

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ**

Факультет автоматизації і інформаційних технологій
Кафедра автоматизації технологічних процесів
(назва кафедри)

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО АТЕСТАЦІЙНОЇ ВИПУСКНОЇ РОБОТИ
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА**

на тему: Ідентифікація динамічних параметрів електропечі в режимі
релейного автоматичного регулювання температури з метою апгрейду
регулятора

Стовбун Михайло Юрійович
(прізвище, ім'я та по батькові студента повністю)

Київ 2024 р.

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ**

Факультет автоматизації і інформаційних технологій

Кафедра автоматизації технологічних процесів

(назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Запривода А.В.

„___” _____ 20__ року

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО АТЕСТАЦІЙНОЇ ВИПУСКНОЇ РОБОТИ
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА**

на тему: Ідентифікація динамічних параметрів електропечі в режимі
релейного автоматичного регулювання температури з метою апгрейду
регулятора

(назва)

Виконав студент групи АКІТ-2М

174 – Автоматизація та комп'ютерно-

інтегровані технології

(спеціальність)

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(спеціалізація)

Стовбун Михайло Юрійович

(прізвище, ім'я та по батькові повністю)

Керівники

Іносов С.В.

(прізвище та ініціали)

Доцент, к.т.н.

(вчене звання, науковий ступінь)

Київ 2024 р.

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ**

Факультет: автоматизації і інформаційних технологій

Кафедра: Автоматизації технологічних процесів

Освітній рівень: магістр за ОПП

Спеціальність: 174 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Спеціалізація: Автоматизоване управління технологічними процесами

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о декана факультету

Герентьєв О.О.

„___” _____ 20__ року

**З А В Д А Н Н Я
ДО ВИКОНАННЯ АТЕСТАЦІЙНОЇ ВИПУСКНОЇ РОБОТИ
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА**

Стовбун Михайло Юрійович

(прізвище, ім'я та по батькові студента)

1. Тема роботи: Ідентифікація динамічних параметрів електропечі в режимі релейного автоматичного регулювання температури з метою апгрейду регулятора

затверджена наказом ректора КНУБА № 923/2 від «24» червня 2024 року

2. Керівник роботи

Іносов Сергій Вікторович

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

3. Строк подання студентом роботи до захисту 01.11.2024 р.

4. Зміст пояснювальної записки за розділами:

Р.1. Технічні умови та завдання на проектування

Р.2. Огляд основних напрямлень технічних рішень

Р.3. Розробка структурної та функціональної схеми

Р.4. Розробка принципової електричної схеми

Р.5. Конструкторська частина

Р.6. Економічна частина

5. Календарний план виконання роботи: а) наукова частина;
б) практична частина.

Види робіт та їх зміст	Дата виконання
Розділ 1. Технічні умови та завдання на проектування	25.10.2024
Розділ 2. Огляд основних напрямлень технічних рішень	29.10.2024
Розділ 3. Розробка структурної та функціональної	05.11.2024
Розділ 4. Розробка принципової електричної схеми	05.11.2024
Розділ 5. Конструкторська частина	07.11.2024
Розділ 6. Економічна частина	07.11.2024
Остаточне оформлення роботи	08.11.2024
Направлення роботи на рецензування, перевірку на плагіат	08.11.2024
Попередній захист роботи на кафедрі	08.11.2024

6. Консультанти розділів атестаційної випускної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Перевірів	
		дата	підпис
Розділ 1.	Технічні умови та завдання на проектування	Іносов С.В.	
Розділ 2.	Огляд основних напрямлень технічних рішень	Іносов С.В.	
Розділ 3.	Розробка структурної та функціональної схеми	Іносов С.В.	
Розділ 4.	Розробка принципової електричної схеми	Іносов С.В.	
Розділ 5	Конструкторська частина	Іносов С.В.	
Розділ 6.	Економічна частина	Шевчук К.І.	

7. Дата видачі завдання 01.09.2024 р.

Зав. кафедри

(підпис)

(прізвище та
ініціали)

Керівник

(підпис)

(прізвище та
ініціали)

Студент

(підпис)

(прізвище та
ініціали)

Київський національний університет будівництва і архітектури /
Kyiv National University of Construction and Architecture

РЕЗЮМЕ / RESUME

Стовбун Михайло Юрійович / Mykhailo Stovbun.
факультет автоматизації і інформаційних технологій /
faculty of automation and information technologies,
група АКІТ-2м / group of ACIT-2m.

Тема атестаційної випускної роботи: / Theme of attestation final work:

«Модернізація системи автоматичного регулювання температури
електропечі» /

«Modernization of the automatic temperature control system of an electric
furnace».

Освітній рівень: «магістр» / Educational level: master's degree.

Спеціальність: 174. «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології» /

Specialty: 174.«Automation and computer-integrated technologies»,

Спеціалізація: «Автоматизація технологічних процесів» /

Specialization: «Automation of technological processes».

Науковий керівник: Іносов Сергій Вікторович, к.т.н., доцент

Scientific leader: Inosov Serhii V., candidate of engineering sciences,

Обсяг роботи. Атестаційна випускна робота магістра складається: розділів – 6, стор. – 99, табл. – 16, рис. – 25, слайдів – 21. Включає завдання, вступ, висновки, список використаних джерел.

Актуальність теми. З огляду на постійне вдосконалення виробничих процесів, модернізація систем автоматичного регулювання в теплових технологіях є важливою складовою підвищення ефективності промислового обладнання. ПД-регулятори є стандартом у керуванні температурними процесами, однак точність їх налаштувань та ефективність функціонування вимагають регулярної оптимізації та адаптації до нових умов роботи. Впровадження сучасних методів автоматизації, таких як оптимізовані алгоритми регулювання та використання твердотільних напівпровідникових регуляторів, дозволяє значно покращити якість процесів нагріву в промислових електропечах.

У вступі розглянуто сучасні вимоги до автоматизації теплових процесів, а також проблематику використання застарілих регулюючих систем у промислових печах.

Перший розділ присвячено аналізу конструкції електропечі СНЗ-6.12.4/10-І2, де визначено основні недоліки в роботі системи регулювання та можливості її модернізації.

У другому розділі детально описано пропозиції щодо впровадження ПД-регулятора, а також описано вплив цього регулятора на підвищення стабільності та точності регулювання температури.

Третій розділ присвячено розробці структурної та функціональної схеми системи управління електропеччю після модернізації.

У четвертому розділі розглянуто принципову електричну схему регулювання, вибір елементної бази та проведено розрахунок параметрів надійності.

П'ятий розділ охоплює конструкторський аспект, зокрема вибір обладнання для модернізованої системи та розробку відповідної електричної схеми.

У шостому розділі подано економічний аналіз, зокрема розрахунок вартості капітальних вкладень та оцінка економічної ефективності модернізації.

У висновках підкреслено, що впровадження ПІД-регулятора та використання сучасних елементів управління дозволяють суттєво покращити точність регулювання температури та зменшити енергоспоживання. Це, в свою чергу, підвищує продуктивність процесу та надійність системи. Модернізація електропечі значно подовжує термін служби обладнання та знижує експлуатаційні витрати.

Ключові слова: автоматизація, ПІД-регулятор, система регулювання, електропеч, модернізація, ефективність.

Keywords: automation, PID controller, control system, electric furnace, modernization, efficiency.

ЗМІСТ

ВСТУП	11
РОЗДІЛ 1	13
1.1. ОПИС ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ	13
1.2. ОПИС ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ	15
1.3. ЗАВДАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ, ЦІЛІ І СПОСОБИ ЇЇ АПГРЕЙДА	20
РОЗДІЛ 2	22
2.1. VISSIM - ПРОГРАМНИЙ ЗАСІБ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ	22
2.2. ІМІТАЦІЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ НА МОДЕЛІ	28
2.3. УНІВЕРСАЛЬНА МОДЕЛЬ ТЕПЛОВОГО ОБ'ЄКТА РЕГУЛЮВАННЯ	32
РОЗДІЛ 3	38
3.1. ІДЕНТИФІКАЦІЯ ДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ОБ'ЄКТА РЕГУЛЮВАННЯ	38
3.2. ПРОБЛЕМА, ЩО ВИНΙΚАЄ ПРИ РІШЕННІ ОПТИМІЗАЦІЙНОГО ЗАВДАННЯ	42
3.3. СТРУКТУРНА СХЕМА САР ТЕМПЕРАТУРИ З ПІД-РЕГУЛЯТОРОМ	48
РОЗДІЛ 4	49
4.1. РОЗРАХУНОК ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ НАСТРОЮВАННЯ ПІД-РЕГУЛЯТОРА	49
4.2. МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ САР ТЕМПЕРАТУРИ З ПІД-РЕГУЛЯТОРОМ	50
4.3. ПРОГРАМНИЙ ОДНОКАНАЛЬНИЙ ПІД-РЕГУЛЯТОР ТРМ-251	58
РОЗДІЛ 5	63
5.1. ДАТЧИК ТЕМПЕРАТУРИ	63
5.2. ТРИФАЗНИЙ ТИРИСТОРНИЙ РЕГУЛЯТОР НАПРУГИ ЗМІННОГО СТРУМУ LSA – ТНЗР90У	65
РОЗДІЛ 6	70
6.1. ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ	70

	10
6.2 РОЗРАХУНОК ВАРТОСТІ КОНСТРУКТОРСЬКИХ РОБІТ	70
6.3. РОЗРАХУНОК СОБІВАРТОСТІ МОНТАЖНО- НАЛАГОДЖУВАЛЬНИХ РОБІТ	72
6.4. КОШТОРИС ДОДАТКОВИХ КАПІТАЛЬНИХ ВКЛАДЕНЬ	73
6.5 ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ	75
6.6 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ	77
ВИСНОВКИ.....	78
Список використаної літератури	79
ДОДАТОК 1	80

ВСТУП

Переважає більшість систем автоматичного регулювання використовують у теплових технологічних процесах. Основним завданням автоматики є автоматична підтримка заданої температури за рахунок керування нагріванням. Як правило, використовується принцип регулювання відхилення від завдання, з контуром негативного зворотного зв'язку. Якість регулювання оцінюється за динамічними критеріями. Основним є час регулювання, яке слід мінімізувати за рахунок правильного вибору алгоритму регулювання та налаштування його параметрів.

У всіх регулюючих мікроконтролерах у переважній більшості випадків використовується лише один єдиний алгоритм регулювання. Це, так званий, ПІД-регулятор (пропорційно - інтегрально-диференціальний). Він став де-факто єдиним стандартним промисловим алгоритмом регулювання, який застосовується для регулювання будь-яких технологічних процесів, насамперед теплових.

Виникає парадоксальна ситуація. У світі інформатики, де всі алгоритми та програми старіють та оновлюються виключно швидко, існує оазис стабільності та консерватизму. За останні сто років змінилися десятки поколінь елементної бази, але кількість алгоритмів регулювання, що використовуються, не тільки не зросла, але зменшилася фактично до одного - ПІД-алгоритму. Регулятори реалізовувалися як механічні, гідравлічні, пневматичні, електромеханічні, на електронних лампах, транзисторах, на інтегральних мікросхемах, на операційних підсилювачах, нарешті, програмно. Але простий ПІД-алгоритм не піддався удосконаленню, хоча без найменших витрат можна було б програмно реалізувати у тисячу разів складніший алгоритм. Виникає питання чому?

Справа в тому, що ПІД-алгоритм регулювання близький до теоретично досяжного ідеалу для регулювання теплових технологічних процесів.

Теплові процеси мають такі, суттєві на вибір регулятора, особливості.

1) Всі теплові об'єкти регулювання аперіодичні (тобто не коливальні). Перехідна функція таких об'єктів (реакція на стрибок впливу, що управляє) монотонно зростає і не містить коливань.

2) Теплові об'єкти мають запізнення, воно відносно мало в загальній інерційності об'єкта і не переважає. Тим не менш, наявність запізнення є вирішальним фактором, що обмежує досяжну якість регулювання.

3) Рівень зашумленості теплових об'єктів дуже малий. Теплова інерційність згладжує коливання регульованої величини. Точність виміру регульованої величини (як правило, це температура) відносно висока. Це дозволяє використовувати форсування перехідних процесів на високих частотах, побічним результатом якого є посилення шумів.

Саме таких об'єктів регулювання ПІД-алгоритм немає конкурентів [6].

РОЗДІЛ 1

1.1. ОПИС ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ

Термічною обробкою металів називаються процеси, сутність яких полягає у нагріванні та охолодженні виробів за певними режимами, внаслідок чого відбуваються зміни структури, фазового складу, механічних та фізичних властивостей матеріалу, без зміни хімічного складу. Тривалість нагріву та час витримки визначаються масою деталі, швидкістю нагріву в даному нагрівальному агрегаті та часом, необхідним для протікання та завершення структурних перетворень. Температура нагрівання та швидкість охолодження визначаються складом сталі та обраним процесом термічної обробки.

У термічному цеху здійснюються такі види термічної обробки металу:

1. загартування
2. відпустка (висока та низька)
3. цементація
4. відпал

Загартування вуглецевої сталі полягає в нагріванні її вище температур фазових перетворень (до 500 - 800 град.), Витримці для завершення всіх перетворень і охолодженні з високою швидкістю з метою збереження при кімнатній температурі нерівноважних структур, що забезпечують вищу міцність і твердість сталі. Швидкість охолодження є вирішальним чинником, визначальним характер структури, що утворюється, а, отже, і властивості сталі. Швидкість охолодження визначається видом та температурою охолоджуючого середовища. Для вуглецевих сталей, що мають високу критичну швидкість охолодження, застосовують воду та різні водні розчини.

Для легованих сталей, що мають невелику критичну швидкість охолодження, - олія та повітря.

Відпустка-це теплова операція, яка включає нагрівання загартованого сплаву нижче температури конверсії для отримання більш стабільного структурного стану сплаву. Відпустка зазвичай є заключною операцією термічної обробки, що складається з нагрівання нижче критичної точки та подальшого охолодження, яке формує остаточну структуру сталі.

Низькотемпературну відпустку проводять з нагріванням до 150-250°C. При цьому внутрішні напруження знижуються, підвищується міцність та покращується в'язкість без помітного зниження твердості. Тривалість відпустки зазвичай становить 1,0-2,5 години

Середньотемпературна (середня) відпустка здійснюється при температурі 350-500 градусів і застосовується в основному для пружин та штампів.

Високотемпературну (високу) відпустку проводять при температурі 500-680 °C. Висока відпустка створює найкраще співвідношення міцності та в'язкості сталі.

Цементация найчастіше використовують для одержання сталевого виробу з твердою поверхнею та м'якою серцевиною. При цементации виріб із низьковуглецевої сталі насичується з поверхні на невелику глибину (0,5-2 мм) вуглецем. Насичення ведеться у вуглецевмісному середовищі - карбюризаторі. При твердій цементации карбюризатор є суміш гранульованого деревного вугілля з солями. Цементация в рідкофазному карбюризаторі (розплавлені солі чи пасти) застосовується для дрібних деталей. При газовій цементации карбюризатором є газове середовище з вуглецевими газами (СН₄, ЗІ та ін.). Температура до 1000°C.

Відпал – це процес термічної обробки, що полягає у нагріванні сталі до певної температури, витримці при ній та подальшому повільному охолодженні з метою отримання більш рівноважної структури. Особливістю відпалу є саме повільне охолодження.

1.2. ОПИС ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

Обладнання, що використовується в теплових цехах, можна розділити на основне - це теплове обладнання, яке використовується безпосередньо для обробки металу (наприклад, загартовані баки, різні типи печей тощо), а також допоміжні (рихтувальні преси, пральні машини).

Як приклад розглянемо електропід опору камерну для відпалу деталей з волокнистими футеровочними матеріалами СНЗ-6.12.4/10-І2, її характеристики наведені в таблиці 1.

Таблиця 1. Параметри електропечі СНЗ-6.12.4/10-І2

Потужність встановлена, кВт	57,5
Розміри робочого простору, мм: ширина × довжина × висота	600 × 1200 × 400
Номінальна температура, °С	1000
Витрата контрольованої атмосфери, м ³ /год	до 8
Напруга мережі живлення, В	380
Частота мережі живлення, Гц	50
Число фаз нагрівача	3

Габаритні розміри печі, мм: ширина × довжина × висота	1560×2380×2040
Штатний алгоритм регулювання температури (до модернізації)	Релейний двопозиційний

На рисунку 1. представлений зовнішній вигляд електропечі СНЗ-6.12.4/10-І2



Рис. 1. Зовнішній вигляд електропечі СНЗ-6.12.4/10-І2

Принцип роботи печі опору базується на використанні тепла, що виділяється шляхом проходження струму через ряд електронагрівачів, що

працюють на основі активного опору. Електричні печі подібного типу, дуже часто використовуються при термічній обробці. До переваг печей опору можна віднести рівномірність нагрівання виробів. Досягти цього вдається завдяки вдало розміщеним нагрівачам, які розташовані по різних сторонах робочої камери, гарантуючи рівномірне і швидке нагрівання.

На рисунку 2. представлена схема електрична важлива печі опору до модернізації алгоритму регулювання.

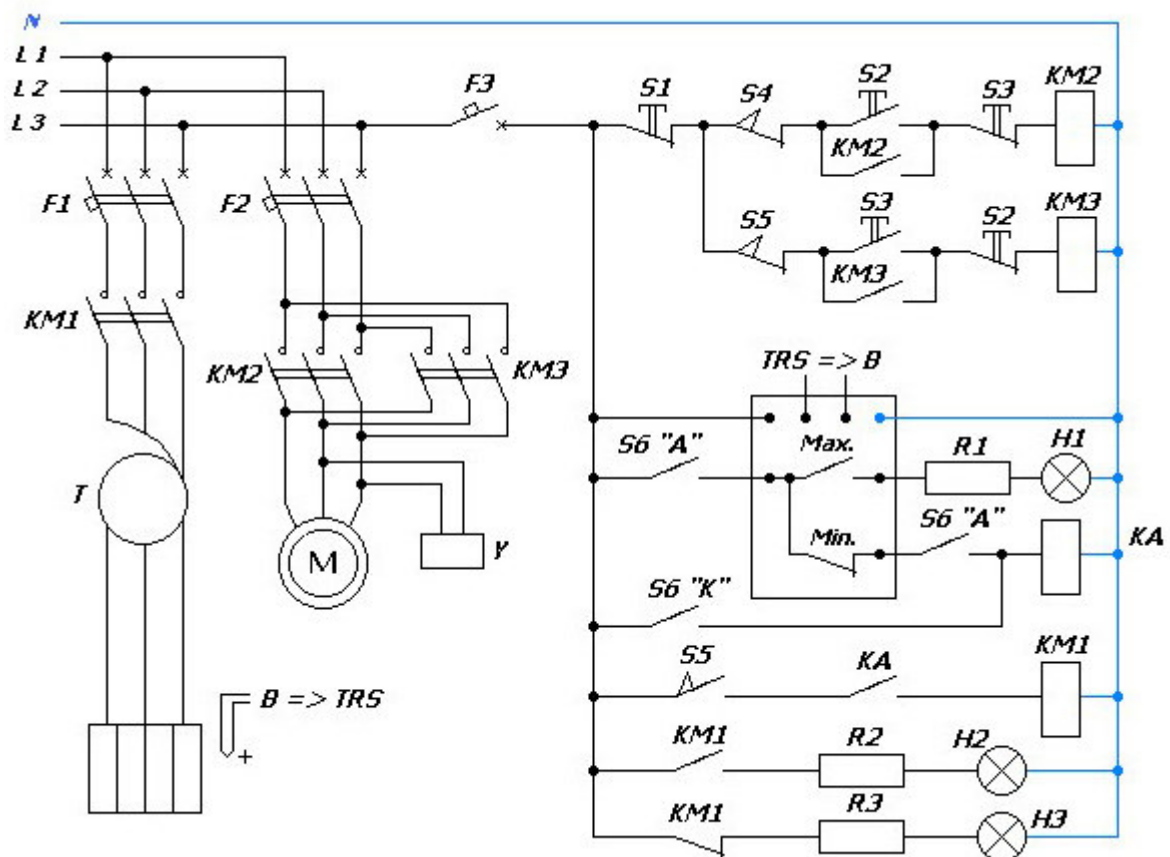


Рис. 2. Схема електрична важлива печі опору до модернізації алгоритму регулювання.

