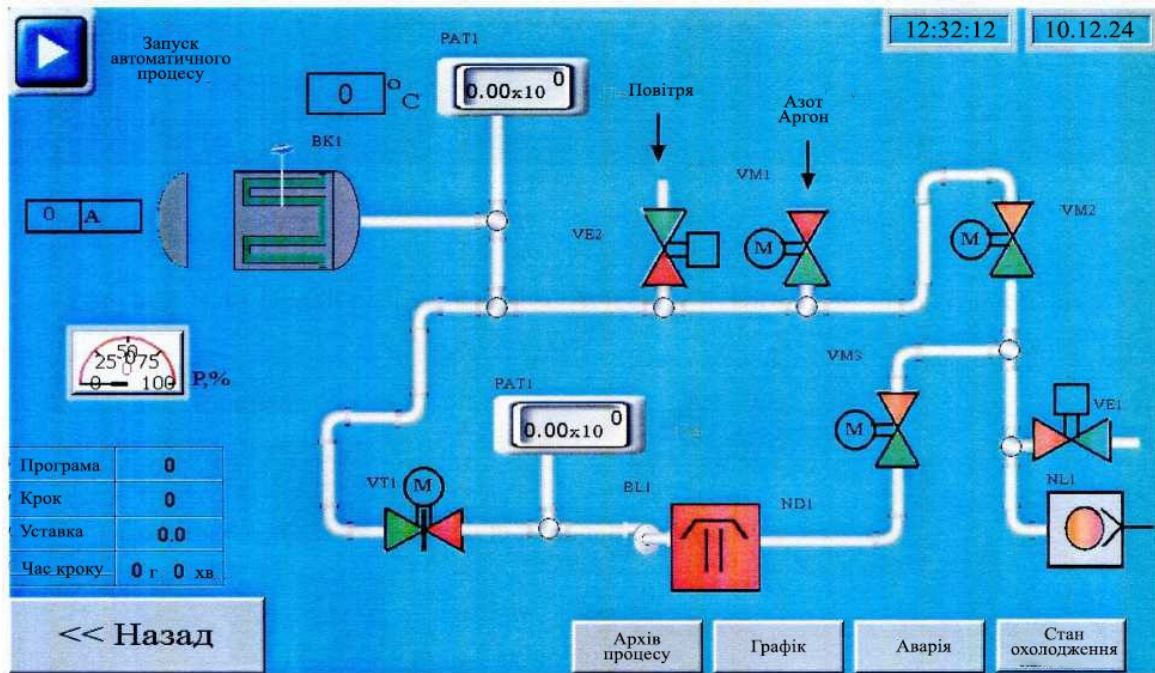


Рис. 3 Екран роботи в автоматичному режимі при відчинених дверцятах

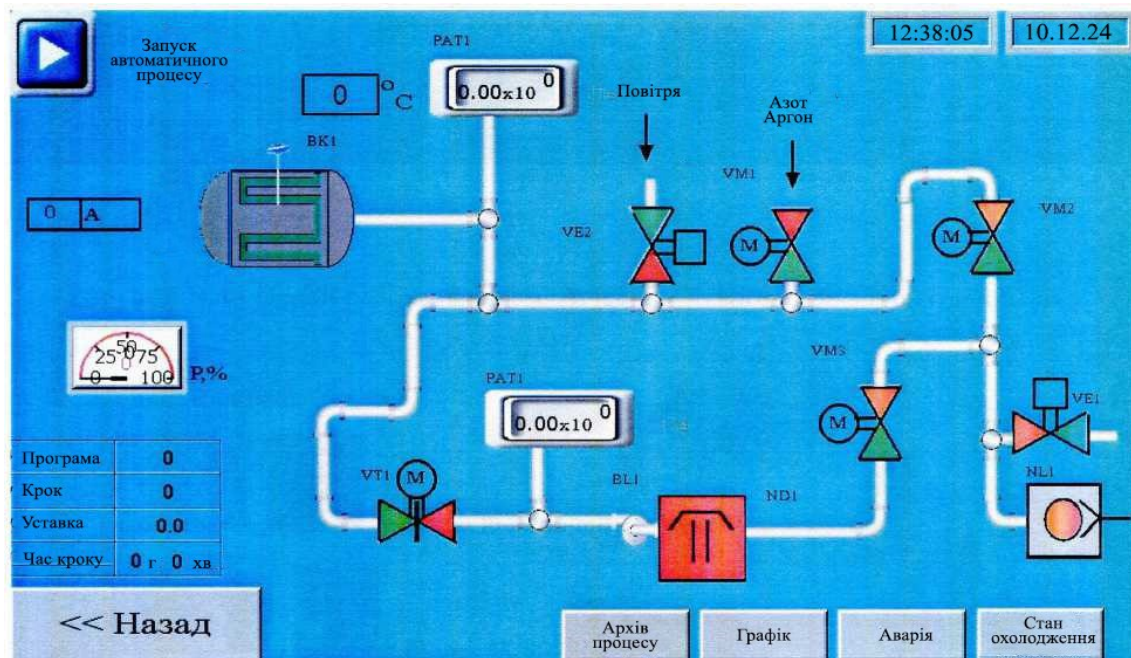





Рис. 4 Екран роботи в автоматичному режимі при закритих дверцятах

Елементи екрану:


- 1)  - насос вимкнений;


2)  - насос увімкнений;


3)  - клапан закритий;

4)  - клапан відкритий;


5)  - затвор закритий;


6)  - затвор у процесі закриття;

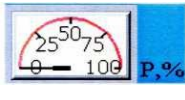
7)  - затвор зупинено у проміжному положенні;

8)  - затвор у процесі відкриття;


9)  - затвор відкритий;


10)  - залишковий тиск у камері печі, натисканням на індикатор можливе перемикання одиниць виміру між «Па» або «Торр»;

11)  - струм у первинній обмотці силового трансформатора;


12)  - потужність на нагрівачах у відсотках від номінальної потужності;

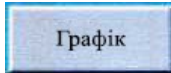
13)  - кнопка запуску технологічного процесу в автоматичному режимі.

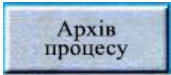
При цьому кнопка змінить свій вигляд на , натискання на яку переведе процес термообробки в режим «СТОП».

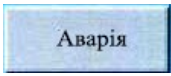
14)  - поточні значення температур робочої та контрольної термопар;


15)  - відображення поточного часу та дати;

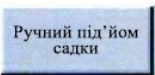
16)  - кнопка повернення до попереднього меню (екран);

17)  - кнопка переходу до перегляду графіків температури та вакууму;


18)  - кнопка переходу до архіву показань температури та вакууму;

19)  - Кнопка переходу до екрану аварійної сигналізації. У випадку виникнення аварійної ситуації кнопка почне блимати червоним кольором, а фон робочої області екрана стане червоним. Одночасно із цим прозвучить звукова сигналізація;

20)  - кнопка переходу до екрану контролю системи водоохолодження;

21)  - кнопка, утримуючи яку можна піднімати садок вгору відображається лише у ручному режимі.

- Пуск печі в автоматичному режимі

Для пуску печі в автоматичному режимі натиснути кнопку . Логіка управління піччю в автоматичному режимі:

- перевірка закритого стану усієї вакуумної арматури з подальшим закриттям відкритих клапанів або затвора;

- увімкнеться форвакуумний насос (NL1 і почнеться перевірка роботи насоса «самого на себе» 2 хвилини. Контроль залишкового тиску здійснюється за мановакууметром (BP2). Після чого програма перейде на наступний крок;

- клапан (VM2) відкриється, і розпочнеться попереднє вакуумування камери печі;

- при досягненні в камері залишкового тиску $6,65 \text{ Па}$ ($5 \cdot 10^{-2} \text{ Торр}$) закриється клапан (VM2), відкриється клапан (VM3) і розпочнеться процес попереднього вакуумування дифузійного насоса (ND1);

- якщо залишковий тиск у дифузійному насосі становитиме приблизно $6,65 \cdot 10^0 \text{ Па}$ ($5 \cdot 10^0 \text{ Торр}$), він включиться для виходу на робочий режим;

- після закінчення 50 хвилин після включення дифузійного насоса і досягненні в ньому робочого тиску близько $6,65 \cdot 10^0$ Па ($5 \cdot 10^{-2}$ Торр), відкриваються затвор (VT1). З цього моменту розпочнеться вакуумування камери печі на робочий залишковий тиск;

- при досягненні робочого залишкового тиску (не нижче) $6,65 \cdot 10^{-3}$ Па у камері печі буде розпочато процес термообробки.

Якщо в процесі термообробки відбувається підвищення залишкового тиску до $6,65 \cdot 10^{-3}$ Па ($5 \cdot 10^{-3}$ Торр), коли нагрівання далі не можна проводити, контролер відключить нагрівачі на час відновлення тиску до робочого рівня. При цьому на панель оператора виводиться попереджувальне повідомлення **«УВАГА! Під час процесу нагрівання виникло падіння вакууму. Технологічний процес зупинений.»**

- після завершення витримки садки за номінальної температури нагрівачі відключаться, садок переміститься в зону охолодження, а шторки закриються;


- після завершення охолодження садка до необхідної температури затвор (VT1) закриється, а на панелі оператора з'явиться інформаційне вікно – **«Виконання програми закінчено».**

Натискання на кнопку «Так» підтверджує обізнаність оператора про завершення процесу термообробки. і напустить у насос атмосферу.

4.3. Ручний режим роботи

На цьому екрані (див. Рис. 5) елементи вакуумної системи активні, включаються та вимикаються одноразовим натисканням на них. При спрацьовуванні елементи змінюватимуть свою індикацію. У ручному режимі керування піччю працюють не всі передбачені блокування. Процес вакуумування печі в даному режимі відбувається вручну одноразовим натисканням на відповідні символи вакуумної системи мнемосхеми панелі оператора.

Увімкнення процесу термообробки (виконання програми технолога) у

цьому режимі роботи починається після натискання кнопки «».

