

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Факультет інформаційних технологій
Кафедра автоматизації, комп'ютерних наук і технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеню вищої освіти-магістр
за освітньо-професійною програмою

«Кіберфізичні системи в промисловості, бізнесі та транспорті»

зі спеціальності

174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

тема роботи:

*«Автоматизація та оптимізація процесу нагрівання заготівель в методичній
печі прокатного стану»*

Виконав ст. гр. АКТР-24-2м

Аркуша Д.О.

Керівник

Тиханський М.П.

Нормоконтроль

Маринич І.А.

Завідувач кафедри

Рубан С.А.

КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**Факультет:** інформаційних технологій**Кафедра:** автоматизації, комп'ютерних наук і технологій**Ступінь вищої освіти:** Магістр**Спеціальність:** 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка**ЗАТВЕРДЖУЮ**Зав. кафедри: к.т.н. Рубан С.А.«15» липня 2025 р.**ЗАВДАННЯ**
на кваліфікаційну роботу магістрастуденту групи АКІТР-24-1м Аркуші Денису Олександровичу**1. Тема кваліфікаційної роботи:** «Автоматизація та оптимізація процесу нагрівання заготівель в методичній печі прокатного стану»

затверджено наказом по університету № 258с від 13.05.2025.

2. Термін здачі кваліфікаційної роботи: 01.12.2025 р.**3. Склад кваліфікаційної роботи:** Пояснювальна записка, додатки, презентація у Microsoft PowerPoint в електронному та друкованому вигляді**4. Консультанти кваліфікаційної роботи:**Розділ 1-3 доц. Тиханський М.П.Нормоконтроль доц. Маринич І. А.

5. Календарний план:

№	Етапи роботи	Термін виконання
1	<i>Вступ</i>	14.05.25
2	<i>Розділ 1</i>	20.05.25
3	<i>Розділ 2</i>	18.08.25
4	<i>Розділ 3</i>	19.09.25
5	<i>Висновки</i>	15.10.25
6	<i>Оформлення кваліфікаційної роботи</i>	20.11.25
7	<i>Підготовка презентації та графічного матеріалу</i>	28.11.25
8	<i>Підготовка доповіді до захисту</i>	01.12.25

6. Дата видачі завдання: 13.05.2025р

Керівник _____ /Тиханський М.П. /

7. Запевнення: Я, Аркуша Денис Олександрович, запевняю, що ця кваліфікаційна робота виконана самостійно, не містить академічного плагіату, фабрикації, фальсифікації. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Із чинним Положенням про академічну доброчесність Криворізького національного університету з метою запобігання та виявлення академічного плагіату в роботах здобувачів вищої освіти ознайомлена. Чітко усвідомлюю, що в разі виявлення у кваліфікаційній роботі умисних порушень робота не допускається до захисту або оцінюється незадовільно.

Здобувач _____ /Аркуша Денис Олександрович /

АНОТАЦІЯ

Аркуша Д.О. Автоматизація та оптимізація процесу нагрівання заготівель в методичній печі прокатного стану : кваліфікаційна робота магістра : 174 – Автоматизація, комп'ютерно – інтегровані технології та робототехніка. Кривий Ріг.Криворізький національний університет, 2025. 84 с.

Об'єктом дослідження є процес нагрівання металевих заготівель у методичній печі прокатного стану.

Предметом дослідження є методи, засоби, моделі та алгоритми автоматизації і оптимального керування температурними та енергетичними параметрами методичної печі.

Метою даної роботи є розробка та дослідження системи автоматизації та оптимізації процесу нагрівання заготівель у методичній печі прокатного стану, що забезпечує підвищення енергоефективності, стабільності та якості технологічного процесу.

В роботі сформуваа імітаційна модель САК температурою, яка відтворює поведінку реального об'єкта у різних режимах роботи; обґрунтовано метод синтезу системи автоматичного регулювання з урахуванням специфіки динаміки об'єкта керування, обрані відповідні критерії якості та розраховані параметри температурного регулятора тризонної методичної печі; досліджено вплив співвідношення параметрів регулятора на показники якості системи, проведено порівняльний аналіз результатів і визначино умови, що забезпечують ефективне налаштування ПІД-регулятора температури. Створене програмне забезпечення може бути використане у виробничих умовах для реалізації автоматизованого контролю температури, підвищення енергоефективності процесу та стабілізації параметрів технологічної системи.

Ключові слова:

АВТОМАТИЗАЦІЯ, МОДЕЛЬ, ОПТИМІЗАЦІЯ, НАГРІВАЛЬНА ПІЧ, ПРОКАТНИЙ СТАН, РЕГУЛЯТОР, ТЕМПЕРАТУРА, ТЕПЛОВИЙ РЕЖИМ .

ANNOTATION

Arkusha D.O. Automation and optimization of the process of heating billets in a methodical furnace of a rolling mill: master's thesis: 174 – Automation, computer-integrated technologies and robotics. Kryvyi Rih. Kryvyi Rih National University, 2025. 84 p.

The object of the study is the process of heating metal billets in a methodical furnace of a rolling mill.

The subject of the study is methods, tools, models and algorithms for automation and optimal control of temperature and energy parameters of a methodical furnace.

The purpose of this work is to develop and study a system for automation and optimization of the process of heating billets in a methodical furnace of a rolling mill, which ensures increased energy efficiency, stability and quality of the technological process.

In the work, a simulation model of the SAK temperature was formed, which reproduces the behavior of a real object in different operating modes; The method of synthesizing the automatic control system is substantiated, taking into account the specifics of the dynamics of the control object, the appropriate quality criteria are selected and the parameters of the temperature controller of the three-zone methodical furnace are calculated; the influence of the ratio of the controller parameters on the system quality indicators is investigated, a comparative analysis of the results is carried out and the conditions that ensure the effective adjustment of the PID temperature controller are determined. The created software can be used in production conditions to implement automated temperature control, increase the energy efficiency of the process and stabilize the parameters of the technological system.

Keywords:

AUTOMATIZATION, MODEL, OPTIMIZATION, HEATING FURNACE, ROLLING MILL, CONTROLLER, TEMPERATURE, THERMAL MODE.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	8
ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ, ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ПІДХОДІВ ДО ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АВТОМАТИЗАЦІЇ	12
1.1 Галузь промисловості	12
1.2 Технологія послідовності виробництва прокату	13
1.3 Об'єкт керування	19
1.4 Структура системи керування	24
1.5 Постановка завдання дослідження.....	27
Висновки до розділу	27
РОЗДІЛ 2. ІДЕНТИФІКАЦІЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТА СИНТЕЗ І МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ	29
2.1 Модель системи автоматичного керування	29
2.2 Критерії якості функціонування системи керування	36
2.3 Синтез системи автоматичного керування	36
2.4 Дослідження якості роботи системи автоматичного керування	40
Висновки до розділу	45
РОЗДІЛ 3. ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ	47
3.1 Структурна схема системи регулювання витрати палива та повітря оптимального керування нагрівом	47
3.2 Структурна схема двоконтурної системи автоматичної оптимізації...	49
3.3 Система автоматичної оптимізації процесу спалювання палива.....	50
3.4 Робота контурів у системі автоматичної оптимізації теплового режиму	52

3.5 Створення Matlab моделі для об'єкта керування	53
3.6 Створення програмного забезпечення для автоматизованої системи керування	57
3.7 Створення програмного забезпечення людино-машинного інтерфейсу	60
3.8 Перевірка функціонування програмного забезпечення	64
Висновки до розділу	66
ВИСНОВКИ	68
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	70
ДОДАТОК А.....	73
ДОДАТОК Б.....	78
ДОДАТОК В.....	83

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АСК – автоматизована система керування;

АСКП – автоматизована система керування підприємством;

АСК ТП – автоматизована система керування технологічним процесом;

ВМ – виконавчий механізм;

ЛМІ – людино-машинний університет;

ОК – об'єкт керування;

ПІД-регулятор – пропорційний інтегральний та диференціальний регулятор;

ПЛК – програмований логічний контролер;

САР – система автоматичного регулювання;

САК – система автоматизованого керування;

ТЗА – технічні засоби автоматизації;

ТК – технологічний комплекс;

ТП – технологічний процес;

ВСТУП

Металургійна промисловість є стратегічно важливою галуззю національної економіки, що забезпечує виготовлення широкого спектра металопродукції для машинобудування, будівництва, енергетики та інших секторів. На сучасному етапі розвитку виробництва перед підприємствами стоять завдання підвищення продуктивності та якості продукції при одночасному зменшенні витрат енергоносіїв, зниженні собівартості та мінімізації негативного впливу на навколишнє середовище. Одним із ключових етапів технологічного маршруту виготовлення металопродукції є підготовка заготівель до деформаційної обробки тиском, що передбачає їх нагрівання у методичних печах.

Методичні печі прокатних станів забезпечують створення необхідного температурного режиму для гарячої прокатки, оскільки якість і рівномірність нагрівання металу визначають стабільність процесу деформації, пластичність заготівель, енергетичні витрати та показники якості готової продукції. Процес нагрівання характеризується складними теплотехнічними процесами, значними інерційними властивостями, мультизв'язностями та нелінійністю. Наявність суттєвих збурювальних впливів, таких як зміна маси та геометричних розмірів заготівель, режимів подачі газу та повітря, ступеня завантаженості печі, а також зовнішніх факторів, створює додаткові труднощі у забезпеченні стабільного та оптимального керування.

На багатьох підприємствах досі використовуються традиційні системи автоматичного регулювання на базі ПІД-алгоритмів, які, незважаючи на свою простоту та надійність, не завжди забезпечують достатню точність підтримання температурних параметрів при зміні умов роботи агрегату. Виникає потреба у впровадженні сучасних систем автоматизації з можливістю адаптації, прогнозування та оптимізації режимів нагрівання. Використання комп'ютерного моделювання, математичного апарату оптимального керування, інтелектуальних

алгоритмів аналізу даних та методів цифрового моделювання дозволяє підвищити ефективність процесу та зменшити витрати палива.

Особливої актуальності набуває створення цифрового двійника теплофізичного процесу нагріву заготівель, що дозволяє проводити дослідження впливу різних параметрів, перевіряти ефективність алгоритмів керування, оцінювати можливість зниження енергетичних витрат та підвищення точності регулювання температури в окремих зонах печі. Розробка оптимізаційних підходів до регулювання співвідношення «паливо — повітря», вдосконалення роботи палиникових пристроїв та використання методів адаптивного керування є важливою складовою підвищення загальної ефективності прокатного виробництва.

З огляду на вищезазначене, дослідження автоматизації та оптимізації процесу нагрівання заготівель у методичній печі є актуальним науково-технічним завданням. Його вирішення дозволить не лише зменшити питомі енерговитрати та підвищити стабільність технологічного режиму, але й забезпечити високу якість готової продукції, що є важливим для конкурентоспроможності металургійних підприємств України в умовах глобальної ринкової економіки.

У даній магістерській кваліфікаційній роботі розглядаються питання аналізу технологічного процесу нагрівання, побудови математичної моделі методичної печі, розроблення системи автоматизації та створення алгоритмів оптимального керування процесом нагрівання з використанням сучасних інженерних підходів. Особлива увага приділяється забезпеченню енергоефективності та надійності роботи технологічного обладнання, а також можливості впровадження результатів на практиці.

Мета роботи - розробка та дослідження системи автоматизації та оптимізації процесу нагрівання заготівель у методичній печі прокатного стану, що забезпечує підвищення енергоефективності, стабільності та якості технологічного процесу.

Об'єкт дослідження - процес нагрівання металевих заготівель у методичній печі прокатного стану.

Предметом дослідження є методи, засоби, моделі та алгоритми автоматизації і оптимального керування температурними та енергетичними параметрами методичної печі.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ, ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ПІДХОДІВ ДО ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АВТОМАТИЗАЦІЇ

1.1 Галузь промисловості

Безпечний розвиток стратегічно важливих секторів економіки виступає основою стабільного зростання держави. Серед таких напрямів одне з провідних місць посідає металургійна промисловість, яка є ключовим елементом формування бюджету та джерелом значних валютних надходжень завдяки високому рівню експорту продукції. Металургія традиційно відіграє значну роль у зовнішньоторговельному обороті України: у 2018 році ця галузь займала друге місце серед промислових секторів за часткою в експорті товарів.

За даними журналу *Forbes Україна*, шість із десяти компаній, що увійшли до рейтингу найбільших експортерів країни, представляють саме цей сектор.

В експортній структурі продукції металургійного комплексу переважають чорні метали, частка яких у 2021 році становила 46,1%. Такий показник свідчить про виражену сировинну орієнтацію національного експорту металопродукції. Зокрема, чорні метали займали перше місце серед усіх експортних позицій — 21% загального обсягу або близько 9,9 млрд дол. США. Це перевищує показник попереднього року на 14,7%. Другу позицію посідали зернові культури (15,3% або 7,2 млрд дол. США), а третю — машини, обладнання та механізми (9,8% або 4,7 млрд дол. США), що також демонструє зростання у порівнянні з 2020 роком.

З огляду на наведені дані, варто відзначити значний потенціал металургійної галузі, який визначається не лише розвиненою виробничою інфраструктурою та великими запасами природної сировини, але й можливостями підвищення ефективності технологічних процесів. Найбільші резерви енергозбереження в чорній металургії, за оцінками фахівців Українського центру ЕіПД ім. О.Разумкова, зосереджені у виробництві чавуну

(потенційне скорочення питомих витрат до 25%) та сталі (до 70%). Інвестиційні перспективи лише у напрямку зменшення енергоемності виробництва оцінюються приблизно у 200 млн грн.

Одним із найефективніших способів підвищення енергоефективності у чорній металургії, зокрема в прокатному виробництві, є застосування сучасних систем автоматизованого керування технологічними процесами, що використовують новітні інформаційні технології. За рівнем енергоспоживання прокатний переділ посідає друге місце після доменного виробництва, де близько 95 % енергії витрачається у формі природного газу та електроенергії. При цьому приблизно 60 % споживаної енергії припадає на нагрів заготовок у печах, а решта 40 % — на сам процес прокатки. Як паливо для нагрівальних печей використовують природний газ (40 %), коксовий газ (30 %), доменний газ (25 %) і мазут (5 %).

Таким чином, підвищення ефективності систем автоматичного регулювання температури у зварювальній зоні методичної печі шляхом вивчення закономірностей теплових процесів і вдосконалення алгоритмів керування є важливим і актуальним завданням сучасної металургії.

1.2 Технологія послідовності виробництва прокату

На сьогоднішній день існує декілька технологічних послідовностей отримання прокату. Відповідно, кожна з цих технологічних послідовностей має свої переваги та недоліки. Можна виділити три основні етапи розвитку технологій отримання прокатної продукції та, які в даний час тією чи іншою мірою використовуються на підприємствах чорної металургії у світі [5]:

1) технологія розливання злитків у виливниці з подальшим виробництвом заготовок із злитків та прокаткою цих заготовок;

2) технологія розливання сталі на машинах безперервного лиття заготовок та подальшою прокаткою цих заготовок;

3) технологія лиття тонкої смуги для використання в холодній прокатки.

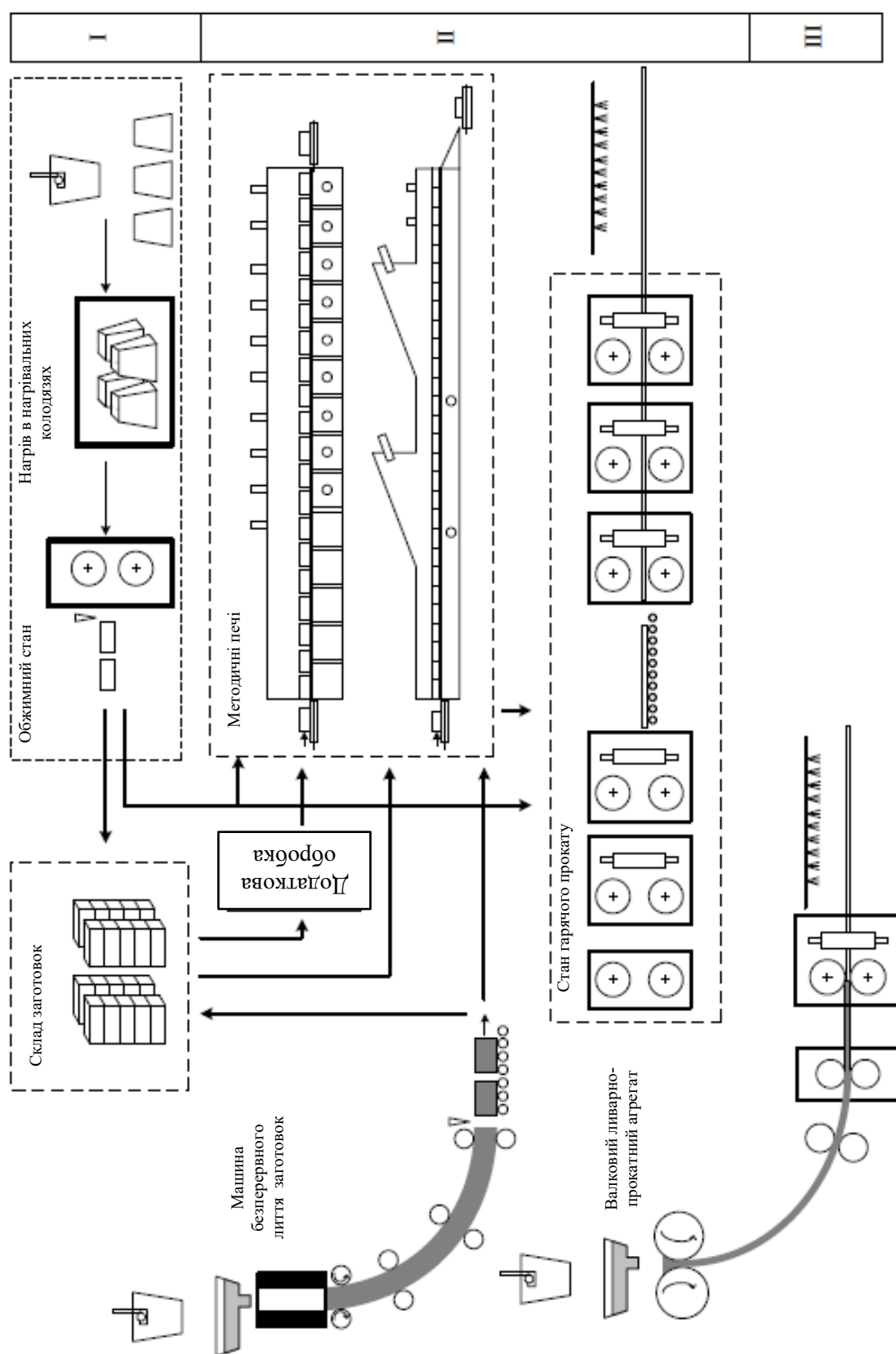
Крім того, використання різних технологічних послідовностей в рамках однієї технології дозволяє оптимізувати витрати по переділу для конкретного виробництва. Різні типи технологічних переділів показано рис. 1.1.

Поява високопродуктивних киснево-конвертерних цехів у 70-80 роках призвела до широкого поширення машин безперервного лиття заготовок (МНЛЗ), які дозволяють отримувати заготівлі заданого розміру (у тому числі надширокі до 2500-2600 мм) з дуже високою продуктивністю. Перехід від розливання до зливки до безперервного розливання також повністю оформив тенденцію до посилення вимог до якості продукції. Безперервність процесу також призвела до створення повністю автоматизованих систем управління процесом розливання, подальшого підвищення продуктивності та якості продукції. Нині МНЛЗ успішно функціонують у всіх промислово розвинених країн світу.

Залежно від організації технологічного процесу витрати палива на переділ можуть змінюватися в широких межах (від 35 кг у.т./т до 67 кг у.т./т залежно від температури посада, технології нагріву, конструкції нагрівальних печей та організаційних заходів) [5–15]. Так, наприклад, завантаження в прохідну піч металу з високим початковим тепломістком (гарячий посад) призводить до зменшення витрати палива на нагрівання.

Використання систем автоматичного планування і стеження за процесом виробництва, призвели до появи технології, у якій передбачається нагрівання заготовок відразу після МНЛЗ без використання складів.

Дана технологія з так званим ливарно-прокатним агрегатом дозволяє максимально скоротити час перебування слябів між розливом на МНЛЗ і піччю широкосмугового прокатного стану. Це досягається шляхом прямого завантаження відлитих заготовок у піч без простоїв на складах із максимально можливою швидкістю. Тим самим забезпечується висока теплотміст (ентальпія) металу.



I – застаріла технологія; II – сучасна технологія; III – перспективна технологія
 Рисунок 1.1 – Технологічна схема виробництва гарячекатаних смуг

Ця технологія була вперше застосована на ринку на початку 90 - х рр., але вже 2000 20 млн. т гарячекатаної смуги було отримано на цих агрегатах, в 2001 р - 28,5 млн. т [18].

Заготовки з високим тепломістком лише підігріваються в прохідних печах і передаються на стан гарячої прокатки. Така технологія дозволяє витратити 5 – 20 кг у.т./т на підігрів металу в печах, а також забезпечити якість прокату вище за рахунок більш рівномірного нагріву за перерізом заготовки. Однак цей спосіб має більш низьку продуктивність порівняно зі способом, у якому використовується склад (на 40%), що для деяких підприємств виявляється неприйнятною, стримуючим ланкою виробництва.

В даний час розробляються і проходять дослідно-промислову експлуатацію способи прямого відливання тонкого листа, який може подаватися на стани холодної прокатки. Запропонована технологія дозволяє уникати технологічного ланцюжка МНЛЗ – стан гарячої прокатки, тобто абсолютно вивести із циклу виробництва печі повторного нагріву та чорнову групу станів гарячої прокатки [18]. Внаслідок цього значно скорочуються капітальні витрати, пов'язані з обладнанням та зменшуються енерговитрати.