Опис електричних елементів

1. Автовимикач нагрівання (F1), електропривод дверцят (F2) та ланцюгів управління технікою (F3);
2. Проміжне реле контактора нагрівальних елементів (KA);

3. Контактор елементів нагрівання (KM1);
4. Пічний автотрансформатор (Т);
5. Термодатчик (В);
6. Електромагнітне гальмо (У);
7. Кнопка стоп (S1), рухи пічних дверей вгору (S2), рухи пічних дверей вниз (S3), вимикачі (S4) та (S5), перемикач роботи печі (S6);
8. Двигун приводу пічних дверей (М);
9. Терморегулятор релейний двопозиційний (TRS);
10. Сигнальна лампа перевищення допустимої температури (Н1), включення (Н2) та вимикання нагрівача (Н3).
11. Додаткові резистори сигнальних ламп R1, R2 та R3.

Автоматичне регулювання температури здійснюється двопозиційним релейним регулятором TRS. Як датчик температури використовується термопара В. Як регулюючий орган використовується електромеханічний контактор KM1, який включає (вимикає) нагрівання, якщо температура менше (більше) заданої.

На рис. 3. показаний зовнішній вигляд щита управління до модернізації алгоритму регулювання.



Рис. 3. Зовнішній вигляд щита керування до модернізації

Послідовність дій при виконанні техпроцесу із загартування деталі:

1. Включити піч і нагріти її до потрібної температури для цієї партії деталей.
3. Завантажити тару з деталями для загартування в піч за допомогою дека.
4. Закрити двері печі.
5. Кожні 10 хвилин перевіряти показники температури з необхідними значеннями.

6. Після завершення циклу охолодити деталь на повітрі або в гартовому баку.

7. Промити у гарячій воді.

1.3. ЗАВДАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ, ЦІЛІ І СПОСОБИ ЇЇ АПГРЕЙДА

Завдання системи автоматичного регулювання (САР) температури електропечі:

- САР повинна підтримувати (або змінювати за заданим графіком) температуру робочого простору печі відповідно до техпроцесу.

Штатний релейний двопозиційний регулятор електропечі СНЗ-6.12.4/10 має такі недоліки:

- САР генерує автоколивання температури.
- Велика динамічна похибка регулювання (десятки градусів)
- Періодичні включення (вимикання) нагріву викликають кидки споживаної електричної потужності до 80 кВт.

Цілі апгрейду (модернізації) системи керування піччю опору СНЗ-6.12.4/10 наступні:

- зменшення похибки регулювання температури печі до діапазону $\pm 5^{\circ}\text{C}$;
- покращення ергономіки праці операторів техпроцесу.
- виключення різких стрибків споживаної від мережі електричної потужності.

Пропонований спосіб досягнення мети:

- Пропонується замінити релейний двопозиційний регулятор на регулятор з пропорційно-інтегрально-диференціюючим (ПІД) алгоритмом регулювання. Доведено, що ПІД алгоритм регулювання температури близький до ідеального і не може бути покращений [6].
- Пропонується замінити дискретний двопозиційний регулюючий орган (електромеханічний комутатор) регулюючий орган безперервної дії (твердотільний напівпровідниковий регулятор напруги).

Проблема, що виникає на шляху до мети.

ПІД-регулятор має три параметри, що настраюються:

- Коефіцієнт пропорційності, K_p ;
- Постійна інтеграція часу, T_i ;
- Постійна інтеграція часу, T_d ;

Цим параметрам потрібно надати чисельні значення, оптимальні для даного об'єкта регулювання. Це називається "налаштування регулятора". Якщо налаштування не виконати, то ПІД-регулятор втрачає свої переваги, аж до втрати стійкості системи.

Для розрахунку оптимальних значень параметрів налаштування необхідно знати динамічні параметри об'єкта регулювання. Виявлення динамічних властивостей об'єкта за результатами спеціально спланованого експерименту називається ідентифікація об'єкта. Ідентифікація об'єкта вважається досить складним і трудомістким завданням, як з погляду постановки експерименту, і з алгоритмічної погляду. Постановка спеціальних експериментів на обладнанні, що діє, як правило, неприпустима або небезпечна. Обробка результатів експерименту зазвичай виконується з досить складних і проблемних алгоритмів автоматичної оптимізації.

Пропонується виконати ідентифікацію динамічних параметрів електропечі на основі реєстрації її звичайного автоколивального режиму роботи під управлінням штатного двопозиційного регулятора, що не вимагатиме проведення спеціально спланованих експериментів.

РОЗДІЛ 2

2.1. VISSIM - ПРОГРАМНИЙ ЗАСІБ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ

VisSim, скорочено від Visual Simulation - це дуже складний, але зручний програмний пакет, спеціально розроблений для моделювання, імітації та аналізу динамічних систем. Завдяки своїй універсальності та візуальному підходу до проектування та моделювання систем, VisSim широко використовується в різних галузях інженерії, включаючи механічну, електричну, аерокосмічну та інженерію систем управління.

Основні можливості VisSim

VisSim поєднує в собі потужність математичного моделювання з інтуїтивно зрозумілим графічним інтерфейсом користувача (GUI), що дозволяє інженерам, дослідникам і студентам створювати динамічні моделі систем за допомогою блок-схем. Деякі з визначальних особливостей VisSim включають

- Моделювання на основі блок-схем: VisSim використовує візуальний підхід до проектування систем на основі блок-схем, де окремі компоненти системи представлені у вигляді блоків. Користувачі можуть з'єднувати ці блоки для формування більших моделей системи, що робить процес моделювання складних систем набагато простішим та інтуїтивно зрозумілішим.

- Моделювання в реальному часі: Однією з найважливіших переваг VisSim є можливість моделювання в реальному часі. Це означає, що користувачі можуть спостерігати за поведінкою системи в часі, отримуючи цінну інформацію про динаміку системи і стратегії управління. Ця функція особливо корисна при проектуванні систем керування, де зворотній зв'язок у реальному часі є важливим для точного налаштування продуктивності.

- Підтримка як лінійних, так і нелінійних систем: VisSim здатний моделювати як лінійні, так і нелінійні динамічні системи. Ця гнучкість має вирішальне значення при вирішенні реальних інженерних задач, де часто присутні нелінійності, такі як механічне тертя, електричне насичення або аеродинамічний опір.

- Широкі математичні та керуючі бібліотеки: VisSim містить велику бібліотеку попередньо визначених блоків, починаючи від простих арифметичних операцій і закінчуючи більш складними системами керування та математичними функціями. Ці бібліотеки охоплюють різні області, включаючи системи керування (ПД-регулятори, моделі простору станів), обробку сигналів та механічне моделювання.

- Збір даних та інтеграція з обладнанням: VisSim легко інтегрується з зовнішнім обладнанням, що дозволяє виконувати збір даних і керування в режимі реального часу. Інженери можуть використовувати VisSim для взаємодії з мікроконтролерами, датчиками, виконавчими механізмами та іншими апаратними компонентами, що робить його чудовим інструментом для розробки вбудованих систем і проведення апаратного моделювання (HIL).

- Моделювання диференціальних рівнянь: VisSim дозволяє користувачам визначати та моделювати звичайні диференціальні рівняння (ODE) та рівняння в частинних похідних (PDE). Ця функція особливо корисна для

систем, які можна описати диференціальними рівняннями, таких як електричні кола, механічні коливальні системи та теплові процеси.

Застосування VisSim в інженерії

1. Інжиніринг систем керування.

VisSim широко визнаний за свій внесок у проектування систем керування. Завдяки можливостям моделювання в реальному часі та комплексній бібліотеці керування, інженери можуть використовувати VisSim для проектування, тестування та оптимізації алгоритмів керування, перш ніж впроваджувати їх у реальні системи. Деякі з ключових методів керування, що підтримуються VisSim, включають

- ПД-регулювання: ПД-регулятор є однією з найпоширеніших стратегій керування в інженерії. VisSim надає простий спосіб проектування та моделювання ПД-регуляторів для регулювання вихідних сигналів системи, підтримання стабільності та покращення продуктивності.

- Управління в просторі станів: VisSim підтримує моделі простору станів, дозволяючи користувачам представляти системи в термінах змінних стану і входів. Це особливо корисно для багатозмінних систем і складних стратегій керування.

- Цифрові та дискретні системи керування: VisSim також підтримує цифрові системи керування, які набувають все більшого значення в сучасних програмах керування. Інженери можуть моделювати системи дискретного керування, налаштовувати цифрові контролери та перевіряти поведінку системи перед впровадженням.

2. Моделювання механічних систем:

У машинобудуванні VisSim можна використовувати для моделювання таких систем, як системи маса-пружина-демпфер, робототехніка та динаміка

багатьох тіл. Визначаючи компоненти системи за допомогою блок-схем і моделюючи динаміку в часі, інженери можуть зрозуміти, як механічні системи реагують на різні входні дані і стратегії управління. Крім того, здатність VisSim працювати з нелінійностями робить його особливо ефективним для моделювання реальних механічних систем, які демонструють неідеальну поведінку, наприклад, тертя або складний рух.

3. Моделювання електричних систем:

VisSim добре підходить для моделювання та імітації електричних ланцюгів і систем, таких як RLC-схеми, силова електроніка та системи керування двигунами і генераторами. Інженери можуть моделювати ці системи, визначаючи елементи схеми як блоки і з'єднуючи їх для імітації загальної поведінки системи. Наприклад, в силовій електроніці VisSim можна використовувати для проектування і тестування алгоритмів керування перетворювачами, інверторами і моторними приводами.

4. Обробка сигналів:

Бібліотека обробки сигналів VisSim дозволяє інженерам моделювати та імітувати системи, які обробляють та аналізують сигнали. Сюди входять додатки в галузі зв'язку, радіолокації, обробки звуку та зображень. Інженери можуть створювати фільтри, підсилювачі та модулятори, використовуючи інтерфейс блок-схем VisSim, а потім моделювати потік сигналу через систему для оптимізації продуктивності та точності.

5. Аерокосмічна інженерія:

Аерокосмічні інженери використовують VisSim для моделювання динаміки польоту, систем керування літаками і космічними апаратами та аеродинамічних симуляцій. Наприклад, інженер може імітувати управління безпілотним літальним апаратом (БПЛА), моделюючи динаміку польоту і

розробляючи закони управління, які забезпечують стабільний політ. Здатність VisSim працювати з багатодоменими системами особливо цінна в аерокосмічній інженерії, де електричні, механічні системи та системи управління повинні працювати разом безперебійно.

VisSim у порівнянні з традиційними інструментами моделювання

VisSim має кілька переваг над традиційними інструментами моделювання на основі програмування, такими як MATLAB/Simulink:

Простота використання: Графічний інтерфейс VisSim значно скорочує час навчання для початківців і непрограмістів. Користувачі можуть швидко створювати та моделювати системи, з'єднуючи блоки візуально, що часто є швидшим та інтуїтивно зрозумілішим, ніж написання коду.

Швидкість моделювання: VisSim відомий своїм швидким механізмом моделювання, який дозволяє користувачам запускати складні симуляції в режимі реального часу. Це особливо корисно для таких додатків, як проектування систем управління, де швидкі ітерації та зворотній зв'язок є важливими.

Економічна ефективність: У порівнянні з іншими інструментами моделювання, VisSim є більш економічно ефективним, що робить його доступним для студентів, невеликих інженерних команд і навчальних закладів.

Підтримка реального часу та вбудованих систем: Хоча такі інструменти, як MATLAB/Simulink, також пропонують моделювання в реальному часі, VisSim перевершує їх в інтеграції з апаратним забезпеченням в реальному часі, забезпечуючи безперебійну підтримку додатків для збору даних і управління. Можливість взаємодії з мікроконтролерами, датчиками і

виконавчими механізмами робить VisSim потужним інструментом для проектування і тестування вбудованих систем.

Переваги використання VisSim

Інтерактивне моделювання: VisSim пропонує високоінтерактивне моделювання, що дозволяє користувачам вносити корективи до параметрів в реальному часі і негайно спостерігати за ефектами. Така інтерактивність значно покращує етапи проектування і тестування при розробці системи.

Міждоменні можливості: Завдяки здатності працювати з різноманітними системами - механічними, електричними, керування та обробки сигналів - VisSim є універсальним рішенням для інженерів, яким потрібно моделювати системи, що охоплюють декілька областей.

Економія часу та коштів: Моделювання в реальному часі та простота використання VisSim допомагають інженерам економити час в процесі розробки, зменшуючи потребу в повторному фізичному прототипуванні та тестуванні. Це в кінцевому підсумку призводить до зниження вартості проекту та швидшого виведення продуктів на ринок.

Покращена візуалізація: Візуальна природа моделювання за допомогою блок-схем допомагає краще розуміти і передавати складну динаміку системи. Інженери та дизайнери можуть представляти свої ідеї більш чітко та інтуїтивно зрозуміло, покращуючи співпрацю між командами.

VisSim є потужним інструментом для моделювання та аналізу динамічних систем у різних галузях інженерії. Зручний візуальний інтерфейс і можливості роботи в реальному часі роблять його особливо цінним для проектування систем управління, моделювання електричних і механічних систем і збору даних в реальному часі. Завдяки швидкому створенню прототипів, інтуїтивно зрозумілому системному аналізу та надійному

проектуванню систем керування, VisSim є незамінним ресурсом для інженерів, викладачів та дослідників, які прагнуть ефективно моделювати та оптимізувати складні динамічні системи. Оскільки інженерні задачі стають дедалі складнішими, такі інструменти, як VisSim, надають вирішальну перевагу в сучасному ландшафті моделювання та керування системами.

2.2. ІМІТАЦІЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ НА МОДЕЛІ

На стадії відпрацювання методики експеримент на об'єкті, що діє, був замінений його імітацією на динамічній комп'ютерній моделі.

На малюнку 1 наведено модель динаміки системи автоматичного регулювання (САР) температури електропечі з релейним двопозиційним регулятором у програмному середовищі VisSim.

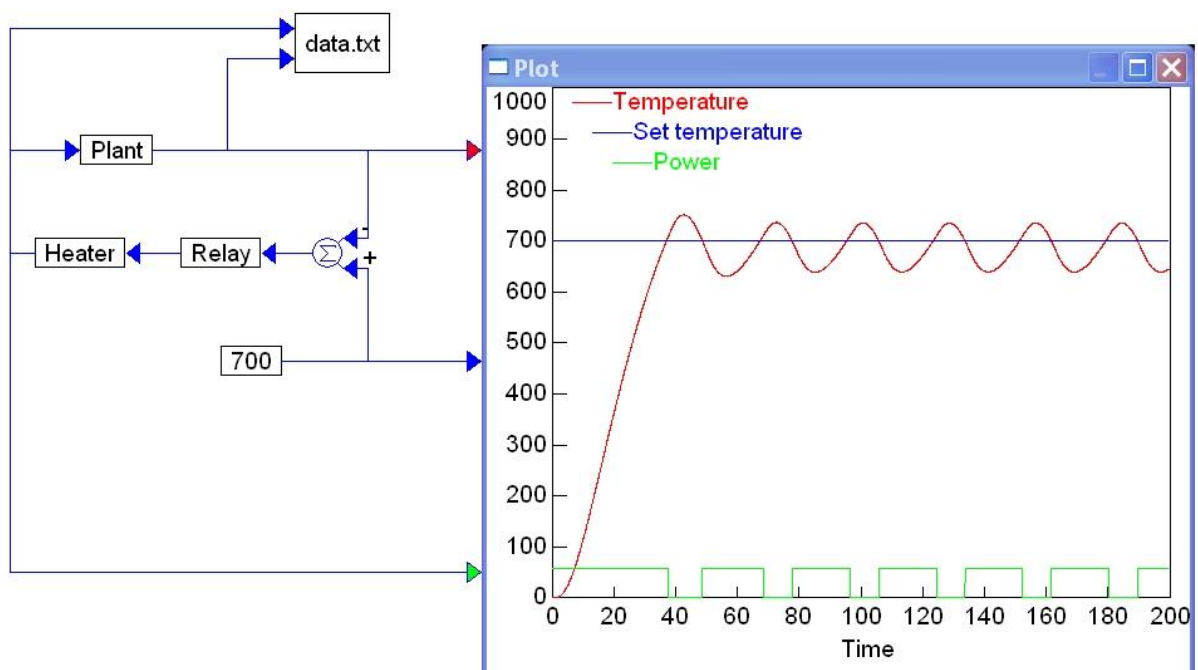


Рис. 1 Модель САР температури електропечі з релейним двопозиційним регулятором. Копія екрану VisSim

Модель включає такі блоки (ланки):

Назва блоку	Функція блоку	Вхід(и) блоку	Вихід блоку
Plant	Модель об'єкта регулювання.	потужність нагріву, кВт.	температура у градусах.
Relay	Модель релейного двопозиційного регулятора.	Розузгодження у градусах	Двопозиційний керуючий вплив (0 або 1)
Heater	Модель електронагрівача	Двопозиційний керуючий вплив (0 або 1)	потужність нагріву, кВт
700	Задатчик температури	-	Задана температура (константа), град
Σ	Блок порівняння	- фактична температура, град. - Задана температура, град	Розузгодження, град.
Data.txt –.	Блок реєстрації даних у текстовому файлі.	- фактична температура, град. - Потужність нагріву, кВт	-
Plot	Віртуальний осцилограф	- фактична температура, град. - задана температура, град. - Потужність нагріву, кВт	-

На осцилографі Plot відображаються осцилограми автоколивань температури в град. та потужності нагріву в кВт.

Ці ж осцилограми реєструються в текстовому файлі Data.txt, у вигляді двох колонок чисел, для подальшої обробки та ідентифікації динамічних властивостей об'єкта регулювання.

Регулятор Relay описується релейною характеристикою (рис. 2). Розузгодження у град. відкладено по горизонталі, керуюча дія – по вертикалі. Ширина петлі гістерези (зона нечутливості) становить 10 град.

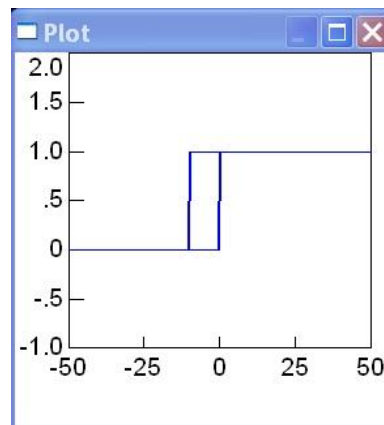


Рис. 2 Релейна характеристика двопозиційного регулятора

Нагрівач Heater моделюється як підсилювальний блок з коефіцієнтом 57 кВт (номінальна потужність при включенні нагріву).

На рис. 3 представлено внутрішню структуру моделі об'єкта регулювання Plant.

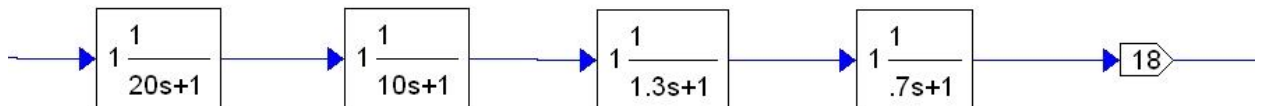


Рис. 3 Внутрішня структура моделі об'єкта регулювання Plant

Модель об'єкта складена з елементарних ланок (блоків). Вона включає чотири аперіодичні блоки першого порядку і один підсилювальний блок. Аперіодичний блок першого порядку позначається як $1/(Ts + 1)$, де T - певна кількість (постійна часу блоку). Фактично вказується формула передавальної функції блоку. Але в середовищі VisSim це просто ярлик, що вказує на тип блоку, тому що для розрахунків операційне літочислення на основі передатних функцій не використовується. Чисельні значення чотирьох постійних часу T_1 , T_2 , T_3 , T_4 прийняті відповідно 20 хв., 10 хв., 1.3 хв., 0.7 хв. Статичний коефіцієнт передачі об'єкта прийнято 18 град./кВт.

Обґрунтування прийнятої моделі об'єкта.

За тривалого нагрівання номінальною потужністю 57 кВт досягається температура 1000 град. Звідси випливає, що статичний коефіцієнт передачі дорівнює $1000/57 = 18$ град./кВт.

Відомо, що процес прогріву будь-якого лінійного стаціонарного об'єкта є сумою експоненту [7]. Отже, відповідна модель може бути зібрана з аперіодичних ланок з різними постійними часами. Чотирьох ланок цілком достатньо для забезпечення прийнятної точності.

Відомо (з тих. документації), що основна постійна часу T_1 для даної електро-печі становить 20 хв. Інші постійні часу поки що невідомі, але відомо, що для теплових об'єктів, як правило, виконується така умова: $T_1 \gg T_2 \gg T_3 \gg T_4$. Відповідні чисельні значення T_2 , T_3 , T_4 прийняті орієнтовно та попередньо для відпрацювання методики¹.