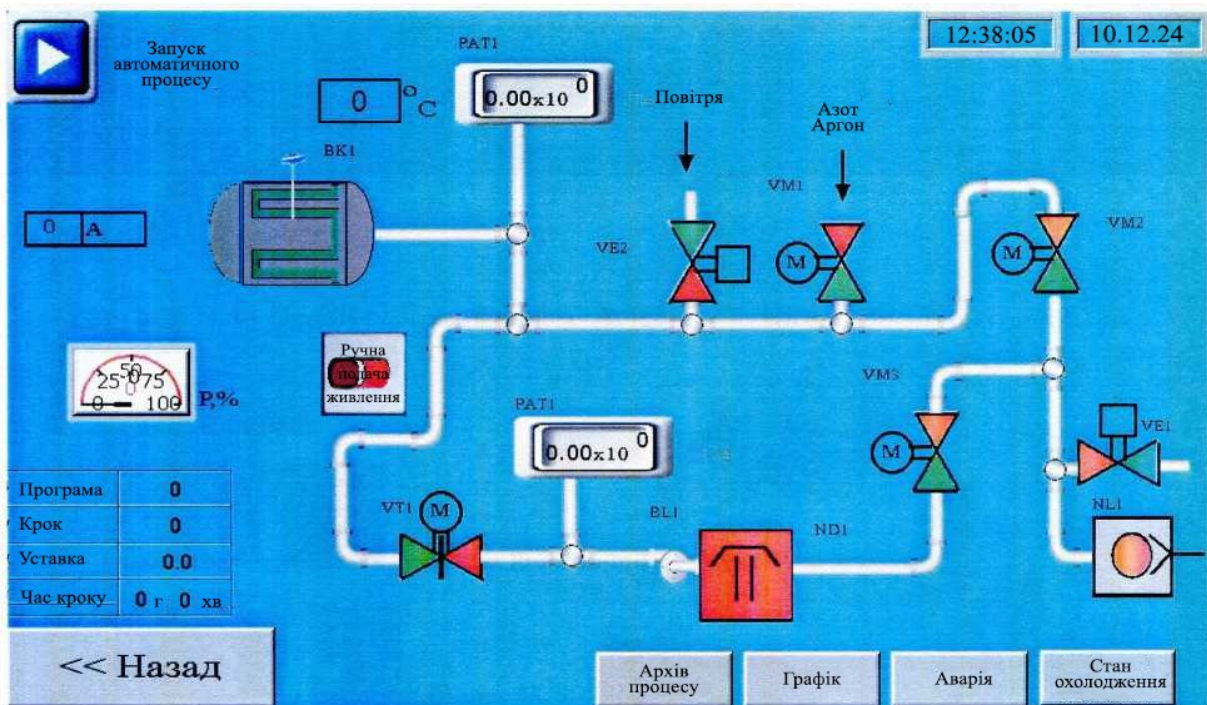


Рис. 5 Екран роботи у ручному режимі

Кнопка «**Ручна подача живлення**» дозволяє вручну подати живлення на нагрівачі. При цьому

зовнішній вигляд кнопки зміниться на «**Ручне задавання потужності**» натискання на яку призведе до вимкнення функції зміни потужності. Для задавання величини потужності в діапазоні 0-100% від номінальної необхідно

натиснути на вікно «». Відобразиться екранна цифрова клавіатура.

Кнопка «**Екстерна зупинка затвора**» призначена для екстреного відключення двигуна затвора.

4.4. Налаштування програми технолога

На цьому екрані технолог задає крок за кроком параметри програм, за якими виконуватиметься процес термообробки конкретних деталей.

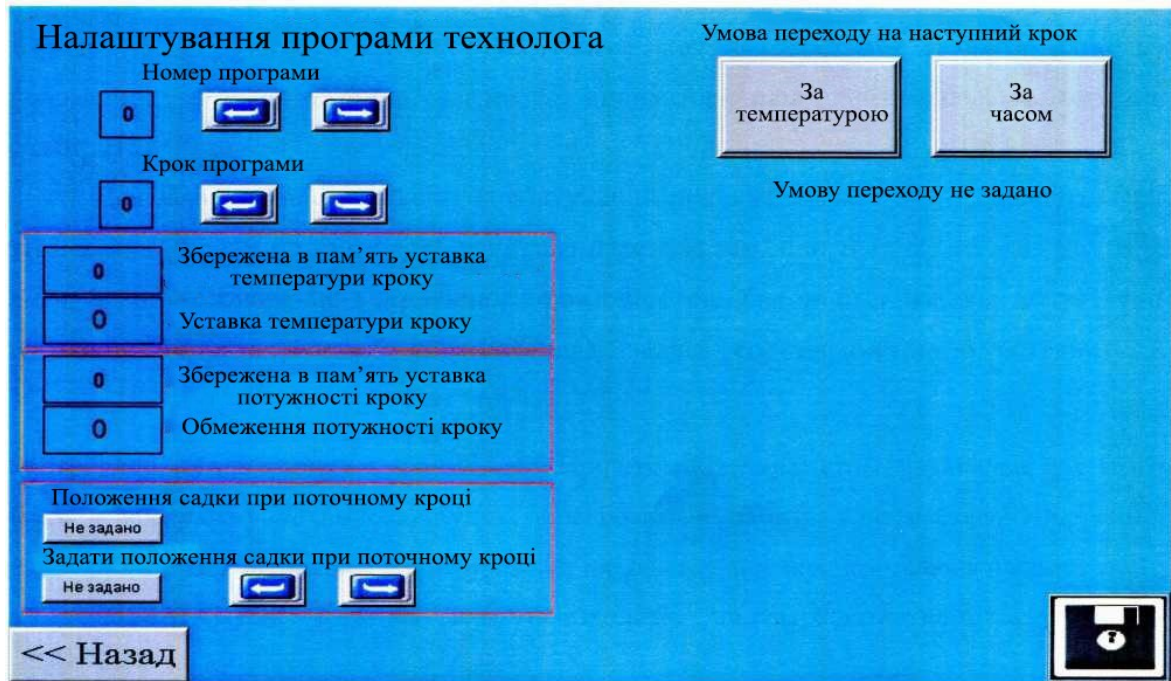




Рис. 6 Екран налаштування програми технолога

У вікнах під написами відображається поточна програма та поточний крок, редагування яких крок за кроком вперед здійснюється кнопкою «» назад

- кнопкою «». У момент натискання кнопки змінюють свій колір на червоний.



Нижче розташовані вікна введення: «Уставка температури», «Обмеження потужності, %», «Положення садки на поточному кроці», та вікна відображення: «Поточне значення уставки», «Поточне значення потужності», «Положення садки на поточному кроці». Ці значення відповідають конфігурованій програмі та кроку.

Введення значень уставки та потужності здійснюється одноразовим натисканням на вікно введення. При цьому з'являється цифрова екранна клавіатура (див. Рис. 7).


Окрім температури та потужності на кожен крок обраної програми необхідно задати тип переходу на наступний крок:

- за температурою;
- за часом.

вказати положення садка на поточному кроці відповідно до технологічного


процесу термообробки конкретних деталей. «» або «», вибрати одне з положень: загартування, завантаження, нагрівання на індикаторі поруч. Спочатку положення садка «Не задано».

Щоб задати тип переходу на наступний крок, натисніть на потрібний напис. При цьому з'явиться екран для введення параметрів переходу. Якщо з будь-яких причин сталася помилка і був вибраний не той тип переходу, вибрати потрібний тип переходу, встановити його параметри і зберегти в контролер, натиснувши

кнопку - «». При цьому всі параметри, введені для цього кроці в програму технолога, буде перенесено на пам'ять контролера. Індикація даних, збережених у контролері, знаходиться над екранами введення параметрів.

УВАГА! Кожен крок необхідно підтвержувати натисканням кнопки

«», яка в момент натискання змінюватиме свій зовнішній вигляд на -

«»; в іншому випадку зміни не збережуться в незалежній пам'яті контролера, а перехід до конфігурування наступного кроку буде неможливим. Приклад введення уставки за температурою на кроці «нуль» програми «нуль» червоним виділено змінюваний параметр та межі його зміни.

УВАГА! Перший номер програми та кроку в контролері вважаються нульовими - (0, 1,2,...).

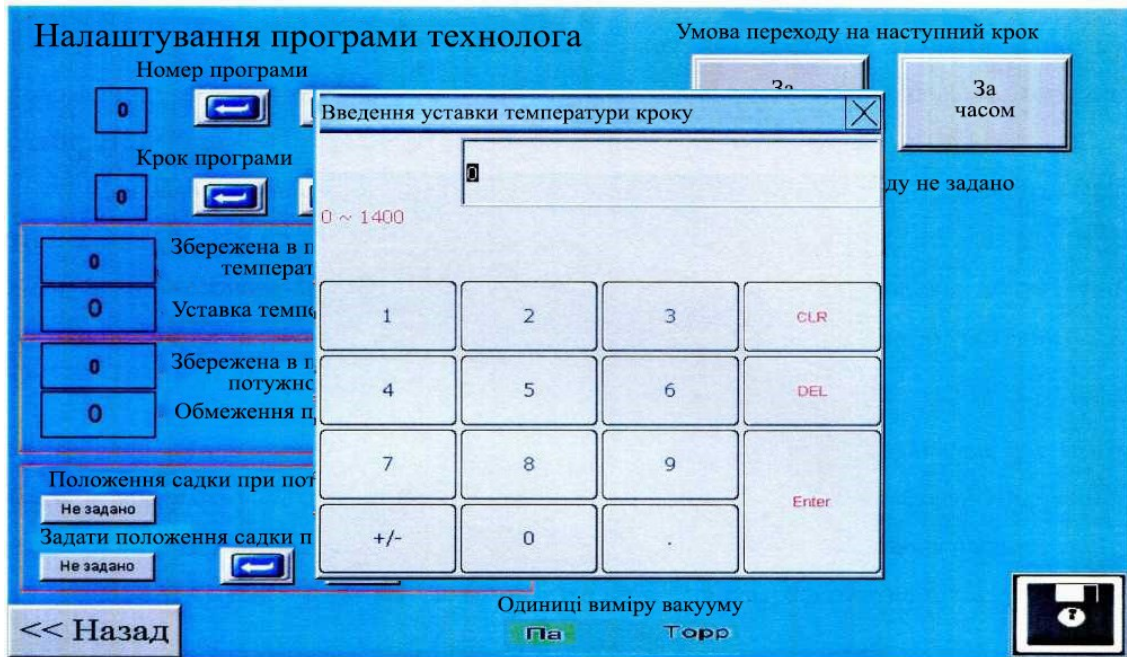


Рис. 7 Введення уставки за температурою на кроці 0 програми



Рис. 8 Введення швидкості нагрівання

Приклад введення часу нагріву (годин, хвилин) під час переходу кроку за часом.
Положення садка не встановлено.