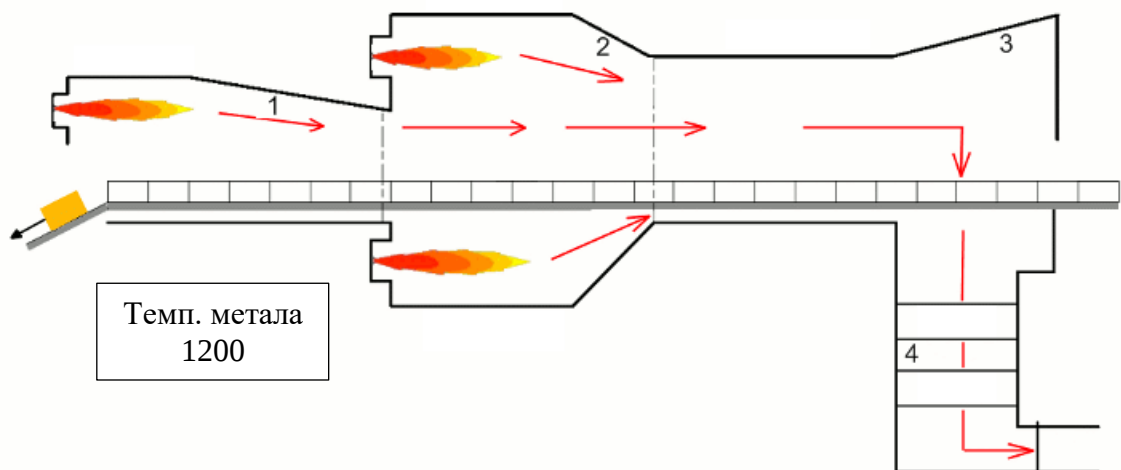
Переважний обсяг прокату виробляється із заготовок, отриманих на машинах безперервного розливання сталі і в роботі розглядається ця технологія. Використання складу зберігання заготовок для узгодження продуктивності МНЛЗ та прокатного стану робить необхідним їх нагрівання перед обробкою металу тиском, який виробляється в нагрівальних печах прохідного типу. Процес нагрівання заготовок ускладнюється тим, що одночасно нагріваються заготовки з різним початковим тепловим станом, різними геометричними розмірами та марками сталі. Крім того, темп роботи нагрівальної печі безпосередньо пов'язаний з темпом роботи прокатного стану. Все це ускладнює керування тепловим станом нагрівальної печі.

Якість готової продукції та ефективність роботи прокатних агрегатів значною мірою залежать від стабільності температурного режиму в нагрівальних печах. Будь-які відхилення під час нагріву металу практично неможливо

виправити на наступних етапах технологічного процесу, що призводить до зменшення виходу придатної продукції та погіршення її властивостей.

Нагрівальні печі в прокатному виробництві призначені для доведення температури злитків до рівня, придатного для прокатки на обтискних станах, а також для нагріву слябів і блюмів перед подачею на листові або сортові стани. Ці установки є початковим елементом технологічного ланцюга прокатного переділу та безпосередньо пов'язані з ритмом роботи всього виробництва. Вони зберігають характерні особливості теплотехнічних систем і зазвичай працюють у перехідних режимах, що виникають через зміну типу чи марки заготовок або темпу їх подачі.

Виходячи з технологічної схеми тризонної методичної печі (рис. 1.2), яка включає зварювальну зону, розглянемо процес нагріву заготовок за рахунок енергії згоряння палива.



1 – томільна зона; 2 – зварювальна зона; 3 – методична зона; 4 – керамічний і металевий рекуператори

Рисунок 1.2 – Нагрів металу в методичній печі

У печі паливо спалюється пальниками, розташованими як над, так і під металевою поверхнею. Димові гази переміщуються двома потоками — верхнім і нижнім — у напрямку, протилежному руху заготовок, після чого через систему каналів потрапляють у боров і далі — через рекуператор та димову трубу — в

атмосферу. Коли метал досягає необхідної температури, його виводять через вікно видачі на рольганг, а звідти — до прокатного стану.

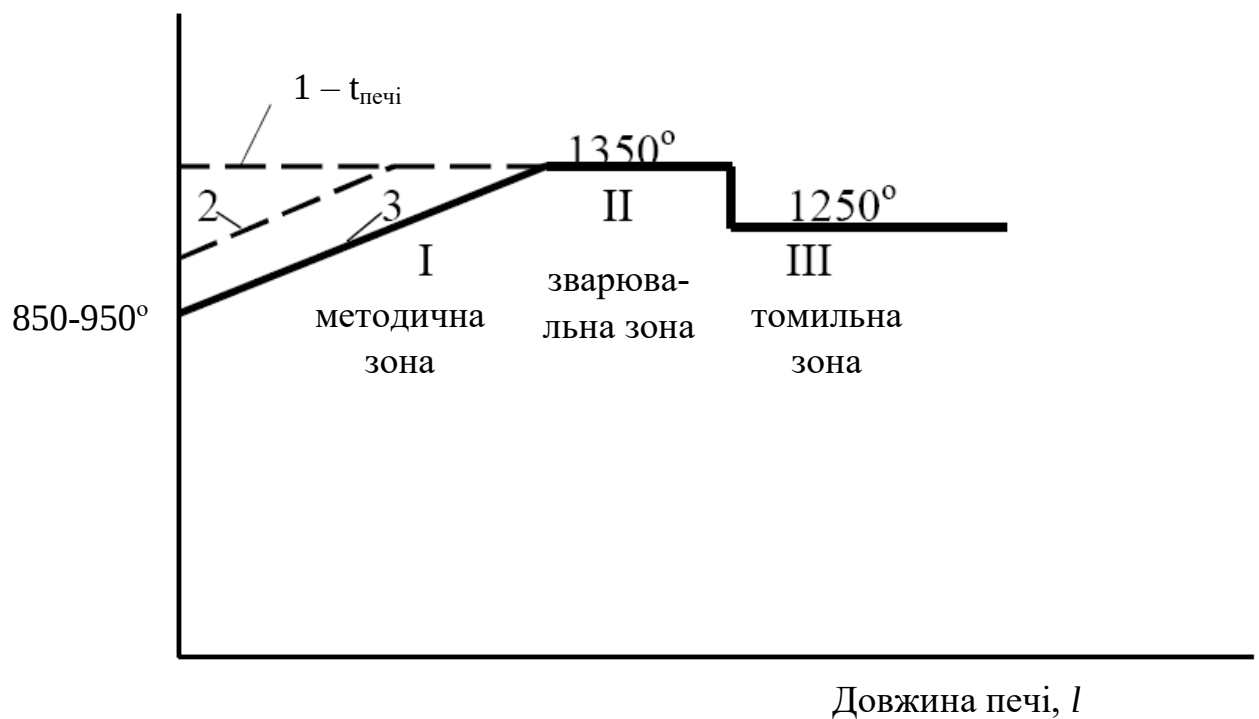
Перша за напрямком руху металу зона (поз. 3 на рис. 1.2) має змінну температуру вздовж довжини печі та називається методичною. У ній процес згоряння палива не відбувається. Друга зона (поз. 2) — це зварювальна або зона високих температур, призначена для швидкого доведення поверхні заготовки до кінцевої температури 1150–1250 °С. Третя зона — томильна (поз. 1) — забезпечує вирівнювання температури по перерізу металу та усунення холодних ділянок на нижній поверхні заготовки.

Для підвищення теплової ефективності печі застосовуються малогабаритні регенератори (п. 4 на рис. 1.2), які встановлюються у стінах агрегату або в конструкції пальників. Нові кулькові регенератори можуть повертати до 85–90 % теплоти відхідних газів, нагріваючи повітря до температури, приблизно на 100°С нижчої, ніж температура димових газів. Це дозволяє скоротити витрату палива у 1,5–2 рази.

Технологія прокатки висуває підвищені вимоги до якості нагріву заготовок. Температурний розподіл по перерізу металу повинен забезпечувати необхідну пластичність без перегріву поверхні, при цьому весь процес має відбуватись за оптимальний час. Нагрівальні установки мають забезпечувати рівномірне нагрівання заготовок навіть за змінного ритму роботи прокатного стану, водночас споживаючи мінімальну кількість палива.

Якість нагріву визначається заданим температурним графіком (рис. 1.3), який описує швидкість і тривалість нагрівання у кожній зоні печі. Кожен графік характеризується кінцевою температурою поверхні металу, ступенем нерівномірності температур по перерізу заготовки та величиною угару металу. У сучасних методичних печах температурна крива стрімко зростає в завантажувальній частині, що відповідає методичній зоні, і стає пологішою у зоні високих температур.

Із підвищенням температури у зварювальній зоні, як правило, збільшується тривалість витримки металу в томильній зоні, тоді як час нагрівання в попередніх зонах змінюється незначно.



2 — температура в печі при гарячій садці; 3 — температура заготовки при гарячій садці

Рисунок 1.3 – Температурний режим нагрівальних печей

1.3 Об'єкт керування

Об'єктом керування, розглянутим у цій кваліфікаційній роботі, є верхня зварювальна зона тризонної методичної печі, що на схемі (рис. 1.2) позначена поз. 2.

1.3.1 Методичні полум'яні печі використовуються для попереднього нагрівання металевих заготовок перед подальшим процесом їх прокатки на сортових або листових прокатних станах. На рисунку 1.4 представлено

зовнішній вигляд типової печі цього типу. Технічні характеристики методичної печі наведено в таблиці 1.1.



Рисунок 1.4 – Зовнішній вигляд методичної печі

Таблиця 1.1 – Технічні характеристики методичної печі

Параметр	Значення
Максимальна продуктивність, т/год	80
Довжина печі, м	24,8
Ширина печі, м	6,1
Теплотворність газу, що нагріває томильну зону, кКал/м ³	2200
Теплотворність мазуту для зварювальних зон, кКал/л	9700
Питомі витрати палива, кг/т	45
Тиск у трубопроводі подачі мазуту, кПа	2
Максимальна витрата мазуту у верхній зварювальній зоні, кг/хв	20

1.3.2 Структура об'єкта керування. Для аналізу методичної печі з точки зору автоматизації розглянемо її основні функціональні вузли, що забезпечують транспорт заготовок і підтримання необхідного температурного режиму (рис. 1.5).

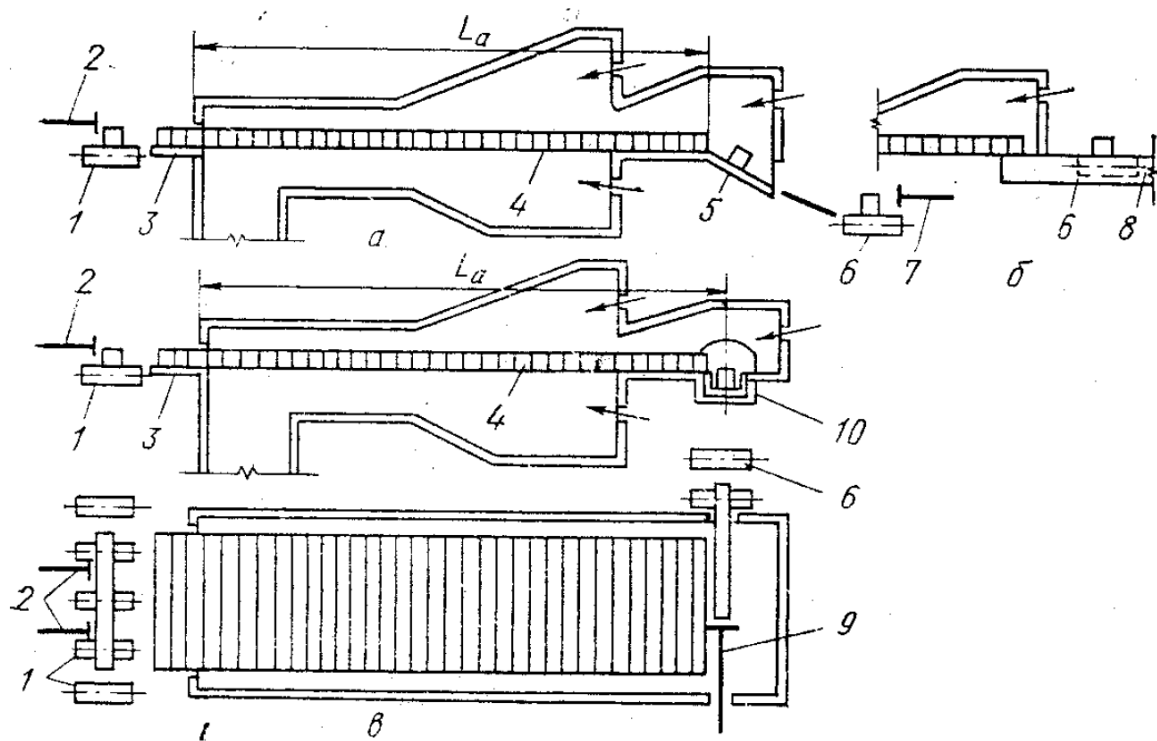


Рисунок 1.5 – Схема транспортування заготовок у методичних печах

В сучасних печах процес транспортування металу та його підготовка до нагріву повністю механізовані. Заготовки подаються мостовими кранами на приймальні решітки з решіток переміщуються на завантажувальний рольганг (поз. 1 на рис. 1.5). Зупинка заготовок у потрібних позиціях здійснюється за допомогою упорів, після чого вони подаються у піч штовхачем (поз. 2). Далі заготовка потрапляє на завантажувальний стіл (поз. 3), з якого переміщується в зону нагріву.

Якщо под печі не оснащений механізмом подачі, зусилля штовхача визначають з урахуванням опору проштовхування всієї садки. Після нагрівання заготовки (поз. 4) скочуються похилою площиною (поз. 5) на рольганг видачі (поз. 6). Щоб знизити ударні навантаження на обладнання, встановлюють пружинний упор (поз. 7).

У таких печах застосовуються інжекційні пальники, що працюють на попередньо підігрітому до температури близько 550 °С повітрі. Це дає змогу максимально ефективно використовувати хімічну енергію палива. Повітря для горіння надходить крізь керамічний рекуператор, розміщений під піччю, та

систему повітропроводів. Аеродинамічний опір потоку компенсується тиском нагрітого повітря та інжекційною дією пальників, що практично виключає його витік.

Конструктивна схема трьохзонної методичної печі показана на рисунку 1.6.

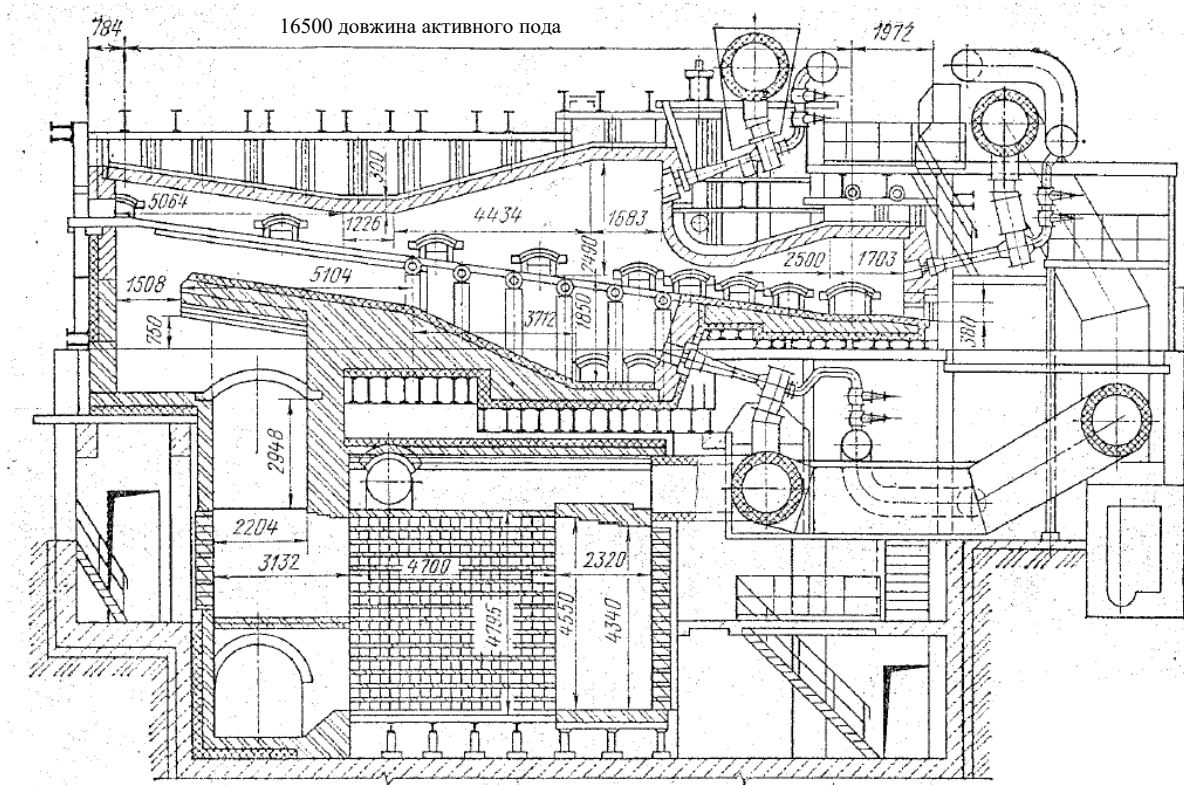


Рисунок 1.6 – Конструктивна схема трьохзонної методичної печі

Таке конструктивне рішення створює сприятливі умови для автоматизації керування тепловими режимами, оскільки забезпечує стабільність подачі повітря й рівномірність розподілу тепла по зонах печі.

У результаті маємо об'єкт керування безперервного типу, в якому вхідним параметром є керуючий сигнал, що надходить до системи керування мазутною форсункою, а вихідним параметром виступає температура у верхній зварювальній зоні.

1.3.3 Принцип функціонування об'єкта керування. З позиції регулювання температури у зонах піч є складним об'єктом автоматичного керування, оскільки на її тепловий баланс впливає велика кількість взаємопов'язаних факторів. На рисунку 1.7 наведено схему теплового навантаження зон методичної печі.

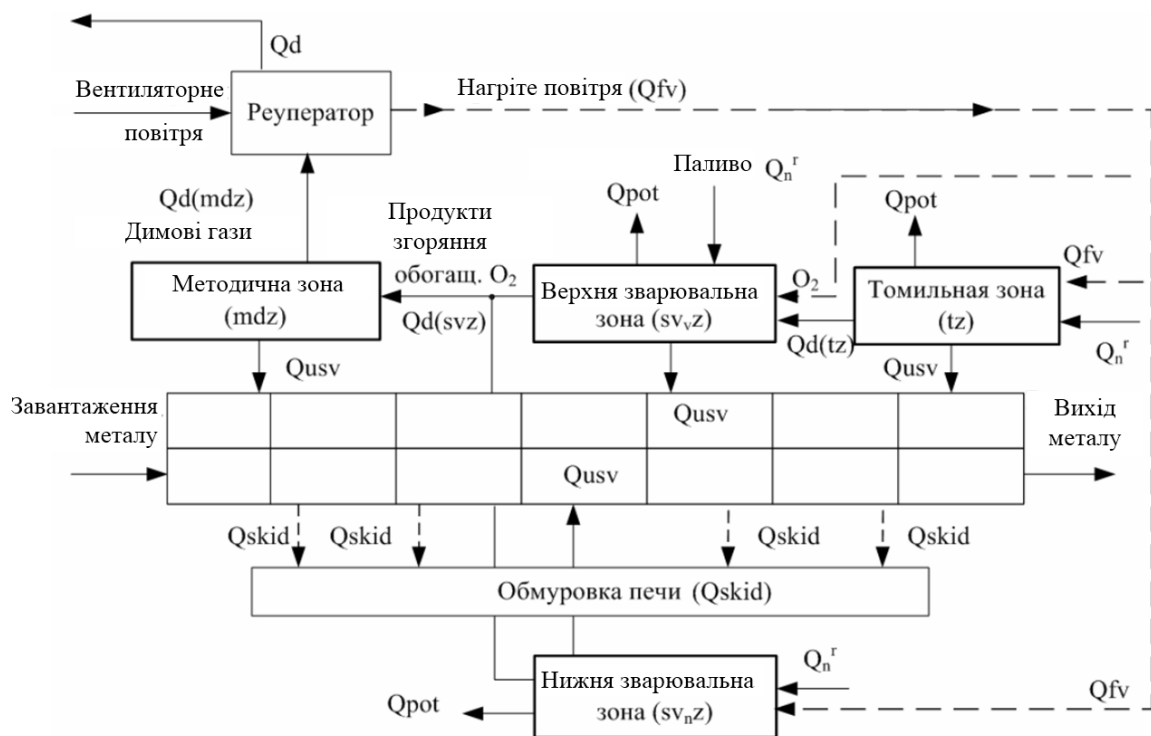


Рисунок 1.7 – Схема теплового навантаження зон методичної печі

Нагрів у верхній зварювальній зоні залежить не лише від інтенсивності горіння палива чи втрат тепла з димовими газами, а й від процесів, що відбуваються у методичній, томильній зонах і рекуператорі. Тому на виході системи керування формується комплексне збурення, яке є результатом сукупної дії різних непередбачуваних впливів.

Зміна продуктивності печі впливає на коефіцієнт передачі температурного каналу керування, що ускладнює забезпечення стабільності теплового режиму.

Принцип роботи системи полягає у підтриманні температури в заданих межах відповідно до термограми (рис. 1.3). Якщо температура у верхній зварювальній зоні знижується нижче встановленого рівня, необхідно підвищити подачу палива до мазутної форсунки; при перевищенні — зменшити її.

У конструкції печі передбачено дві взаємопов'язані локальні системи автоматичного регулювання:

- перша відповідає за підтримання оптимального співвідношення «паливо–повітря»;
- друга забезпечує стабілізацію тиску в робочому просторі верхньої зварювальної зони.

Таким чином, синхронна робота цих підсистем гарантує сталість теплових параметрів і підвищує ефективність процесу нагріву металу.

1.4 Структура системи керування

Оскільки об'єктом автоматизації є безперервна система, у якій вхідною величиною є керуючий сигнал, що надходить до блоку регулювання мазутної форсунки, а вихідною — температура у верхній зварювальній зоні тризонної методичної печі, було розроблено відповідну структурну схему системи автоматичного керування. (рис. 1.8).



Рисунок 1.8 – Структурна схема системи автоматичного керування

Керуючий сигнал формується контролером і надходить на блок регулювання мазутної форсунки, який змінює положення клапана відповідно до

команди. Регулювання виконується в межах діапазону від нуля до ста відсотків, де 0% відповідає повністю закритому клапану (відсутність подачі палива), а 100% — максимально відкритому (повне впорскування мазуту зі швидкістю 20 кг/хв).

Вихідним параметром об'єкта керування є t у верхній зварювальній зоні трьохзонної печі, що підтримується в межах 1150–1250 °С відповідно до технологічних вимог.

Головне завдання системи полягає у підтриманні стабільної температури в зварювальній зоні згідно з технологічною картою процесу, забезпечуючи необхідну якість нагріву заготовок і мінімальні енерговитрати.