¹Примітка. В результаті ідентифікації ми отримуємо більш просту, зручну та універсальну модель об'єкта, в якій усі найвищі постійні часу, крім двох перших, враховуються інтегрально як час запізнення

2.3. УНІВЕРСАЛЬНА МОДЕЛЬ ТЕПЛОВОГО ОБ'ЄКТА РЕГУЛЮВАННЯ

Будь які об'єкти реального світу насправді є неймовірно складними системами. Але, як не дивно, при будь-якому дослідженні нам завжди вдається мати справу лише з дуже простими моделями реальних систем і об'єктів. Яким чином це вдається зробити?

Ми взагалі не могли б створювати адекватні прості моделі реальності, якби не ефект колективної поведінки елементів системи. Всі елементи системи беруть участь у колективному узгодженому процесі. Саме колективну поведінку ми можемо вивчати, використовуючись відносно простими моделями.

Розглянемо приклад створення спрощеної моделі системи на підставі врахування колективної поведінки елементів системи. Потрібно розрахувати реакцію будівельної конструкції (балки, ферми і т.п.) на ударний вплив. Якщо намагатися моделювати реальну структуру конструкції, (як пружне тіло дуже складної форми, з урахуванням хвильових процесів), то завдання виявиться неймовірно складним. Але динаміку будь-якої конструкції можна розрахувати як суму декількох колективних поведінок всіх елементів конструкції. Ці колективні поведінки дуже прості. Вони являють собою синусоїдальні коливання різних частот, які називаються власними коливаннями конструкції. Для прикладу розглянемо власні коливання балки (рис. 1).

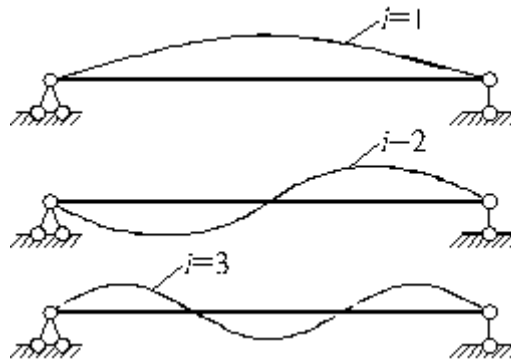


Рис. 1 Власні форми поперечних коливань балки

Криві лінії на малюнку показують форму зігнутої осі балки при максимальному відхиленні коливань і називаються власними формами (модами) коливань. Найнижчу частоту має перша власна форма коливань ($i = 1$). Друга власна форма ($i = 2$) має більш високу частоту коливань. Третя власна форма ($i = 3$) має ще більш високу частоту коливань і так далі. При ударі по балці в будь-якій точці збуджуються власні форми коливань і результуючий рух балки-якій іншій точці являє собою просто суму синусоїдальних коливань декількох основних частот (вклад власних форм більш високого порядку змістовно малий). Таким чином, врахування колективних рухів елементів конструкції (власних форм коливань) дозволяє різко спростити розрахункову модель системи.

Розглянемо докладніше приклад більш актуальний для автоматики. Для розрахунку системи автоматичного регулювання температури (наприклад, в приміщенні) потрібно мати математичну модель динаміки теплового об'єкта регулювання (у даному прикладі модель прогріву приміщення), що зв'язує потужність нагріву (керуючий вплив) з температурою (регульована величина) з урахуванням теплової інерційності. Якщо намагатися моделювати реальну структуру теплового об'єкта, (у даному прикладі з урахуванням теплоємності стін, меблів, конвекції повітряних потоків,

процесів теплообміну, хвильових процесів теплопередачі і т.п.), то завдання виявиться неймовірно складним. Але ми знаємо, що динаміку будь-якого лінійного стаціонарного об'єкта можна розрахувати як суму декількох колективних поведінок (власних форм) всіх його елементів. Ці колективні поведінки для теплових об'єктів вельми прості і являють собою затухаючі з різною швидкістю експоненти [7]. На рис. 2 наведена типова перехідна функція (реакція температури на включення нагріву) теплового об'єкта регулювання. Вона з достатньою точністю може бути представлена як сума двох основних експонент (верхня і нижня криві). Ці дві експоненти мають простий фізичний зміст. Перша експонента відображає прогрів приміщення, як єдиного цілого. Друга експонента відображає процес вирівнювання температури в межах приміщення. Всі інші невраховані експоненти враховуються загальною додаванням невеликого запізнення. Таким чином, врахування колективних процесів в об'єкті регулювання дозволяє різко спростити розрахункову модель теплового об'єкта.

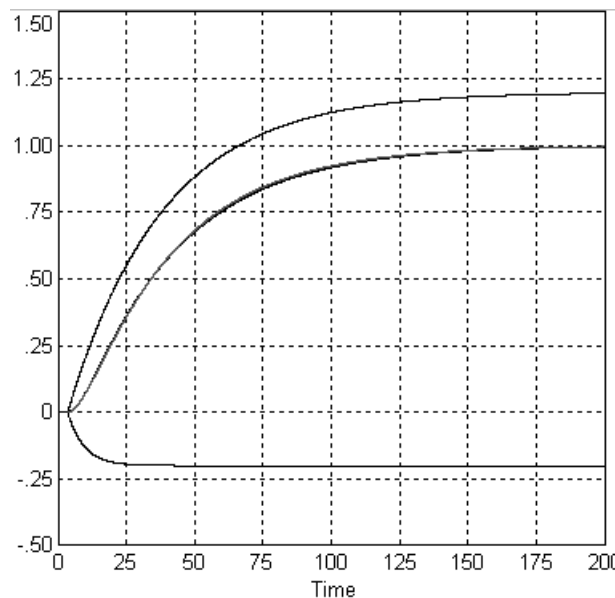


Рис. 2 Типова перехідна функція об'єкта регулювання як сума двох експонент з запізненням

На рис. 3 представлена відповідна модель теплового об'єкта у вигляді паралельної структурної схеми з елементарних динамічних ланок. Структурна схема складена з односпрямованих блоків (ланок). Стрілки показують напрямок причинно-наслідкового залежності (вихід залежить від входу, але не навпаки).

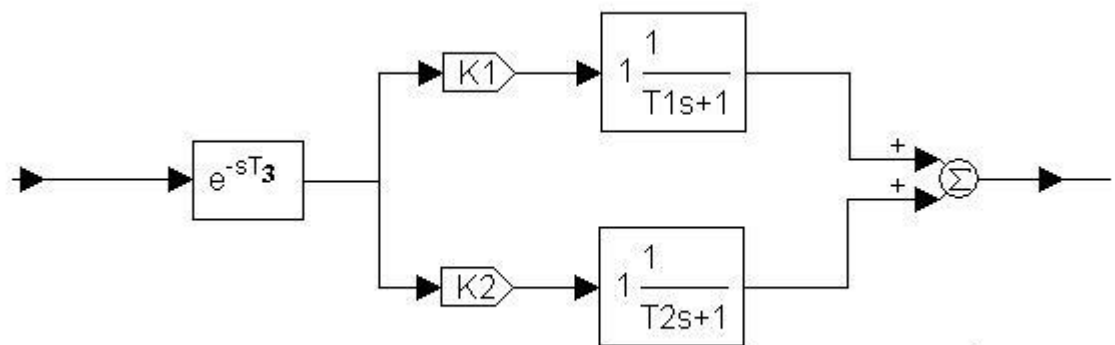


Рис. 3 Універсальна динамічна модель теплового об'єкта регулювання в паралельному варіанті.

Модель відображає залежність температури (вихід праворуч) від потужності нагріву (вхід зліва) з урахуванням динаміки прогріву. Модель включає два паралельні канали, що враховують два основних колективних процеса. Кожен канал реагує незалежно, їх виходи додаються суматором Σ . Кожен канал включає аперіодичну ланку, яка формує відповідний експоненційний процес, з передаточною функцією $1/(T_i s + 1)$, де T_i - стала часу відповідної експоненти. У кожному каналі є підсилувальна ланка, що визначає коефіцієнт впливу відповідного каналу K_i . Крім того, є загальна ланка запізнювання з передаточною функцією e^{-sT_3} (T_3 - час запізнювання), що інтегрально враховує всі інші колективні процеси. Загальна передаточна

функція об'єкта $W(s)$ ² може бути отримана з використанням правил еквівалентних перетворень структурних схем і алгебраїчних перетворень передаточних функцій. Послідовне з'єднання ланок відповідає добутку, паралельне з'єднання відповідає сумі передаточних функцій.

$$W(s) = e^{-sT_3} \cdot \left(\frac{K_1}{T_1 \cdot s + 1} + \frac{K_2}{T_2 \cdot s + 1} \right)$$

На практиці зручніше використовувати цю формулу в більш простій еквівалентній формі.

$$W(s) = \frac{K \cdot e^{-sT_3}}{(T_1 \cdot s + 1) \cdot (T_2 \cdot s + 1)}$$

Де $K = K_1 + K_2$ – це статичний коефіцієнт передачі об'єкта.

У такому вигляді динамічна модель теплового об'єкта не містить нічого зайвого, проте вона враховує все необхідне для розрахунку динаміки регулювання. Більше того, така модель універсальна. Вона однаково придатна для будь-яких теплових об'єктів (лабораторна електропіч, пропарювальна камера, ядерний реактор і т.п.). Зверніть увагу, що структура моделі не має нічого спільного з конструкцією конкретного теплового об'єкта (які всі різні), але зате відтворює структуру взаємодії колективних процесів (яка однакова для всіх теплових об'єктів). Саме в такому вигляді модель

² Передаточні функції є математичними моделями, якими традиційно описують динамічні властивості лінійних інерційних стаціонарних об'єктів. Передаточну функцію можна інтерпретувати як формульний вираз амплітуди-фазо-частотної характеристики (АФЧХ) об'єкта, тобто залежність комплексного коефіцієнта підсилення від частоти. Комплексний аргумент s має фізичний зміст уявної частоти $j\omega$. Комплексні числа використовуються для спрощення розрахунків, оскільки дозволяють закодувати одним числом одночасно амплітуду і фазу коливань. При цьому всі динамічні розрахунки зводяться до алгебраїчних операцій. Передаточні функції і частотні характеристики вивчаються в курсі «Теорія автоматичного управління»

об'єкта найбільш зручна для розрахунку параметрів настроювання ПД-регулятора.

Послідовне з'єднання ланок відповідає добутку передаточних функцій, тому універсальну модель теплового об'єкта можна зібрати з елементарних ланок у вигляді еквівалентної послідовної схеми.

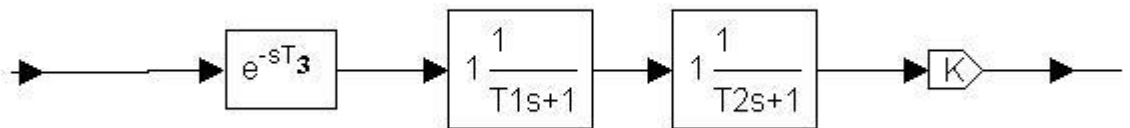


Рис. 4 Універсальна динамічна модель теплового об'єкта регулювання в послідовному варіанті.

Саме в такому вигляді вона найзручніша для комп'ютерного моделювання.

Приведенная модель объекта (рис. 4) может считаться универсальной, пригодной для расчета динамики регулирования любых тепловых объектов, так как она учитывает все существенные особенности таких объектов: статизм, наличие аperiodических инерционностей (учитываются две основные с постоянными времени T_1 и T_2) и наличие запаздывания T_3 , которое относительно мало в общей инерционности объекта, но сильно влияет на качество регулирования. T_3 суммарно учитывает все малые инерционности, не учтенные двумя основными постоянными времени

Природно, чисельні значення параметрів моделі K , T_1 , T_2 , T_3 повинні бути обрані такими, щоб динамічні властивості моделі були ідентичними динамічним властивостями заданого конкретного об'єкта регулювання (з позицій концепції «чорного ящика», без урахування внутрішньої структури).

Визначення чисельних значень параметрів моделі K , T_1 , T_2 , T_3 для конкретного об'єкта регулювання за результатами пробного експеримента називається задачею ідентифікації об'єкта. Саме цією задачею ми й будемо займатись.

РОЗДІЛ 3

3.1. ІДЕНТИФІКАЦІЯ ДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ОБ'ЄКТА РЕГУЛЮВАННЯ

На рис. 1 представлені вихідні експериментальні дані, отримані розділ «Імітація експерименту на моделі». Це осцилограми зміни потужності нагріву в кВт та температури у град. При релейному двопозиційному регулюванні температури. Дані імпортовані в електронні таблиці EXCEL з файлу Data.txt у табличній формі, вигляді трьох масивів чисел (час у хв., Потужність нагріву в кВт, температура в град.). Дані отримані періодичною вибіркою значень із періодом 0.1 хв. Відповідні осцилограми відображені на графіку.

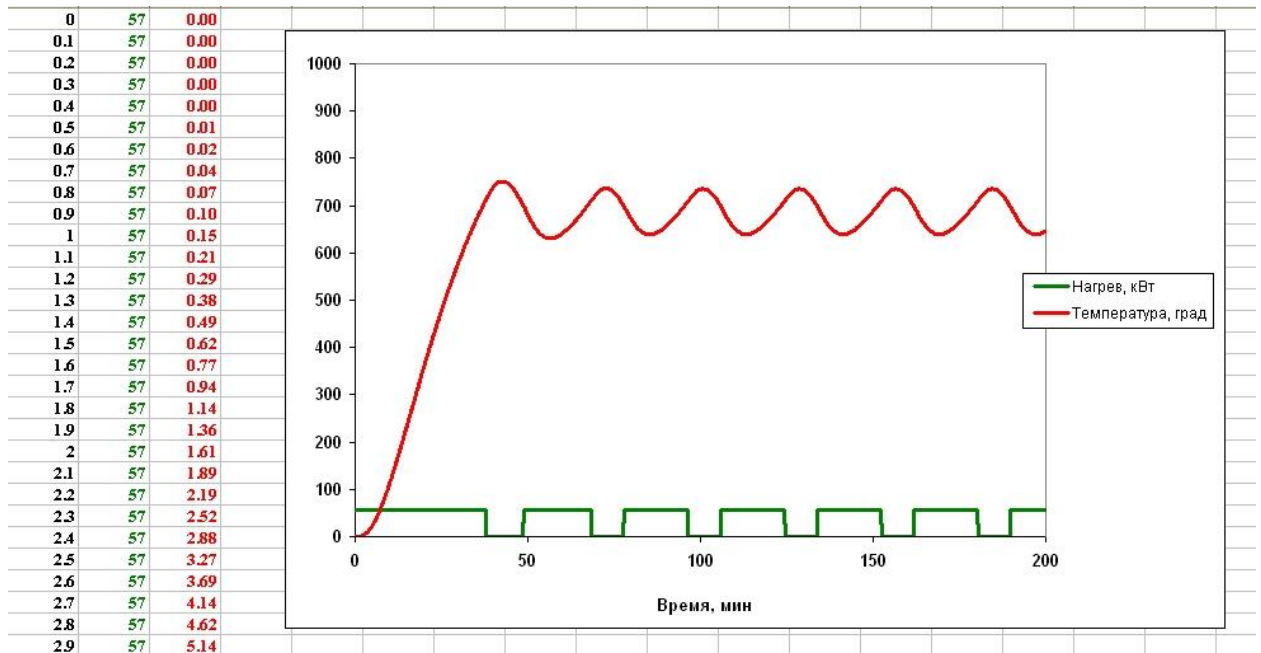


Рис. 1 Вихідні експериментальні дані

На рис. 2 показано структурну схему алгоритму ідентифікації динамічних параметрів об'єкта регулювання (електропечі). Експериментальна осцилограма потужності нагріву (як масиву чисел) пропускається через комп'ютерну модель електропечі, реалізовану в електронних таблицях EXCEL. Використана універсальна модель теплового об'єкта регулювання, описання в попередньому розділі

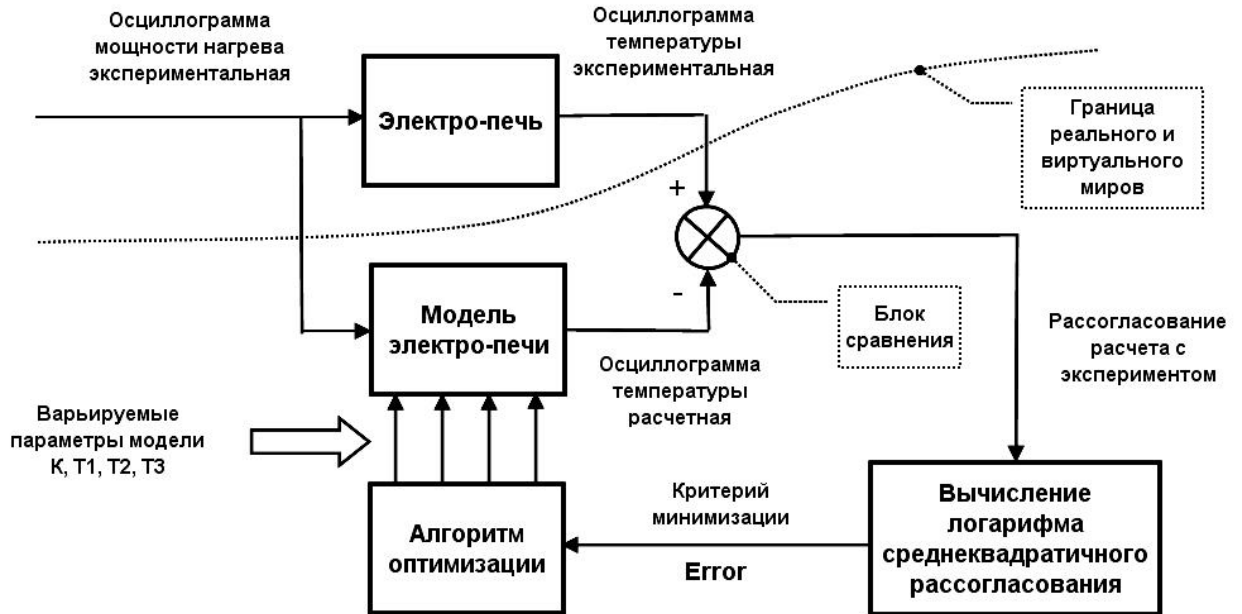


Рис. 2 Структурна схема алгоритму ідентифікації

Модель електропечі має невідомі параметри K , T_1 , T_2 , T_3 , яким спочатку надано довільні значення. На виході моделі електропечі отримуємо розрахункову осцилограму зміни температури (як масиву чисел). Вона, природно, дуже відрізняється від експериментальної (рис. 3). Для пошуку правильних значень параметрів K , T_1 , T_2 , T_3 використовуємо алгоритм оптимізації (який EXCEL називається «Пошук рішення»). Цей алгоритм автоматично підбирає значення параметрів K , T_1 , T_2 , T_3 таким чином, щоб мінімізувати інтегральну помилку (Error) неузгодженості розрахункових та експериментальних осцилограм температури. Розузгодження обчислюється як різницю відповідних числових масивів (і також є числовим масивом). Критерій мінімізації Error обчислюється як логарифм (десятковий) середньоквадратичного значення від неузгодженості та є одним числом. Логарифмування використовується зменшення діапазону зміни критерію мінімізації. Це полегшує роботу алгоритму оптимізації та підвищує наочність графіків у наступному розділі.

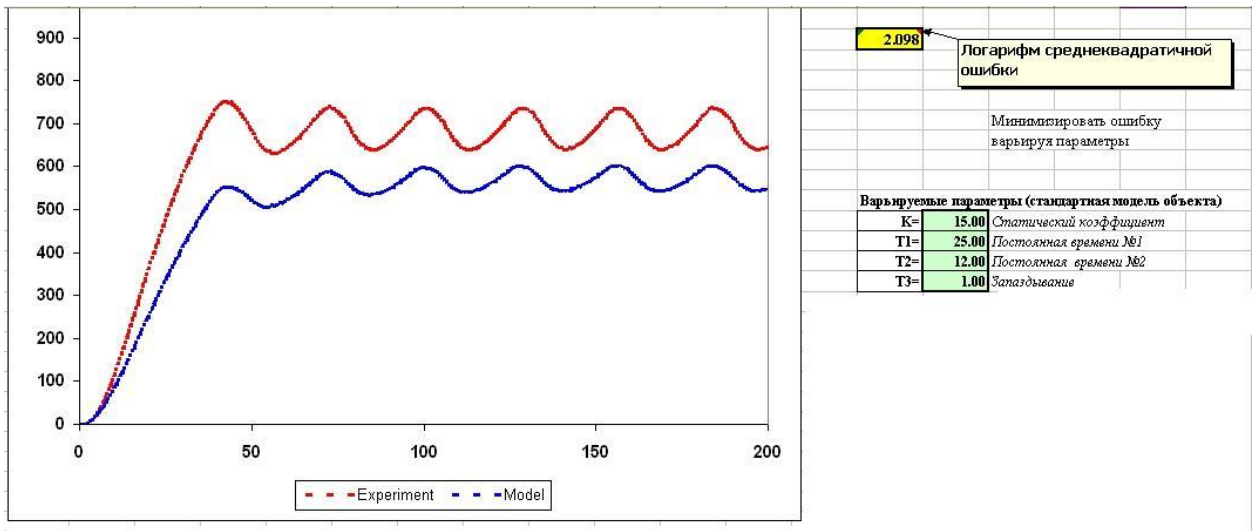


Рис. 3 Розбіжність експериментальної та розрахункової осцилограм температури при довільному виборі параметрів моделі об'єкта

Після запуску алгоритму оптимізації значення критерію мінімізації Error різко зменшується, розрахункова та експериментальна осцилограми температури практично збігаються, а параметрам моделі K, T1, T2, T3 присвоюються правильні значення (рис. 4).