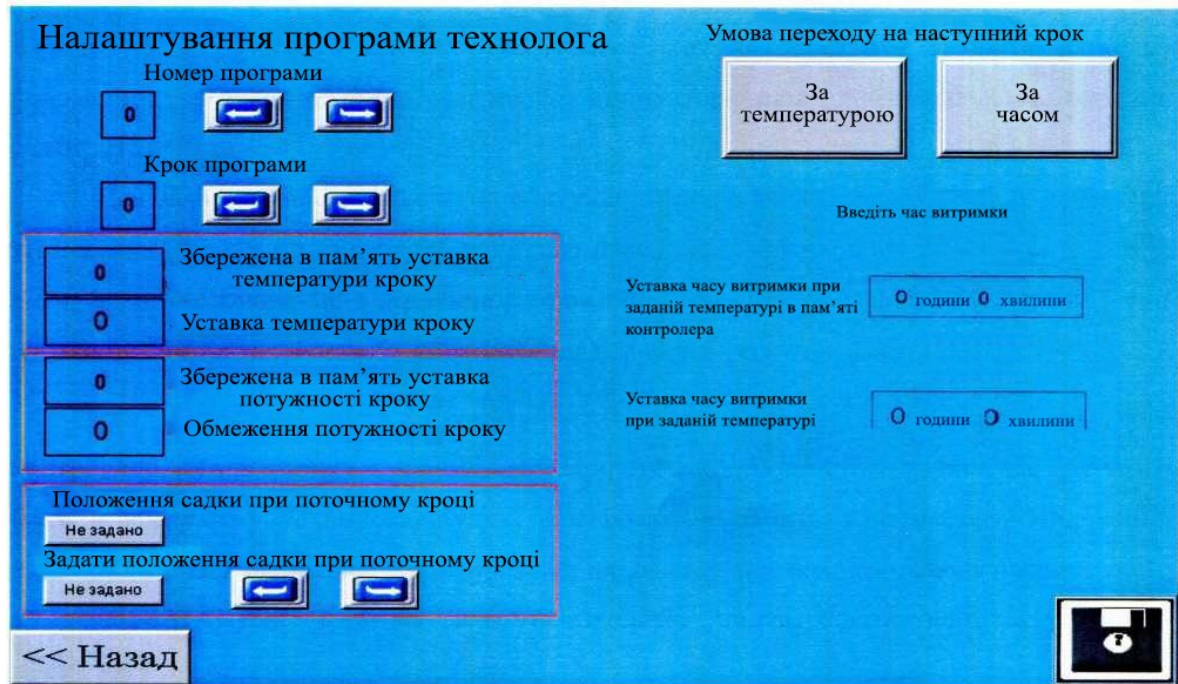


Рис. 9 Введення часу нагріву

4.5. Налаштування ПІД-регулятора

ПІД-регулятор – пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор. Вихід печі на температуру уставки та точність підтримки її виконується згідно із законом ПІД-регулювання. ПІД-регулятор прописаний алгоритмах контролера.

$$Y = Y_OFFSET + KP \left(e(t) + \frac{1}{TN} \int_0^{TN} e(t) + TV \frac{de(t)}{dt} \right),$$

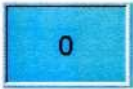
де Y_OFFSET – стаціонарне значення;

KP – коефіцієнт передачі;

TN - постійне інтегрування, в секундах;

TV – постійна диференціювання, в секундах;

$e(t)$ - сигнал помилки.

Для введення ПІД-коефіцієнтів необхідно натиснути на вікно  відповідного параметра ПІД-регулятора (див. Рис. 10).

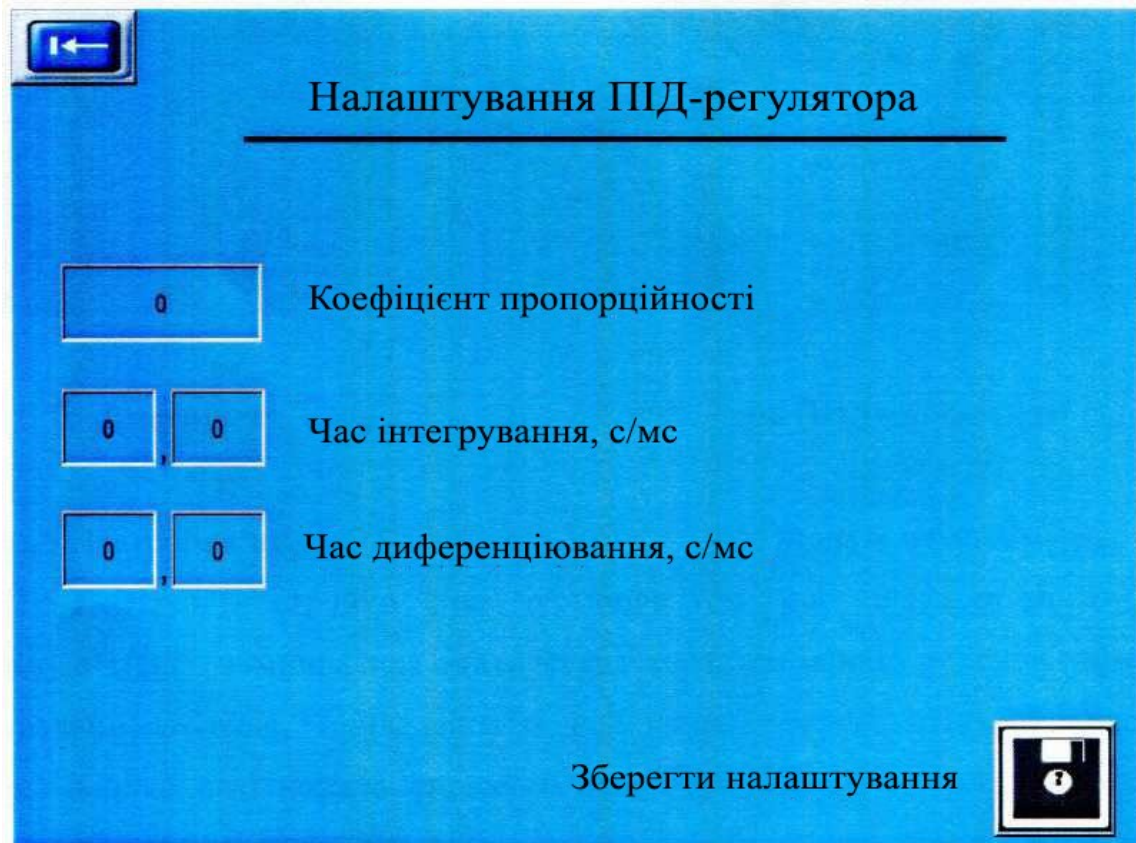


Рис. 10 Екран налаштування ПІД-регулятора

Введення значень здійснюється за допомогою екранної клавіатури для введення цифр. Параметр і діапазон, що вводиться, виділено червоним кольором. Кожне значення необхідно підтверджувати натисканням кнопки ENTER. Для збереження налаштувань ПІД-регулятора в незалежній пам'яті контролера

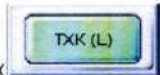
натиснути «». При цьому кнопка змінить свій зовнішній вигляд





Рис. 11 Введення значень параметрів ПІД-регулятора

Налаштування типу термоелектричних перетворювачів (термопар). Екран налаштування типу термопар дозволяє вибрати необхідну НСХ (номінальна статична характеристика) робочої термопари з уніфікованого ряду, наведеного на даному екрані. Для зміни типу термопари необхідно натиснути кнопку з

потрібною характеристикою, яка змінить колір на зелений - «».

Для вибору НСХ (номінальної статичної характеристики) робочої термопари на екрані необхідно натиснути кнопку «**Вибір термопар**» на екрані, що з'явився (див. Рис. 12) вибрати тип термопар.

Для переходу до попереднього меню (екран) необхідно натиснути кнопку

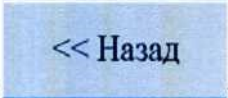
повернення «».



Рис. 12 Екран вибору типу робочої термопары

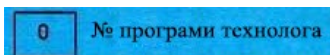
Вибір програми технолога (див. Рис. 13)



Рис. 13 Екран вибору та перегляду програми технолога

Даний екран призначений для перегляду програм технолога на відповідність технологічним процесам термообробки конкретних деталей.

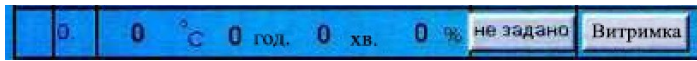
Вибір номера програми здійснюється одноразовим натисканням на вікно



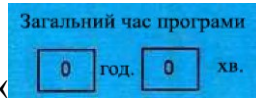
після чого з'явиться екранна клавіатура (див. рис. 14).

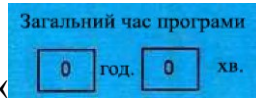
Після введення номера програми на екрані з'явиться поле зі значеннями

температури, часу, тривалості даного кроку, типу кроку та маркера кроку для початку програми -



Нумерація програм та кроків



починається від нуля. «» відображається загальна тривалість вибраної програми.

Якщо програму термообробки конкретних деталей необхідно запускати з певного кроку, необхідно натиснути на полі цього кроку; після чого маркер

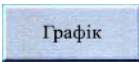


кроку для початку програми «» з'явиться на вибраному кроці.



Рис. 14 Введення номера програми технолога

4.6. Запис технологічного процесу

Для перегляду графіка поточної температури в зоні нагріву та залишкового тиску в камері печі перейти до робочого екрану та натиснути кнопку  - Перегляд графіка.

На екрані з'являться:

- графік температури в зоні нагріву – синя лінія;
- графік температури у зоні охолодження – зелена лінія;

- графік залишкового тиску (масштабованого x100) у камері печі – червона лінія.

Індикація вимірювань залишкового тиску проводиться у вольтах (див. рис. 15). Переведення показань даного екрана в одиниці залишкового тиску слід проводити за допомогою графіка або формул перерахунку, наведених у паспорті вакуумметр.