Для досягнення поставленої мети до складу системи автоматичного керування входять такі основні елементи:

- датчик температури, що здійснює безперервний контроль і вимірювання поточного значення температури;
- виконавчий механізм (клапан), що регулює кількість мазуту;
- контролер, який формує сигнал керування на основі відхилення фактичного значення температури від заданого;
- пульт оператора, що забезпечує введення режимних параметрів і візуальний контроль за перебігом процесу.

Усі елементи системи взаємодіють між собою за замкненим принципом зворотного зв'язку, що гарантує корекцію режиму в реальному часі. Схематично взаємозв'язок технічних засобів подано на рисунку 1.9.

Згідно вимог, система має забезпечувати стабілізацію температури під зводом у зварювальній зоні в межах 1150–1250 °С. У межах виконаної роботи розроблено функціональну схему автоматизації, яка реалізує зазначене завдання.

Як основний пристрій управління працює програмований логічний контролер (PLC) VIPA 214-2BE03 (UY3), що забезпечує збір, обробку та передачу сигналів у систему керування. Для візуалізації процесу на пульті оператора (UYR4) знаходиться персональний комп'ютер, який відображає температуру та стан обладнання в реальному часі.

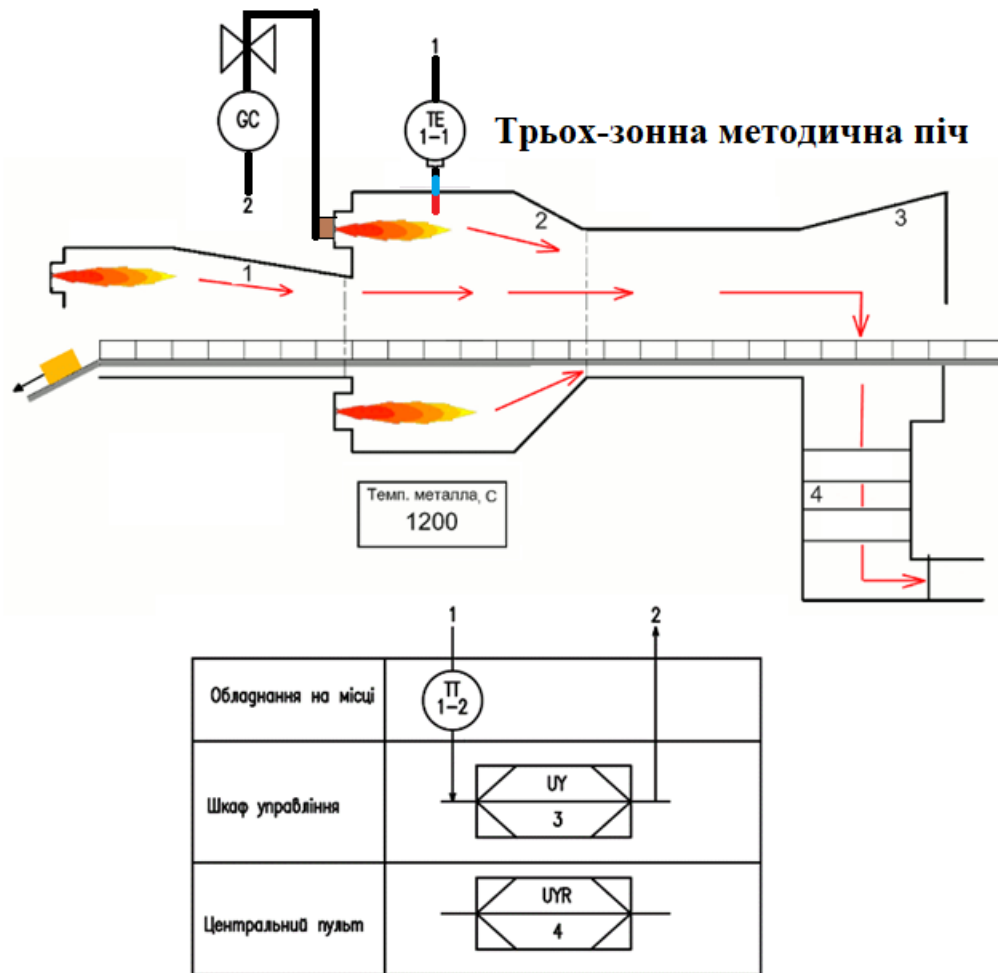


Рисунок 1.9 – Функціональна схема автоматизації системи керування

Температура в зварювальній зоні вимірюється термопарою ТПР-В-1-29-В-1,8 (ТЕ1-1), сигнал з якої нормується перетворювачем ТТ1-2 у стандартний струмовий діапазон 4–20 мА. Отримані дані надходять до контролера, який на їх основі розраховує необхідну подачу палива через форсунку для підтримання температури в заданих межах.

Таким чином, структурна організація САК забезпечує взаємодію між вимірювальними, виконавчими та обчислювальними елементами, що дозволяє оперативно реагувати на відхилення технологічного процесу та підтримувати його стабільність.

1.5 Постановка завдання дослідження

З метою досягнення головної мети — забезпечення оптимальних показників роботи системи автоматичного регулювання температури у верхній зварювальній зоні тризонної методичної печі — необхідно вирішити такі основні завдання:

- сформувати імітаційну модель САК температурою, яка відтворювала б поведінку реального об'єкта у різних режимах роботи;
- обґрунтувати метод синтезу системи автоматичного регулювання з урахуванням специфіки динаміки об'єкта керування, обрати відповідні критерії якості та розрахувати параметри температурного регулятора у верхній зварювальній зоні тризонної методичної печі;
- дослідити вплив співвідношення параметрів регулятора на показники якості системи, провести порівняльний аналіз результатів і визначити умови, що забезпечують ефективне налаштування ПІД-регулятора температури в зварювальній зоні методичної печі.

Реалізація цих завдань дозволить оцінити роботу системи за основними динамічними характеристиками — швидкодією, коливальністю, точністю та стійкістю — і виробити рекомендації щодо її подальшої оптимізації.

Висновки до розділу

У роботі як об'єкт дослідження розглянуто трьохзонну методичну піч, що застосовується у прокатному виробництві.

Предметом дослідження є принципи автоматичного регулювання температури у верхній зварювальній зоні печі, тоді як безпосереднім об'єктом керування виступає локальна система, призначена для підтримання температури в заданих межах.

Методична піч є складним теплотехнічним об'єктом з точки зору автоматизації, оскільки на її тепловий баланс одночасно впливає значна кількість взаємопов'язаних факторів.

Температура у верхній зварювальній зоні залежить не лише від інтенсивності згоряння палива чи втрат тепла з відхідними газами, а й від процесів, що протікають у методичній і томильній зонах, а також у системі рекуперації теплоти.

Унаслідок цього в системі керування виникає комплексне збурення, яке має стохастичний характер і впливає на температуру випадковим чином.

З урахуванням цих особливостей, до основних критеріїв якості системи автоматичного регулювання належать швидкодія реакції на збурення (як ступінчастого, так і непередбачуваного типу), точність стабілізації температури та стійкість системи до зміни параметрів об'єкта.

Досліджуваний об'єкт належить до неперервних одномірних систем керування з одним вхідним сигналом (керуючим впливом на блок управління мазутною форсункою) та одним вихідним параметром — температурою у верхній зварювальній зоні. Проте через складну природу теплообмінних процесів відбувається зміна параметрів передаточної функції, що ускладнює підтримання стабільного режиму регулювання.

З метою підвищення ефективності роботи системи необхідно проаналізувати вплив параметрів налаштування регулятора на якісні показники керування, визначити оптимальні значення його параметрів та встановити область раціональної дії скоригованої системи за умов змінних або випадкових збурень.

Отримані результати дослідження стануть основою для розроблення рекомендацій щодо вибору параметрів ПІД-регулятора, який забезпечить стійке та надійне функціонування системи автоматичного регулювання температури у верхній зварювальній зоні методичної печі.

РОЗДІЛ 2

ІДЕНТИФІКАЦІЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТА СИНТЕЗ І МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ

2.1 Модель системи автоматичного керування

В межах кваліфікаційної роботи виконано структурну та параметричну ідентифікації моделі об'єкта керування із застосуванням спеціалізованих програмних засобів. Для параметричної оптимізації невідомих коефіцієнтів розглянуто чотири альтернативні форми передавальної функції. Кожен варіант послідовно налаштовувався в середовищі MATLAB System Identification Tool через вікно «Model Transfer Function». Корегувалась опція Zero - наявність/відсутність нуля, а також опція Poles - кількість полюсів (рис. 2.1).

На рис. 2.1 наведено конфігурації для всіх чотирьох версій передавальної функції об'єкта. Згідно до результатів структурної ідентифікації (підрозділ 3.2), у моделі враховано транспортне запізнення (опція Delay).

На рис. 2.2 показано експериментальну криву розгону та відгуки всіх чотирьох моделей. У полі Best Fits вказано у відсотках ступінь узгодженості моделі з експериментом, оцінений за нормованою кореневою СКП (ідеальне значення — 100%).

Позначення варіантів на рис. 2.2: перший — «P2D», другий — «P3D», третій — «P2DZ», четвертий — «P3DZ». Перші три підходи демонструють майже повний збіг з експериментом. Водночас у «P3D» третя постійна часу знаменника істотно менша за дві інші (нею можна знехтувати), а в «P2DZ» постійна часу чисельника також незначуща (див. рис. 2.1). Четвертий варіант поступається за точністю, тож його відкинуто.

Підсумовуючи аналіз рис. 2.1–2.2: має два дійсних полюси, коефіцієнт підсилення 0,08, сталі часу 83,6044 с і 32,6162 с, а транспортна затримка дорівнює 16,28 с, об'єкт не має нулів.



Рисунок 2.1 – Вікно параметрів процесних моделей («Process Models») у додатку ідентифікації

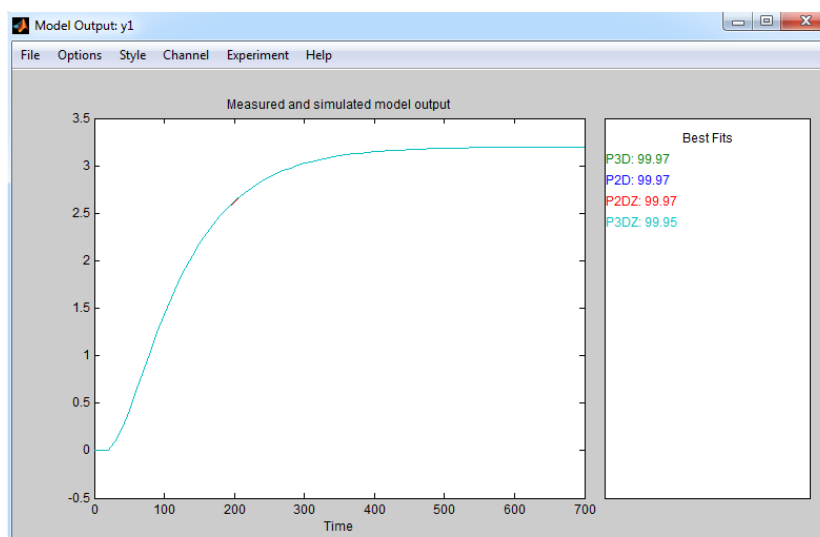


Рисунок 2.2 – Експериментальна крива розгону та моделі об'єкта керування

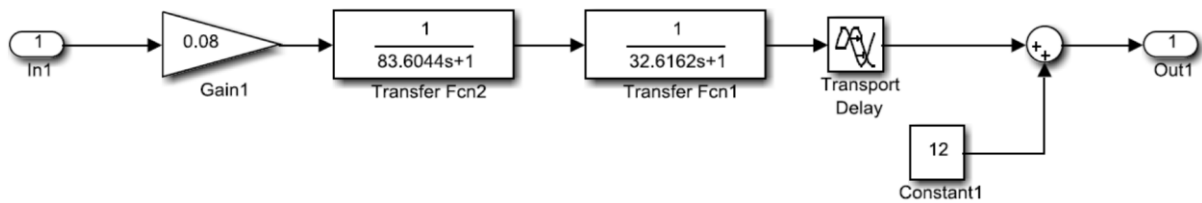


Рисунок 2.3 – Структурна схема моделі об'єкта керування за керуючим каналом

З урахуванням знайдених параметрів і початкових умов (керуючий вплив, керована величина) модель об'єкта за керуючим каналом у Simulink має вигляд, наведений на рис. 2.3. Спираючись на характеристики температурного датчика та виконавчого механізму, сформовано модель САК температурою у верхній зварювальній зоні трьохзонної методичної печі (рис. 2.4). Оскільки керуючий сигнал — команда на контролер блока виконавчого пристрою, він нормується до 0...100%. З огляду на шкалювання датчика (4 мА → 1000 °С; 20 мА → 1800 °С) і той факт, що за повного відкриття клапана фактична температура становить 1500 °С, передавальний коефіцієнт каналу керування

$$K = \frac{20 - 4}{1800 - 1000} = 0,02$$

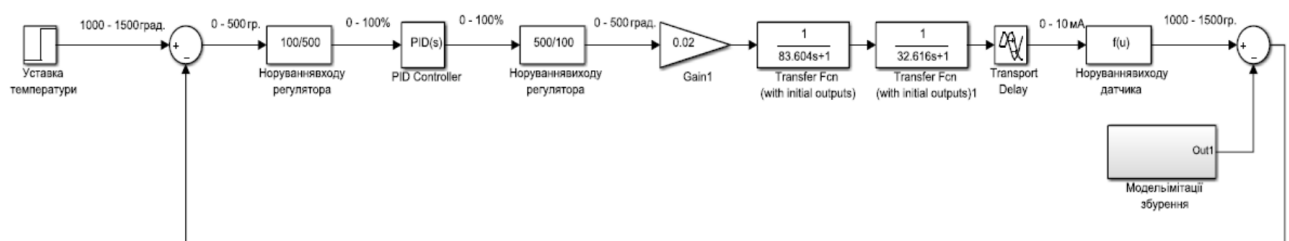


Рисунок 2.4 – Структура моделі САК температурою у верхній зварювальній зоні в MATLAB/Simulink

У моделі (рис. 2.4) вхід/вихід PID-регулятора нормуються до 0...100% для зручності співставлення ваг його складових і загального підсилення. Введено блок «Нормування входу регулятора» з коефіцієнтом 100/500 (перехід 0...500 °С

→ 0...100%) та «Нормування виходу регулятора» з коефіцієнтом 500/100 (зворотнє перетворення). Ідентифіковану модель об'єкта реалізовано блоками Transfer Fcn і Transport Delay.

Датчик температури прийнято безінерційним. Вихідний сигнал імітаційного блока-датчика (діапазон 1000–1800 °С, струм 4–20 мА) обчислюється як

$$X_{\text{вих.дат.}} = 1000 + X_{\text{вх.дат.}} \cdot \frac{500}{10}$$

PID-регулятор температури в зварювальній зоні реалізовано стандартним блоком PID Controller (рис. 2.4). Оскільки налаштування виконуватиметься на східчастій уставці, джерелом задання є step-сигнал. Окрема підсистема моделює збурення з випадковими амплітудою та періодом, що підкоряються нормальному розподілу (обґрунтування — розділ 1). За експериментальними статистиками: матсподівання періоду — 23 с, СКВ періоду — 4,5 с, СКВ амплітуди — 55 °С. З урахуванням цих величин побудовано генератор випадкового сигналу (рис. 2.5).

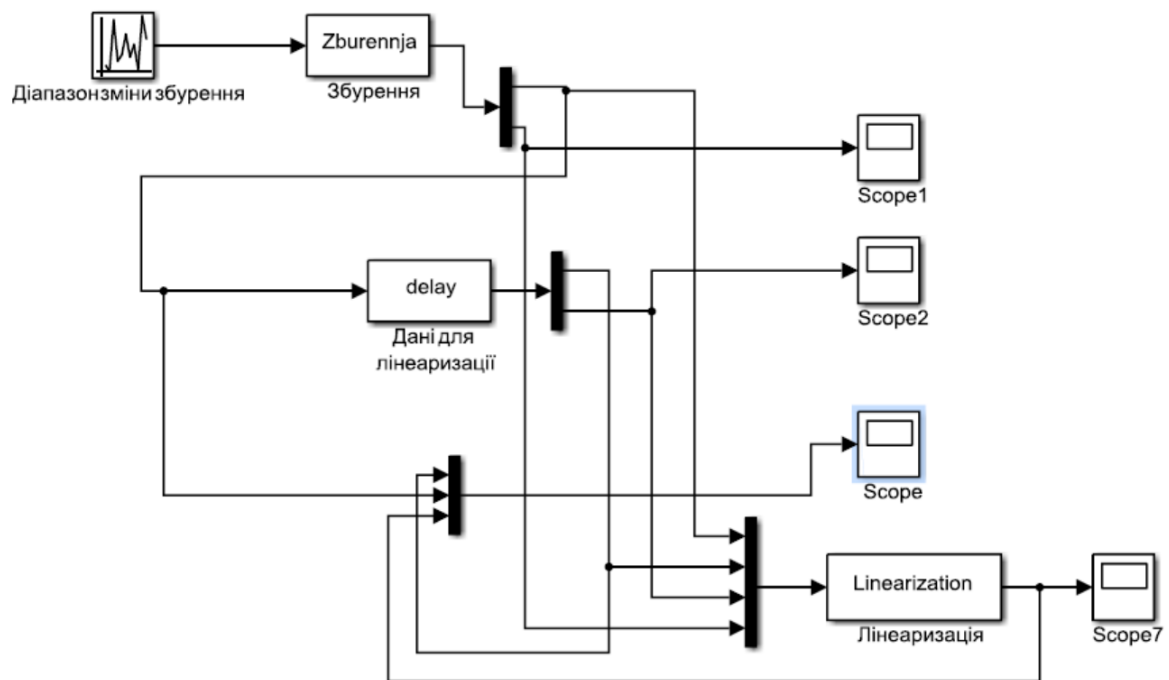


Рисунок 2.5 – Схема моделі генератора збурення для САК

На вході генератора формується квантування за рівнем і часом (східчастий процес). У блоці «Збурення» реалізовано S-функцію MATLAB Zburennja (код нижче). Далі застосована лінійна інтерполяція:

$$y_i = y_{\text{поп}} + \frac{y_{\text{поп}} - y_{\text{нов}}}{T_{\text{пер}}(V_n)} \cdot t_i$$

де y_i — поточне значення інтерпольованого сигналу, $y_{\text{поп}}$ — попередній рівень, $y_{\text{нов}}$ — новий рівень, t_i — поточний час для розрахунку.

Перша програма – S-функція MATLAB «Zburennja» (генерація східчастого збурення)

```
function [sys,x0,str,ts] = Zburennja(t,x,u,flag)
switch flag,
case 0
    [sys,x0,str,ts] = mdlInitializeSizes;
case 2
    sys = mdlUpdate(t,x,u);
case 3
    sys = mdlOutputs(t,x,u);
case 4

    sys = mdlGetTimeOfNextVarHit(t,x,u);
case { 1, 9 }
    sys = [];
otherwise
    error(['Unhandled flag = ',num2str(flag)]);
end
function [sys,x0,str,ts] = mdlInitializeSizes
sizes = simsizes;
sizes.NumContStates = 0;
sizes.NumDiscStates = 1;
sizes.NumOutputs = 2;
sizes.NumInputs = 1;
sizes.DirFeedthrough = 1;
sizes.NumSampleTimes = 1;
sys = simsizes(sizes);
x0 = [23];
str = [];
ts = [-2 0];
function sys = mdlUpdate(t,x,u)
sys=normrnd(23,4.5);
function sys = mdlOutputs(t,x,u)
sys(1) =u(1);
sys(2) = x(1);
function sys = mdlGetTimeOfNextVarHit(t,x,u)
sys = t + x(1);
```

Для параметрів рівняння використано S-функцію delay.

Друга програма – S-функція MATLAB «delay» (вхідні параметри інтерполяції)

```
function [sys,x0,str,ts] = delay(t,x,u,flag)
switch flag,
case 0
    [sys,x0,str,ts] = mdlInitializeSizes;
case 2
    sys = mdlUpdate(t,x,u);
case 3
    sys = mdlOutputs(t,x,u);
case { 1, 4, 9 }
    sys = [];
otherwise
    error(['Unhandled flag = ',num2str(flag)]);
end
function [sys,x0,str,ts] = mdlInitializeSizes
sizes = simsizes;
sizes.NumContStates = 0;

sizes.NumDiscStates = 3;
sizes.NumOutputs = 2;
sizes.NumInputs = 1;
sizes.DirFeedthrough = 0;
sizes.NumSampleTimes = 1;
sys = simsizes(sizes);
x0 = [0 0 0];
str = [];
ts = [0.1 0];
function sys = mdlUpdate(t,x,u)
if (x(2)==u(1))
    sys = [x(1) x(2) x(3)+0.1];
else
    sys = [x(2) u(1) 0];
end
function sys = mdlOutputs(t,x,u)
sys = [x(1) x(3)];
```

Безпосередню лінійну інтерполяцію реалізує S-функція Linearization. Третя програма – S-функція MATLAB «Linearization» (лінійна інтерполяція збурення)

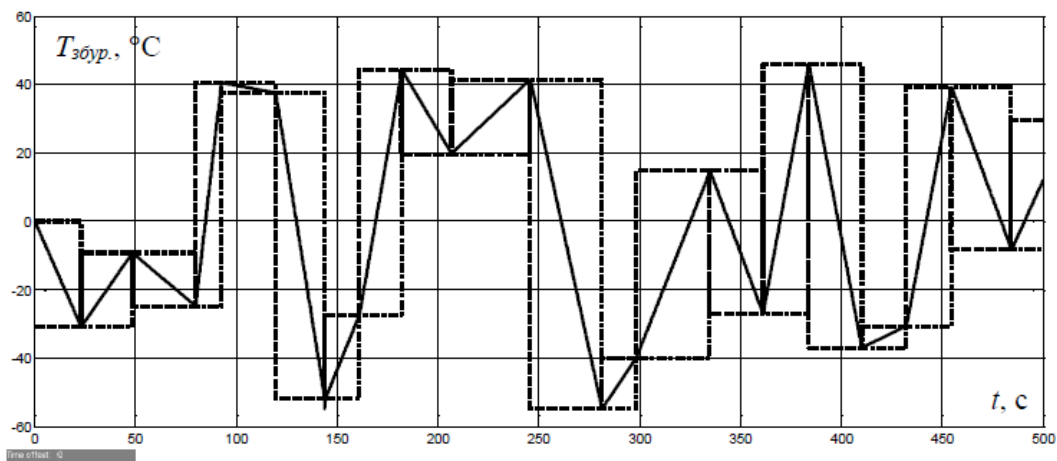
```
function [sys,x0,str,ts] = Linearization(t,x,u,flag)
switch flag,
case 0
    [sys,x0,str,ts] = mdlInitializeSizes;
case 2
    sys = mdlUpdate(t,x,u);
case 3
    sys = mdlOutputs(t,x,u);
case { 1, 4, 9 }
    sys = [];
otherwise
    error(['Unhandled flag = ',num2str(flag)]);
end
```

```

function [sys,x0,str,ts] = mdlInitializeSizes
    sizes = simsizes;
    sizes.NumContStates = 0;
    sizes.NumDiscStates = 2;
    sizes.NumOutputs = 1;
    sizes.NumInputs = 4;
    sizes.DirFeedthrough = 1;
    sizes.NumSampleTimes = 1;
    sys = simsizes(sizes);
    x0 = [0 0];
    str = [];

    ts = [0.1 0];
    function sys = mdlUpdate(t,x,u)
    sys = [x(2) u(2)+(((u(1)-u(2))*u(3))/u(4))];
    function sys = mdlOutputs(t,x,u)
    if (abs(x(1)-x(2))>7)
        sys = u(2);
    else
        sys = x(2);
    end

```



- - - - - первинний східчастий сигнал, — - — сигнал зі зсувом на один період,
 ————— інтерпольований сигнал

Рисунок 2.6 – Часові реалізації

Як видно з рис. 2.6, інтерполяція виконана коректно: суцільна траєкторія проходить через «кути сходинок», що відповідає очікуваному згладженню випадкового східчастого профілю.