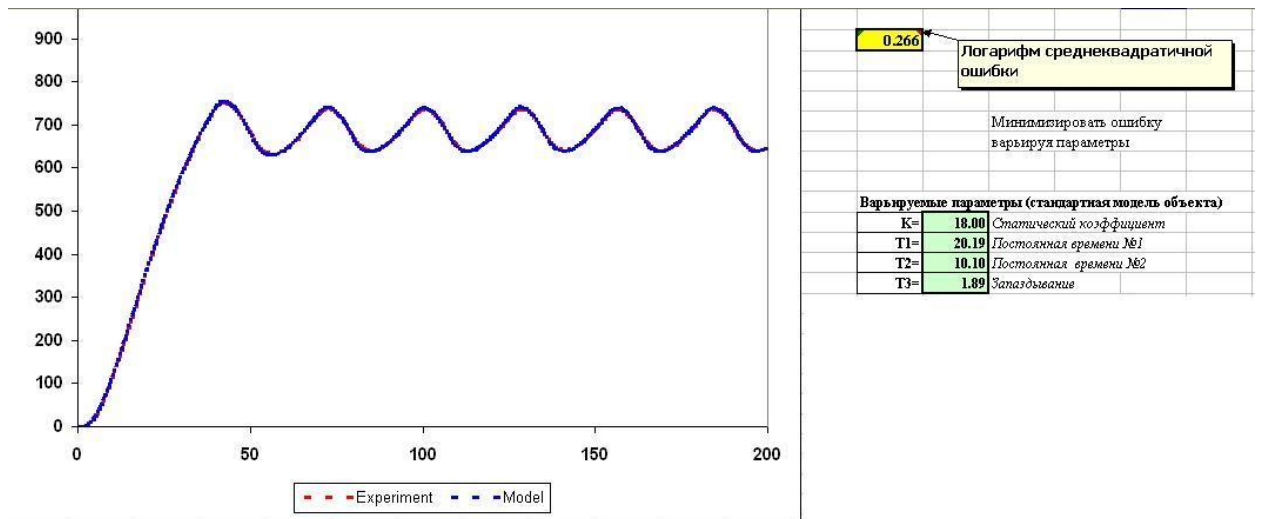


Рис. 4 Збіг експериментальної та теоретичної осцилограм температури після завершення процедури мінімізації помилки

3.2. ПРОБЛЕМА, ЩО ВИНИКАЄ ПРИ РІШЕННІ ОПТИМІЗАЦІЙНОГО ЗАВДАННЯ

Функція відгуку (залежність критерію мінімізації Error від параметрів K , T_1 , T_2 , T_3), що варіюються, даної оптимізаційної задачі має чітко виражений глобальний мінімум, що гарантує однозначність рішення оптимізаційної задачі. Графік функції відгуку в п'ятивимірному просторі уявити неможливо. Тому ілюструючі малюнки 1 – 6 є різними двовимірними перерізами цього графіка.

Знайти глобальний мінімум, позначений №1 на всіх графіках, ручним перебором значень параметрів абсолютно неможливо. Доводиться використовувати алгоритм автоматичної оптимізації. Проте автоматичний пошук глобального мінімуму ускладнюється наявністю так званого «яру».

При невдалому виборі початкових значень параметрів, що варіюються, алгоритм оптимізації «застрягає» в локальному мінімаксі на «дні яру» (позначений як №2 на рис. 3 - 6). Методом проб встановлено, що рух «дном яру» (пунктирна лінія на рис. 3 – 6) відповідає зміні співвідношення T_2 до T_1 за збереження їх суми. Параметри K та T_3 при цьому не змінюються. Місце точок «дна яру» у координатах T_1 , T_2 є прямою лінією (рис. 5)³. Глобальний мінімум досягається на дні яру при $T_2/T_1 = 0.5$ (рис. 6). Точковою лінією на рис. 3, 4 показані перерізи «яру» в локальному мінімаксі №2.

У локальному мінімаксі №2 дно яру немає нахилу (рис. 6), тому алгоритм оптимізації у цій точці вважає пошук завершеним. У цьому варіанті $T_1 = T_2 = 15$ хв. Цей варіант відповідає співвідношенню $T_2/T_1 = 1$.

³Для наочності, на рис. 5, 6 графік продовжений для значень $T_2 > T_1$, хоча на практиці в цьому випадку просто змінюють місцями нумерацію.

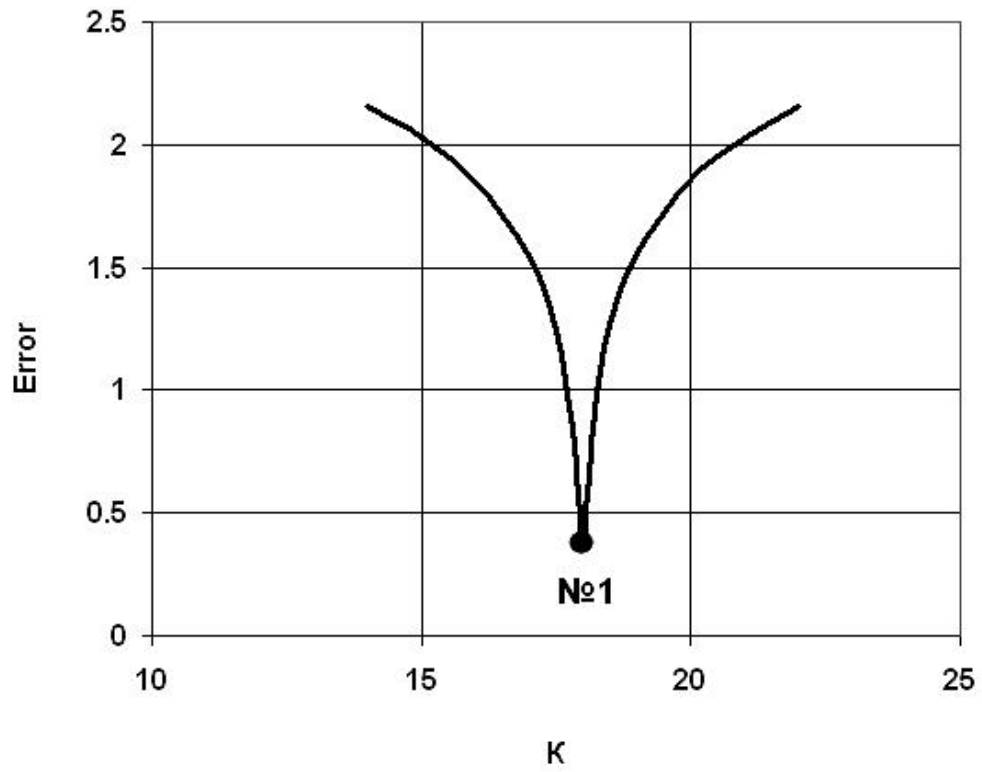


Рис. 1 Залежність критерію оптимізації Error від параметра K при оптимальному налаштуванні інших параметрів

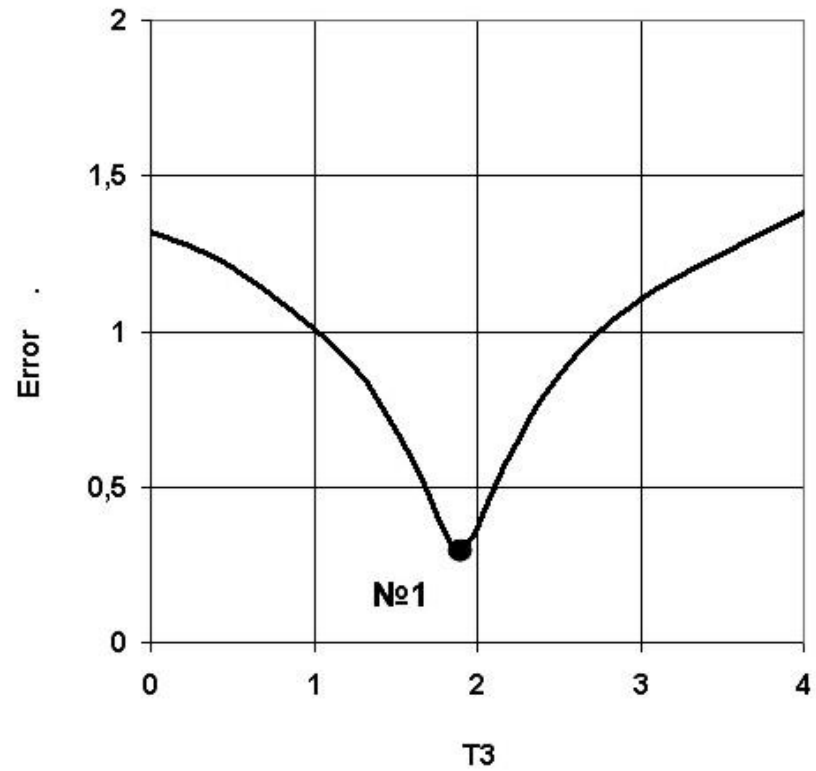


Рис. 2 Залежність критерію оптимізації Error від параметра T3 при оптимальному налаштуванні інших параметрів

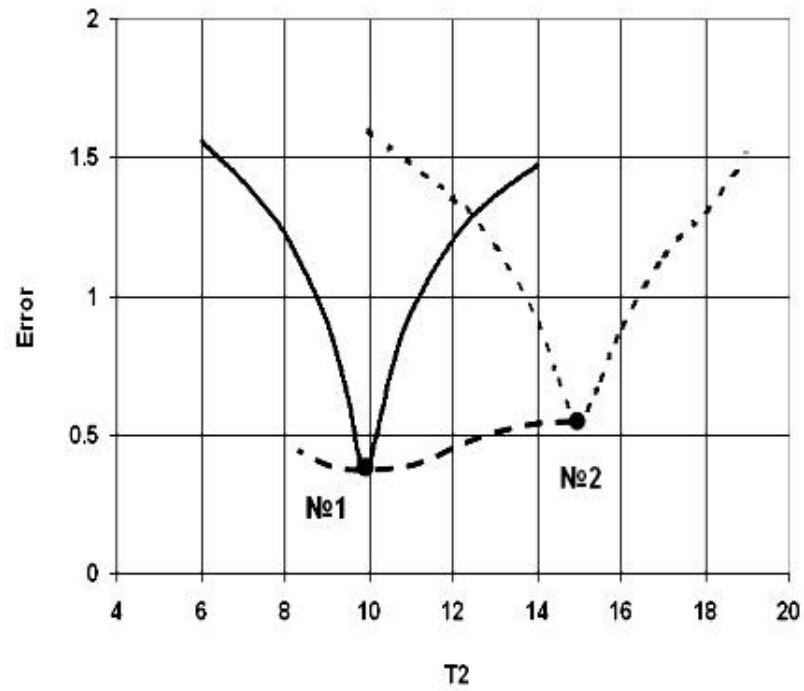


Рис. 3 Залежність критерію оптимізації Error від параметра T2 при оптимальному налаштуванні інших параметрів. Пунктиром показано «дно яру»

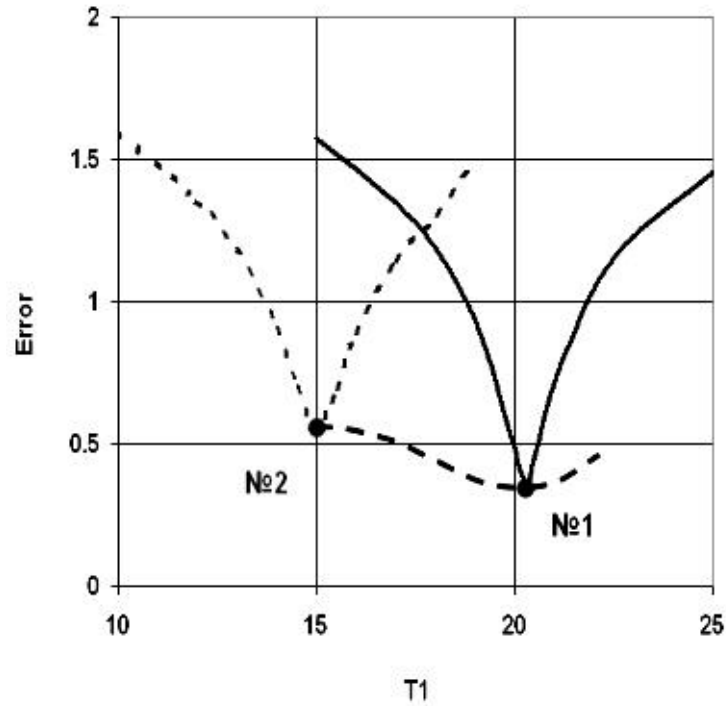


Рис. 4 Залежність критерію оптимізації Error від параметра T1 при оптимальному налаштуванні інших параметрів. Пунктиром показано "дно яру".

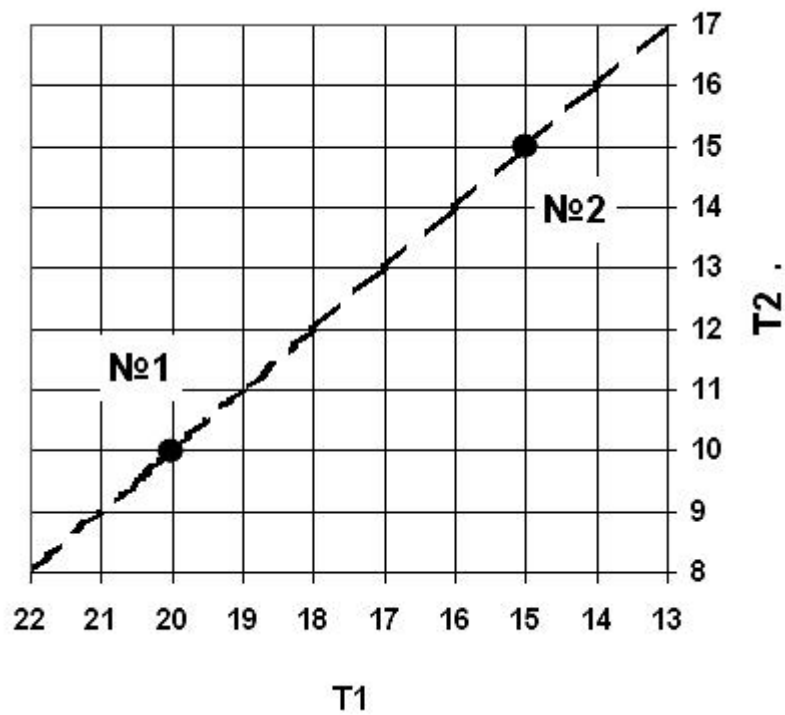


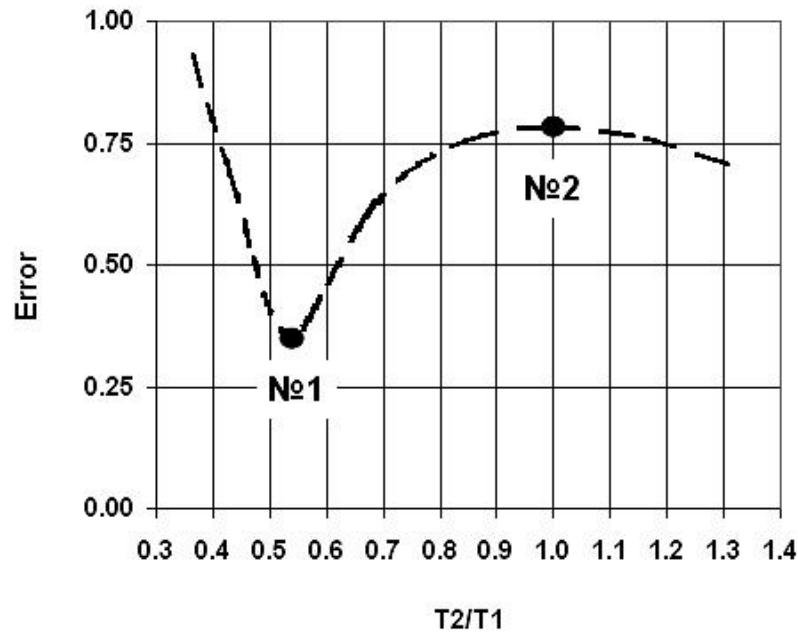
Рис. 5 Місце точок «дна яру» в координатах T_1 , T_2 

Рис. 6 Профіль «дна яру» по висоті

Що ж робити, якщо алгоритм оптимізації «застрягне» у локальному мінімаксі №2 на «дні яру»?

Можна допомогти алгоритму оптимізації, підкоригувавши отримані значення параметрів вручну і знову запуснути оптимізацію ще раз. Достатньо змінити лише значення T_2 і T_1 так, щоб вони суттєво відрізнялися, але щоб їхня сума T_1+T_2 залишалася незмінною (в даному випадку 30 хв.).

Цікаво, що при подальших розрахунках параметрів налаштування ПД-регулятора та якості регулювання різниця вибору варіантів №1 і №2 позначається несуттєво (див. наступний розділ), хоча параметри об'єкта регулювання (T_1 і T_2) для цих варіантів відрізняються значно.

Висновок: якщо в результаті ідентифікації вийшли однакові значення основних постійних часу об'єкта T_1 , T_2 , потрібно поставитися до цього факту з підозрою, оскільки це може бути грубою помилкою.

3.3. СТРУКТУРНА СХЕМА САР ТЕМПЕРАТУРИ З ПІД-РЕГУЛЯТОРОМ

Пропонована структурна схема САР температури з ПІД-регулятором представлена на рис. 1

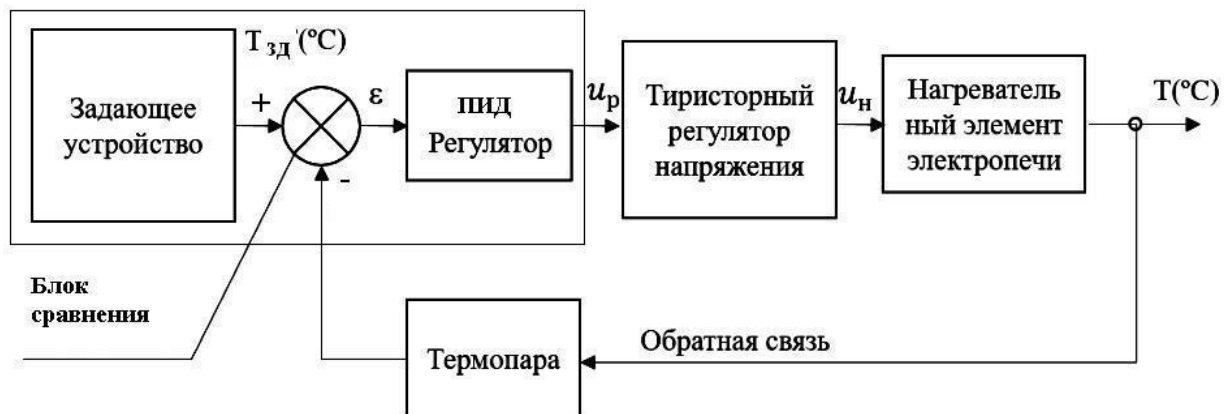


Рис. 1 Структурна схема САР температури з ПІД-регулятором

Система автоматичного регулювання (САР) дозволяє підтримувати температуру об'єкта (у разі печі) на заданому рівні. Від датчика температури (термопара), що знаходиться, у печі, поточне значення температури $T (°C)$ передається на блок порівняння, який виробляє сигнал неузгодженості ϵ . Графік зміни заданої температури $T (°C)$ виробляється пристроєм, що задає. Далі сигнал неузгодженості ϵ подається на ПІД-регулятор. Керуючий сигнал з виходу ПІД-регулятора надходить на виконавчий пристрій, а саме на тиристорний регулятор напруги. Практично тиристорний регулятор напруги виконує функцію підлеглого (slave). Основний ПІД-регулятор (master) реалізує негативний зворотний зв'язок за температурою і видає необхідну на даний момент потужність нагріву u_p . Підлеглий (slave) регулятор,

отримавши це завдання, видає відповідну напругу живлення нагрівача ин. Він працює за розімкнутою схемою, без зворотного зв'язку.