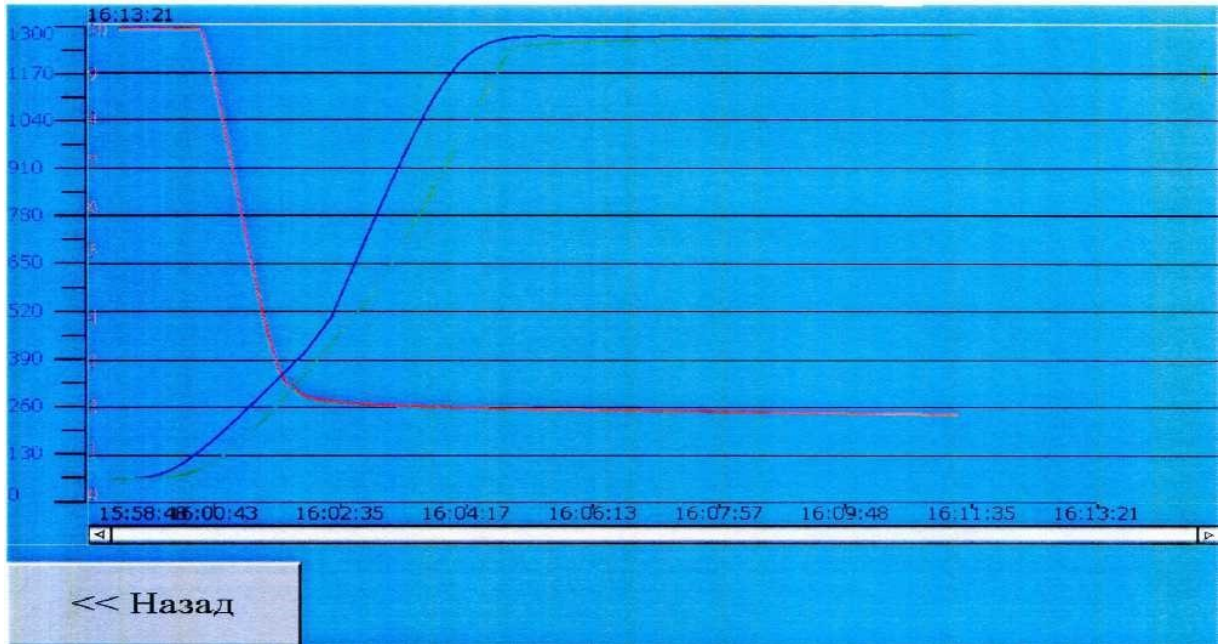


Рис. 15 Екран перегляду графіків поточної температури та вакууму

Натискаючи праву «hh:mm» або ліву «hh:mm» частина «повзунка» (див. рис. 15) графік можна зрушувати у часі одну чи іншу сторону.

Для перегляду архіву показань температури та вакууму в табличному вигляді перейти до робочого екрану та натиснути кнопку «Архів процесу». З'явиться екран перегляду архіву показань температури та вакууму (див. Рис. 16).




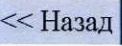
Рис. 16 Екран відображення архіву показів

На цьому екрані у лівому вікні виводиться архів температур у табличному вигляді. У правому вікні виводиться архів залишкового тиску у табличному вигляді.

Формат виведення: час (години, хвилини, секунди), дата (дні, місяці, рік), температура та вакуум.

Дискретність виведення даних визначається при програмуванні контролера і відповідає вимогам підприємства-споживача.

4.7. Система водоохолодження

Для перегляду стану системи охолодження (витрати води та її температури) на основних екранах (див. Рис. 5) необхідно натиснути кнопку , з'явиться вікно з витратою води та її температурою (див. рис. 17). Якщо витрата води недостатня, а її температура перевищує 40 °С, зелений індикатор світитиметься червоним кольором, наприклад, кришка CN2. Крім того, на активному екрані сенсорної панелі відкриється вікно з аварійним повідомленням «**АВАРІЯ! Витрати охолоджуючої рідини в кришці недостатньо для нормальної роботи**», щоб повернутися до попереднього екрана, натисніть кнопку «».

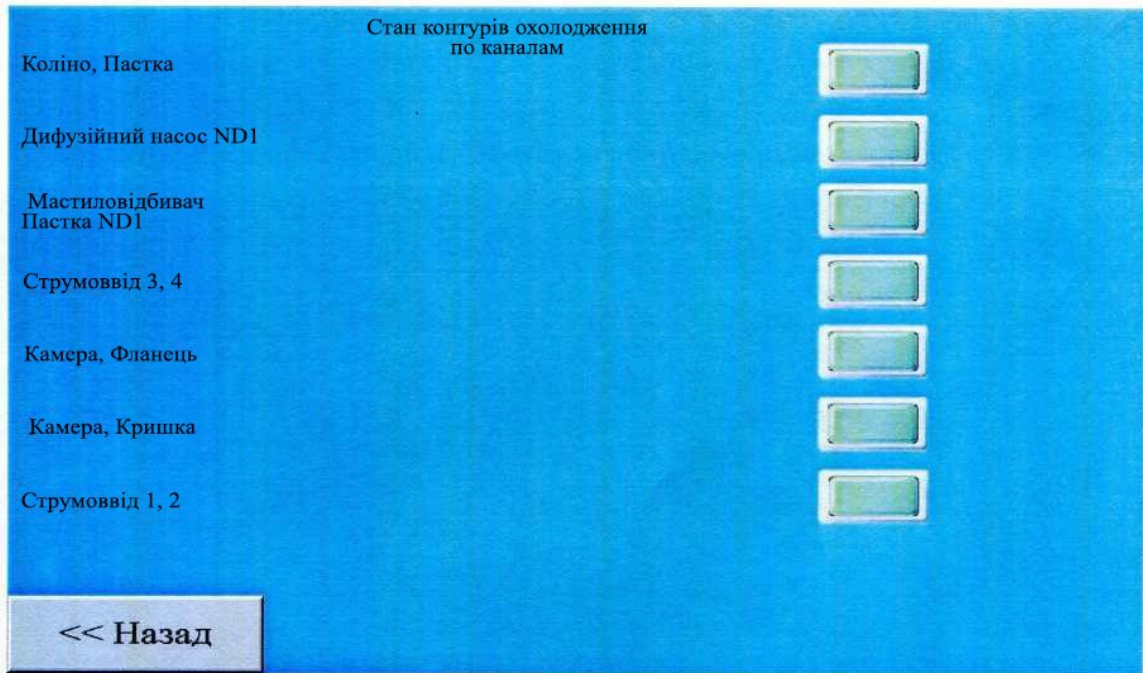
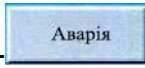

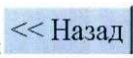


Рис. 17 Параметри охолоджувальної води

4.8. Екран перегляду аварійної сигналізації

Для входу в екран перегляду аварійної сигналізації потрібно перейти до робочого екрану та натиснути кнопку перегляду аварій - . З'явиться екран перегляду (див. Рис. 18). На цьому екрані можуть бути помічені місця виникнення аварій. У разі аварійної ситуації оператору на екран виводиться вікно з попереджувальним повідомленням, наприклад, **«АВАРІЯ! Обрив або коротке замикання термопар. Виникла помилка на вимірювальних входах контролера.»**, що супроводжується звуковою сигналізацією. Звукова сигналізація відключиться натисканням на кнопку **«Вимкнути сирену»** у повідомленні. Для закриття вікна повідомлення натиснути на символ . Сигналізація на екрані перегляду аварій залишиться до усунення причин несправності.

Щоб повернутися до попереднього екрану, натисніть кнопку .

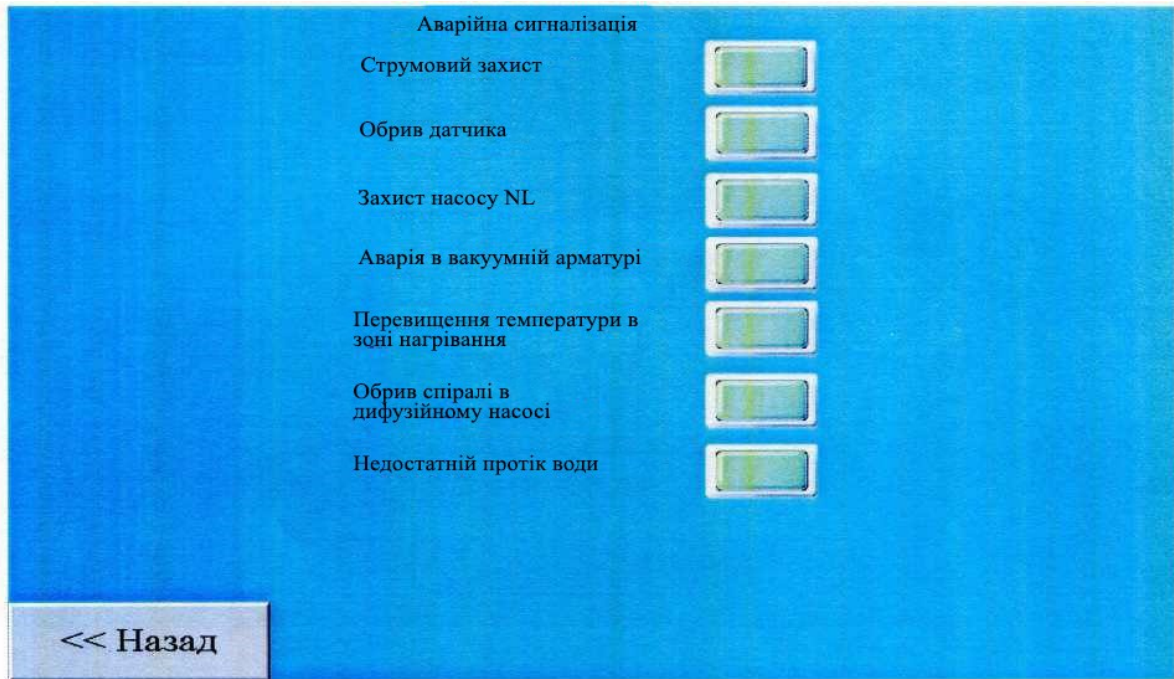



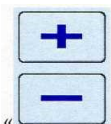
Рис. 18 Екран індикації аварій

4.9. Налаштування сенсорної панелі оператора

Для налаштування сенсорної панелі оператора відповідно до неї посібником з експлуатації натиснути кнопку «**Налаштування сенсорної панелі**» (Див. Рис.

20). Пересування по «меню» вікна необхідно використовувати кнопки « і

». Для зміни чисельного значення необхідно використовувати кнопки



« ». Щоб зберегти введені значення, натисніть кнопку «»».