2.2 Критерії якості функціонування системи керування

САК температурою у верхній зварювальній зоні працює у режимі стабілізації на рівні 1350 °С за умов складного, непередбачуваного збурення. Перехідні процеси при компенсації збурення відрізняються від реакції на зміну уставки (рис. 2.7), тому критерії якості формуємо саме для режиму відпрацювання збурення.

Основні показники (див. рис. 2.7):

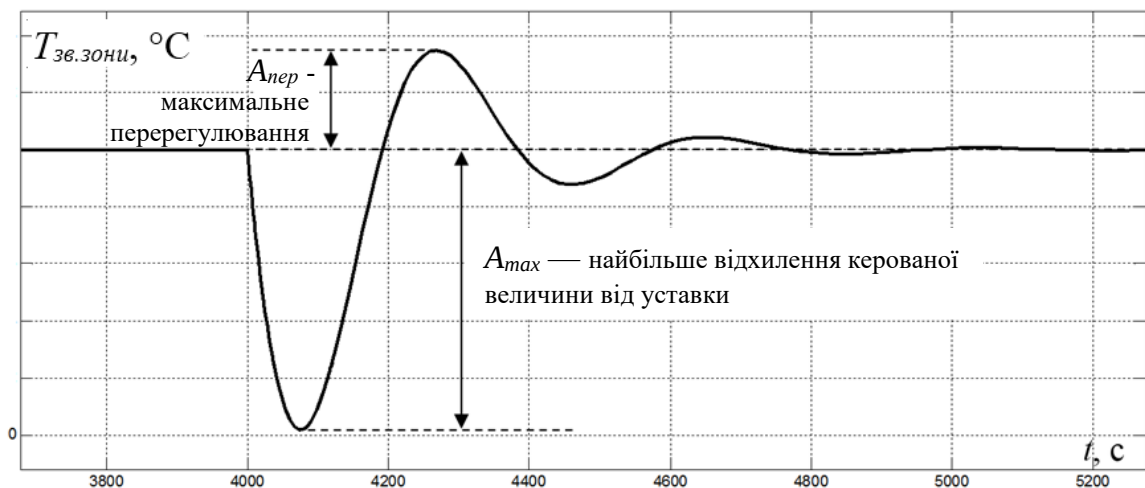


Рисунок 2.7 – Відгук скоригованої САК на східчає збурення

Приймаємо такі критерії якості:

- $A_{max} \leq 5\%$;
- $A_{пер} \leq 2,5\%$ (узгоджено з першим критерієм);
- час повернення у смугу $\pm 2,5\%$ від уставки — мінімальний;
- запаси стійкості: за амплітудою ≥ 8 дБ, за фазою $\geq 40^\circ$.

2.3 Синтез системи автоматичного керування

Використовуючи імітаційну модель, виконуємо синтез САК. Спочатку оцінюємо вплив динаміки підпорядкованої САК положенням заслінки

газопроводу на перехідний процес температурного контуру у верхній зварювальній зоні (САК заслінкою фактично виконує роль виконавчої частини). Якщо її інерційність майже не впливає на вихід температурної САК, підпорядковану ланку можна замінити підсилювачем.

Створено імітаційну модель САК положенням заслінки (рис. 2.8): кут повороту моделюється Integrator, незмінна швидкість приводу — через Gain так, щоб повний хід займав 10 с (за ТУ). Регулятор — двопозиційний релейний, реалізований Dead Zone + Sign.

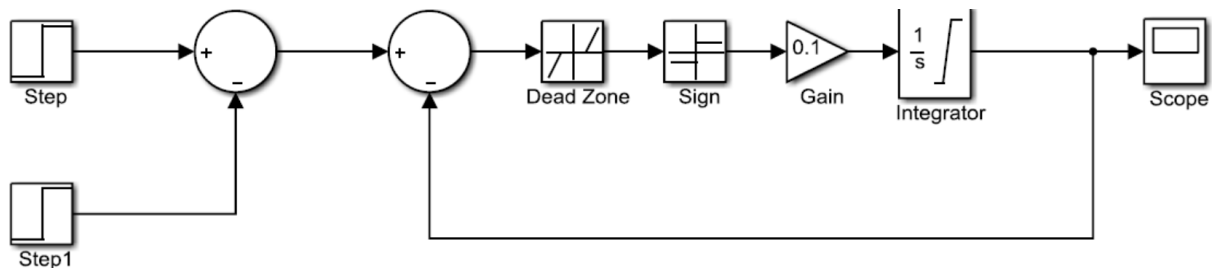


Рисунок 2.8 – Модель САК положенням заслінки в газопроводі

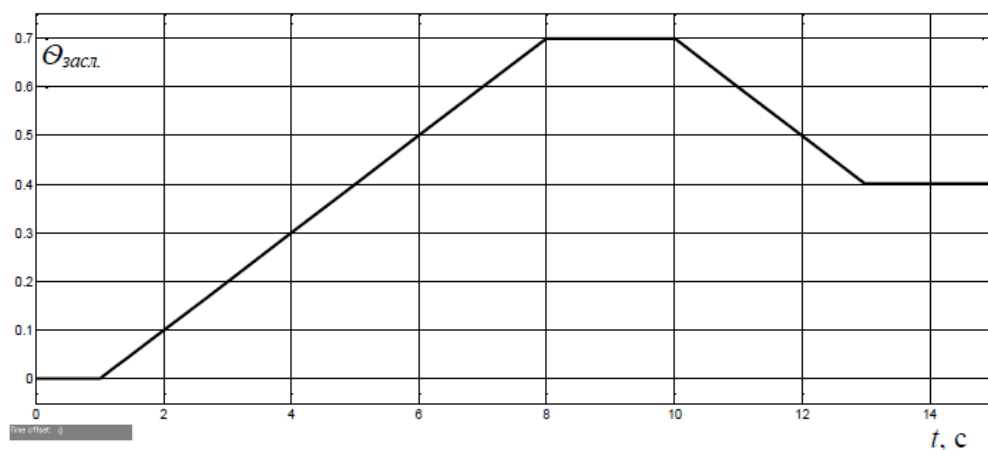


Рисунок 2.9 – Часовий закон зміни відносного кута повороту заслінки

Перевірка (рис. 2.9) підтвердила коректність: з 0 до 70% — 7 с, з 70% до 40% — 3 с, що відповідає паспортним даним.

Далі зіставлено перехідні процеси температури з урахуванням інерційності заслінки та без неї (рис. 2.10 — схема порівняння; рис. 2.11 — графіки). Для кількісної оцінки використано NRMSE:

```
>> goodnessOfFit(T_bez_zasl, T_s_zasl, 'NRMSE')
ans = 0.960714933290949
```

Отримано 96,07% збігу, тож САК положенням заслінки доцільно приймати як підсилювальну ланку з коефіцієнтом 1.

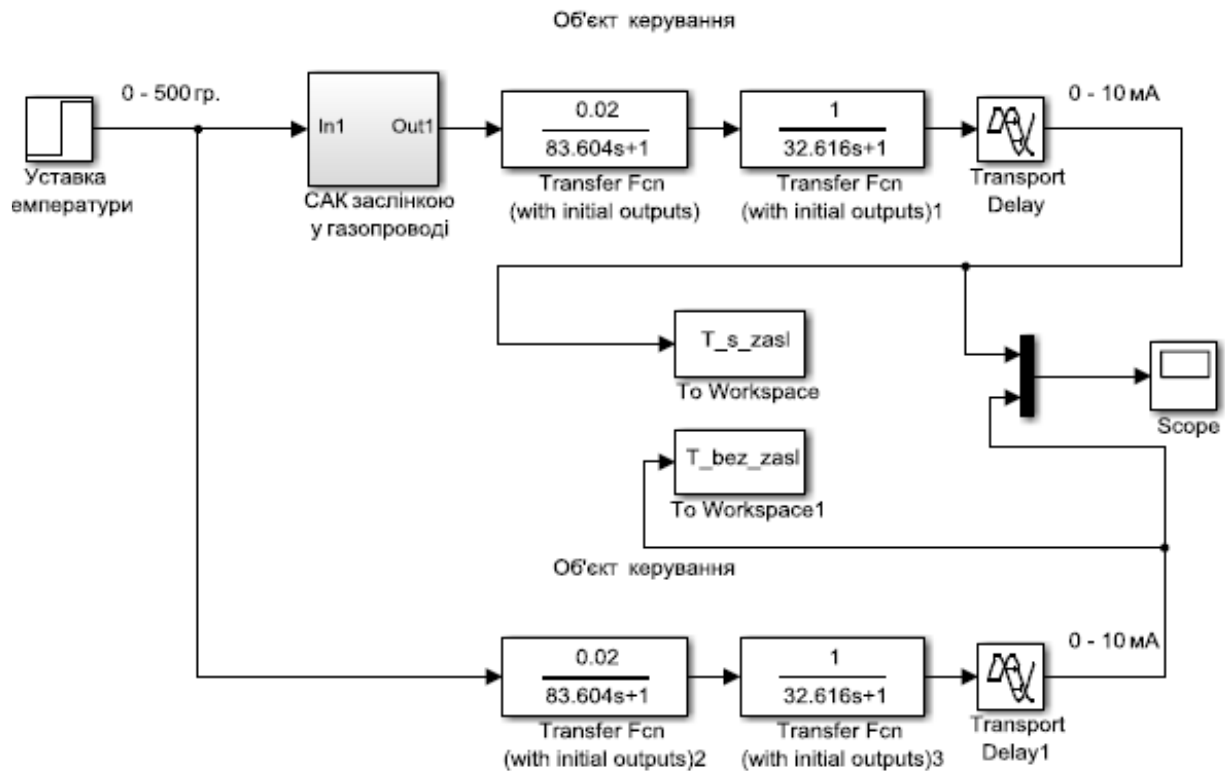


Рисунок 2.10 – Схеми об'єкта з/без САК заслінкою

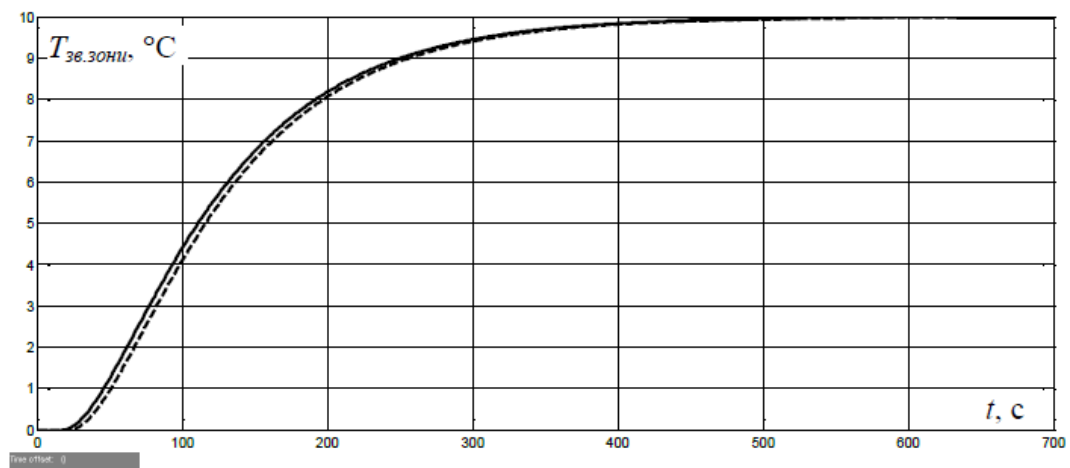


Рисунок 2.11 – Часові реалізації температури з урахуванням/без інерційності заслінки

Для синтезу температурної САК використано інструмент PID Controller/PID Tuning Tool. Через складність об'єкта і неідеальну лінеаризацію автоматичні оцінки якості інколи некоректні, а рекомендовані налаштування —

не оптимальні. Тому додатково досліджено залежність критеріїв якості від різних налаштувань, які відповідають різному рівню Response Time (рис. 2.13). Спочатку задано обмеження керуючого сигналу 0...100% і anti-windup інтегратора (рис. 2.12).

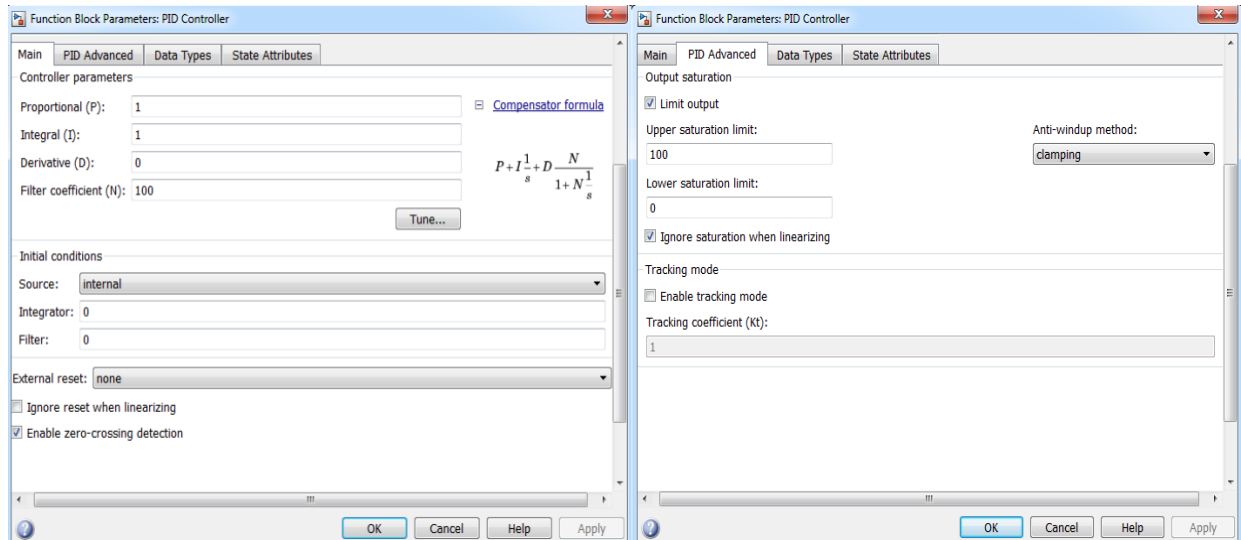


Рисунок 2.12 – Вікна параметрів PID Controller

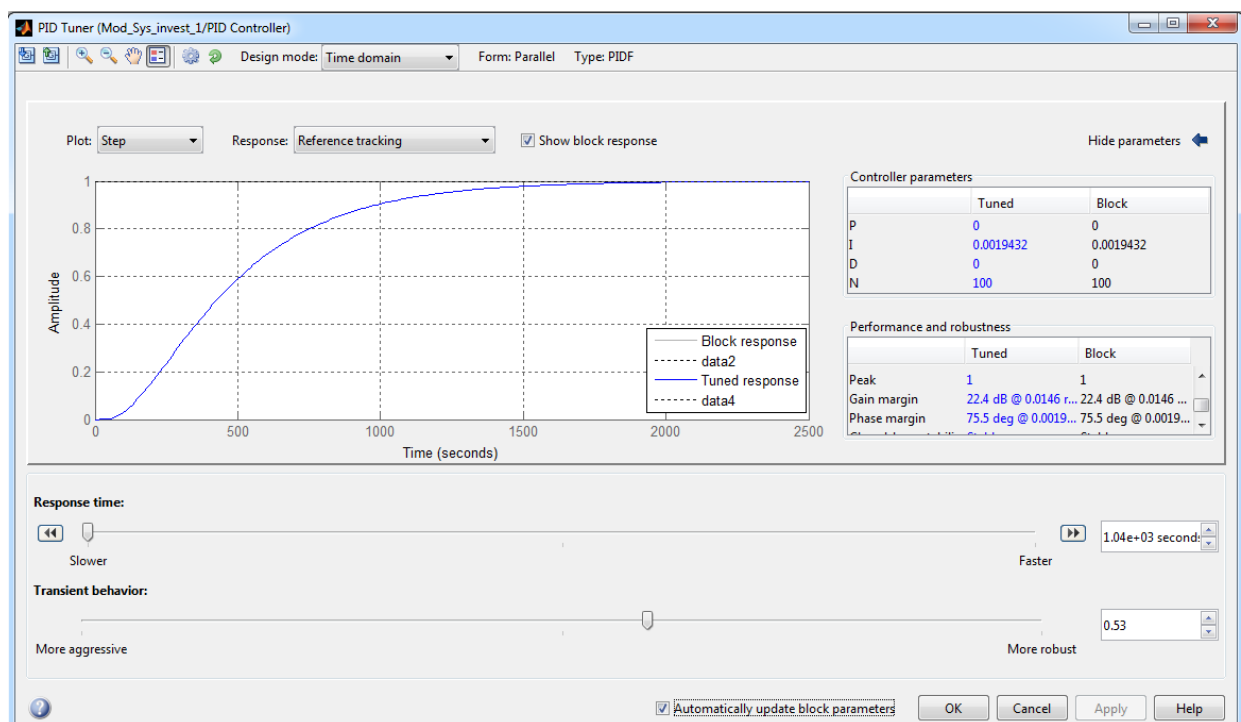


Рисунок 2.13 – Перше налаштування: мінімальна швидкодія (повзунок Response Time ліворуч)

Згідно рис. 2.13 мінімальна швидкодія відповідає фактично І-регулятору, що має коефіцієнтом підсилення 0,0019. Перевірка на максимальному східчастому збуренні (найгірший сценарій) наведена на рис. 2.14.

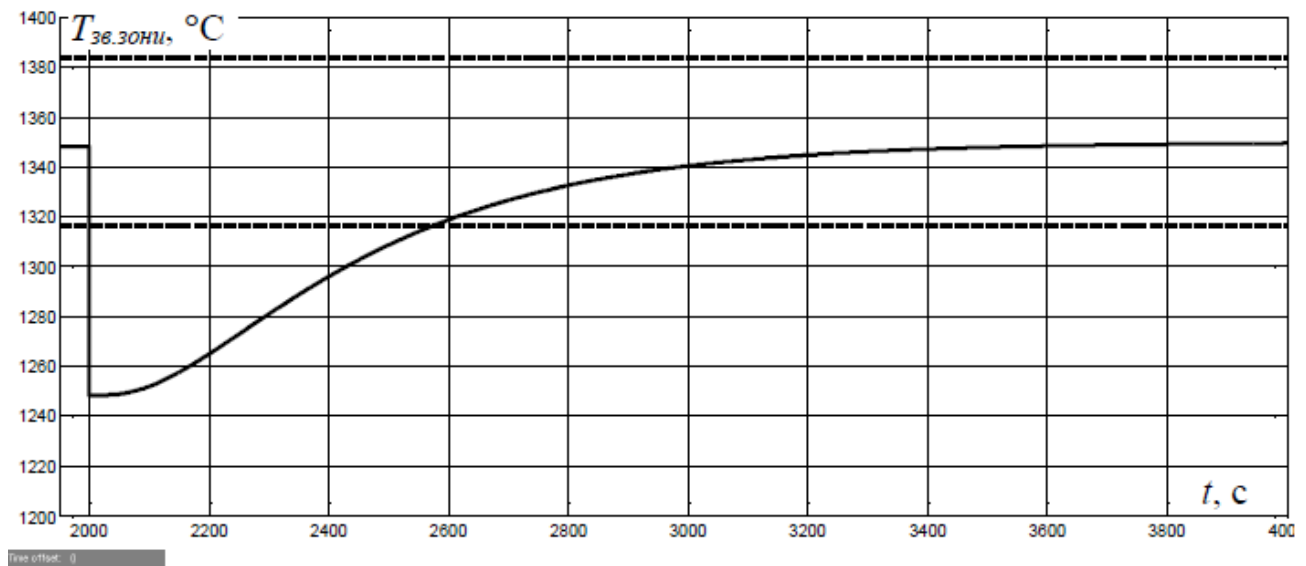


Рисунок 2.14 – Реакція температури за першим (повільним) налаштуванням

Температура від 1350 °C просідає приблизно до 1250 °C і повертається в зону $\pm 2,5\%$ за 572 с, без перерегулювання. Враховуючи тривалий вихід за допуск, потрібен подальший пошук кращих налаштувань.

2.4 Дослідження якості роботи системи автоматичного керування

Щоб простежити вплив параметрів ПІД на якість, для 10 положень повзунка Response Time було згенеровано налаштування. Для кожного положення додатково коригувався Transient behavior (робастність), щоби мінімізувати час перехідного процесу при дотриманні запасів стійкості: амплітуда ≥ 8 дБ, фаза $\geq 40^\circ$.

Для об'єктивного порівняння до моделі САК додано підсистему оцінки якості (рис. 2.15), що визначає:

- час перебування поза $\pm 2,5\%$ від уставки (на збуренні),
- максимальне відносне відхилення,
- перерегулювання (для збурення і — окремо — для зміни уставки).