Впровадження ПІД-регулювання дозволить досягти наступних переваг:

- Забезпечення плавного нагріву (охолодження)
- Високу точність підтримання заданої температури
- Виключення великих кидків потужності, яка споживається від електромережі, при включеннях (вимиканнях) нагрівача.

Конструктивні особливості. Заданий пристрій, блок порівняння та ПІД алгоритм регулювання реалізуються, як правило, програмно в одному пристрої (виділено тонким прямокутником). Тиристорний регулятор напруги великої потужності є окремим пристроєм.

РОЗДІЛ 4

4.1. РОЗРАХУНОК ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ НАСТРОЮВАННЯ ПІД-РЕГУЛЯТОРА

Використовуються наступні формули для розрахунку оптимальних параметрів настроювання параметрів ПІД-регулятора в залежності від відомих параметрів об'єкта регулювання [7]:

Коефіцієнт пропорційності

$$K_p = F \frac{T_1 + T_2}{K \cdot T_3}$$

Стала часу диференціювання

$$T_d = \frac{T_1 \cdot T_2}{T_1 + T_2}$$

Стала часу інтегрування

$$T_i = T_1 + T_2$$

Де:

K – статичний коефіцієнт передачі об'єкта

T_1, T_2 – основна і додаткова сталі часу об'єкта

T_3 – час запізнення об'єкта

F – коректуючий множник;

$F=0.4$ (перерегулювання не припустиме)

$F=0.5$ (допускається перерегулювання)

4.2. МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ САР ТЕМПЕРАТУРИ З ПІД-РЕГУЛЯТОРОМ

На рис. 1 представлена структурна схема моделі динаміки САР температури з ПД-регулятором

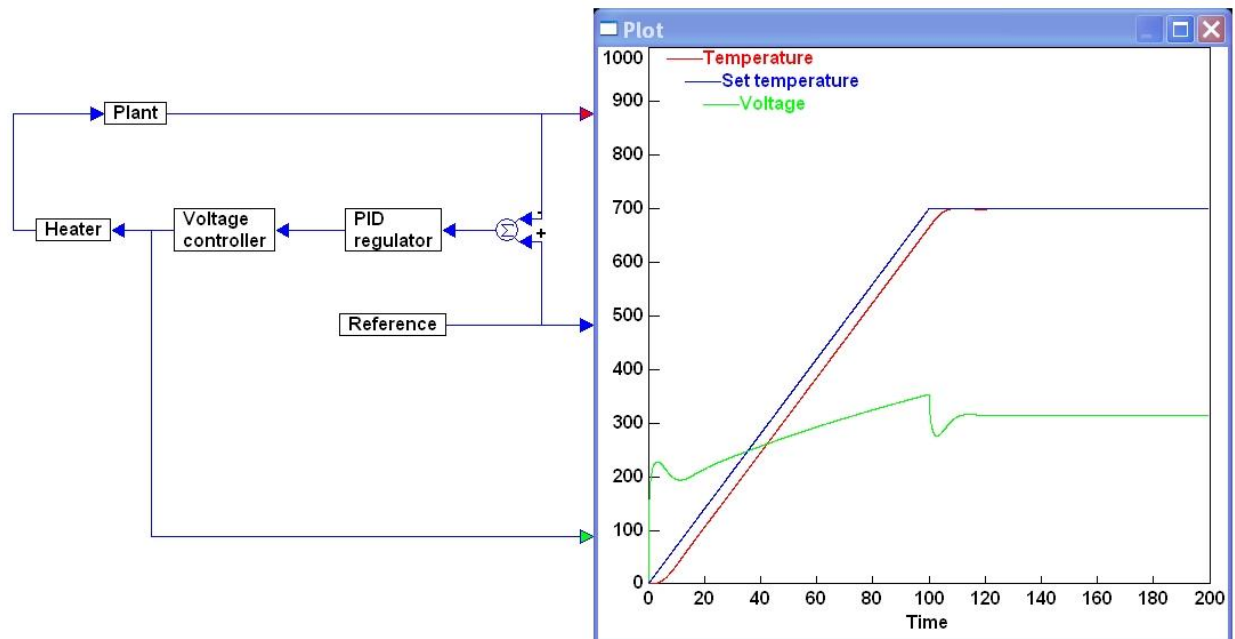


Рис. 1 Структурна схема моделі динаміки САР температури з ПІД-регулятором

Модель включає такі блоки (ланки):

Назва блоку	Функція блоку	Вхід(и) блоку	Вихід блоку
Plant	Модель об'єкта регулювання.	потужність нагріву, кВт.	температура у градусах.
PID regulator	Модель ПІД регулятора.	Розузгодження у градусах	Необхідна поточна потужність нагріву кВт
Voltage controller	Модель тиристорного регулятора напруги	Необхідна поточна потужність нагріву кВт	Електрична напруга на нагрівачі,
Heater	Модель нагрівача	Електрична напруга на нагрівачі,	Поточна потужність нагріву, кВт
Σ	Блок порівняння	- фактична	Розузгодження, град.

		температура, град. - Задана температура, град	
Reference	Модель задатчика.	-	Поточна задана температура, град.
Plot	Віртуальний осцилограф	- фактична температура, град. - задана температура, град. - Напруга на нагрівачі,	-

На осцилограф Plot відображається практично ідеальний процес програмного підйому температури до 700 град. за 100 хв. Наявність невеликого запізнення (5 хв.) температури щодо завдання даного технологічного процесу абсолютно несуттєво. Напруга живлення нагрівача змінюється плавно, без стрибків.

Внутрішня структура моделі об'єкта Plant відповідає вихідному варіанту (до ідентифікації), описаному у розділі "Імітація експерименту на моделі".

На рис. 2 представлена внутрішня структура моделі ПД регулятора.

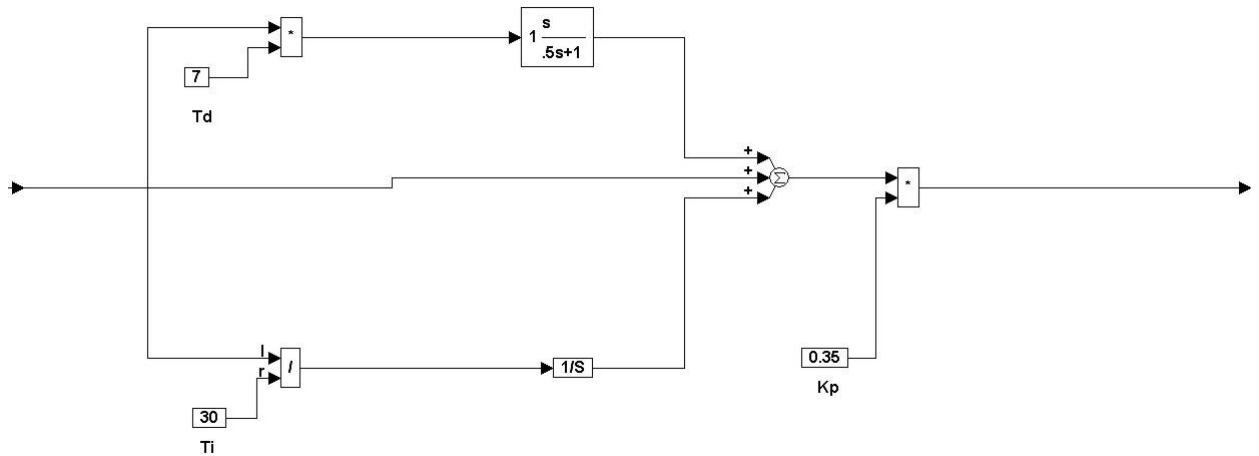


Рис. 2 Внутрішня структура моделі ПІД регулятора

ПІД-регулятор має три паралельні канали – пропорційний, інтегруючий, диференціюючий. Виходи всіх трьох каналів додаються. Для настроювання підсилення окремо по каналах ПІД-регулятор має три підсилювальні ланки з коефіцієнтами 0.35 кВт/град. диференціювання T_d , хв.). Чисельні значення коефіцієнтів відповідають оптимальному настроюванню регулятора і були розраховані у попередньому розділі.

Інтегруюче зв'язок має передатну функцію $1/s$.

Передатна функція диференціювання s в ідеальному вигляді фізично нереалізована, оскільки посилення шумів, які завжди присутні, прагне нескінченності на високих частотах. Для обмеження посилення диференціює ланки на високих частотах до нього вводиться аперіодична ланка з постійної часу τ (у разі 0.5) істотно меншою, ніж T_d [7]. Співвідношення T_d/τ – визначає коефіцієнт посилення високочастотних перешкод, у разі 13.4. Так як у електропечі рівень шуму температури дуже малий, це цілком допустиме значення.

На рис. 3 представлена нелінійна квадратична характеристика (залежність потужності від напруги) електронагрівача. Блок 380 (константа) задає номінальну напругу живлення нагрівача V . Блок pow реалізує зведення в квадрат. Блок 57 (константа) задає номінальну потужність нагріву кВт. Показання віртуальних вимірювальних приладів на малюнку відповідають режиму, що встановився, з температурою 700 град. (Потужність нагріву 39 кВт, напруга живлення нагрівача 314 В).

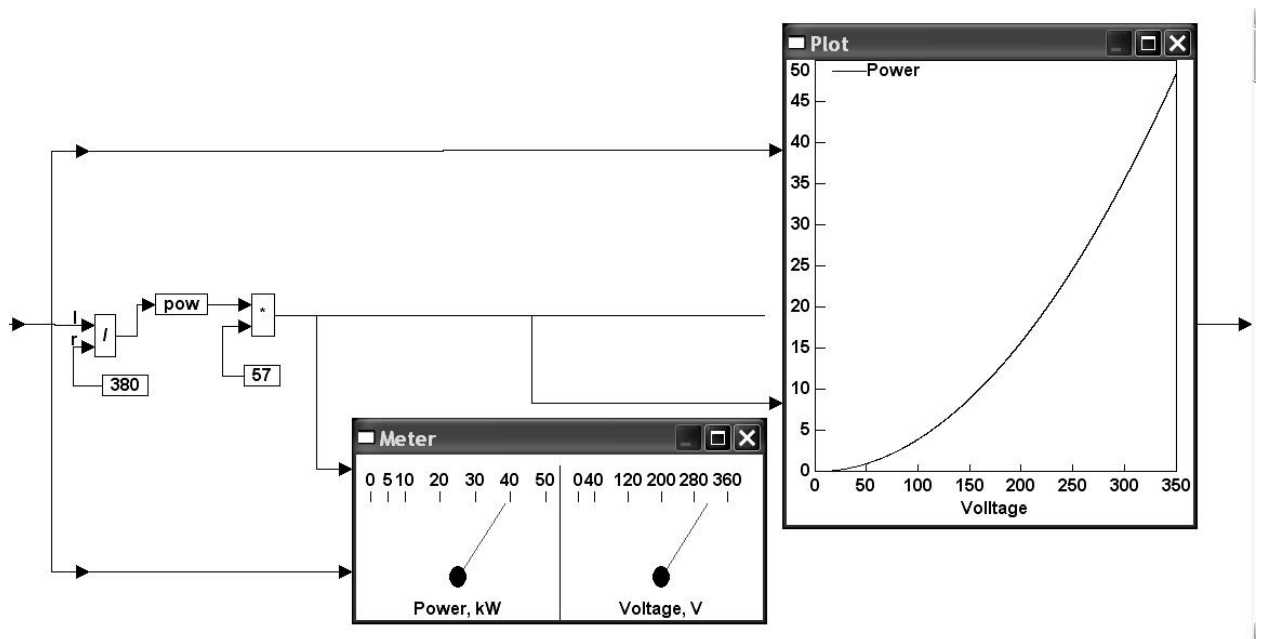


Рис. 3 Нелінійна квадратична характеристика електронагрівача

Нелінійність нагрівача має бути компенсована. На рис. 4 представлена обернена нелінійна характеристика коректора нелінійності в тиристорному регуляторі напруги. Практично тиристорний регулятор напруги виконує функцію підлеглого (slave). Основний ПД-регулятор (master) реалізує негативний зворотний зв'язок за температурою і видає необхідну на даний момент потужність нагріву. Підлеглий (slave) регулятор, отримавши це завдання, видає відповідну напругу живлення нагрівача. Він працює за розімкнутою схемою, без зворотного зв'язку.

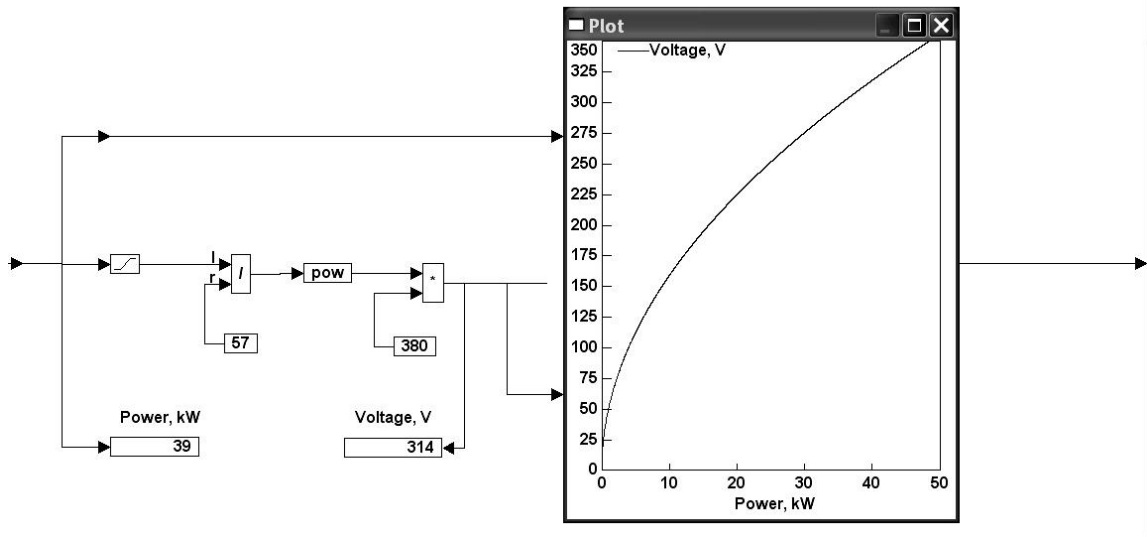


Рис. 4 Зворотна характеристика коректора нелінійності в тиристорному регуляторі напруги

Потужність нагрівання обмежується діапазоном від 0 до 57 кВт на вході. Блок 57 (константа) задає номінальну потужність кВт. Блок pow реалізує зведення у ступінь $1/2$. Блок 380 (константа) задає номінальну напругу живлення нагрівача В. Показання цифрових індикаторів на малюнку відповідають встановленому режиму з температурою 700 град. (Потужність нагріву 39 кВт, напруга живлення нагрівача 314 В).

Рис. 5 ілюструє погіршення точності регулювання лінійної характеристики тиристорного регулятора (корекція нелінійності нагрівача відсутня).

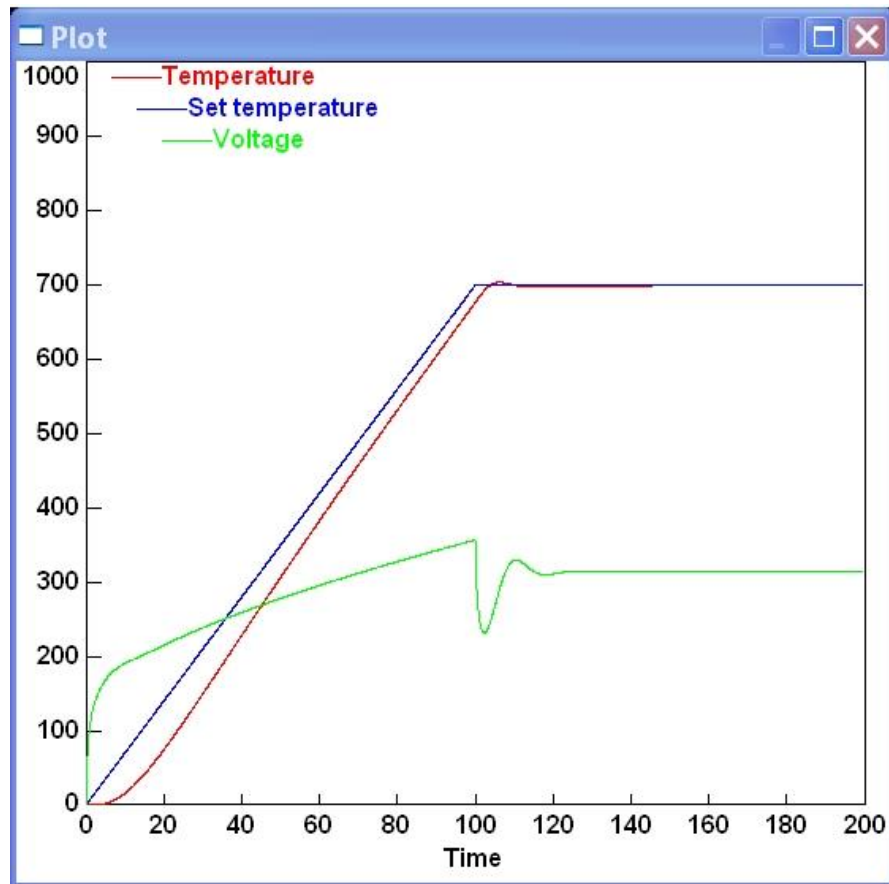


Рис. 5 Погіршення точності регулювання за відсутності коректора нелінійності

Чисельні значення параметрів об'єкта регулювання за результатами ідентифікації (дивись попередній розділ):

Параметр	Значення за основним варіантом №1	Значення за варіантом №2	Розмірність
K	18	18	град/Квт
T1	20,1	14,9	хв.
T2	10,1	14,9	хв.
T3	1,9	1,9	хв.

В результаті розрахунку за формулами отримані наступні оптимальні чисельні значення параметрів настроювання ПД-регулятора (для $F=0.4$):

Параметр	Значення за основним варіантом №1	Значення за варіантом №2	Розмірність
K_p	0.354	0,348	кВт/град
T_i	30,2	30	хв.
T_d	6,75	7,4	хв.

Хоча параметри об'єкта регулювання досить сильно відрізняються за варіантами ідентифікації, розрахункові параметри настроювання ПД-регулятора практично співпадають (в межах припустимої похибки)

4.3. ПРОГРАМНИЙ ОДНОКАНАЛЬНИЙ ПІД-РЕГУЛЯТОР ТРМ-251

На рис.1 показано загальний вигляд програмного одноканального регулятора ТРМ-251 [8], обраного для регулювання температури електропечі СНЗ-6.12.4/10-І2



Рис. 1 Загальний вигляд програмного одноканального регулятора ТРМ-251

Прилад виконує такі основні функції:

- Вимірювання температури, контрольованої первинним перетворювачем (датчиком);
- Цифрову фільтрацію промислових імпульсних перешкод;
- Корекцію нелінійності датчика;
- відображення на цифровому індикаторі фактичного та заданих значень температури;

- регулювання температури за ПД (або двопозиційним релейним) алгоритмом;
- Автоналаштування ПД регулятора;
- зміна заданої температури за певним графіком у часі (відповідно до програми технолога);
- ручне керування вихідною потужністю за допомогою клавіатури приладу;
- Використання резервного датчика у разі несправності основного датчика;
- передача в мережу через порт RS-485 поточних значень вимірюваної та заданої температури, а також вихідного сигналу регулятора;
- програмування та керування роботою приладу за допомогою комп'ютера через мережу через порт RS-485;
- Підтримка протоколів обміну: OВЕН, Modbus-RTU (Slave) та Modbus-ASCII (Slave);
- зміна значень параметрів налаштування приладу за допомогою кнопок керування на лицьовій панелі;
- Формування аварійного сигналу при виході регульованого параметра за допустимі межі;
- перехід в аварійний стан під час розриву контуру регулювання;
- Збереження програмованих параметрів в енергонезалежній пам'яті при відключенні напруги живлення.