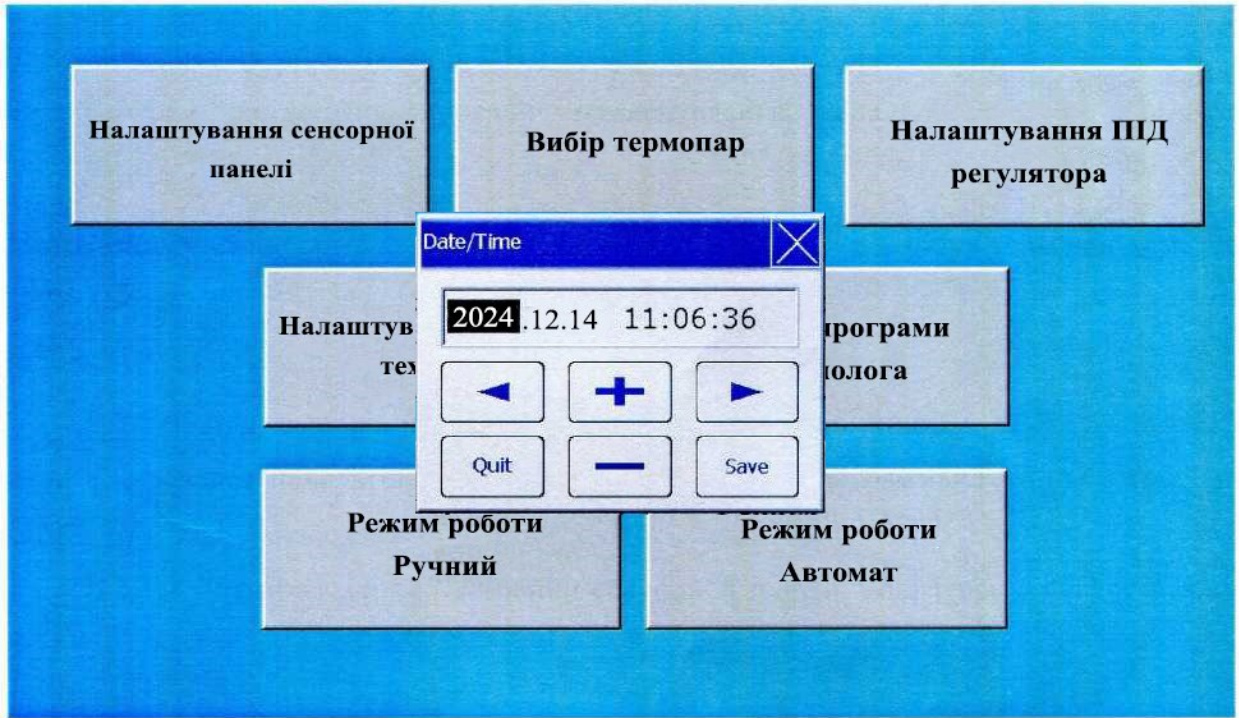


Рис. 20 Налаштування сенсорної панелі оператора

ВИСНОВКИ

1. Розроблено системи регулювання температури ВЕПО, що дозволяють контролювати та обмежувати температуру окремих її внутрішніх елементів.

2. Запропоновано модель регулятора температури ВЕПО з обмеженням температури нагрівальних елементів шляхом введення каналу обмеження температури.

3. Розроблено модель регулятора температури багатозонної ВЕПО, що дозволяє підвищити рівномірність розподілу температури в робочому просторі печі шляхом компенсації різниці температур у теплових зонах у процесі нагрівання. Дана модель дозволяє розрахувати необхідний запас потужності регулятора при проектуванні та виборі тиристорного регулятора напруги. Запропоновано методику вибору встановленої потужності регуляторів температури багатозонної ВЕПО періодичної дії з компенсацією різниці температур між тепловими зонами у процесі нагрівання.

Визначені залежності для розрахунку додаткової потужності, необхідної для компенсації різниці температур між тепловими зонами. Представлені у поліноміальній формі.

Запропонована можливість і доцільність використання адаптивної системи управління тепловими зонами ВЕПО, процес параметричної адаптації якої здійснюється автоматично на основі розроблених поліномів.

4. Показано, що розроблений регулятор температури електричної печі опору з введенням додаткового зворотного зв'язку струму в канал зворотного зв'язку за температурою, забезпечує «плавний» пуск нагрівачів з дисіліциду молібдену. Показано, що застосування розробленого регулятора з додатковим каналом струму дозволяє знизити стрибки струму на нагрівачах: на 30% порівняно з «струмовим відсіканням» у внутрішньому контурі регулятора; на 70% - з перемиканням ступенів напруги.

5. Розроблено програмне забезпечення та інтерфейс панелі оператора з урахуванням результатів дослідження.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Горбачов В. М. "Сучасні електричні печі та установки". – Київ: Видавництво "Техніка", 2021. – 320 с.
2. Петренко І. О. "Електротермічні установки: новітні технології та розрахунки". – Львів: Видавництво "Світ", 2020. – 280 с.
3. Свенчанський А. Д., Жердєв І. Т., Кручинін А. М. "Електричні промислові печі: дугові печі та установки спеціального нагріву". – Київ: Техніка, 2010. – 350с.
4. Сидоренко С. П. "Основи вакуумної техніки: теорія та практика". – Харків: ХНУ, 2019. – 350 с.
5. Ковальчук О. В. "Вакуумні системи та їх застосування в промисловості". – Одеса: ОНПУ, 2022. – 290 с.
6. Мельник П. І. "Електронні регулятори напруги: сучасні рішення". – Київ: Політехніка, 2021. – 310 с.
7. Данилюк М. М. "Системи керування електричними мережами: новітні технології". – Львів: Видавництво ЛНУ, 2020. – 275 с.
8. Іванченко В. С. "Програмування PLC: сучасні підходи та практика". – Київ: Наукова думка, 2022. – 340 с.
9. Савченко О. Г. "Основи програмування промислових контролерів: практичний посібник". – Дніпро: ДНУ, 2023. – 360 с.
10. Бойко Ю. М. "Теорія автоматичного керування: сучасні аспекти". – Київ: Вища школа, 2019. – 400 с.
11. Григоренко І. В. "Системи автоматичного регулювання: нові підходи". – Харків: ХНУРЕ, 2021. – 320 с.
12. Кравченко П. О. "Mathcad у інженерних розрахунках: практичний курс". – Київ: Політехніка, 2020. – 280 с.
13. Лисенко В. М. "Практикум з Mathcad: сучасні задачі". – Львів: Видавництво ЛНУ, 2021. – 250 с.
14. Сергієнко І. В. "Matlab для інженерів: новітні технології". – Київ: Наукова думка, 2022. – 370 с.

15. Дорошенко О. П. "Обробка сигналів у Matlab: практичний підхід". – Харків: ХНУ, 2023. – 330 с.
16. Блинов І. В. "Моделювання систем в Matlab". – Одеса: ОНПУ, 2014. – 310 с.
17. Ковтун О. С. "Matlab: розв'язання інженерних задач". – Дніпро: ДНУ, 2015. – 290 с.
18. Шевченко В. О. "Matlab та Simulink у моделюванні динамічних систем". – Київ: Політехніка, 2012. – 350 с.
19. Опальчук А. С., Котречко О. О., Роговський Л. Л., Семеновський О. Є., Роговський І. Л. "Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів: Лабораторний практикум". – Київ: Видавничий дім "Вініченко", 2015. – 224 с.
20. Верховлюк А. М., Нарівський А. В., Могилатенко В. Г. "Технології одержання металів та сплавів для ливарного виробництва". – Київ: Видавничий дім "Вініченко", 2016. – 224 с.
21. Сігова В.І., Руденко П.В. "Методи локальної поверхневої обробки деталей машин". – Суми: Видавництво СумДУ, 2008. – 218 с.
22. Верховлюк А.М., Нарівський А.В., Могилатенко В.Г. "Технології одержання металів та сплавів для ливарного виробництва". – Київ: Видавничий дім "Вініченко", 2016. – 224 с.

ДОДАТКИ

CHAPTER 1. VACUUM TECHNOLOGIES IN METALLURGY

The development of almost all branches of the metallurgical industry is connected with the intensive use of vacuum technology. In metallurgy - furnaces and means of out-of-furnace processing in technological processes that provide smelting and tempering of high-purity metals and alloys. In powder metallurgy, vacuum technology is used for the final stage of compaction - sintering of hard alloys, permanent magnets, etc.

1.1. Vacuum electric furnaces

Vacuum electric furnaces became widespread in connection with the emergence of such branches of industry as nuclear, rocket, etc. significantly improve the physical and mechanical properties of the metal.

According to the principle of the device and purpose, vacuum electric furnaces are divided into the following types: arc, induction, electron beam and resistance.

Vacuum arc furnaces - used for melting high-quality steels - stainless steel, structural steel, electrical engineering steel, ball bearing steel; heat-resistant alloys, refractory and highly reactive metals. The diverging electrode is attached to the rod to which the negative pole of the DC source is connected. The electrode rod is introduced into the vacuum space of the furnace. An electric arc occurs between the end of the electrode and the gasket of the crystallizer tray. The material of the electrode melts under the influence of the heat of the arc and flows into the crystallizer, where it hardens and an ingot is gradually formed from it. The electrode serving as one pole of the arc can be consumable or non-consumable. The non-consumable electrode participates in the process only as a current conductor.

Another fundamentally different type of vacuum arc furnace is the furnace for melting in the garnish, the feature of which is the presence of a cooling crucible filled with metal. The walls of the crucible are covered with a shell of solidified metal that separates the liquid metal from the walls of the crucible. Thanks to this shell (garnish), the molten metal does not come into contact with the material of the crucible and is therefore not contaminated by it. A pressure of the order of 10^{-10} Pa is maintained

in the melting space with the help of a system of vacuum pumps (pre-vacuum rotary or booster pumps, or high-vacuum steam-oil pumps connected in series with a booster pump) [7].

Vacuum induction furnaces are used for melting and pouring various metals and alloys, and melting furnaces with a tilting crucible inside a stationary casing have become the most common [7, 8]. The principle of operation of furnaces is that in a refractory crucible installed in a vacuum chamber, with the help of a high-frequency inductor, a solid charge (waste of a special billet, pure metals and ferroalloys) is melted and liquid metal is refined; furnaces can also work on a liquid garden. Furnaces are pumped by diffusion pumps, which provide fairly low pressures of less than 10 Pa. In recent years, intensive development has been carried out to create an industrial vacuum plasma-induction furnace. The use of a plasmatron accelerates the process of melting the charge and allows you to organize it more rationally, as it becomes possible to maintain a constant power of the furnace, which does not depend on the dimensions and density of stacking of the charge materials.

Electron beam furnaces are used to obtain particularly pure metals. In furnaces of this type, heating is carried out by bombarding the surface with fast-moving electrons. Since it is possible to create a directed flow of electrons and transfer sufficient energy only in conditions of high vacuum, in electron-beam furnaces a pressure of the order of 10^{-3} - 10^{-4} Pa is maintained. The main element of the furnace is a heating element or gun, with an electromagnetic focusing device and a beam scanning system, which allows you to get a spot with a diameter of 5-10 mm at a distance of 1.5-2 m from the cathode and move it over the surface of the ingot. It should be noted that electron beam furnaces are used not only for melting, but also for various processes related to the heating of materials, for example, during the growth and zone purification of single crystals, heat treatment of strip and wire materials, evaporation of metals for the purpose of coating, for welding, casting, etc.