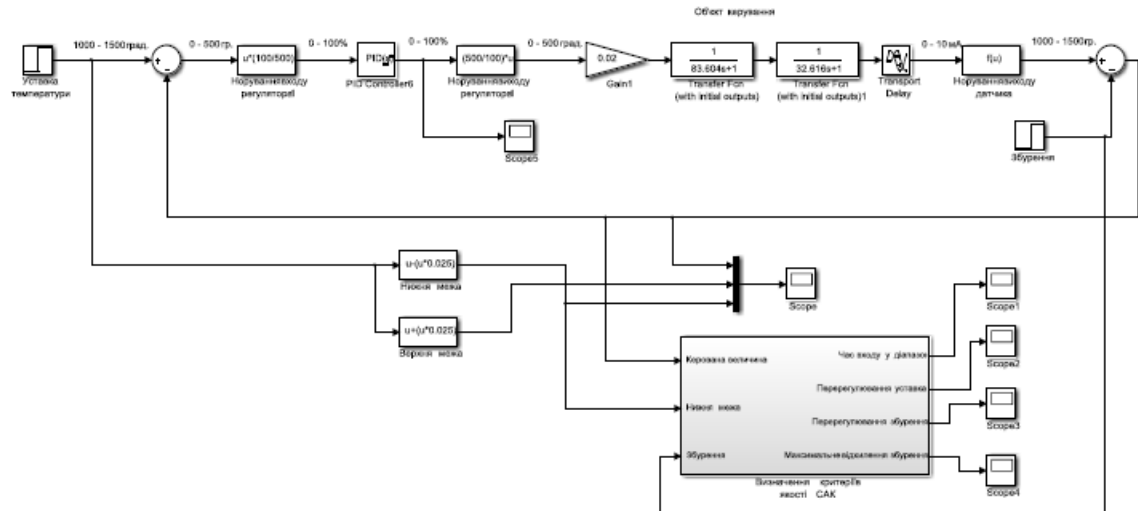


Рисунок 2.15 – САК із підсистемою оцінювання якості

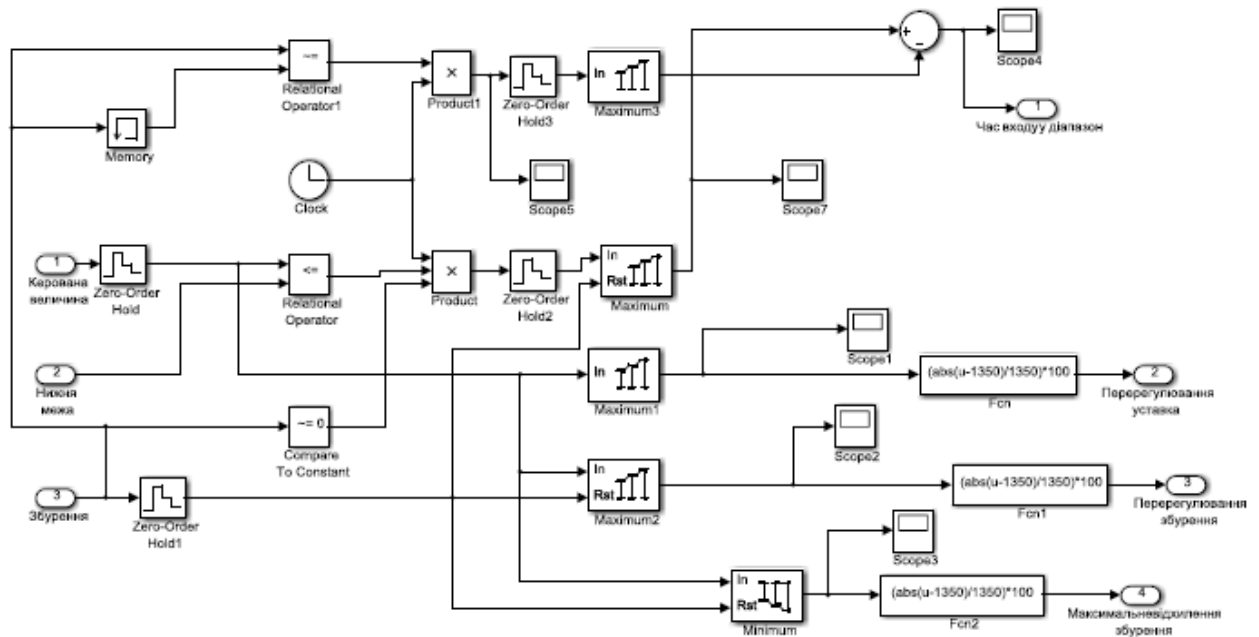


Рисунок 2.16 – Схема підсистеми оцінювання

Таблиця 2.1 – Результати дослідження залежності критеріїв якості САК від параметрів ПД-регулятора

№ Вар	Параметри регулятора				Критерії якості роботи САК				
	P	I	D	N	Максимальне відхилення, %	Перерегулювання, %	Час входу у діапазон, с	Запас стійкості за амплітудою, Дб	Запас стійкості за фазою, град.
1	0	0,0019	0	100	7,41	0	572,4	22,4	75,5
2	0	0,0022	0	100	7,41	0	528,0	21,7	74,3
3	0,31	0,00425	0	100	7,4	0,42	301,7	17,2	62,0
4	0,45	0,0087	0	100	7,4	0,71	160,4	18,8	88,0
5	2,02	0,018	40,2	0,07	7,4	0	103,4	10,6	66,0
6	3,51	0,035	70,3	0,32	7,4	0	99,3	8,8	60,1
7	6,56	0,071	128,1	5,75	7,4	0	99,1	5,41	35,0
8	8,17	0,0005	199,9	8,71	7,4	0,4	106,6	2,25	21,0
9	1,08	0,0007	341,5	13,8	-	-	-	-	-
10	0,98	0,0008	413,2	14,1	-	-	-	-	-

За табл. 2.1 дев'яте й десяте налаштування (найвища швидкодія) виявилися непридатними: система не входила до рекомендованого діапазону, тому критерії не визначено. Графіки залежностей представлено на рис. 2.17–2.18.

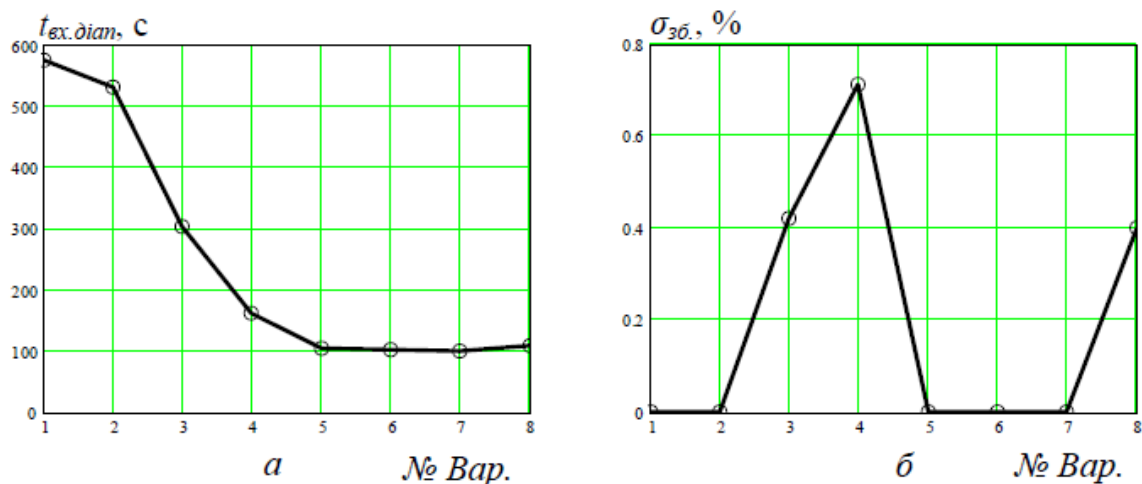


Рисунок 2.17 – Час входу в $\pm 2,5\%$ (а) та перерегулювання (б) проти № варіанту налаштування

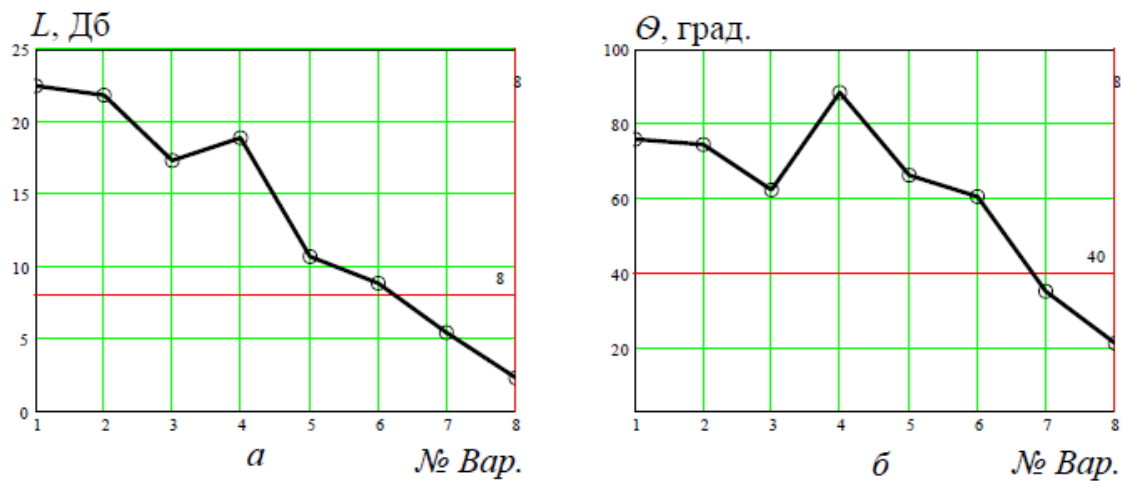


Рисунок 2.18 – Запаси стійкості за амплітудою (а) та за фазою (б) проти № варіанту

Висновки з рис. 2.17, а: час перебування поза $\pm 2,5\%$ при максимальній сходинці збурення експоненційно зменшується зі зростанням швидкодії і, починаючи з 5-го варіанту, стабілізується на рівні близько 100 с. Із рис. 2.17, б: перерегулювання для всіх прийнятних швидкодій $\leq 0,8\%$, що відповідає вимогам.

З рис. 2.18: із підвищенням швидкодії запаси стійкості (ампл./фаза) загалом зменшуються (нелінійно). Поблизу межі між середньою та високою швидкодією вони опускаються нижче допустимих 8 дБ і 40° . Отже, 5-й варіант (швидкодія між середньою й високою) забезпечує компроміс за всіма критеріями: мінімальний час входу при збереженні допустимих запасів.

За рис. 2.19 система повертає температуру в $\pm 2,5\%$ за 103,4 с, без перерегулювання; керуючий сигнал тривалий час утримується на верхній межі (100%), що відповідає високій (але не крайньої) швидкодії.

Далі перевірено роботу САК з оптимальним ПД при випадковому збуренні, характерному для реальних умов (рис. 2.20 — схема з блоком інтегральної СКП відхилення).

Аналіз рис. 2.21: фактична температура завжди лишається в межах $\pm 5\%$ навколо 1350°C . СКВ відхилення у відносних одиницях — $0,33\%$, максимальне відносне відхилення — $4,83\%$.

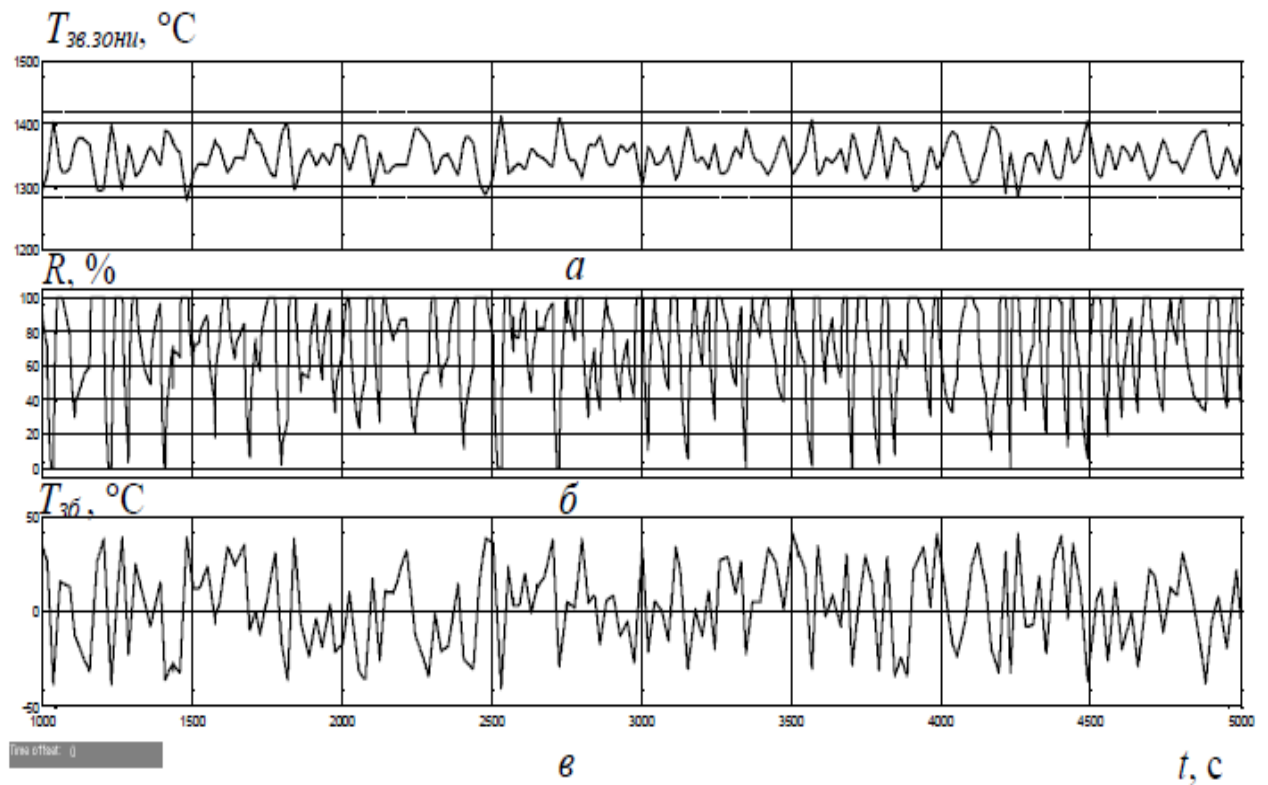


Рисунок 2.21 – Часові реалізації: а) температура; б) керуючий вплив; в) збурення (випадковий профіль)

Висновки до розділу

1. За результатами структурної та параметричної ідентифікації побудовано динамічну модель каналу «керуючий сигнал $\rightarrow$ керована величина»: дві послідовні аперіодичні ланки з часами 83,6044 с та 32,6162 с, плюс транспортна затримка 16,28 с. Статична передача каналу лінійна з коефіцієнтом 0,02.

2. За експериментальними даними збурення в системі регулювання температури (верхня зварювальна зона) мають параметри: матсподівання періоду 23 с, СКВ періоду 4,5 с, СКВ амплітуди 55 °C. З урахуванням цього створено генератор випадкового сигналу (східчасте квантування за рівнем і часом з подальшою лінійною інтерполяцією).

3. Для режиму компенсації збурення встановлено критерії якості: $A_{max} \leq 5\%$, $A_{пер} \leq 2,5\%$, мінімальний час входу в $\pm 2,5\%$, запаси стійкості ≥ 8 дБ (ампл.) і $\geq 40^\circ$ (фаза).

4. Додавання до моделі температурної САК підлеглої САК положенням заслінки з нерегульованим приводом майже не змінює перехідний процес: $NRMSE = 96,07\%$. Отже, підпорядковану САК коректно апроксимувати підсилювачем із коефіцієнтом 1.

5. Час перебування поза $\pm 2,5\%$ при максимальному східчастому збуренні обернено-експоненційно залежить від показника швидкодії; починаючи з 5-го варіанту — близько 100 с. Перерегулювання при поверненні в діапазон для всіх прийнятних швидкодій $\leq 0,8\%$.

6. Запаси стійкості (амплітуда/фаза) в середньому зменшуються при зростанні швидкодії; біля межі між середнім і високим рівнями можливе падіння нижче 8 дБ і 40° .

7. Показник швидкодії між середнім та високим (варіант №5) забезпечує найкращий компроміс: мінімальний час входу до $\pm 2,5\%$ при допустимих запасах стійкості.

8. Обчислювальний експеримент з випадковим збуренням підтвердив ефективність оптимального налаштування: СКВ відхилення 0,33%, максимальне відхилення 4,83%, утримання температури в межах $\pm 5\%$ від 1350 °С.

РОЗДІЛ 3

ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ

3.1 Структурна схема системи регулювання витрати палива та повітря оптимального керування нагрівом

Функціонування енергозберігаючої системи оптимального керування нагріванням заготовок у методичних печах полягає у визначенні поточного значення температури робочого простору або поверхні металу в кожній зоні печі та передачі цих даних як завдання для регуляторів. Вони здійснюють керування витратою палива в кожній зоні, забезпечуючи підтримання розрахованої температури на заданому рівні.

У такій системі для ефективного спалювання палива, що подається у топковий простір, необхідно обчислити й підтримувати оптимальну витрату повітря, яка гарантує повне згоряння. Зазвичай системи керування повітряним потоком будуються за каскадною схемою, спрощена структура якої подана на рисунку 3.1.

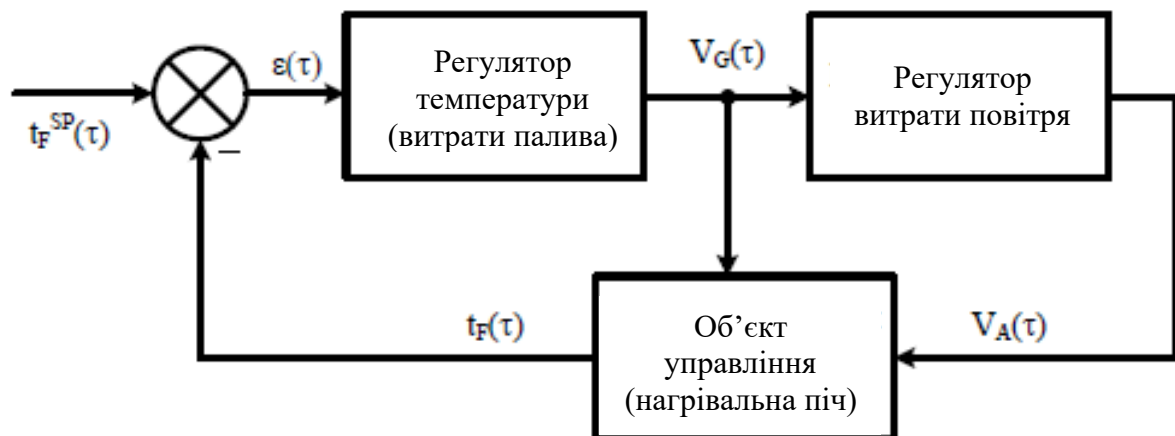


Рисунок 3.1 – Структурна схема системи регулювання витрати палива та повітря

На регулятор температури надходить сигнал розбалансу $\varepsilon(\tau) = t_F^{SP}(\tau) - t_F(\tau)$ що визначає різницю між заданою температурою ($t_F(\tau)$), розрахованою системою керування нагрівом, і реальною температурою робочого простору. В результаті формується сигнал витрати газу ($VG(\tau)$), який подається на виконавчі механізми, що регулюють положення заслінок у газопроводі. Той самий сигнал, виміряний датчиком витрати, подається і до регулятора витрати повітря, де визначається поточна величина ($VA(\tau)$) для відповідного ($VG(\tau)$) і далі передається до виконавчих механізмів повітропроводу.

Щоб уникнути збоїв оптимізаційного керування за умов дрейфу статичних характеристик процесу, система реалізується у двоконтурній структурі.

Перший контур — стабілізувальний, — швидко визначає наближену величину витрати повітря, забезпечуючи оперативну реакцію на різкі зміни параметрів, наприклад, при зміні подачі газу. Другий контур — оптимізаційний, — виконує точне налаштування процесу спалювання палива для досягнення найкращого режиму, хоча працює повільніше. Послідовність роботи двоконтурної системи оптимізації процесу горіння показано на рисунку 3.2.

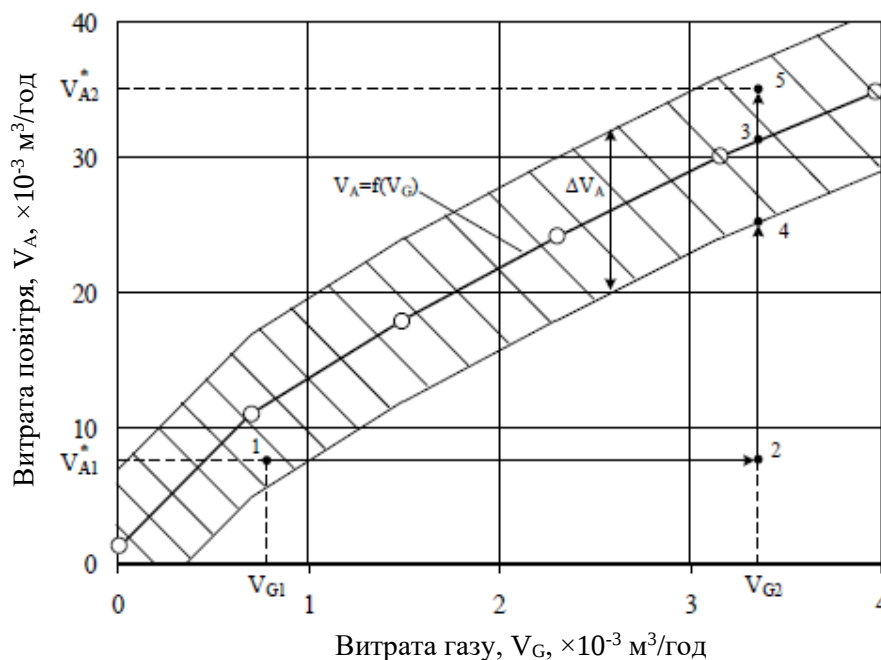


Рисунок 3.2 – Послідовність роботи двоконтурної системи оптимізації процесу спалювання палива при зміні витрати палива

3.2 Структурна схема двоконтурної системи автоматичної оптимізації

Схему двоконтурної системи, що реалізує цей принцип керування, наведено на рисунку 3.3.

До стабілізуювального контуру входять датчики поточних витрат палива (ДП) та повітря (ДПв) із перетворювачами, а також пристрої реєстрації відповідних значень ($V_G(\tau)$) і ($V_A(\tau)$).