На рис.2 показано передню панель програмного одноканального регулятора ТРМ-251



Рис. 2 Передняя панель программного одноканального регулятора ТРМ-251

На рис. 3 показана структурна схема каналу автоматичного регулювання

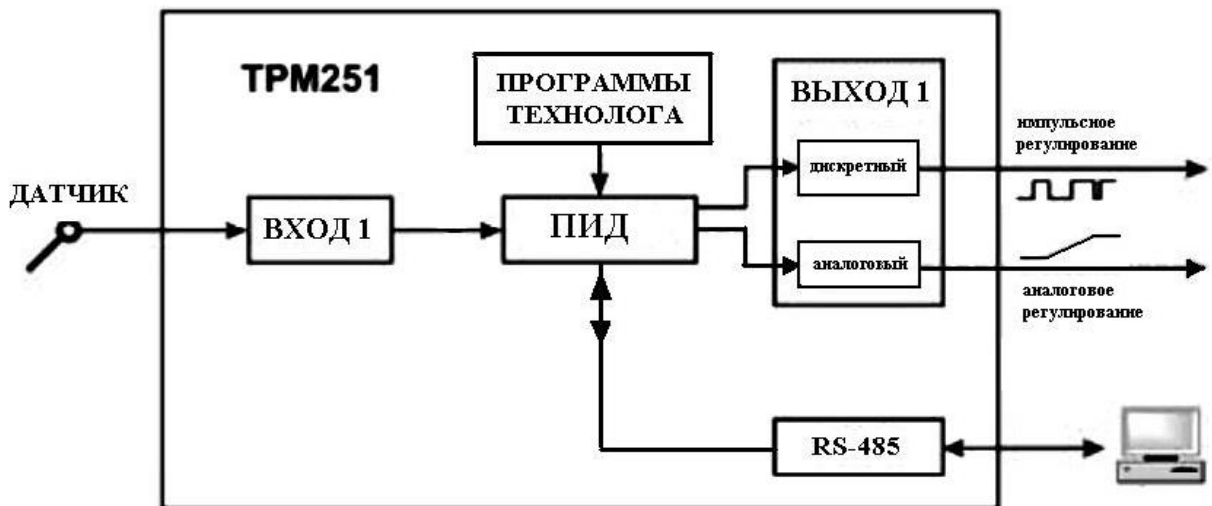


Рис. 3 Структурна схема каналу автоматичного регулювання

На рис. 4 показані монтажні та габаритні розміри програмного одноканального регулятора ТРМ-251

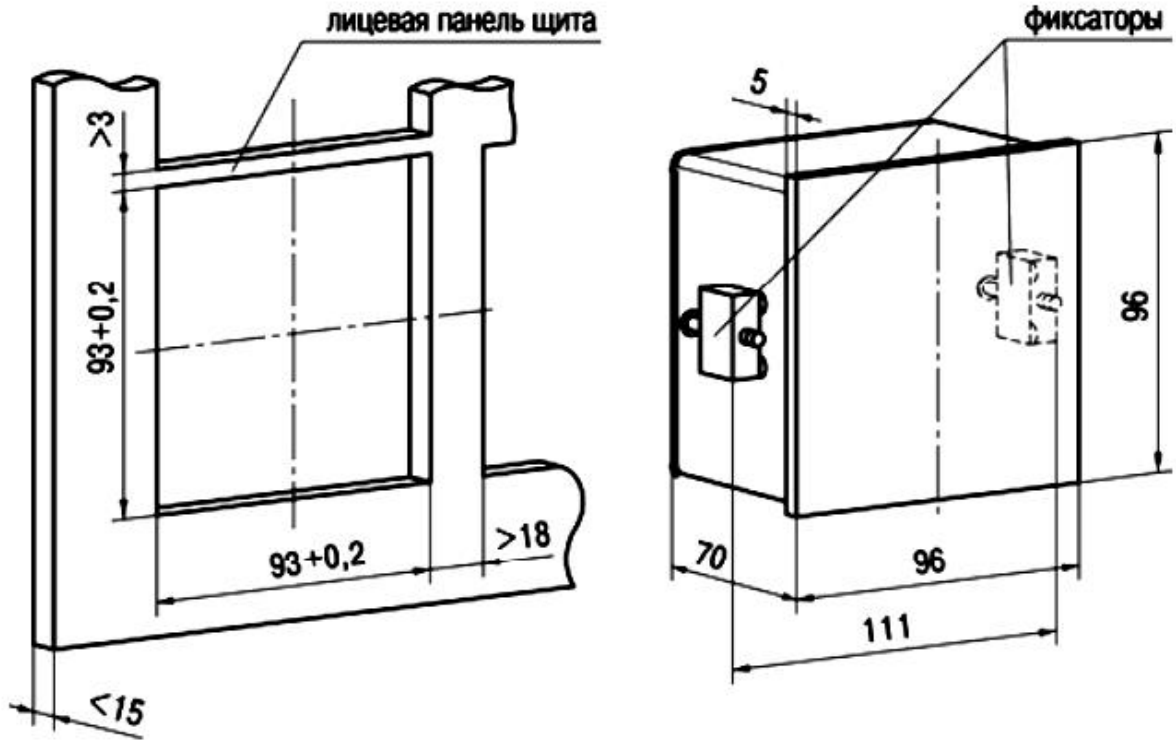


Рис. 4 Монтажные та габаритні розміри програмного одноканального регулятора ТРМ-251

На рис. 5 показано схему підключення датчика температури типу «термопара» до програмного одноканального регулятора ТРМ-251

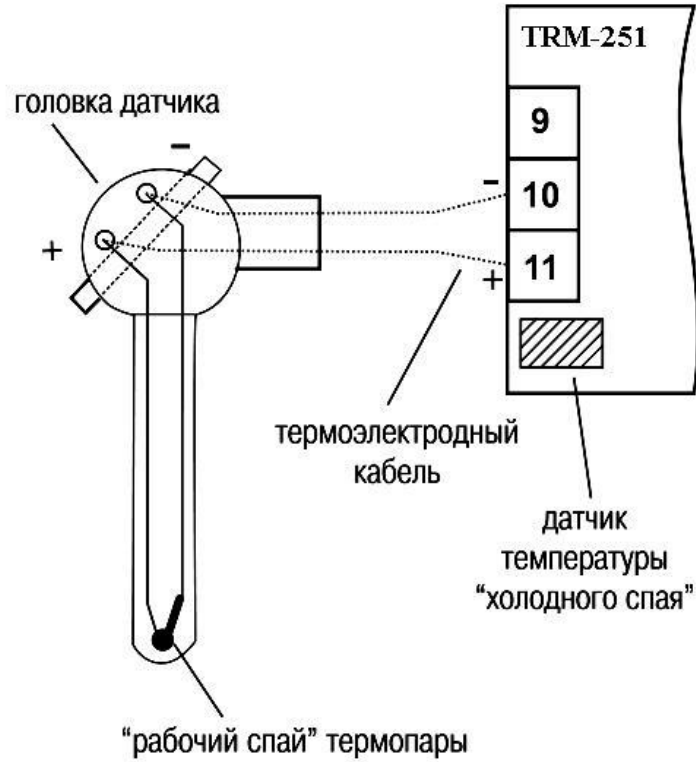


Рис. 5 Схема підключення датчика температури типу «термопара» до програмного одноканального регулятора TRM-251

На рис. 6 показано схему підключення виконавчого пристрою (тиристорного регулятора напруги LSA – ТНЗР90У) до аналогового виходу програмного одноканального регулятора TRM-251

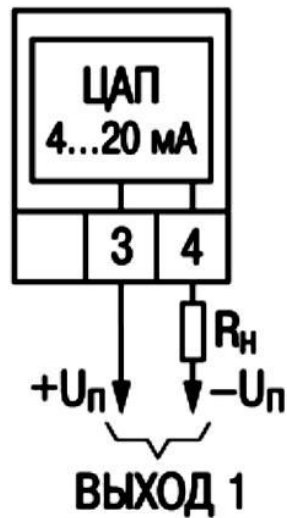


Рис. 6 Схема підключення виконавчого пристрою (тиристорного регулятора напруги LSA – TH3P90Y) до аналогового виходу програмного одноканального регулятора TRM-251

РОЗДІЛ 5

5.1. ДАТЧИК ТЕМПЕРАТУРИ

Для вимірювання для вимірювання температури в робочому просторі печі необхідний аналоговий датчик температури, що нержавіє і має діапазон вимірювання від 0 до 1000 град С. Цим умовам задовольняє термопара.

Принцип роботи термопари ґрунтується на наступному явищі. Якщо два дроти з різномірних металів з'єднані один з одним на одному кінці, на іншому кінці даної конструкції, за рахунок контактної різниці потенціалів, з'являється напруга (ЕРС), яка залежить від температури. Іншими словами, з'єднання двох різних металів поводить як джерело електричної напруги, чутливе до зміни температури. Використовуючи це, можемо обчислити температуру місця з'єднання двох металів, вимірявши напругу.

На малюнку 1 наведено зовнішній вигляд термопари, що використовується на виробництві до модернізації. Заміна її не проводитиметься, оскільки вона повністю задовольняє вимогам.



Рис. 1 Зовнішній вигляд термопари ТПК 135

У Таблиці 1 наведено характеристики наявного датчика температури.

Таблиця 1. Показники датчика температури

Модель	ТПК 135
Тип термопари	(НСХ) К (ХА)
Діапазон вимірювання температури	-40 ... 1200 °С
Довжина монтажної частини	400 мм
Постійна часу теплової інерції	не більше 30 с
Виконання робочого спаю щодо	ізольований

корпусу	
Діаметр термоелектроду	3,2 мм
Опір ізоляції не менше	100 Мом
Вихідний сигнал	до 20 мV

5.2. ТРИФАЗНИЙ ТИРИСТОРНИЙ РЕГУЛЯТОР НАПРУГИ ЗМІННОГО СТРУМУ LSA – ТНЗР90У

Як регулюючий орган потужності нагріву електро-печі вибираємо трифазний тиристорний регулятор напруги змінного струму LSA – ТНЗР90У НА 90 А. Переваги використання тиристорних регуляторів полягають у простоті конструкції, невисокій вартості та високій надійності роботи.

Потужність електропечі становить 68 кВт. Даній потужності при підключенні до трифазної мережі відповідає сила струму приблизно рівна 63 А. Також обраний прилад повинен мати аналоговий керуючий вхід 4...20 мА. За цими параметрами підходить трифазний тиристорний регулятор напруги змінного струму LSA – ТНЗР90У.

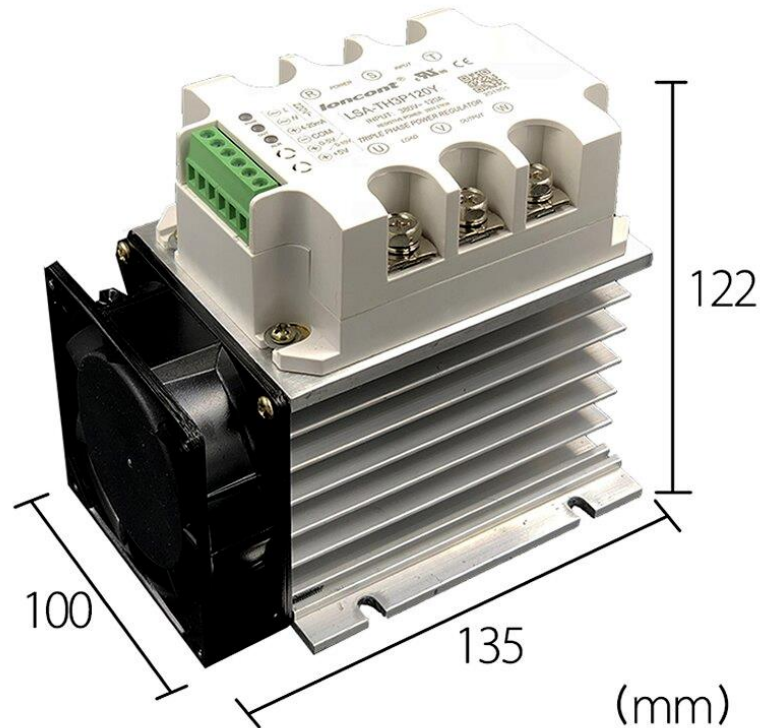


Рис. 1 Загальний вигляд трифазного регулятора напруги змінного струму LSA – TH3P90Y з радіатором та вентилятором охолодження

Особливості виробу:

1. **Не потрібний зовнішній трансформатор, також не потрібне зовнішнє джерело живлення постійного струму + 12 В DC.**
2. Повна ізоляція ланцюгів керування від силового ланцюга. Витримує напругу до 2000 В змінного струму, електронні компоненти безпеки UL.
3. Високотужний тиристор та термостійке мідне керамічне з'єднання (DCB) з радіатором забезпечують високу надійність.
4. Підтримуються всі стандарти сигналів керування (4-20mA, 0-5Vdc, 0-10Vdc, 1-5Vdc, 0-10mA та інші), також можна використовувати ручне управління. Діапазон регулювання вхідного сигналу широкий, точність

- регулювання вихідного сигналу висока, хороша трифазна симетрія, ефективний захист від перешкод
5. Крива вихідних характеристик є лінійною завдяки вбудованій функції лінійної компенсації.
 6. Невисокий рівень гармонічних перешкод має вбудовану схему захисту SCR.
 7. Тиристорний регулятор напруги може адаптуватися до індуктивного навантаження або резистивного навантаження електричного нагріву, підтримує з'єднання з навантаженням трикутником або зіркою.
 8. Тиристорний регулятор напруги також придатний для повільного запуску двигунів змінного струму вентиляторів, насосів тощо з малим пусковим моментом.
 9. Є світлодіодна індикація.
 10. Тиристорний регулятор напруги призначений для трифазного чотирипровідного ланцюга, AC 380V + 10%, частота: 50Hz. Є автоматична ідентифікація послідовності чергування фаз

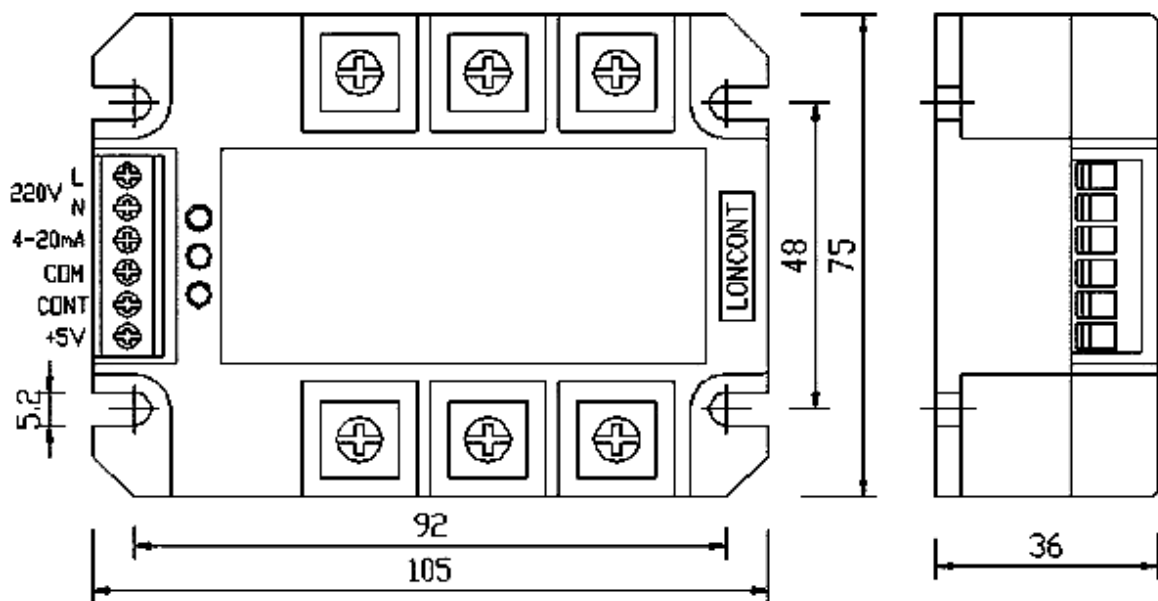


Рис. 2 Габаритні та настановні розміри трифазного регулятора
напруги змінного струму LSA – TH3P90Y

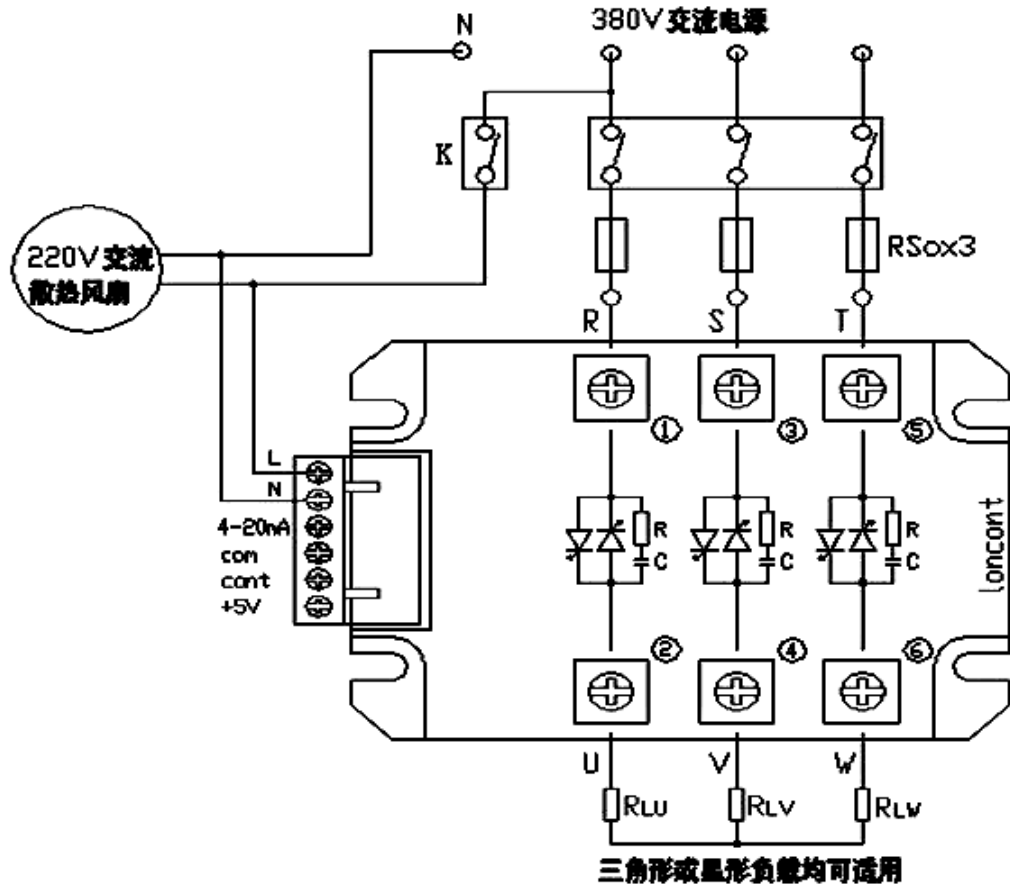


Рис. 3 Схеми підключення силових ланцюгів до трифазного регулятора
напруги змінного струму LSA – TH3P90Y у разі резистивного навантаження
(електропіч)

На рис. 4 показані схеми підключення аналогових керуючих сигналів до
трифазного регулятора напруги змінного струму LSA – TH3P90Y

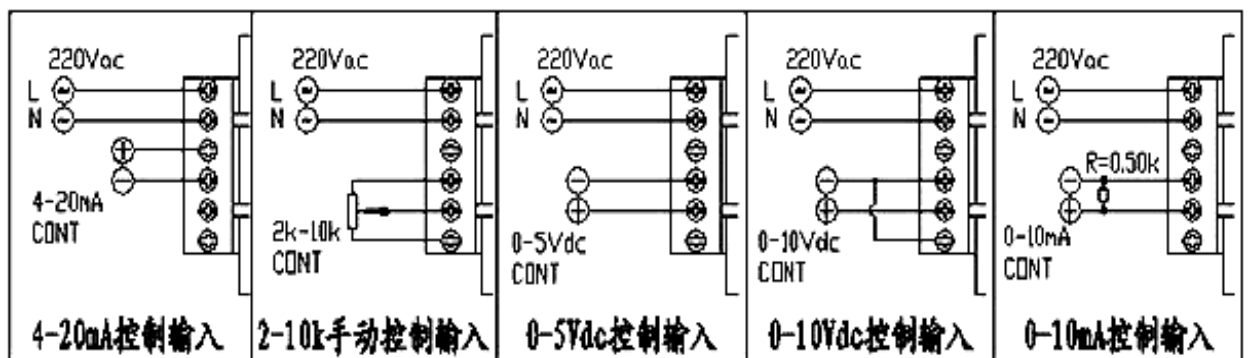


Рис. 4 Схеми підключення аналогових керуючих сигналів до трифазного регулятора напруги змінного струму LSA – TH3P90Y

Підтримуються такі стандартні аналогові керуючі сигнали: 0-5Vdc, 0-10Vdc, 4-20mA, 1-5Vdc, 0-10mA, також можна використовувати потенціометр 2-10K для ручного управління. Напруга 5 проводиться самим модулем, без необхідності зовнішнього живлення.