Electric resistance vacuum furnaces are the most versatile, as they have many areas of application, for example, they are used for heating long products, large and heavy cages, parts in a suspended state to prevent their deformation, for annealing

transformer steel, etc. The principle of the furnace device consists in the presence of a hermetic, heat-insulated chamber, inside which are located heating elements that emit heat due to the flow of electric current through them. Furnaces are pumped out by diffusion pumps that provide residual pressures of less than 10^{-7} Pa [8, 9]. According to the type, vacuum electric resistance furnaces are divided into garden and methodical furnaces. In garden electric furnaces, the garden remains stationary during the entire heating time and it is not possible to make another load in them without first unloading the furnace. These furnaces are characterized by relatively low productivity. Such garden vacuum electric furnaces as chamber, mine, hood, and elevator furnaces have become the most popular. High-performance methodical vacuum electric furnaces include loading and unloading sluice chambers, heating and cooling chambers, a system of devices for moving the cage in the furnace, and a pumping system. According to the principle of cage movement, the following types of methodical furnaces have been used: push furnaces, step furnaces, multi-chamber furnaces with a rolling cart, and furnaces for heat treatment of tape and wire.

Purpose of vacuum electric resistance furnaces:

- for heat treatment, annealing, hardening and soldering;
- for sintering and degassing;
- for heating under pressure treatment;
- for special chemical and technological processes.

Annealing in a vacuum (at a pressure of 10^{-1} - 10^{-3} Pa) is a thermovacuum process of processing metals and alloys, which consists in their heating, aging and cooling to remove slander, increase plasticity, change the structure in the desired direction, provide certain electrical, magnetic and other properties, as well as for cleaning from gas and non-metallic inclusions. The following are annealed in a vacuum: sheets, wire, blanks for further pressure treatment, parts made of various metals. For example, it is recommended to anneal tantalum and niobium for one hour at 1300-1400 °C and a pressure of no more than 10^{-3} Pa [10]. Niobium is processed by the method of vacuum rolling at 1100-1250°C, and after the destruction of the cast structure, it is easily processed by pressure at room temperature. After annealing at 1700-1730°C in a

vacuum, the Brinell hardness of the metal increases to 800-900 N/mm², the strength limit to 300-400 N/mm², and the relative elongation is 30%. The following types of annealing are distinguished: high-temperature, deoxidizing, decarburizing, recrystallization, etc. For example, in the production of mercury rectifiers, parts made of low-carbon steel are annealed in furnaces. It provides decontamination and obtaining a bright surface, which, when the parts are heated during operation, excludes the formation or peeling of an oxide film and reduces gas evolution, thus preventing shorting and breakdown. High-temperature annealing in furnaces improves magnetic properties and increases the yield percentage of higher grades of transformer steel [10].

Hardening in a vacuum is a thermovacuum process of processing steel and some alloys (for example, brass, bronze, etc.) by heating and then rapid cooling. strength, hardness with reduced viscosity, reduction of deformation and warping, etc.; in some steels and alloys, hardening leads only to an increase in viscosity.

Electric furnaces for vacuum hardening are divided into furnaces for hardening in gas and for hardening in liquid media. Hardening in gas after heating in a vacuum is carried out in shaft and chamber furnaces. These furnaces are widely used for hardening large products, medical and precision instruments, device parts, etc.

1.2. Distillation in a vacuum

Distillation of metals and alloys in a vacuum is one of the technological processes of vacuum melting, designed to remove harmful impurities from metal in a gaseous state with the aim of obtaining pure metal for rocket technology, atomic energy and other industries [1, 9] vacuum arc and induction furnaces with pressure below 10⁻¹ Pa.

The process of vacuum distillation consists in the evaporation of impurities and their subsequent condensation.

Vacuum distillation of sulfur creates favorable conditions for desulfurization of cast iron. Such metals as calcium, beryllium, zirconium, titanium, etc. can be subjected to vacuum distillation. Vacuum distillation is used for the purification of spongy titanium and zirconium after recovery, in the production of pure metals: zinc, selenium and rare earth metals, in the enrichment of scrap light metals.

1.3. Welding and soldering in a vacuum

Vacuum welding is intended for obtaining inseparable connections of device elements, parts (nodes) of machine structures used in precision engineering, microelectronics, in the creation of atomic reactors, etc. [12] and thermodiffusion welding (pressure welding).

Electron-beam welding is carried out in a vacuum at a residual gas pressure of 10^{-1} – 10^{-3} Pa using an installation that includes a vacuum working chamber, an electron-optical system that forms an electron beam. The installation allows performing linear and circular axial welding in a vacuum at an operating pressure in the vacuum chamber of $5 \cdot 10^{-1}$ – $5 \cdot 10^{-3}$ Pa [13].

Since the 1960s, electron beam welding has been used in the production of propulsion systems for space and rocket systems. Its use to obtain integral connections in combination with new strong materials allowed to create engines of a new generation with high operational characteristics. A new promising field of application of electron beam welding is work in outer space [14]. Electron beam welding is widely used in microelectronics technology, as well as in the sealing of metal-glass housings of electronic vacuum devices, for welding refractory, chemically active and heterogeneous materials, and steel products.

Thermodiffusion welding is performed in a vacuum at a rarefaction of 10^{-3} – 10^{-2} Pa with heating of the welding site to 0.4–0.8 of the melting temperature of the materials being welded; when welding dissimilar materials, temperature heating is determined by the temperature of the less refractory material. In this way, it is possible to weld most solid materials - both homogeneous and heterogeneous [15, 16]. When connecting a pair of materials that are difficult to weld, an intermediate gasket is used.

Diffusion welding provides vacuum, heat-resistant and vibration-resistant connections while maintaining high accuracy, shape and geometric dimensions of the product; widely used in welding crystal thermocompensators, cathode legs, deceleration systems and other components and elements of electronic devices.

Thermodiffusion welding installations usually consist of the following main units: a vacuum system for obtaining a vacuum in the chamber where welding takes place, as

well as for raising and lowering the chamber; - the use of technological processes with the use of thermocompression devices (TCP), which allow welding in vacuum furnaces of general industrial purpose.

The principle of operation of TKP is based on the use of the difference in coefficients of thermal linear expansion of the materials of the parts to be welded and the equipment elements to create and transfer force to the parts to be welded. When the device is heated, a compressive force occurs, which is transmitted to the parts to be welded. After welding, the parts together with the device are cooled, the chamber is evacuated, the device is removed with finished products, then the device is disassembled and the welded parts are removed. The developed TKP is used for diffusion connection in a vacuum of products made of magnetic and non-magnetic steels, aluminum, copper, stainless steel, bronze, etc.

The main advantages of diffusion welding: there is no need to use solders, electrodes, fluxes, protective gas environment; there is no warping of the parts and no change in the properties of the metal in the joint area. Diffusion welding can be used to obtain structures of various shapes. You can weld parts not only on a plane, but also on a conical, spherical, curved, complex relief surface, etc.

Soldering in a vacuum is the process of obtaining an integral connection by heating the soldering point and filling the gap between the parts to be joined (made of metal and alloys, glass, ceramics, etc.) with molten solder and its subsequent solidification. When soldering parts from dissimilar materials, to ensure a strong connection, select materials with close values of the coefficient of thermal expansion or use highly plastic solders. Vacuum soldering can be combined with degassing annealing. There are two methods of soldering in a vacuum: soldering with a local heating source by arc discharge and high-temperature soldering.

Technological process of high-temperature soldering of layered structures in vacuum furnaces for their use in modern aircraft [18]. The use of, for example, vacuum soldering for the manufacture of multilayer heat exchangers from aluminum alloys ensures the production of soldered joints that are not inferior in strength and corrosion resistance of the base material, which allows to significantly increase the service life

and operational reliability of the units. The process is carried out in a periodic vacuum furnace, in which simultaneous soldering of (3-5) layer heat exchangers can be performed. Furnace power 200 kW, pressure 10^{-2} - 10^{-3} Pa, maximum working temperature 750 °C.

The arc soldering process combines the advantages of fusion welding and high-temperature soldering with general heating in a vacuum and a controlled atmosphere [17]. The inseparable compounds obtained in this way have increased heat resistance and heat resistance and can be used in the manufacture and repair of gas turbine engine parts from high-strength cast alloys [19].

1.4. Sintering in vacuum

Sintering of metal and ceramic powder materials is one of the most important technological operations used in powder metallurgy. Structural parts of machines and mechanisms are manufactured by the sintering method; filters for cleaning liquids and gases, sealing materials for gas turbines, vacuum and other equipment, contacts, magnets, ferrites for products of the electro-radio industry, etc. [20].

Sintering of hard alloys, solid materials, permanent magnets, refractory metals and tantalum capacitors is mainly carried out in a vacuum.

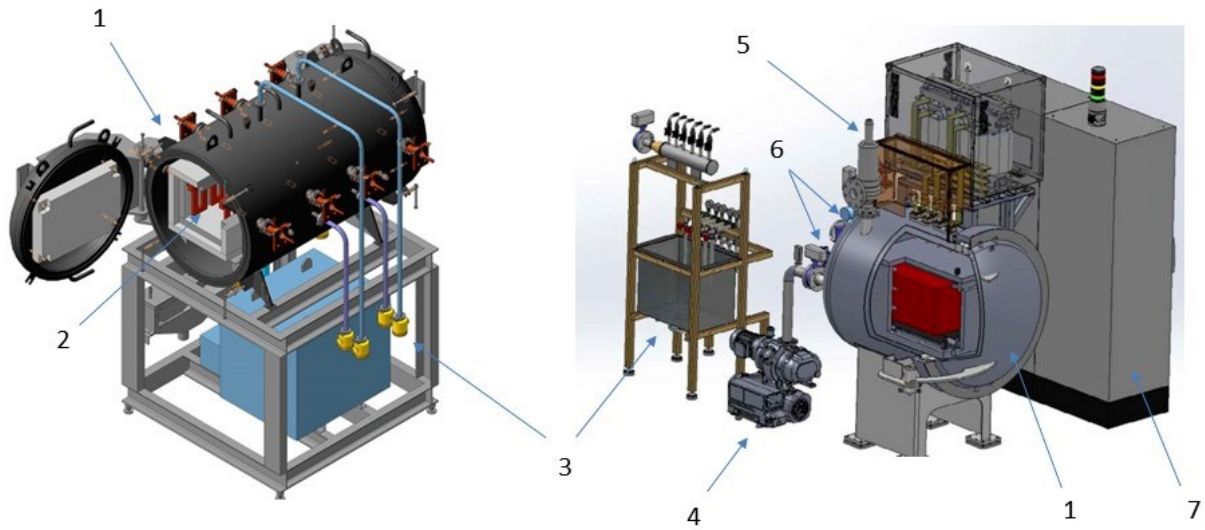
In electronics, porous compact structures formed by vacuum sintering of niobium hydride powder are widely used as metal linings of niobium oxide semiconductor capacitors (OPC). For example, vacuum sintering of finely dispersed niobium hydride powder instead of niobium powder makes it possible to increase the specific capacity of niobium OPKs [21].