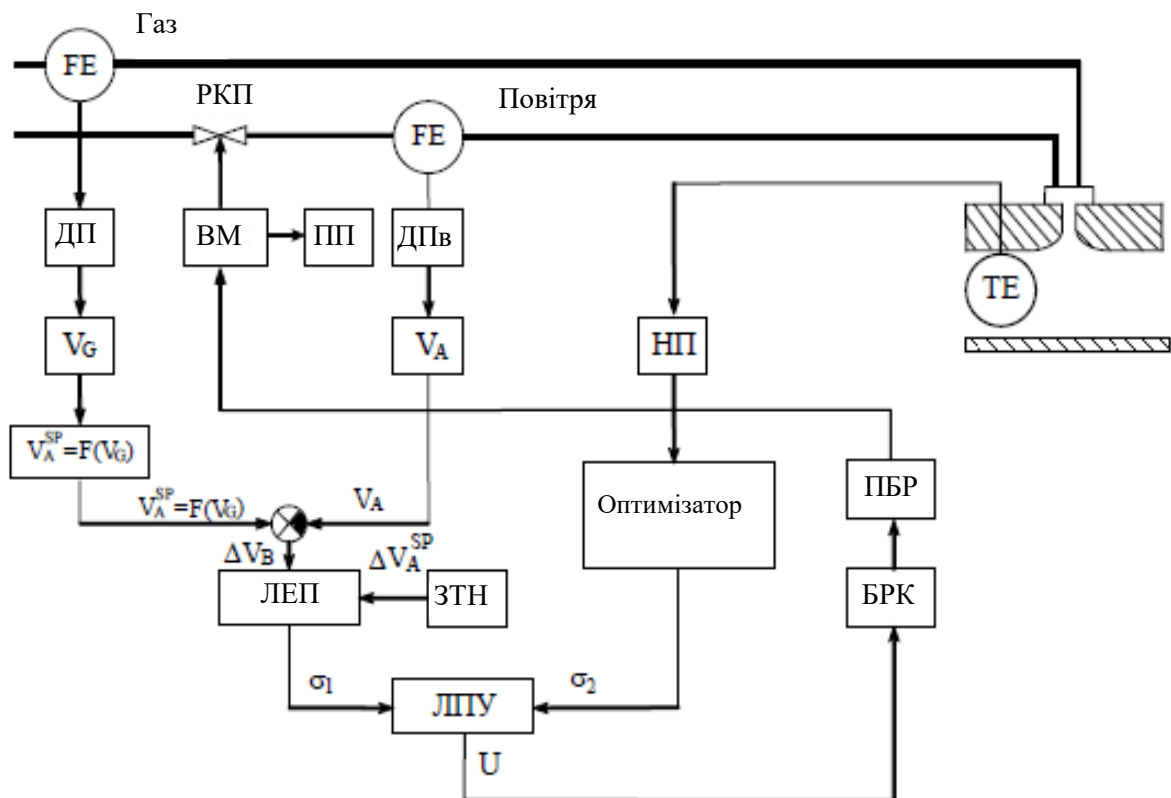


Рисунок 3.3 – Структурна схема двоконтурної системи оптимізації процесу спалювання палива в промислових печах

Контур оптимізації включає датчик температури (ТЕ) — термопару або оптичний пірометр, зорієнтований на дно карборундового стакана в склепінні печі. Оптимальне розміщення датчика — на відстані 500–700 мм від осі факела та заглибленням 20–50 мм у топковий простір.

Сигнал температури, перетворений нормувальним перетворювачем у стандартний уніфікований формат, надходить до оптимізатора — програмного

пристрою або алгоритму оптимізації (ОАК), реалізованого на мікропроцесорному контролері.

Оптимізатор забезпечує пошук і підтримання умов з максимально можливим тепловим ефектом у межах допустимого діапазону ΔV^{SP} . У процесі роботи формується керуючий сигнал $\sigma_2 \in [-1, 0, +1]$, де: -1 – зменшення витрати повітря; $+1$ – збільшення витрати повітря; 0 – зупинка виконавчого механізму.

Під час пошуку оптимуму сигнал змінюється між ± 1 ; після досягнення оптимального значення повітряної подачі (V_A^+) система витримує паузу τ_s ($\sigma_2 = 0$), після чого цикл поновлюється.

3.3 Система автоматичної оптимізації процесу спалювання палива

Проект реалізації системи автоматичного оптимізованого керування спалюванням палива у зоні нагрівальної печі включає:

- функціональну схему автоматизації;
- принципову електричну схему з використанням контролера;
- програму реалізації оптимізувального алгоритму (ОАК) з урахуванням особливостей функціональної схеми та електричної частини.

Схемою передбачено виконання таких функцій:

1. Вимірювання, індикація та реєстрація поточних витрат повітря та природного газу. Витрати визначаються за перепадом тиску на діафрагмах (поз. 1а, 3а), установлених у трубопроводах. Первинні перетворювачі (поз. 1б, 3б) формують електричний сигнал, який лінеаризується блоками (поз. 1в, 3в). Поточна витрата повітря також реєструється приладом (поз. 1г). Сигнали надходять на аналогові входи контролера.

2. Вимірювання температури в зоні горіння. Виконується термоелектричним датчиком (поз. 2а), сигнал якого через нормувальний перетворювач (поз. 2б) подається на четвертий аналоговий вхід контролера.

3. Формування керуючого сигналу для виконавчого механізму. Контролер генерує імпульсні сигнали (через пристрій запуску, поз. 1е) для керування виконавчим механізмом (поз. 1ж).
4. Режими керування. Перемикання між автоматичним і ручним режимами, а також дистанційне керування здійснюється блоком ручного керування (поз. 1д).
5. Контроль положення виконавчого механізму. Блок сигналізації положення (поз. 4а) передає дані на індикатор (поз. 4б) і на третій аналоговий вхід контролера.

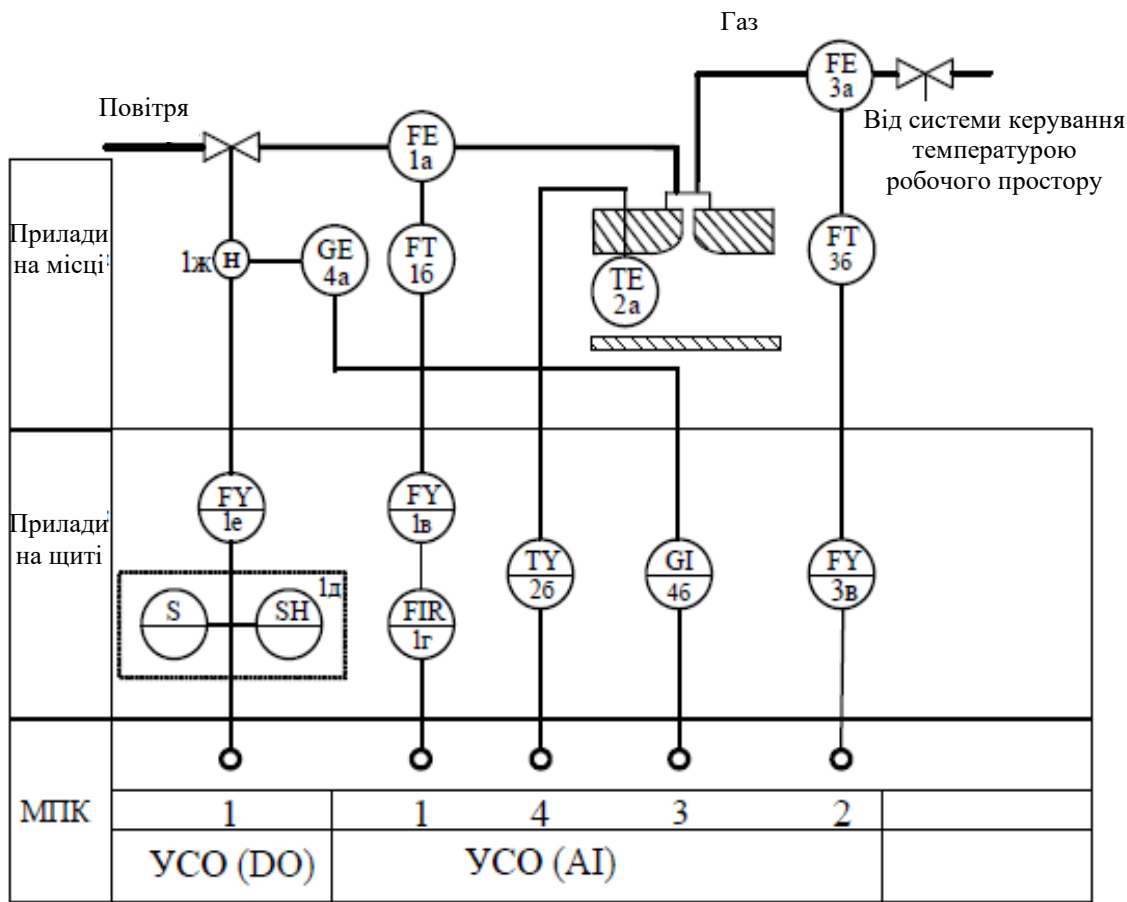


Рисунок 3.4 – Функціональна схема автоматизації контуру керування процесом спалювання палива

3.4 Робота контурів у системі автоматичної оптимізації теплового режиму

У прохідних печах нагрівання заготовок перед прокаткою відбувається кілька взаємопов'язаних процесів. Для стабілізації параметрів у кожному з них застосовуються окремі контури регулювання.

У системі оптимізації керування тепловими процесами таких печей зазвичай виділяють три групи взаємопов'язаних локальних контурів:

1. Контур керування температурним параметром процесу нагріву — може базуватись на контролі температури факела, робочого простору, поверхні кладки або металу.

2. Контур керування процесом спалювання палива, підпорядкований температурному.

3. Контур керування газодинамічним режимом (тиском) у топковому просторі, що залежить від перших двох контурів.

Взаємний вплив цих контурів є суттєвим, особливо під час оптимізації, коли дрейф статичних характеристик може порушити рівновагу системи. Дослідження взаємодії дозволяє визначити реакцію системи автоматичної оптимізації на зовнішні збурення, оцінити її ефективність і вибрати оптимальну структуру керування.

У наведеній схемі реалізовано контур стабілізації температури на основі стандартного ПД-регулятора та два оптимізаційні контури з алгоритмами оптимізованого керування (ОАК).

Перший контур (ОАК₁) вибирає та підтримує такий потік повітря ($V_A(\tau)$) при поточній витраті палива ($V_G(\tau)$), щоб тепловий ефект був максимальним. Другий контур (ОАК₂) стабілізує тиск у робочому просторі, зменшуючи втрати від підсмоктувань і перевищення тиску.

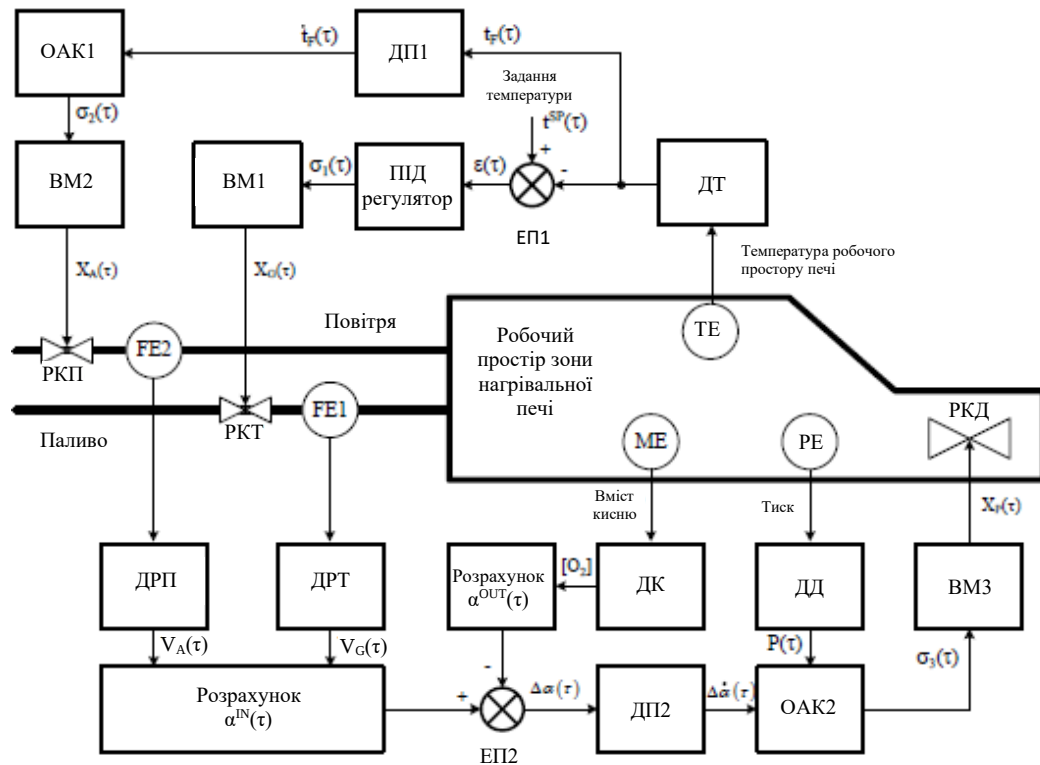


Рисунок 3.5 – Структурна схема системи оптимізації керування тепловим режимом робочого простору печі

3.5 Створення Matlab моделі для об'єкта керування

Розроблена система автоматичного керування представлена на рис. 3.6.

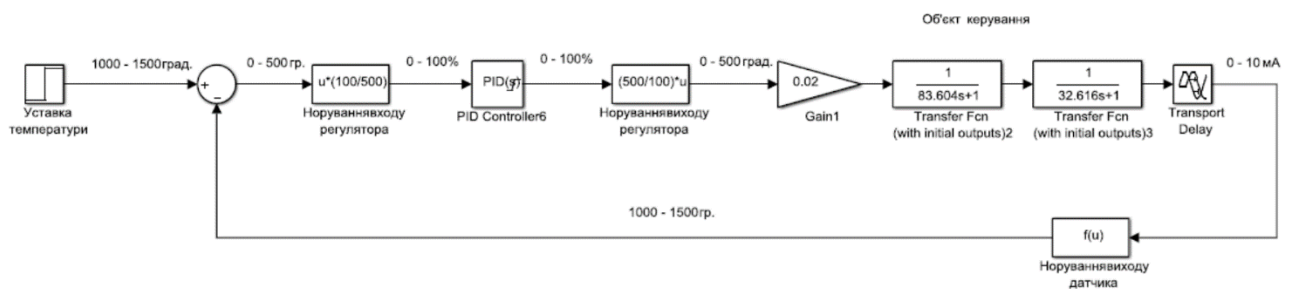


Рисунок 3.6 – Імітаційна модель розробленої системи автоматичного керування

На рисунку 3.7 подано результати моделювання: у верхній частині показано зміну керованої величини, а в нижній — керуючої.

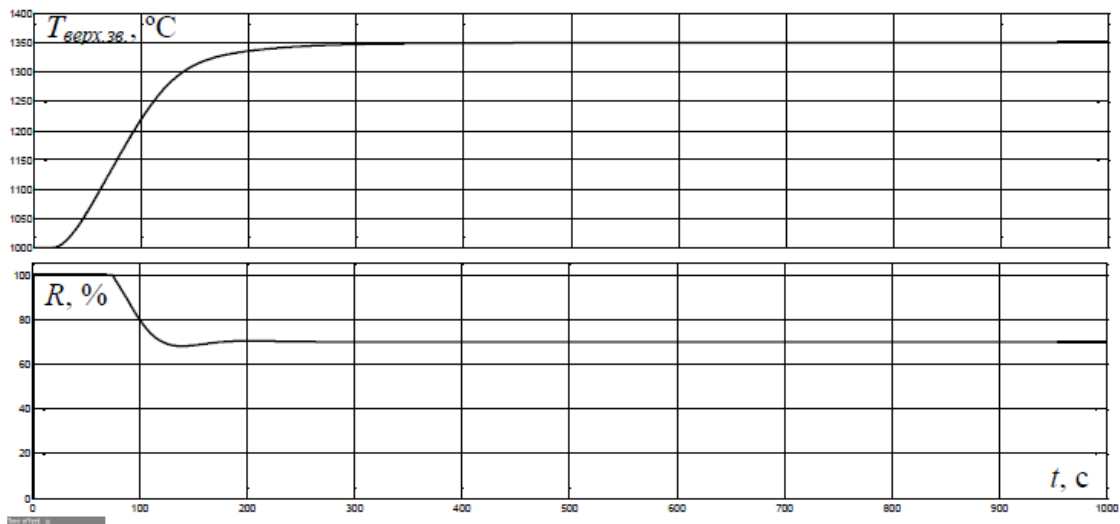


Рисунок 3.7 – Результати моделювання розробленої системи автоматичного керування (верхній графік – керована величина, нижній – керуюча)

Для того щоб розробити програмне забезпечення системи потрібно перейти до її цифрової моделі а від неперервної. Для цього неперервні елементи системи замінюються відповідними цифровими моделями. Зокрема, для перетворення неперервних моделей виконується програмою на мові MATLAB (рис. 3.8)

```
w1=tf([1],[83.604 1]);
w2=tf([1],[32.616 1]);
w1z=c2d(w1,0.1);
w2z=c2d(w2,0.1);

[num1 denum1] = tfdata(w1z);
A1 = cell2mat(num1)
B1 = cell2mat(denum1)

[num2 denum2] = tfdata(w2z);
A2 = cell2mat(num2)
B2 = cell2mat(denum2)
```

Рисунок 3.8 – Перетворення неперервної моделі об'єкта керування в цифрову

Результати виконання програми

$A1 =$

0 0.001195399957978

$B1 =$

1.0000000000000000 -0.998804600042022

$A2 =$

0 0.003061284570645

$B2 =$

1.0000000000000000 -0.996938715429355

На основі отриманих коефіцієнтів побудовано цифрову модель об'єкта керування (рис. 3.9) і цифрову систему автоматичного керування (САК) (рис. 3.10).

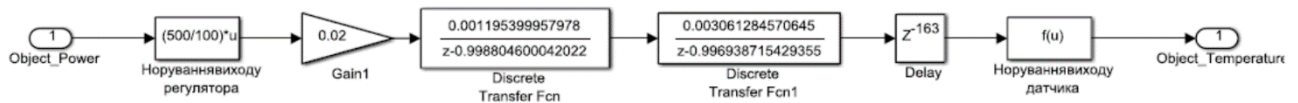


Рисунок 3.9 – Цифрова модель об'єкта керування

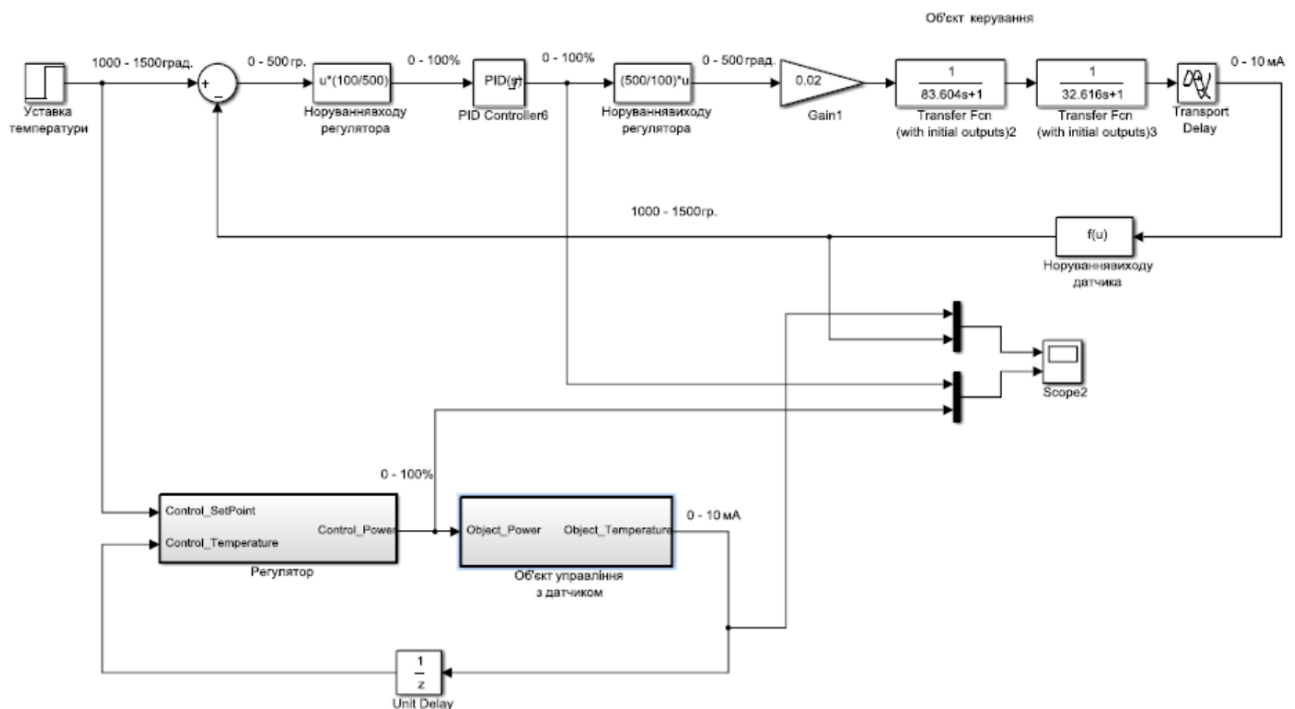


Рисунок 3.10 – Порівняння неперервної та цифрової моделей системи автоматичного керування

На рисунку 3.11 наведено результати порівняльного моделювання, де: а – величина якою керують, б – величина яка керує.