РОЗДІЛ 6

6.1. ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ.

Економічна частина дипломного проекту відіграє важливу роль у визначенні доцільності модернізації системи автоматичного регулювання температури електропечі.

Проект спрямований на впровадження ПДД-регулятора, що дозволяє підвищити якість керування тепловим процесом, покращити стабільність системи та зменшити витрати на експлуатацію. У зв'язку з цим розрахунки проводяться з метою оцінки економічної ефективності впровадження нової автоматизованої системи, враховуючи витрати на її створення та подальшу експлуатацію.

Основною метою економічної частини є обґрунтування раціональності інвестицій у впровадження системи автоматичного регулювання та підтвердження її фінансової доцільності.

Проект охоплює як первинні витрати на розробку та встановлення системи, так і потенційні вигоди, які можна отримати від скорочення експлуатаційних витрат і підвищення ефективності роботи електропечі.

6.2 РОЗРАХУНОК ВАРТОСТІ КОНСТРУКТОРСЬКИХ РОБІТ

Процес модернізації системи автоматичного регулювання температури електропечі потребує розробки технічної документації, що включає структурні, електричні та функціональні схеми. Основна мета цієї документації — забезпечити детальні інструкції для монтажу, налаштування й експлуатації нової системи.

Конструкторська робота вимагає значних трудових витрат, оскільки включає залучення спеціалістів, зокрема інженерів та технічних працівників, для створення технічних рішень.

Для розрахунку витрат на заробітну плату на конструкторську роботу використовується погодинна ставка оплати праці провідного спеціаліста, яка становить 400 грн/год. Ставка включає основну заробітну плату та додаткові витрати, що виникають у процесі розробки документації.

У таблиці 6.1 наведені основні види робіт, обсяг необхідного часу для їх виконання та загальна вартість.

Таблиця 6.1. Розрахунок витрат на розробку ПКД

Найменування робіт	Тривалість, людино-години	Вартість, грн.
Розробка структурної схеми	16	6400,00
Розробка електричної схеми	8	3200,00
Підготовка пояснювальної записки	10	4000,00
Загальна вартість	-	13600,00

1. Розробка структурної схеми включає визначення основних елементів системи та їх взаємозв'язків, що дозволяє ефективно управляти температурними режимами електропечі.

2. Розробка електричної схеми передбачає визначення всіх електричних з'єднань між компонентами системи, що є необхідним для безпечного та надійного функціонування обладнання.

3. Підготовка пояснювальної записки забезпечує документування принципів роботи системи, рекомендації з експлуатації та технічні характеристики нового обладнання.

Загальна вартість розробки проектно-конструкторської документації становить 13 600 грн. Ці витрати враховуються як частина початкових інвестицій у модернізацію, оскільки без відповідної документації неможливо забезпечити коректне функціонування системи.

6.3. РОЗРАХУНОК СОБІВАРТОСТІ МОНТАЖНО-НАЛАГОДЖУВАЛЬНИХ РОБІТ

Монтажно-налагоджувальні роботи включають витрати на встановлення обладнання, підключення електричних елементів, налаштування ПД-регулятора та тестування системи на відповідність заданим параметрам. Якісне виконання цих робіт забезпечує стабільну і надійну роботу системи в реальних умовах експлуатації.

Основними статтями витрат є заробітна плата працівників, які виконують монтаж і налаштування, а також вартість матеріалів і технічних засобів, що використовуються в процесі робіт. Для обчислення вартості робіт використовується погодинна ставка в 400 грн/год, яка включає основну оплату праці та додаткові витрати, пов'язані з виконанням робіт у виробничих умовах.

Розрахунок витрат на оплату праці робітників представлено в таблиці 6.2.

Таблиця 6.2. Розрахунок витрат на монтажно-налагоджувальні роботи

Вид роботи	Трудоємність, людино-години	Вартість, грн.
------------	--------------------------------	----------------

Монтаж обладнання	20	8000,00
Налагоджувальні роботи	10	4000,00
Загальна вартість	-	12000,00

1. Монтаж обладнання включає встановлення ПІД-регулятора та додаткових компонентів системи керування, підключення їх до джерел живлення та інших елементів обладнання. Роботи виконуються з урахуванням технічних вимог та стандартів безпеки.
2. Налагоджувальні роботи охоплюють налаштування параметрів ПІД-регулятора, тестування роботи системи та корекцію налаштувань для досягнення оптимальних показників. На цьому етапі також перевіряється робота системи під різними температурними навантаженнями, що дозволяє забезпечити її стабільну роботу.

Загальна вартість монтажних-налагоджувальних робіт становить 12 000 грн. Ці витрати є необхідні для забезпечення правильного функціонування системи та підвищення її надійності в умовах промислової експлуатації.

6.4. КОШТОРИС ДОДАТКОВИХ КАПІТАЛЬНИХ ВКЛАДЕНЬ

Додаткові капітальні вкладення включають витрати на нове обладнання, матеріали та електроенергію. Ці витрати є важливими для забезпечення ефективності та продуктивності проекту, адже без належного технічного забезпечення неможливо досягти бажаних результатів. Сумарна вартість додаткових капітальних вкладень наведена в таблиці 6.3.

Таблиця 6.3. Додаткові капітальні вкладення

Вид капітальних вкладень	Вартість, грн.
Вартість обладнання	50000,00
Вартість матеріалів	10000,00
Витрати на електроенергію	2000,00
Загальна вартість	62000,00

Вартість додаткових капітальних вкладень складається з:

1. Вартість обладнання (50 000,00 грн): це основна частина капітальних вкладень, яка забезпечує технологічну базу для виконання робіт. Використання обладнання дозволяє знизити витрати на обслуговування, підвищити продуктивність та забезпечити високу якість виконання завдань.
2. Матеріальні витрати (10 000,00 грн): інвестиції для забезпечення процесу виробництва. Вони включають не лише сировину, а й допоміжні матеріали, які використовуються у виробничих процесах.
3. Витрати на електроенергію (2 000,00 грн) відображають потреби проекту в електричній енергії, що є важливим ресурсом для роботи обладнання.

Таким чином, загальна вартість додаткових капітальних вкладень становить 62 000,00 грн, що є оптимальним рішенням для реалізації даного проекту. У подальшому, інвестиції в ці напрямки дозволять досягти підвищення ефективності та конкурентоспроможності підприємства, що є важливим фактором у сучасних умовах ринку.

6.5 РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ

Впровадження ПД-регулятора дозволяє знизити споживання електроенергії та зменшити експлуатаційні витрати. Економія досягається за рахунок зниження потужності на 15% та скорочення витрат на обслуговування. Загальна економія складає 25 000 грн на рік, що дозволяє окупити інвестиції за 2,5 роки.

Зазначені показники свідчать про високу ефективність реалізації проекту, оскільки період окупності інвестицій є коротким і свідчить про позитивний фінансовий результат. Зниження витрат на електроенергію є важливим фактором не лише для зменшення витрат підприємства, а й для зниження негативного впливу на навколишнє середовище.

Впровадження системи забезпечує:

1. Покращення умов експлуатації: Впровадження ПД-регулятора також підвищує надійність і стабільність роботи обладнання, що, в свою чергу, зменшує ймовірність аварійних ситуацій і непередбачених витрат на ремонт.
2. Зниження витрат на обслуговування: Зменшення потреби в обслуговуванні обладнання та зменшення частоти технічних оглядів є важливими для оптимізації ресурсів. Це звільняє час і ресурси персоналу, які можуть бути перенаправлені на інші важливі задачі.
3. Екологічні вигоди: Скорочення споживання електроенергії не тільки знижує витрати, але й сприяє зменшенню викидів вуглекислого газу та інших забруднювальних речовин. Це позитивно вплине на екологічну ситуацію в регіоні та може покращити імідж підприємства як екологічно свідомого.
4. Можливість реінвестування: Економія коштів, отримана від впровадження ПД-регулятора, може бути використана для

фінансування нових проектів, що в свою чергу може сприяти подальшому розвитку і модернізації виробництв.

Впровадження ПД-регулятора є економічно ефективним і стратегічно обґрунтованим напрямком підвищення ефективності підприємства, що підтверджується коротким терміном окупності та значними довгостроковими перевагами.

6.6 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ

Таблиця 6.3. Додаткові капітальні вкладення

№	Найменування показника	Аналог (база)	Пропонований варіант
1	2	3	4
Технічні показники			
1	Тип керування	ручний	автоматичний(ПІД-регулятор)
2	Кількість контролюючих параметрів	1	3(температура, потужність нагріву, час)
3	Споживча потужність, кВт.	575	480
4	Чисельність персоналу, люд.	1	1
5	Кваліфікація персоналу, розряд	6	5

Таблиця 6.3. Додаткові капітальні вкладення

№	Найменування показника	Пропонований варіант
1	2	4
Економічні показники		
1	Додаткові капітальні вкладення, грн	1 200 000
2	Загальна величина економії, в т.ч.:	750 000
	- за рахунок зменшення потужності, що споживається	400 000
	- за рахунок економії на оплаті праці завдяки підвищенню ефективності управління системою	350 000
3	Термін окупності капітальних вкладень, рік:	2,4

ВИСНОВКИ

В даній дипломній роботі розглядається проблема модернізації системи автоматичного регулювання (САР) температури електропечі з використанням ПД-регулятора, що є стандартом для керування тепловими процесами. Основною метою є поліпшення якості регулювання температури за рахунок зменшення динамічної похибки і запобігання стрибкам потужності, які виникають при використанні релейних двопозиційних регуляторів.

Для модернізації системи автоматичного регулювання температури електропечі СНЗ-6.12.4/10-І2 рекомендується впровадження ПД-регулятора, який забезпечує високу точність керування та стабільність процесу нагріву. Використання ПД-регулятора дозволяє мінімізувати коливання температури в межах $\pm 5^{\circ}\text{C}$, що позитивно впливає на якість термічної обробки металів та знижує витрати енергії.

Для підвищення ефективності системи рекомендується замінити електромеханічний комутатор на твердотільний напівпровідниковий регулятор напруги, що забезпечить плавний нагрів та виключить різкі стрибки потужності. Це рішення підвищить надійність роботи системи, продовжить строк служби обладнання та зменшить навантаження на електромережу.

Для точної ідентифікації динамічних параметрів електропечі доцільно використовувати методи моделювання в середовищі VisSim. Це дозволить уникнути проведення небезпечних експериментів на реальному обладнанні, а також забезпечить оптимальні параметри налаштування ПД-регулятора, що сприятиме стабільності та надійності процесу.

Впровадження сучасних засобів автоматизації та модернізації системи регулювання дозволить значно покращити ефективність термічної обробки, знизити енергоспоживання та підвищити безпеку експлуатації електропечі.

Список використаної літератури

1. Попович М. Г. , Ковальчук О. В. Теорія автоматичного керування: Підручник. — К. : Либідь, 2007. — 656 с..
2. А.П.Ладанюк, К.С.Архангельська. Теорія автоматичного керування (частина I): Конспект лекцій. – К.: НУХТ, 2007. – 102 с..
3. Характеристики печі супротиву камерної СНЗ-6.12.4/10-И2.
<https://electro.mashinform.ru/ehlektropечи-kamernye-v-tom-chisle-s-vydvizhnym-podom-precizionnye/jelektropечh-soprotivlenija-kamernaja-snz-6-12-4-10-i2-obj5121.html>
4. Автоматизація управління електричними печами.
<http://www.electrolibrary.info/12-avtomatizaciya-upravleniya-elektricheskimi-70pechami.html>;
5. Технологія процесу и способи гартування сталі.
<https://wikimetall.ru/metalloobrabotka/zakalka-stali.html>
6. С.В. Іносов, В.М. Корнієнко. Оптимізація алгоритму автоматичного регулювання тепловими процесами. Управління розвитком складних систем. – № 13, 2013, – с. 104-108
7. Іносов С. В., Бондарчук О.В. Зв'язок похибок вимірювання температури з динамікою регулювання теплового об'єкту. Управління розвитком складних систем. – № 35, 2018, – с. 162-166.
8. Вимірювач-регулятор програмний ТРМ251. Посібник з експлуатації. - ОВЕН, www.owen.ua -95 с.



Ідентифікація динамічних параметрів електропечі в режимі релейного автоматичного регулювання температури з метою апгрейду регулятора

ДОДАТОК 1

Виконав студент групи АКІТ-2М

Стовбун Михайло Юрійович

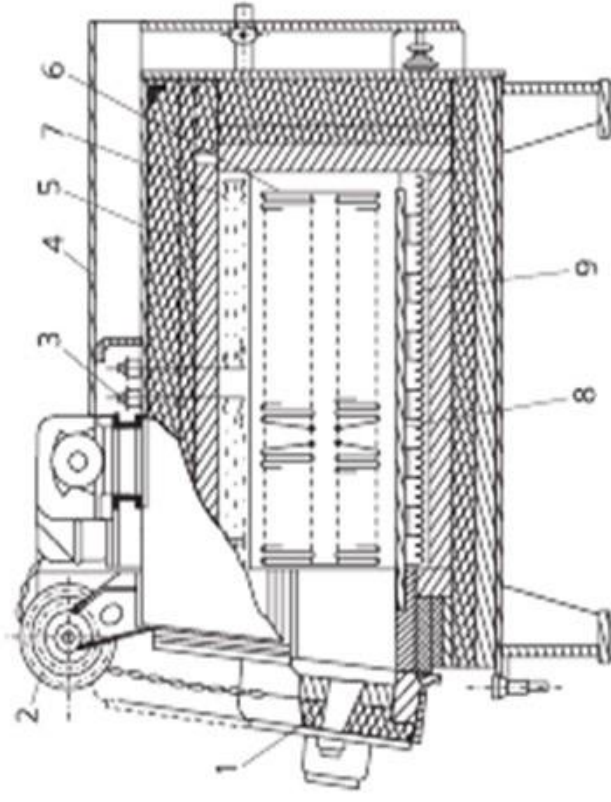
Керівник проекту

Іносов Сергій Вікторович

Метою даного проекту є:

- Комплексна модернізація системи автоматичного регулювання температурного режиму промислової електропечі з метою підвищення точності та ефективності роботи обладнання в умовах промислової експлуатації.
- Проект передбачає впровадження сучасного ПІД-регулятора, що забезпечує надійне регулювання температури шляхом зменшення динамічної похибки та уникнення різких коливань потужності.
- Завдяки використанню даного регулятора досягається оптимізація енергоспоживання, що сприяє зниженню експлуатаційних витрат, подовженню терміну служби обладнання та підвищенню продуктивності.
- Крім того, модернізація має на меті створення умов для безпереймкого функціонування системи в умовах високих навантажень і забезпечення безпеки персоналу в процесі експлуатації.
- Реалізація даного проекту спрямована на поліпшення якості управління тепловими процесами та підвищення економічної ефективності виробництва.

1. Технічні характеристики камерної електропечі опору



Деталі, що нагрівають, завантажуються через завантажувальне вікно на жароміцний лист 8 у піч, нагріваються від нагрівальних елементів 6 і 9, по закінченню технологічного процесу, вивантажуються з печі. Дверцята печі 1 відкриваються за допомогою механізму 2.

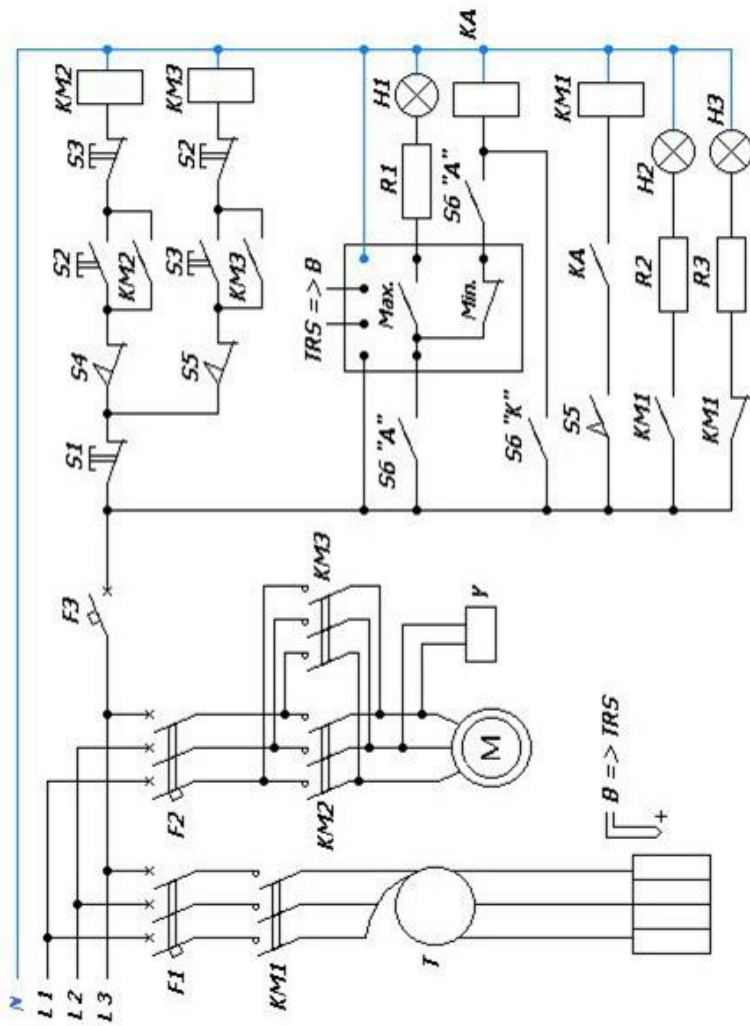
Для виміру температури використовуються термопари 3, закріплені на металевому кожусі 4. Футерівка печі 5 складається із внутрішнього вогнетривкого шару й зовнішнього теплоізоляційного.

В даному дипломному проєкті буде проводитись модернізація камерної електропечі на базі моделі електропечі СНЗ-6.12.4/10-І2

Потужність встановлена, кВт	57,5
Розміри робочого простору, мм: ширина × довжина × висота	600 × 1200 × 400
Номінальна температура, °С	1000
Витрата контрольованої атмосфери, м3/год	до 8
Напруга мережі живлення, В	380
Частота мережі живлення, Гц	50
Число фаз нагрівача	3

Таблиця 1. Параметри електропечі СНЗ-6.12.4/10-І2

Електрична схема печі опору до модернізації алгоритму регулювання.



- 1-Автовимикач нагрівання (F1), електропривод двертят (F2) та ланцюгів управління технікою (F3); 2-Проміжне реле контактора нагрівальних елементів (KA); 3-Контактор елементів нагрівання (KM1); 4-Пічний автотрансформатор (T); 5-Термодагчик (B); 6-Електромагнітне гальмо (Y); 7- Кнопка стоп (S1), рухи пічних дверей вгору (S2), рухи пічних дверей вниз (S3), вимикачі (S4) та (S5), перемикання роботи печі (S6); 8-Двигун приводу пічних дверей (M); 9-Терморегулятор релейний двонозційний (TRS); 10-Сигнальна лампа перевищення допустимої температури (H1), включення (H2) та вимикання нагрівача (H3). 11-Додаткові резистори сигнальних ламп R1, R2 та R3.

2. Завдання системи автоматичного регулювання (САР) температури електропечі:

Цілі апгрейду (модернізації) системи керування піччю опору СНЗ-

6.12.4/10 наступні:

- зменшення похибки регулювання температури печі до діапазону $\pm 5^{\circ}\text{C}$;
 - покращення ергономіки праці операторів техпроцесу.
- виключення різких стрибків споживаної від мережі електричної потужності.

Пропонований спосіб досягнення мети:

- Пропонується замінити релейний двопозиційний регулятор на регулятор з пропорційно-інтегрально-диференціюючим (ПІД) алгоритмом регулювання. Доведено, що ПІД алгоритм регулювання температури близький до ідеального і не може бути покращений [6].
- Пропонується замінити дискретний двопозиційний регулюючий орган (електромеханічний комутатор) регулюючий орган безперервної дії (твердотільний напівпровідниковий регулятор напруги).