The high-temperature sintering of plasma chemical powders based on ZrO_2 is interesting, because such ceramics have high fracture toughness and can be used as structural materials [22]. Achieving a high sintering temperature of 1800 °C made it possible to obtain a high-density material with good mechanical properties.

Along with such vacuum processes as sintering, smelting and others, the process of extracting crystals from the melt is widely used in metallurgy. This process is carried out in vacuum electric furnaces to obtain metals of high purity, for example, copper, nickel, tantalum, gold; NaCl, CaF₂ crystals.

1

Основні вузли вакуумної електричної печі опору (ВЕПО)



- 1. Вакуумна камера; 2. Нагрівальні елементи; 3. Система охолодження;
- 4. Вакуумна система; 5. Газова система;
- 6. Датчики температури та тиску;
- 7. Система управління.

2

Функціональна схема системи регулювання температури ВЕПО

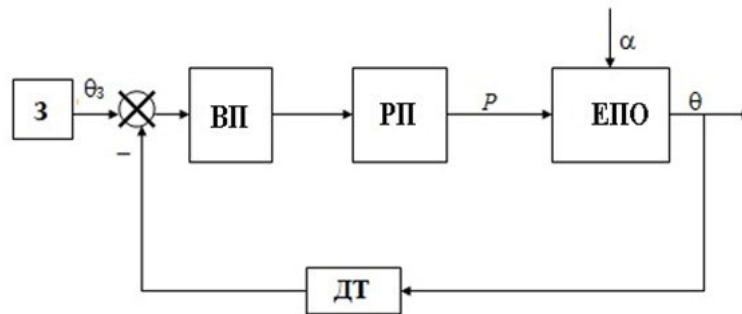
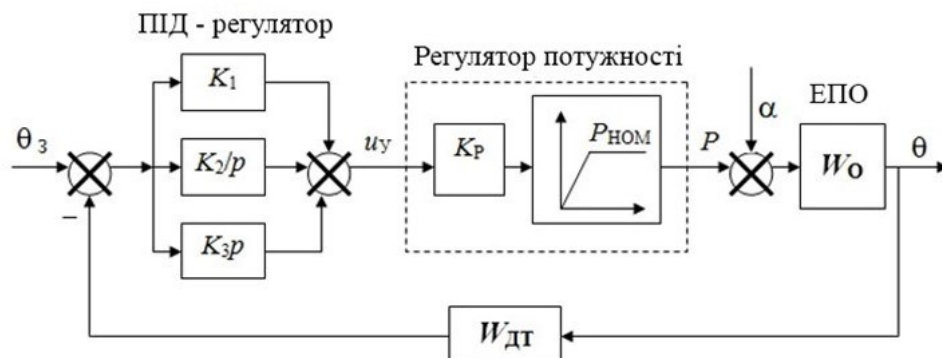
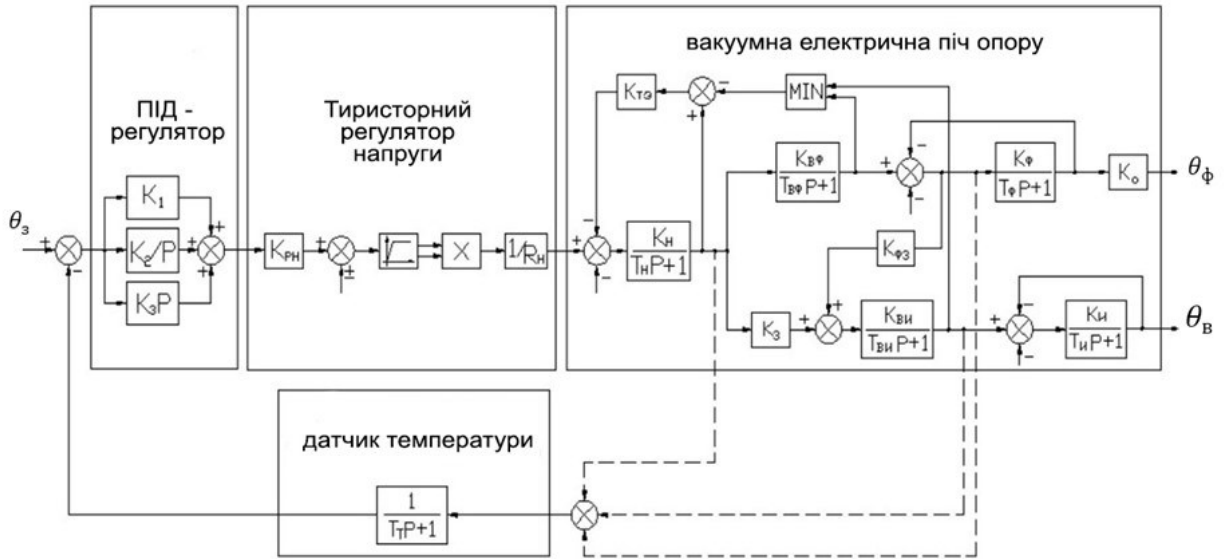


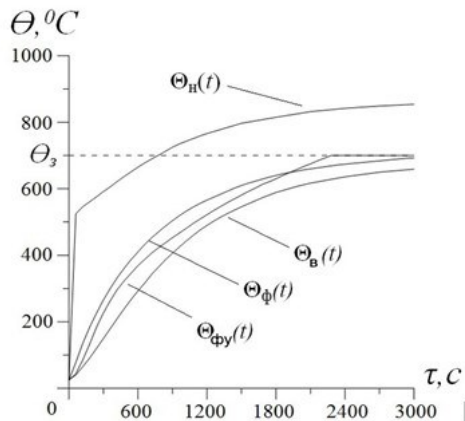
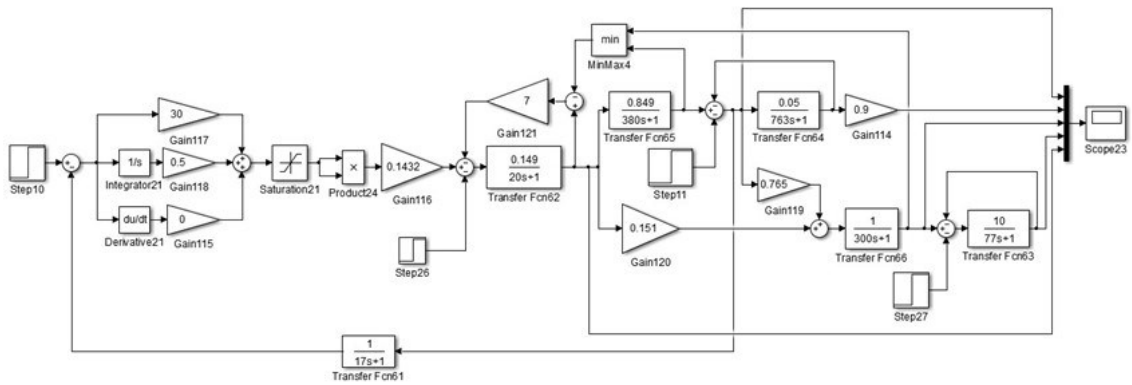
Схема структурна безперервного регулювання температури з ПД-законом регулювання



Структурна схема регулятора температури, що враховує неоднорідність ВЕПО як об'єкта управління та нелінійність характеристик регулюючих елементів