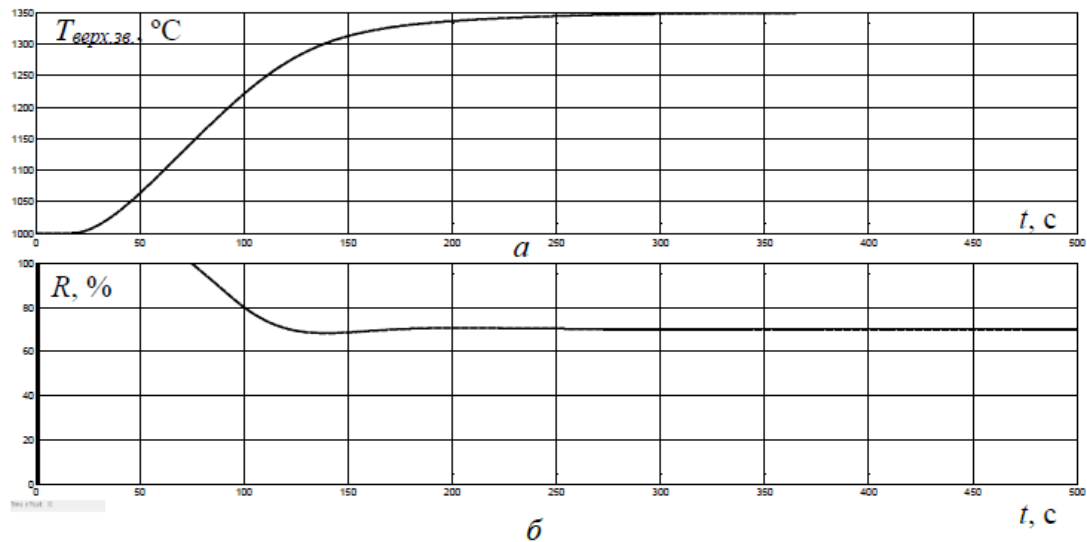


Рисунок 3.11 – Результати моделювання

По графікам видно, що вони практично збігаються. Для точнішої оцінки відповідності використано нормоване середньоквадратичне відхилення між точками обох моделей за часом:

```
>> goodnessOfFit(Model_C, Model_D, 'NRMSE')*100
```

```
ans = 99.4158
```

Отриманий результат свідчить про високу точність відтворення цифровою моделлю динаміки неперервної системи (відповідність становить 99,4%).

У підсистемі, що відповідає регулятору, реалізовано цифрову модель ПІД-регулятора. Вона містить обмеження на керуючий сигнал у межах 0–100%, а також захист від перенасичення інтегруючої складової, що підвищує стабільність системи.

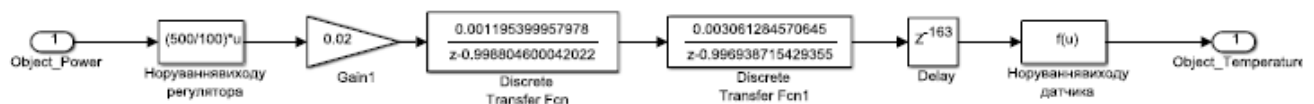


Рисунок 3.12 – Цифрова модель об'єкта керування

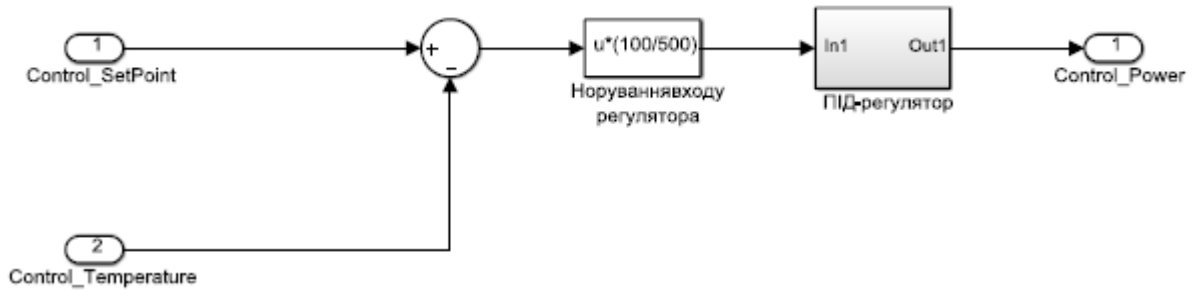


Рисунок 3.13 – Цифрова модель регулятора

На основі отриманої цифрової моделі САК сформовано програмні модулі (дод. А).

3.6 Створення програмного забезпечення для автоматизованої системи керування

Програмне забезпечення автоматизованої системи керування структуровано на два основні функціональні модулі: блок регулювання та модель керованого об'єкта. Такий принцип побудови сприяє модульному підходу, що полегшує процес налаштування та інтеграції окремих елементів системи.

Розробка програмного забезпечення регулятора виконувалася для програмованого логічного контролера (PLC), який функціонує в середовищі zenon Logic, що входить до складу SCADA-системи Zenon. Контролер відповідає за формування керуючого впливу на об'єкт залежно від відхилення температури у верхній зварювальній зоні від заданого значення.

Програмне забезпечення для об'єкта керування створено з метою перевірки коректності функціонування системи та тестування драйвера пристрою керування.

Для цього було розроблено драйвер з відповідними налаштуваннями, який забезпечує взаємодію між програмним середовищем і змінними, що моделюють фізичні входи та виходи системи (рис. 3.14).

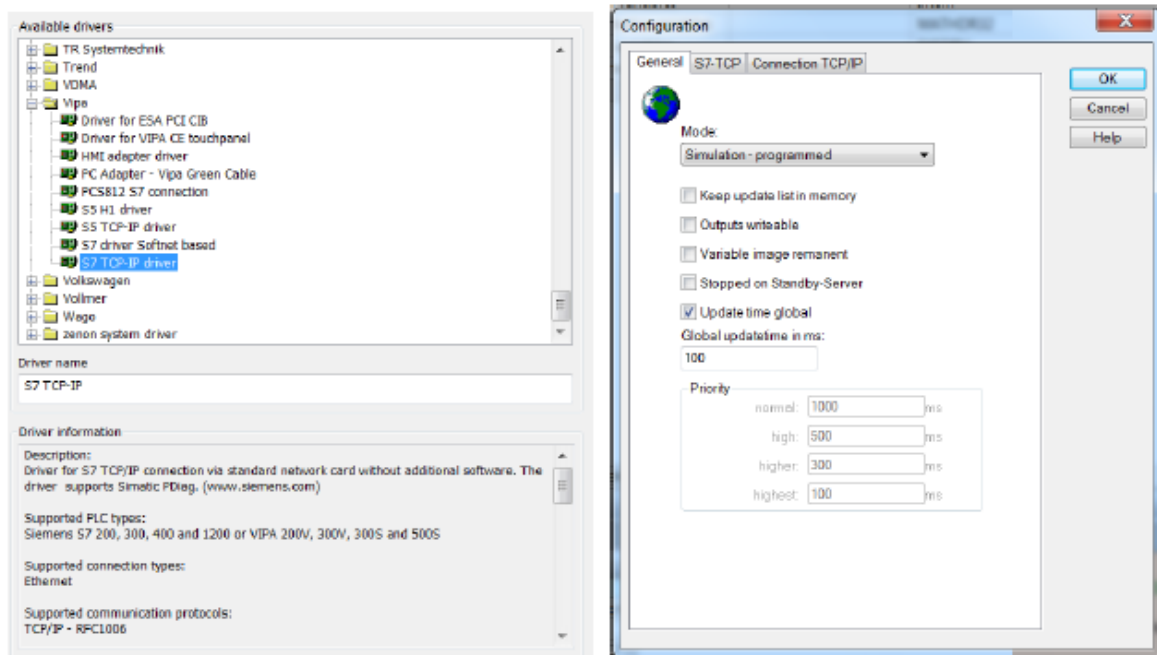


Рисунок 3.14 – Вибір драйвера пристрою керування та його параметри

Для драйвера були створені змінні, які забезпечують доступ до необхідних параметрів системи — сигналів на вході та виході, а також проміжних технологічних змінних (рис. 3.15).

State	Name	Identification	Measur.	Net address	Data block	Offset	Bit num.	Align.	Symbol	Driver	Data type	Decimals	Start offset
	Power	Filter load	%	0	0	0	0	0		S7TCP12 - VIPA	REAL	0	0
	Temperature	Filter load	°C	0	0	0	0	0		S7TCP12 - VIPA	REAL	2	0

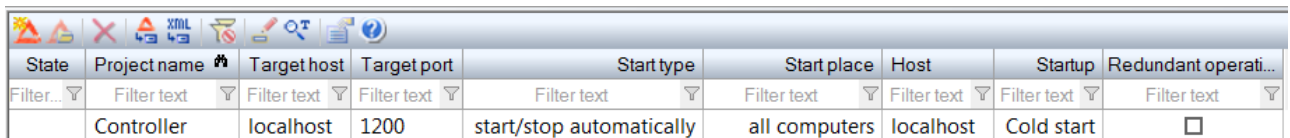
Рисунок 3.15 – Змінні драйвера об'єкта керування

Розроблення програмного забезпечення виконано у середовищі zenon Logic Workbench, де на основі попередньо створеного модуля було реалізовано цифрову модель об'єкта керування. Після цього, з використанням розробленого користувацького функціонального блоку, побудовано повноцінне програмне

забезпечення об'єкта керування. Це програмне забезпечення дає змогу виконувати перевірку динамічної поведінки системи у режимі реального часу.

Детальний перелік розроблених програм, змінних та драйверів, що використовуються в модулі об'єкта керування, наведено у додатку Б1.

Проект регулятора у середовищі Zenon Logic (рис. 3.16) створено для реалізації програмного забезпечення регулятора.



State	Project name	Target host	Target port	Start type	Start place	Host	Startup	Redundant operati...
Filter...	Filter text	Filter text	Filter text	Filter text	Filter text	Filter text	Filter text	Filter text
	Controller	localhost	1200	start/stop automatically	all computers	localhost	Cold start	☐

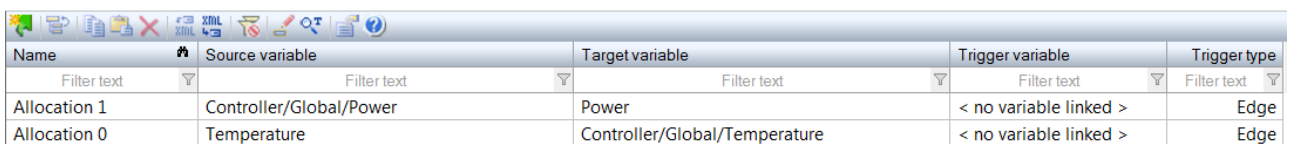
Рисунок 3.16 – Проект регулятора

У межах цього проекту створено набір змінних, що відповідають основним параметрам системи:

- заданій (уставці) температури;
- фактичному значенню температури у верхній зварювальній зоні;
- вихідному керуючому впливу (сигналу на форсунку).

Всі ці змінні описані та структуровані у додатку Б2.

За допомогою механізм розподілу даних “Allocations”, який забезпечує автоматичний обмін інформацією між програмними блоками встановлено зв'язок між програмними модулями регулятора і об'єкта керування (рис. 3.17).



Name	Source variable	Target variable	Trigger variable	Trigger type
Filter text	Filter text	Filter text	Filter text	Filter text
Allocation 1	Controller/Global/Power	Power	< no variable linked >	Edge
Allocation 0	Temperature	Controller/Global/Temperature	< no variable linked >	Edge

Рисунок 3.17 – Механізм розподілу “Allocations”

У межах цього механізму реалізовано два типи зв'язків:

1. Перший канал передає поточне значення температури у верхній зварювальній зоні від об'єкта керування до регулятора.

2. Другий канал забезпечує зворотну передачу сигналу керуючого впливу (положення заслінки або витрати палива) від регулятора до об'єкта керування.

Таким чином, створена двостороння взаємодія між підсистемами, що дозволяє забезпечити стабільний зворотний зв'язок і контроль процесу в реальному часі.

3.7 Створення програмного забезпечення людино-машинного інтерфейсу

Людино-машинний інтерфейс (ЛМІ) забезпечує взаємодію оператора з технологічним процесом, відображає актуальний стан об'єкта і дозволяє контролювати виконання керуючих команд.

Для повноцінного функціонування системи автоматичного керування програмний модуль ЛМІ повинен забезпечувати такі основні можливості:

- візуалізацію перебігу перехідних процесів у режимі реального часу;
- контроль за зміною параметрів об'єкта керування, включаючи основні технологічні величини;
- моніторинг стану системи із можливістю відображення аварійних ситуацій, попереджень і діагностичних повідомлень.

Для зручності експлуатації та відповідності технічним стандартам було сформульовано базові вимоги до людино-машинного інтерфейсу:

- мінімальна роздільна здатність екрану оператора — 1024×920 рх;
- кількість екранів (зображень) — п'ять, з можливістю перемикання між ними за допомогою навігаційних кнопок;
- основні типи зображень:
 - технологічна схема процесу;
 - графік перехідного процесу;
 - список подій;
 - список тривог;
 - панель навігації з кнопками управління.

На рисунку 3.18 показано набір кнопок, реалізованих у межах ЛМІ. Кожна кнопка виконує певну функцію переходу між екранами або виклик окремих операційних вікон.

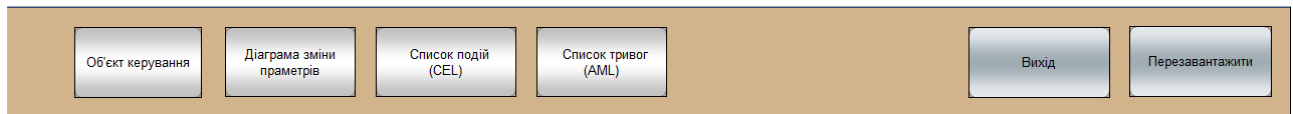


Рисунок 3.18 – Зображення кнопок ЛМІ

Кнопка «Об'єкт керування» відкриває екран із технологічною схемою системи (рис. 3.19), на якому відображено розташування основних датчиків, виконавчих механізмів та напрямки потоків. Для реалізації переходу між вікнами інтерфейсу використано функцію switch screen, яка забезпечує перемикання між екранами системи.

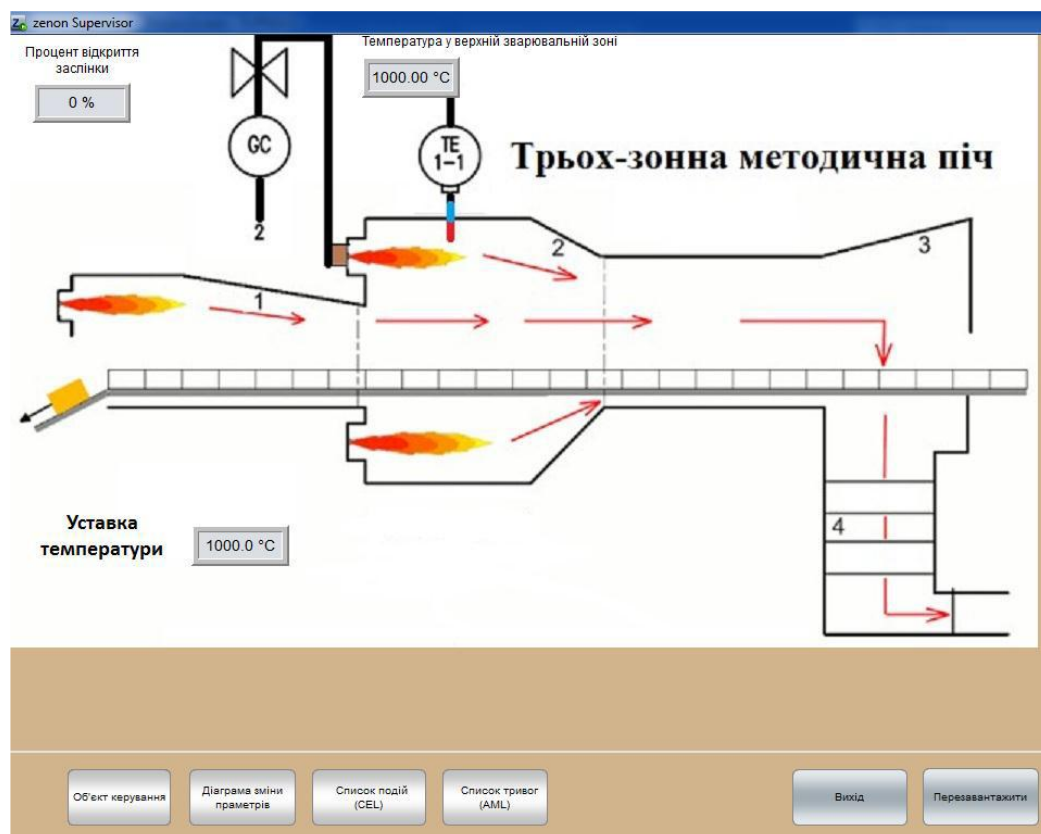


Рисунок 3.19 – Екран із технологічною схемою

Аналогічним чином реалізовано роботу кнопок «Діаграма зміни параметрів», «Список подій» та «Список тривог» — при їх натисканні

відкриваються відповідні вікна з графічним відображенням температурних змін (рис. 3.20), журналом подій (рис. 3.21) і журналом тривог (рис. 3.22).

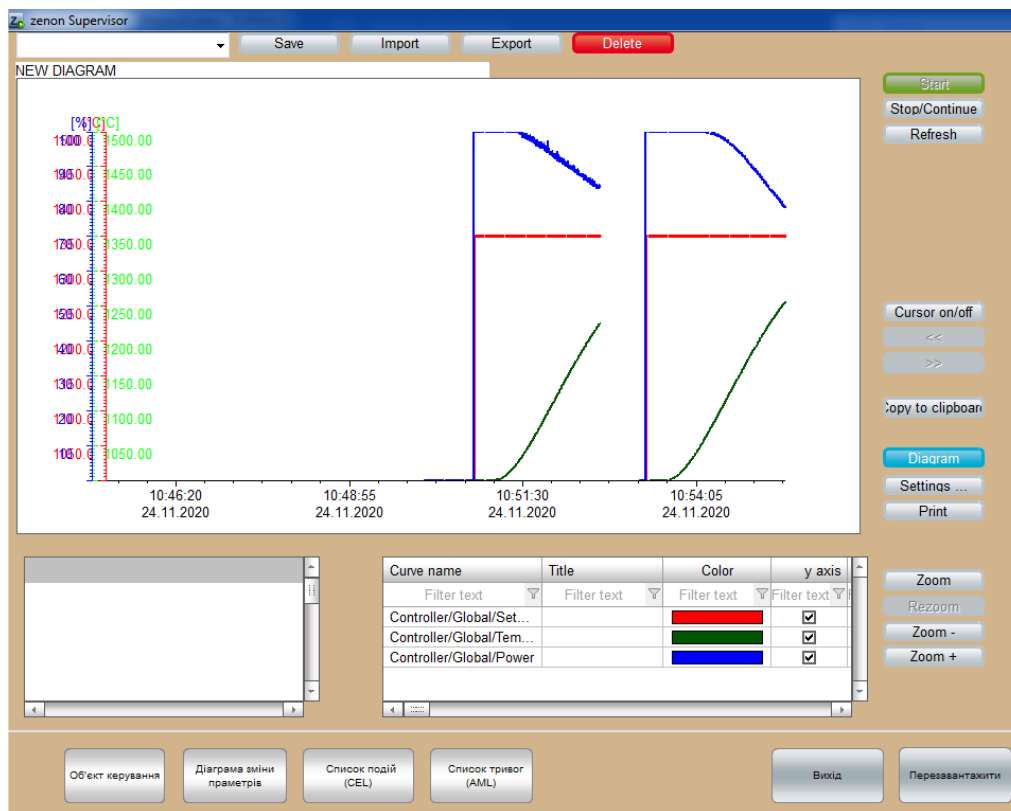


Рисунок 3.20 – Екран з графіком перехідного процесу

Variable name	Time received	Text
	24.11.2020 11:11:34	System was stopped
	24.11.2020 11:11:59	System was started
Controller/Global/SetPoint	24.11.2020 11:12:05	Modify spontaneous value: (1350.0 °C)
	24.11.2020 11:14:48	System was stopped
	24.11.2020 11:15:12	System was started
Controller/Global/SetPoint	24.11.2020 11:15:18	Modify spontaneous value: (1350.0 °C)
	24.11.2020 11:17:48	System was stopped
	24.11.2020 11:18:20	System was started
Controller/Global/SetPoint	24.11.2020 11:18:26	Modify spontaneous value: (1350.0 °C)
	24.11.2020 11:21:12	System was stopped
	24.11.2020 11:21:58	System was started
Controller/Global/SetPoint	24.11.2020 11:22:05	Modify spontaneous value: (1350.0 °C)
	24.11.2020 11:32:05	System was stopped
	24.11.2020 11:32:49	System was started
Controller/Global/SetPoint	24.11.2020 11:33:03	Modify spontaneous value: (1350.0 °C)
	24.11.2020 11:36:42	System was stopped
	24.11.2020 11:37:40	System was started
Controller/Global/SetPoint	24.11.2020 11:37:50	Modify spontaneous value: (1350.0 °C)
	24.11.2020 11:47:19	System was stopped
	24.11.2020 11:49:27	System was started
Controller/Global/SetPoint	24.11.2020 11:49:37	Modify spontaneous value: (1350.0 °C)

Рисунок 3.21 – Екран “Список подій”

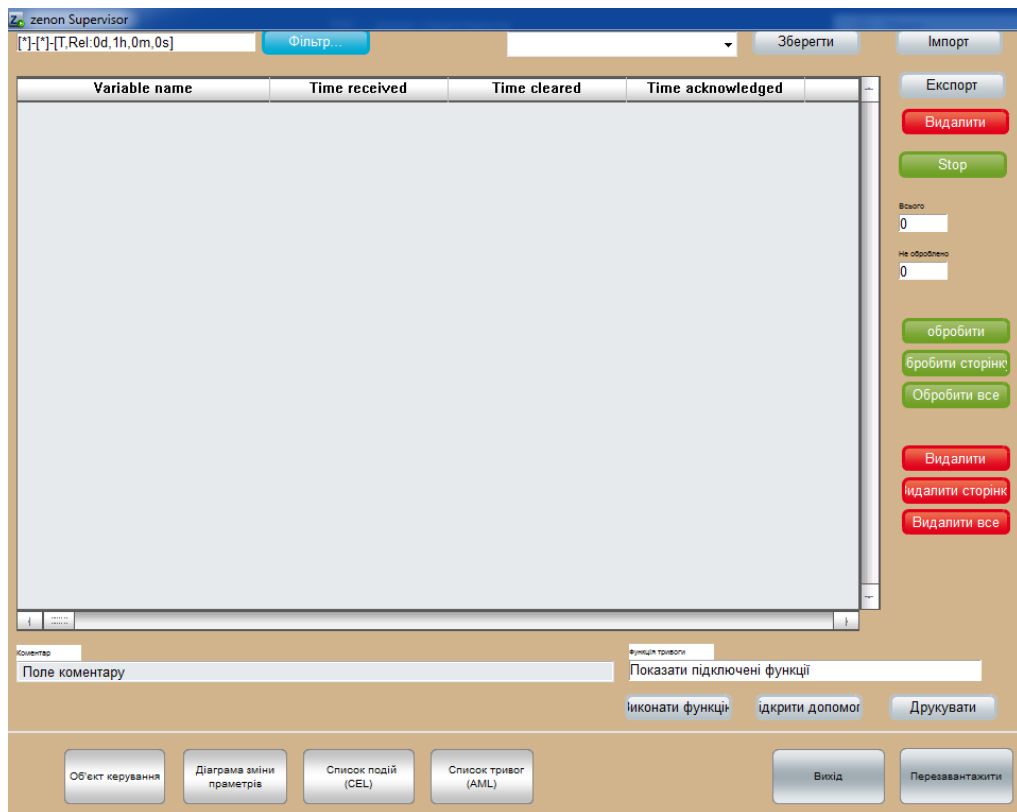


Рисунок 3.22 – Екран “Список тривог”

Кнопки «Вихід» та «Перезавантажити» реалізовано з використанням вбудованих функцій `exit runtime` і `reload project`, що дають змогу відповідно завершити роботу проєкту або перезапустити його без необхідності виходу із середовища SCADA.