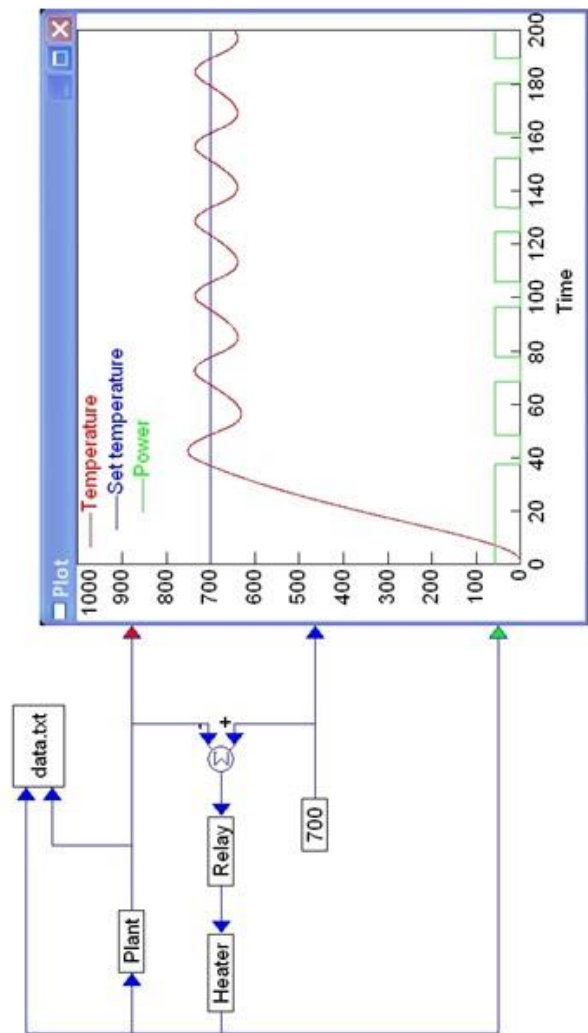


Рис. 1 Модель САР температури електропечі з релейним двопозиційним регулятором. Копія екрану VisSim

На стадії відпрацювання методики експеримент на об'єкті, що діє, був замінений його імітацією на динамічній комп'ютерній моделі.

На малюнку 1 наведено модель динаміки системи автоматичного регулювання (САР) температури електропечі з релейним двопозиційним регулятором у програмному середовищі VisSim.

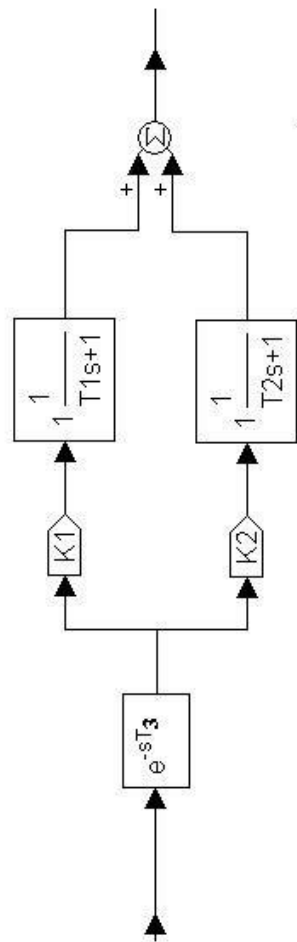


Рис. 3 Універсальна динамічна модель теплового об'єкта регулювання в паралельному варіанті.

Загальна передаточна функція об'єкта $W(s)$ може бути отримана з використанням правил еквівалентних перетворень структурних схем і алгебраїчних перетворень передаточних функцій. Послідовне з'єднання ланок відповідає добутку, паралельне з'єднання відповідає сумі передаточних функцій.

$$W(s) = e^{-sT_3} \cdot \left(\frac{K_1}{T_1 \cdot s + 1} + \frac{K_2}{T_2 \cdot s + 1} \right)$$

На практиці зручніше використовувати цю формулу в більш простій еквівалентній формі.

$$W(s) = \frac{K \cdot e^{-sT_3}}{(T_1 \cdot s + 1) \cdot (T_2 \cdot s + 1)}$$

Де $K = K_1 + K_2$ – це статичний коефіцієнт передачі об'єкта.

ІДЕНТИФІКАЦІЯ ДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ОБ'ЄКТА РЕГУЛЮВАННЯ

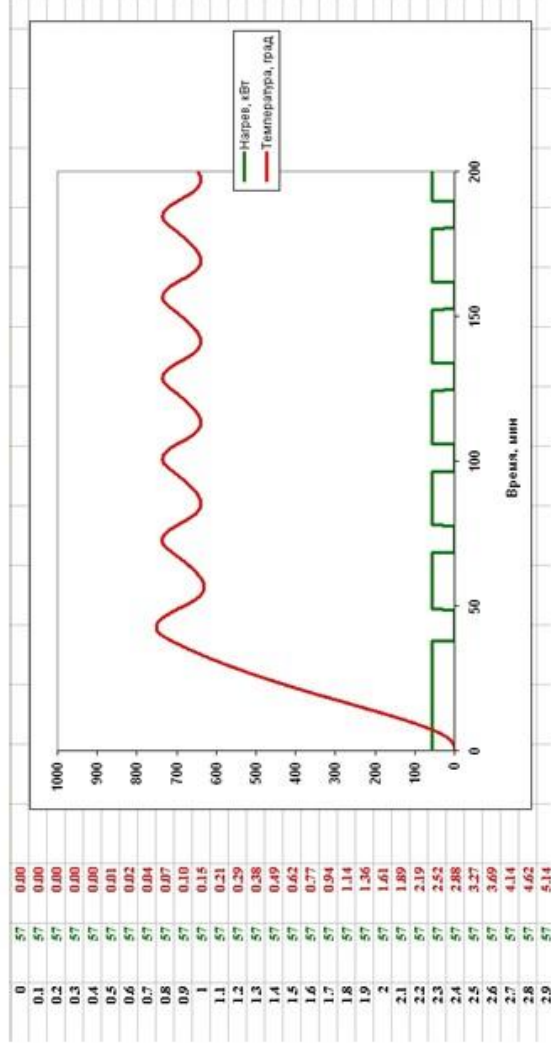


Рис. 1 Вихідні експериментальні дані

На рис. 1 представлені вихідні експериментальні дані, отримані розділ «Імітація експерименту на моделі». Це осцилограми зміни потужності нагріву в кВт та температури у град. При релейному двопозиційному регулюванні температури. Дані отримані періодичною вибіркою значень із періодом 0.1 хв. Відповідні осцилограми відображені на графіку.

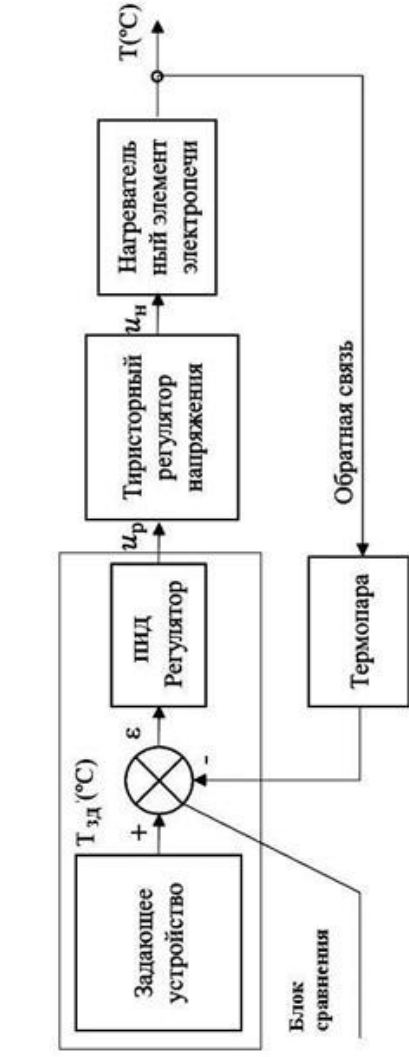


Рис. 1 Структурная схема САР температуры с ПИД-регулятором

Впровадження ПИД-регулювання дозволить досягти наступних переваг:

- Забезпечення плавного нагріву (охолодження)
- Високу точність підтримання заданої температури
- Виключення великих кидків потужності, яка споживається від електромережі, при включеннях (вимиканнях) нагрівача.

РОЗРАХУНОК ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ НАСТРОЮВАННЯ ПІД-РЕГУЛЯТОРА

Використовуються наступні формули для розрахунку оптимальних параметрів настроювання параметрів ПІД-регулятора в залежності від відомих параметрів об'єкта регулювання [7]:

Коефіцієнт пропорційності

$$K_p = F \frac{T_1 + T_2}{K \cdot T_3}$$

Стала часу диференціювання

$$T_d = \frac{T_1 \cdot T_2}{T_1 + T_2}$$

Стала часу інтегрування

$$T_i = T_1 + T_2$$

Де:

K – статичний коефіцієнт передачі об'єкта

T_1, T_2 – основна і додаткова сталі часу об'єкта

T_3 – час запізнення об'єкта

F – коректуючий множник;

$F=0.4$ (перерегулювання не припустиме)

$F=0.5$ (допускається перерегулювання)

МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ САР ТЕМПЕРАТУРИ З ПІД-РЕГУЛЯТОРОМ

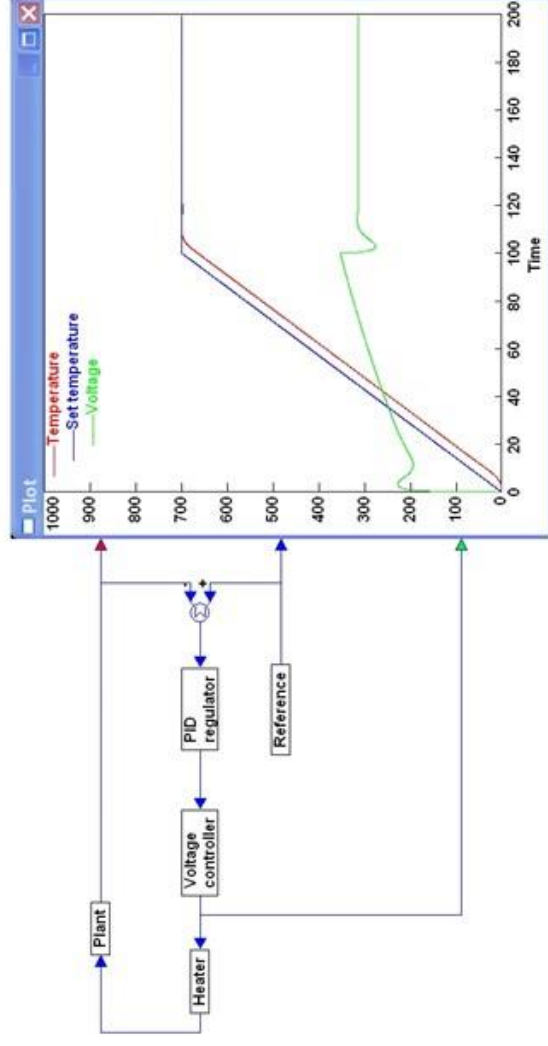


Рис. 1 Структурна схема моделі динаміки САР температури з ПД-регулятором

На осцилограф Plot відображається практично ідеальний процес програмного підйому температури до 700 град. за 100 хв. Наявність невеликого запізнення (5 хв.) температури щодо завдання даного технологічного процесу абсолютно несуттєво. Напряга живлення нагрівача змінюється плавно, без стрибків.

Чисельні значення параметрів об'єкта регулювання за результатами ідентифікації:

Параметр	Значення за основним варіантом №1	Значення за варіантом №2	Розмірність
K	18	18	град/квт
T1	20,1	14,9	хв.
T2	10,1	14,9	хв.
T3	1,9	1,9	хв.

В результаті розрахунку за формулами отримані наступні оптимальні чисельні значення параметрів настроювання ПД-регулятора (для $F=0.4$):

Параметр	Значення за основним варіантом №1	Значення за варіантом №2	Розмірність
K_p	0.354	0,348	кВт/град
T_i	30,2	30	хв.
T_{cp}	6,75	7,4	хв.

Хоча параметри об'єкта регулювання досить сильно відрізняються за варіантами ідентифікації, розрахункові параметри настроювання ПД-регулятора практично співпадають (в межах припустимої похибки)

ПРОГРАМНИЙ ОДНОКАНАЛЬНИЙ ПІД-РЕГУЛЯТОР ТРМ-251

На рис.1 показано загальний вигляд програмного одноканального регулятора ТРМ-251 [8], обраного для регулювання температури електропечі СНЗ-6.12.4/10-І2



Рис. 1 Загальний вигляд програмного одноканального регулятора ТРМ-251

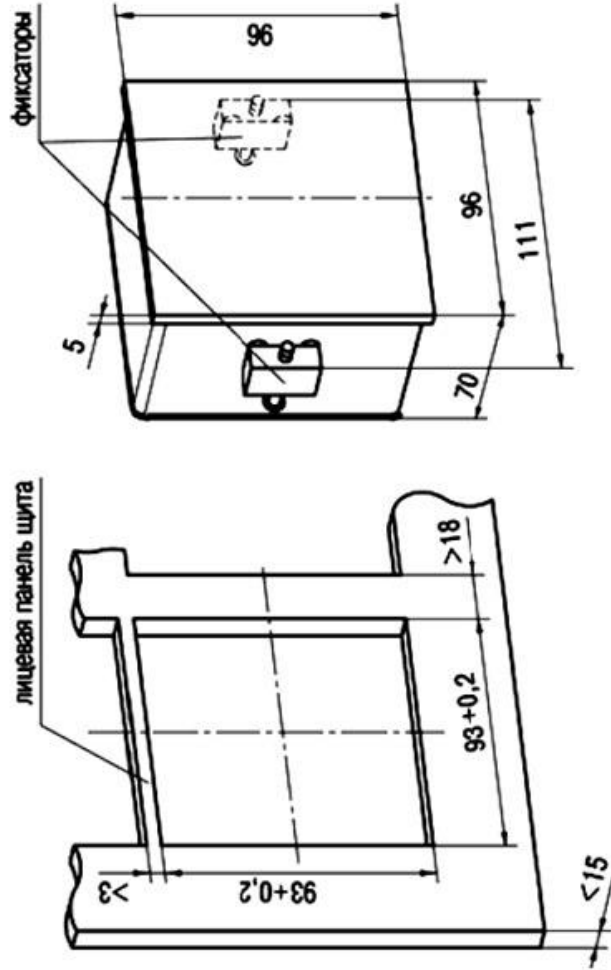


Рис. 4 Монтажные та габаритні розміри програмного
одноканального регулятора ТРМ-251

ДАТЧИК ТЕМПЕРАТУРИ



Рис. 1 Зовнішній вигляд термопары ТПК 135

Для вимірювання для вимірювання температури в робочому просторі печі необхідний аналоговий датчик температури, що нержавіє і має діапазон вимірювання від 0 до 1000 град С. Цим умовам задовольняє термопара.

Модель	ТПК 135
Тип термометри	(НСХ) К (ХА)
Діапазон вимірювання температури	-40 ... 1200 °С
Довжина монтажної частини	400 мм
Постійна часу теплової інерції	не більше 30 с
Виконання робочого спаю щодо корпусу	ізолюваний
Діаметр термоелектроду	3,2 мм
Опір ізоляції не менше	100 Мом
Вихідний сигнал	до 20 мV

Таблиця 1. Показники датчика температури

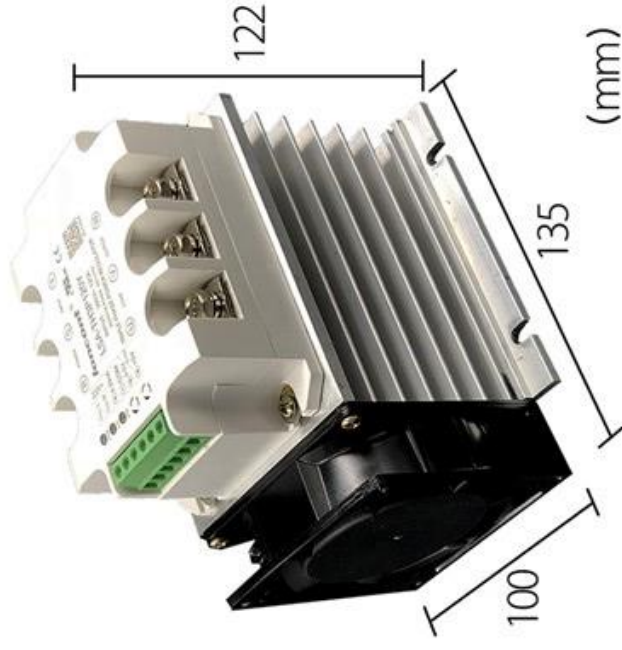


Рис. 1 Загальний вигляд трифазного регулятора напруги змінного струму LSA – ТНЗР90У з радіатором та вентилятором охолодження

Як регулюючий орган потужності нагріву електро-печі вибираємо трифазний тиристорний регулятор напруги змінного струму LSA – ТНЗР90У НА 90 А. Переваги використання тиристорних регуляторів полягають у простоті конструкції, невисокій вартості та високій надійності роботи.

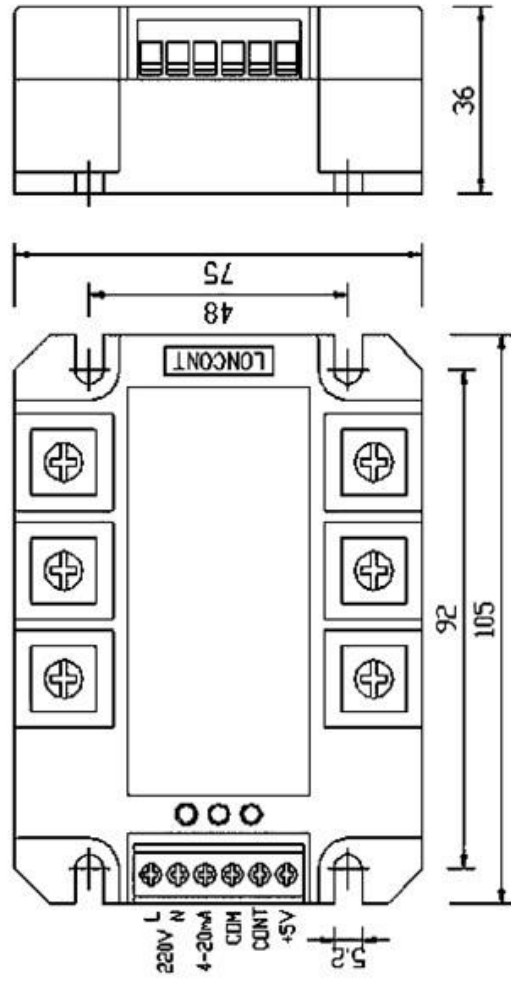


Рис. 2 Габаритні та настановні розміри трифазного регулятора
напруги змінного струму LSA – ТНЗР90У

Економічна частина

Техніко-економічні показники

№	Найменування показника	Аналог (базис)	Пропонований варіант
1	2	3	4
Технічні показники			
1	Тип керування	ручний	автоматичний(ПІД-регулятор)
2	Кількість контролюючих параметрів	1	3(температура, потужність нагріву, час)
3	Споживаємо потужність, кВт.	575	480
4	Норма обслуговування, чол.	1	1
5	Кваліфікаційний рівень персоналу	6	5
Економічні показники			
7	Величина додаткових капітальних вкладень	-----	1 200 000
8	Загальна величина економії, в т.ч.:	-----	750 000
9	- за рахунок зменшення потужності, що споживається	-----	400 000
10	- за рахунок зменшення фонду оплати праці у результаті зниження кваліфікаційного рівня працівників	-----	350 000
11	Термін окупності капітальних вкладень	-----	2,4

Запропонований варіант удосконалення передбачає автоматизацію управління і розширення параметрів контролю, що підвищує ефективність та надійність роботи. Завдяки зниженню енергоспоживання та вимог до кваліфікації персоналу зменшуються експлуатаційні витрати. Додаткові інвестиції швидко окупуються за рахунок значної економії, що робить проект фінансово вигідним.

Висновки

В даній дипломній роботі розглядається проблема модернізації системи автоматичного регулювання (САР) температури електропечі з використанням ПІД-регулятора, що є стандартом для керування тепловими процесами. Основною метою є поліпшення якості регулювання температури за рахунок зменшення динамічної похибки і запобігання стрибкам потужності, які виникають при використанні релейних двопозиційних регуляторів.

Для модернізації системи автоматичного регулювання температури електропечі СНЗ-6.12.4/10-12 рекомендується впровадження ПІД-регулятора, який забезпечує високу точність керування та стабільність процесу нагріву. Використання ПІД-регулятора дозволяє мінімізувати коливання температури в межах $\pm 5^{\circ}\text{C}$, що позитивно впливає на якість термічної обробки металів та знижує витрати енергії.