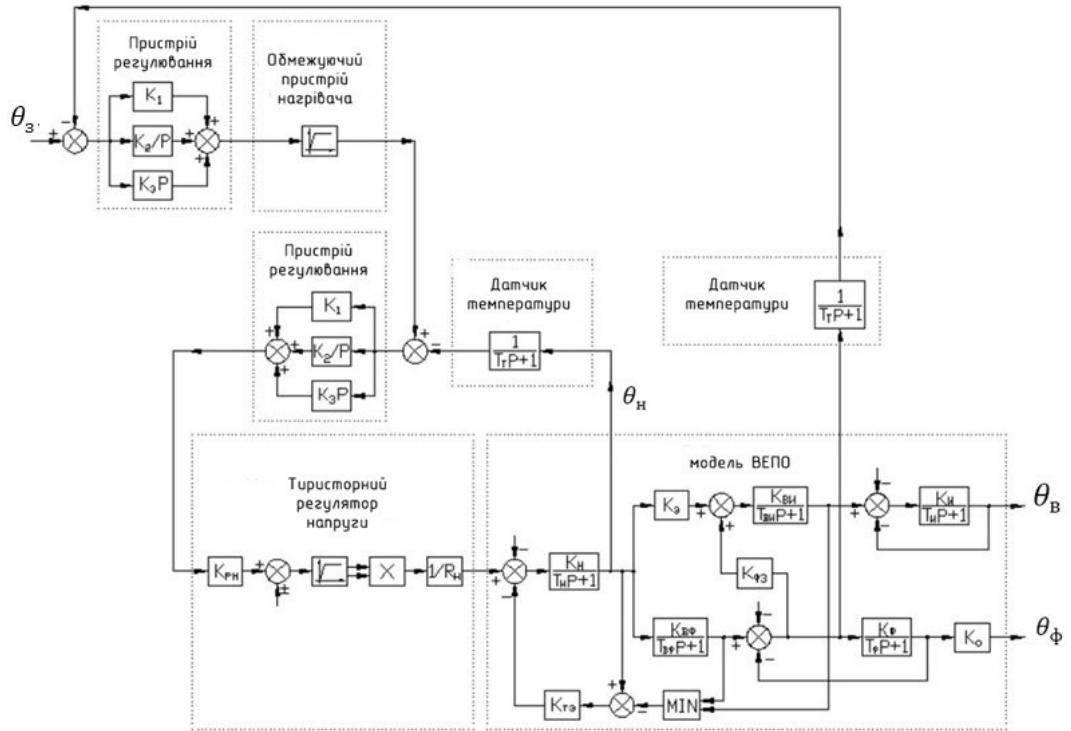


Імітаційна модель регулятора температури ВЕПО

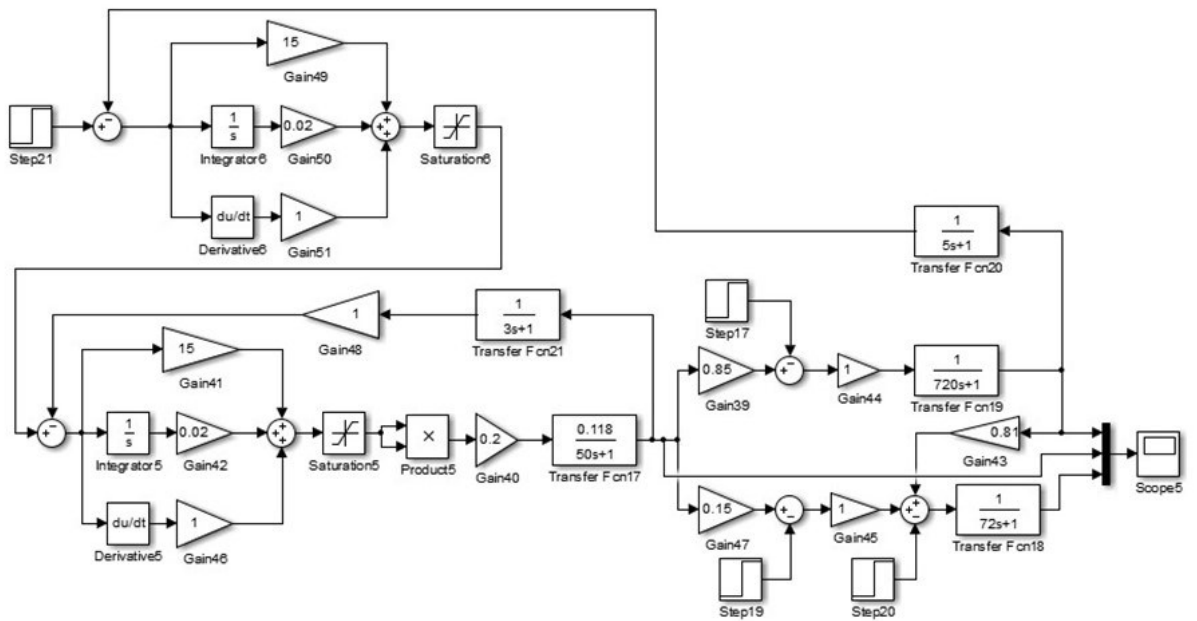


Осцилограми перехідних функцій температур футерування печі $\Theta_\phi(t)$, нагрівачів $\Theta_H(t)$, виробу $\Theta_B(t)$ та заданого значення температури $\Theta_3(t)$ при використанні в якості сигналу зворотного зв'язку температури футерування $\Theta_\phi(t)$.

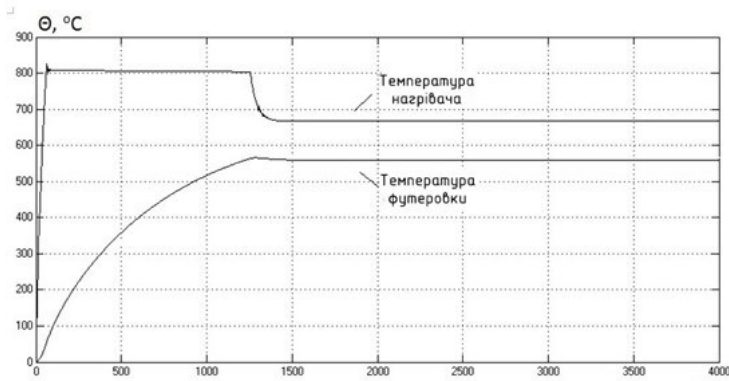
Структурна схема регулятора температури ВЕПО з обмеженням температури нагрівальних елементів



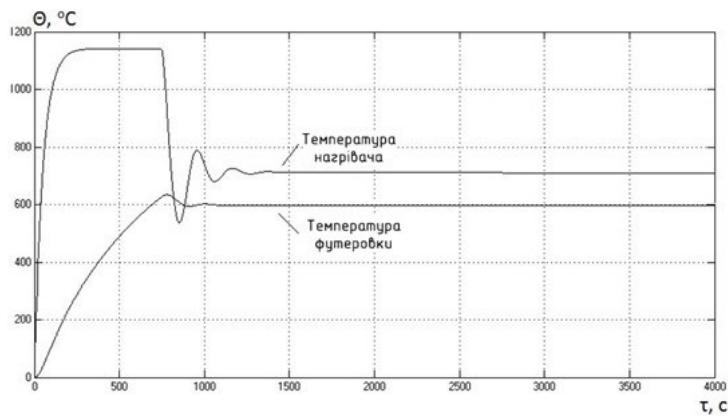
Імітаційна модель регулятора температури ВЕПО з обмеженням температури нагрівальних елементів



Динамічні характеристики температури нагрівача та футерування, отримані на імітаційній моделі

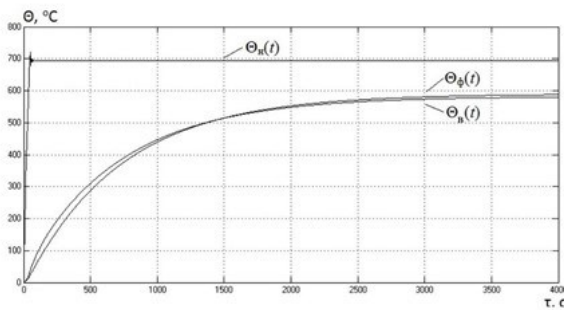


з двома контурами зворотного зв'язку

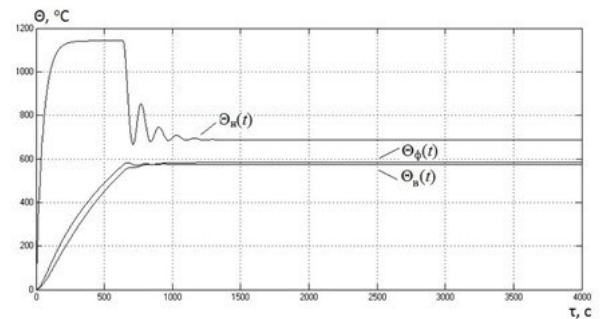


з одним контуром зворотного зв'язку

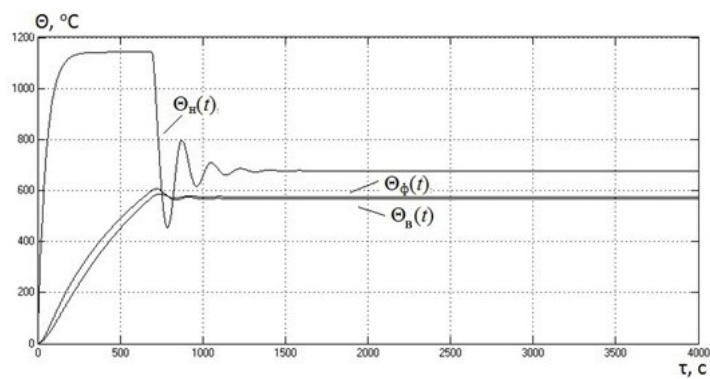
Дослідження впливу місця встановлення датчика температури



Сигнал зворотного зв'язку за температурою нагрівача $\Theta_n(t)$.



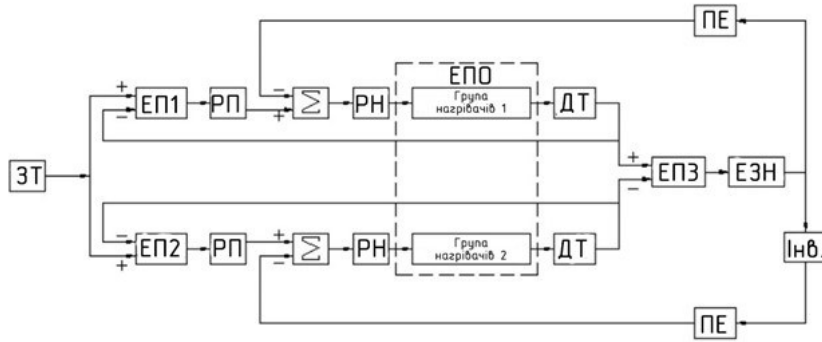
Сигнал зворотного зв'язку за температурою виробу $\Theta_b(t)$.



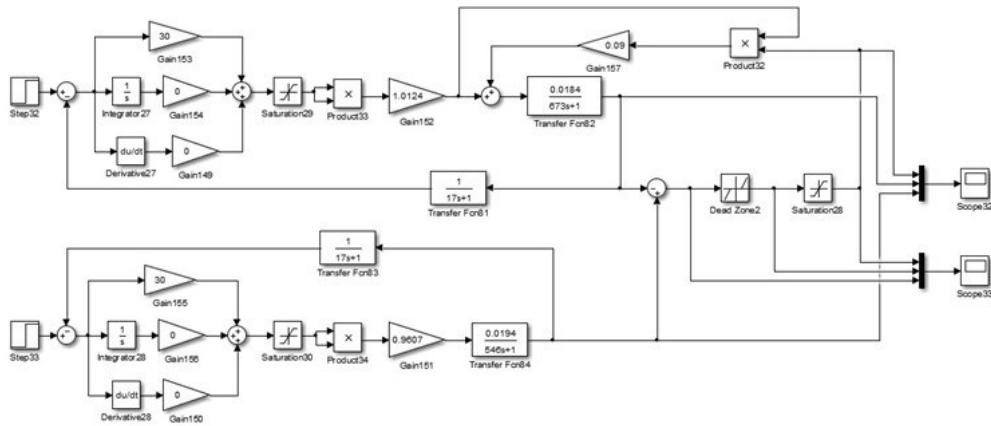
Сигнал зворотного зв'язку за температурою футерування $\Theta_f(t)$.

Функціональна схема регулятора температури ЕПО із компенсацією потужності в теплових зонах

9



Імітаційна модель регулятора температури ВЕПО

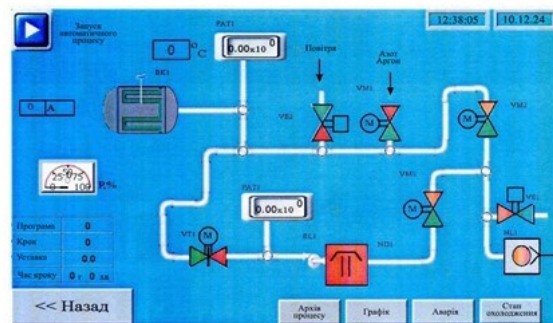


10

Панель оператора



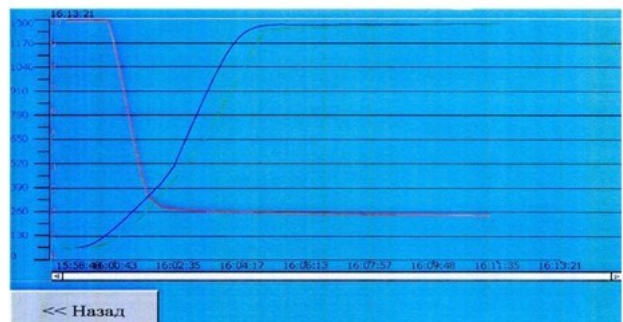
Головний екран



Екран роботи в автоматичному режимі



Екран налаштування програми технолога



Екран перегляду графіків поточної температури та вакууму

98

Фото з об'єкту автоматизації