Усі створені зображення організовано згідно з єдиним графічним шаблоном (рис. 3.23). Основна частина вікна — це головний фрейм, де відображаються змінні технологічного процесу, діаграми й індикатори. Панель із кнопками розташована окремим статичним фреймом, який постійно залишається видимим і забезпечує швидкий доступ до всіх функцій інтерфейсу.

Для реалізації екранів «Список подій» і «Список тривог» використано стандартні шаблони SCADA-системи zenon, що дозволяють автоматично формувати й оновлювати журнали у процесі роботи системи.

Розроблене програмне забезпечення людино-машинного інтерфейсу повністю відповідає вимогам до SCADA-візуалізації, забезпечує зручний моніторинг процесу, відображення поточних параметрів, контроль стану

обладнання та оперативне інформування про події в системі. Детальний опис реалізації інтерфейсу та структура проєкту наведені у додатку В.

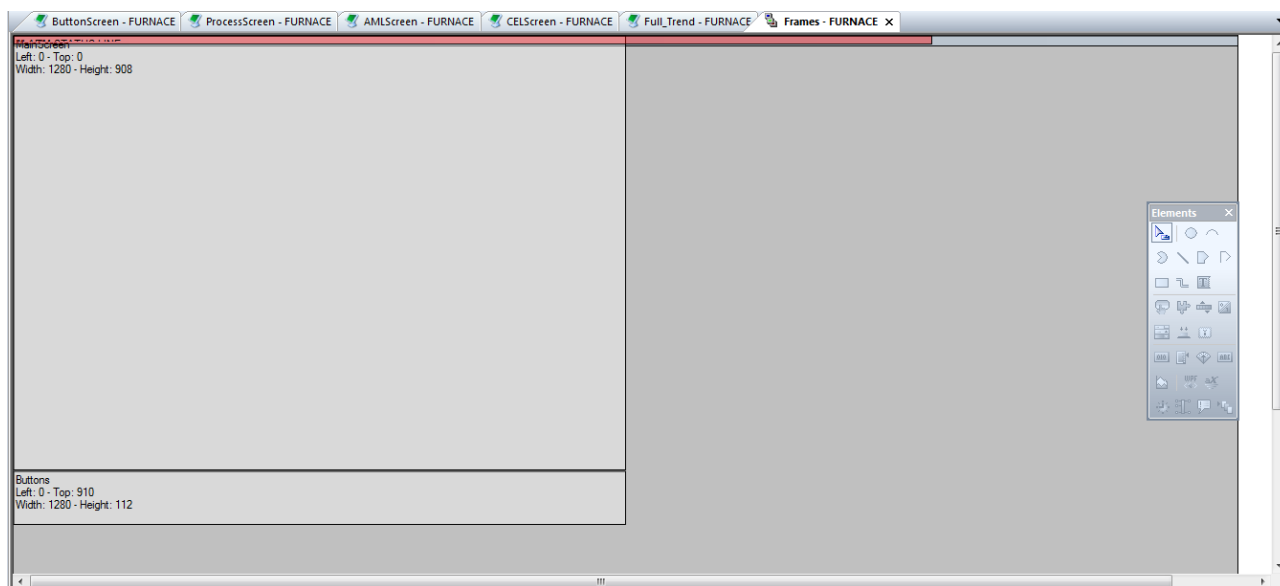


Рисунок 3.23 – Структурний шаблон зображень ЛМІ

3.8 Перевірка функціонування програмного забезпечення

Етап перевірки функціонування програмного забезпечення системи автоматичного керування виконувався з метою оцінки працездатності створених програмних модулів та перевірки узгодженої взаємодії між регулятором, об'єктом керування і людино-машинним інтерфейсом (ЛМІ).

Для тестування було встановлено уставку температури у верхній зварювальній зоні методичної печі 1350 °C, після чого система була переведена у режим моделювання.

Результати випробувань подані на рисунку 3.24, який демонструє динаміку зміни температури та реакцію системи на збурення. З аналізу графіка видно, що об'єкт і регулятор функціонують узгоджено, а перехідний процес відбувається

без коливань, перевищення чи запізнення, які виходили б за межі допустимих значень.

Перерегулювання не перевищує 2,5 %, що відповідає критеріям якості, визначеним під час синтезу системи.



Рисунок 3.24 – Перевірка функціонування програмного забезпечення системи автоматичного керування

У ході тестування також було здійснено перевірку роботи людино-машинного інтерфейсу. Результати підтвердили, що всі функціональні елементи ЛМІ працюють коректно:

- усі кнопки виконують свої призначення — забезпечують швидкий перехід між екранами системи;

- на технологічній схемі коректно відображаються актуальні параметри процесу, включаючи значення температури, положення клапана та стан виконавчих механізмів;
- при зміні уставки дані про подію автоматично фіксуються у списку подій;
- система своєчасно генерує аварійні повідомлення, однак під час тестування жодних тривожних подій не зафіксовано, що свідчить про стабільну роботу системи.

Отже, проведена перевірка показала, що створене програмне забезпечення функціонує коректно, взаємодія між усіма компонентами — об'єктом, регулятором і ЛМІ — є узгодженою, а система в цілому відповідає технічним вимогам до якості, надійності та стабільності. Розроблене рішення може бути використане для практичного впровадження у виробничих умовах, забезпечуючи автоматизоване регулювання температури в методичній печі відповідно до технологічних параметрів процесу.

Висновки до розділу

У результаті проведеної роботи виконано повний цикл розробки програмного забезпечення системи автоматичного керування технологічним процесом, що включає створення модулів об'єкта керування, регулятора та людино-машинного інтерфейсу (ЛМІ).

У ході дослідження було здійснено:

- розробку цифрової моделі об'єкта керування, що забезпечує адекватне відтворення динаміки неперервної системи;
- створення програмного забезпечення регулятора, адаптованого для роботи у середовищі SCADA zenon із використанням контролера zenon Logic;

- розробку програмного забезпечення об'єкта керування, яке реалізує моделювання технологічного процесу для тестування функціональних можливостей системи;

- проектування людино-машинного інтерфейсу, який забезпечує моніторинг, керування й діагностику стану системи в режимі реального часу.

Перевірка функціонування розробленого програмного забезпечення підтвердила правильність і надійність роботи всіх складових. Результати випробувань засвідчили:

- коректну взаємодію регулятора з об'єктом керування;
- стабільність системи при заданій уставці температури 1350 °С;
- відсутність значних коливань перехідного процесу (перерегулювання не перевищує 2,5 %);

- коректну роботу елементів ЛМІ — усі функціональні кнопки, відображення параметрів, реєстрація подій і тривог здійснюються згідно з вимогами.

Таким чином, розроблена система автоматичного керування та її програмне забезпечення повністю відповідають встановленим технічним і функціональним вимогам:

- точне підтримання температурного режиму у верхній зварювальній зоні методичної печі;
- високу якість керування технологічним процесом;
- надійність і зручність експлуатації завдяки інтегрованому людино-машинному інтерфейсу.

Проведені дослідження довели, що створене програмне забезпечення може бути використане у виробничих умовах для реалізації автоматизованого контролю температури, підвищення енергоефективності процесу та стабілізації параметрів технологічної системи.

ВИСНОВКИ

Методична піч є складним теплотехнічним об'єктом з точки зору автоматизації, оскільки на її тепловий баланс одночасно впливає значна кількість взаємопов'язаних факторів.

Температура у верхній зварювальній зоні залежить не лише від інтенсивності згоряння палива чи втрат тепла з відхідними газами, а й від процесів, що протікають у методичній і томильній зонах, а також у системі рекуперації теплоти.

Досліджуваний об'єкт є неперервною одномірною системою з одним керуючим входом (сигналом на блок керування мазутною форсункою) та одним вихідним параметром (температура у верхній зварювальній зоні).

За результатами структурної та параметричної ідентифікації побудовано динамічну модель каналу «керуючий сигнал → керована величина».

Додавання до моделі температурної САК підлеглої САК положенням заслінки з нерегульованим приводом майже не змінює перехідний процес.

Запаси стійкості (амплітуда/фаза) в середньому зменшуються при зростанні швидкодії.

У результаті проведеної роботи виконано повний цикл розробки програмного забезпечення системи автоматичного керування технологічним процесом, що включає

- розробку цифрової моделі об'єкта керування, що забезпечує адекватне відтворення динаміки неперервної системи;
- створення програмного забезпечення регулятора, адаптованого для роботи у середовищі SCADA zenon із використанням контролера zenon Logic;
- розробку програмного забезпечення об'єкта керування, яке реалізує моделювання технологічного процесу для тестування функціональних можливостей системи;

- проектування людино-машинного інтерфейсу, який забезпечує моніторинг, керування й діагностику стану системи в режимі реального часу.

Перевірка функціонування розробленого програмного забезпечення підтвердила правильність і надійність роботи всіх складових

Таким чином, розроблена система автоматичного керування та її програмне забезпечення повністю відповідають встановленим технічним і функціональним вимогам:

- точне підтримання температурного режиму у верхній зварювальній зоні методичної печі;
- високу якість керування технологічним процесом;
- надійність і зручність експлуатації завдяки інтегрованому людино-машинному інтерфейсу.

Проведені дослідження довели, що створене програмне забезпечення може бути використане у виробничих умовах для реалізації автоматизованого контролю температури, підвищення енергоефективності процесу та стабілізації параметрів технологічної системи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Сибір А.В., Решетняк С.І., Романько Я.В. Застосування сучасних методів моделювання для розрахунку теплової роботи паливних нагрівальних печей. *Теплотехніка та енергетика в металургії*: зб. тр. XV Міжнародна конференція. Дніпропетровськ, 7–9 жовтня 2008 р. Дніпропетровськ, 2008. С. 204–205.
2. Федюн Р.В., Федотов Е.С. Математическая модель процесса нагрева заготовок в методической нагревательной печи. *Наукові праці ДонНТУ*, м.Донецьк. 2011. Випуск 21 (183). С. 61-68.
3. Конспект лекцій з дисципліні «Автоматизація теплових процесів» для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за спеціальністю 144 – Теплоенергетика, Кам'янське : ДДТУ, 2019. С.138
4. Амурський, Євген, Кравченко, Віктор Система автоматичної корекції температури зон методичної печі при коливаннях типу (геометричних розмірів) і темпу прокатки нагрітих заготівок. *Наука та виробництво*. 2021 с. 298-305. DOI: 10.31498/2522-9990232020241176.
5. Ткаченко В. Н. Математическое моделирование, идентификация и управление технологическими процессами тепловой обработки материалов. Київ : Наукова думка, 2008. 244 с.
6. L. Romano-Acosta, I. Álvarez-Elcoro, O. Zapata-Hernandez, and L. Leduc-Lezama. Optimization of Heating Cycles Prior Forging for Large Steel Ingots Based on a Simulation Model. *Materials Performance and Characterization*. 2018. No 1. P. 33-48. DOI : 10.1520/MPC20170139.
7. N. Bohloli Arkhazloo, Y. Bouissa, F. Bazdidi-Tehrani, M. Jadidi, J.-B. Morin, M. Jahazi. Experimental and unsteady CFD analyses of the heating process of large size forgings in a gas-fired furnace. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2019. No. 8. P. 940. DOI :10.1016/j.csite. 2019. 100428.
8. Програмно-технічні комплекси засобів автоматизації. Навчально-методичний посібник для студентів ЗДІА спеціальності 7.092501

"Автоматизоване управління технічними процесами" / Укл.: Н.О. Мінняйло, А.М. Ніколаєнко. Запоріжжя, 2008. 218с

9. Stepanov M., Ivanova M., Litovchenko P., Ivanova L., Tarasenko O. Study of thermal modes of working fluids in grinding machines. Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2020. P. 299-308.

10. Бірюков А.Б. Энергоефективність та якість теплової обробки матеріалів у печах: монографія. Донецьк : Ноулідж, 2012. 247 с.

11. Барішенко О.М., Ревун М.П. Актуальні енергозберігаючі методи роботи нагрівальних печей : монографія. Запоріжжя : ЗДІА, 2012. 138 с.

12. Єрємін А. О. Сучасні способи опалення нагрівальних печей. Металургійна теплотехніка (Сб.научн. праць НМетАУ). Дніпропетровськ : Нова ідеологія, 2008. С. 139 – 151.

13. Пилипенко Р. А. Інтенсифікація теплової роботи камерних печей, що опалюються природним газом. Металургійна теплотехніка (Сб. нав. праць НМетАУ). Дніпропетровськ: НМетАУ, 2002. Т.8. С.99-105.

14. Сучасний стан та вдосконалення конструкцій методичних печей / В.Л. Гусовський та ін. / Сталь. 2001. № 1. С. 46–49

15. Парсункін Б.Н., Андрєєв С.М., Бушманова М.В. Оптимізація управління тепловим режимом нагрівальних печей / Сталь. 2003. № 9. С. 65–67.

16. Арунянц Г.Г., Рутковський А.Л. Проблеми вирішення багатокритеріальних завдань оптимального управління. *Балтійський економічний журнал*. 2009. по. 2. Рр. 155–164.

17. Формалізація та вирішення завдання оптимального управління складним технологічним комплексом / А.Л. Рутковський та ін. / *Вісник Балтійського федерального університету ім. І. Канта*. 2016. № 1. С. 81–89.

18. Авер'янов О.І. Технологічне обладнання : підручник для СПО. 2011. 306 с.

19. Шандр Б.В. Технічні засоби автоматизації. 2010. 423 с.

20. Шаруда В.Г., Ткачов В.В., Бубліков А.В. Дослідницька частина в кваліфікаційній роботі магістра : навч. посіб. Д.: Національний гірничий університет, 2015. 487 с.

21. Маринич І.А., Тронь В.В. Методичні рекомендації до виконання кваліфікаційної роботи магістра для студентів спеціальності 151 “Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології”. Кривий Ріг : Видавничий центр КНУ, 2022. 50 с.

22. ДСТУ 3008:2015. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. Київ, ДП «УкрННЦ», 2015. 26с. (Інформація та документація).

23. ДСТУ 8302:2015. Бібліографічне посилання. Загальні вимоги та правила складання Київ, ДП «УкрННЦ», 2016. 16 с. (Інформація та документація).

24. ДСТУ 3582:2013. Бібліографічний опис. Скорочення слів і словосполучень в українській мові. Загальні вимоги та правила. Київ, ДП «УкрННЦ», 2013. 23 с. (Інформація та документація).

25. ДСТУ 3651.0-97 Метрологія. Одиниці фізичних величин. Основні одиниці фізичних величин Міжнародної системи одиниць. Основні положення, назви та позначення Київ, Держстандарт України, 1998. 27 с. (Інформація та документація).

Програмні модулі системи керування

А.1 Модуль об'єкта керування

```
(*
 *
 * File: MOD_SYS.exp
 *
 * IEC 61131-3 Structured Text (ST) code generated for subsystem
"MOD_SYS/Об'єкт управління
з датчиком1"
 *
 * Model name                : MOD_SYS
 * Model version             : 1.39
 * Model creator             : DIMA
 * Model last modified by    : DIMA
 * Model last modified on    : Mon Nov 23 16:46:22 2020
 * Model sample time         : 0s
 * Subsystem name            : MOD_SYS/Об'єкт управління
з датчиком1
 * Subsystem sample time     : 0.1s
 * Simulink PLC Coder version : 1.6 (R2013b) 08-Aug-2013
 * ST code generated on      : Mon Nov 23 17:28:38 2020
 *
 * Target IDE selection      : 3S CoDeSys 2.3
 * Test Bench included       : No
 *
 *)
FUNCTION BLOCK sfun_target
VAR_INPUT
    ssMethodType: SINT;
    Object_Power: LREAL;
END_VAR
VAR_OUTPUT
    Object_Temperature: LREAL;
END_VAR
VAR
    DiscreteTransferFcn_states: LREAL;
    DiscreteTransferFcn1_states: LREAL;
    Delay_DSTATE: ARRAY [0..162] OF LREAL;
END_VAR
VAR_TEMP
    k: DINT;
    i: DINT;
    DiscreteTransferFcn: LREAL;
END_VAR
CASE ssMethodType OF
    SS_INITIALIZE:
        (* InitializeConditions for Delay: '<S1>/Delay' *)
```

```

FOR i := 0 TO 162 DO
    Delay_DSTATE[i] := 0.0;
END_FOR;
(* End of InitializeConditions for Delay: '<S1>/Delay' *)

(* InitializeConditions for DiscreteTransferFcn:
'<S1>/Discrete Transfer Fcn' *)
DiscreteTransferFcn_states := 0.0;

(* InitializeConditions for DiscreteTransferFcn:
'<S1>/Discrete Transfer Fcn1' *)
DiscreteTransferFcn1_states := 0.0;
SS_STEP:

(* Outport: '<Root>/Object_Temperature' incorporates:
* Delay: '<S1>/Delay' *)
Object_Temperature := Delay_DSTATE[0];

(* DiscreteTransferFcn: '<S1>/Discrete Transfer Fcn' *)
DiscreteTransferFcn := 0.001195399957978 *
DiscreteTransferFcn_states;

(* Update for Delay: '<S1>/Delay' incorporates:
* DiscreteTransferFcn: '<S1>/Discrete Transfer Fcn1' *)
FOR k := 0 TO 161 DO
    Delay_DSTATE[k] := Delay_DSTATE[k + 1];
END_FOR;
Delay_DSTATE[162] := 0.003061284570645 *
DiscreteTransferFcn1_states;
(* End of Update for Delay: '<S1>/Delay' *)

(* Update for DiscreteTransferFcn: '<S1>/Discrete Transfer
Fcn' incorporates:
* Gain: '<S1>/Gain1'
* Update for Inport: '<Root>/Object_Power' *)
DiscreteTransferFcn_states := (0.1 * Object_Power) - (-
0.998804600042022 * DiscreteTransferFcn_states);

(* Update for DiscreteTransferFcn: '<S1>/Discrete Transfer
Fcn1' *)
DiscreteTransferFcn1_states := DiscreteTransferFcn - (-
0.996938715429355 * DiscreteTransferFcn1_states);
END_CASE;
END_FUNCTION_BLOCK
VAR_GLOBAL CONSTANT
    SS_INITIALIZE: SINT := 0;
    SS_STEP: SINT := 1;
END_VAR
VAR_GLOBAL
END_VAR

```

A.2 Модуль регулятора

```

(*)
*
* File: MOD_SYS.exp
*
* IEC 61131-3 Structured Text (ST) code generated for subsystem
"MOD_SYS/Регулятор"
*
* Model name                : MOD_SYS
* Model version              : 1.38
* Model creator              : DIMA
* Model last modified by    : DIMA
* Model last modified on    : Mon Nov 23 14:51:07 2020
* Model sample time         : 0s
* Subsystem name            : MOD_SYS/Регулятор
* Subsystem sample time     : 0.1s
* Simulink PLC Coder version : 1.6 (R2013b) 08-Aug-2013
* ST code generated on      : Mon Nov 23 14:55:17 2020
*
* Target IDE selection      : 3S CoDeSys 2.3
* Test Bench included       : No
*
*)
FUNCTION_BLOCK sfun_target
VAR_INPUT
    ssMethodType: SINT;
    Control_SetPoint: LREAL;
    Control_Temperature: LREAL;
END_VAR
VAR_OUTPUT
    Control_Power: LREAL;
END_VAR
VAR
    DiscreteTimeIntegrator_DSTATE: LREAL;
    DiscreteTimeIntegrator1_DSTATE: LREAL;
END_VAR
VAR_TEMP
    rtb_Gain: LREAL;
    rtb_Gain6: LREAL;
    rtb_Sum_o: LREAL;
    rtb_Compare_bw: BOOL;
    rtb_Compare_o: BOOL;
END_VAR
CASE ssMethodType OF
    SS_INITIALIZE:
        (* InitializeConditions for Atomic SubSystem: '<S1>/ПІД-
регулятор' *)

        (* InitializeConditions for DiscreteIntegrator:
'<S2>/Discrete-Time Integrator' *)
        DiscreteTimeIntegrator_DSTATE := 0.0;

```

```

      (* InitializeConditions for DiscreteIntegrator:
'<S2>/Discrete-Time Integrator1' *)
      DiscreteTimeIntegrator1_DSTATE := 0.0;
      (* End of InitializeConditions for SubSystem: '<S1>/ПІД-
регулятор' *)
      SS_STEP:

      (* Gain: '<S1>/Gain' incorporates:
      * Inport: '<Root>/Control_SetPoint'
      * Inport: '<Root>/Control_Temperature'
      * Sum: '<S1>/Sum' *)
      rtb_Gain := (Control_SetPoint - Control_Temperature) *
0.2;

      (* Outputs for Atomic SubSystem: '<S1>/ПІД-регулятор' *)
      (* Gain: '<S2>/Gain6' incorporates:
      * DiscreteIntegrator: '<S2>/Discrete-Time Integrator1'
      * Gain: '<S2>/Gain5'
      * Sum: '<S2>/Sum1' *)
      rtb_Gain6 := ((70.3362704043526 * rtb_Gain) -
DiscreteTimeIntegrator1_DSTATE) * 0.318370240044981;

      (* Sum: '<S2>/Sum' incorporates:
      * DiscreteIntegrator: '<S2>/Discrete-Time Integrator'
      * Gain: '<S2>/Gain1' *)
      rtb_Sum_o := ((3.51362893040726 * rtb_Gain) +
DiscreteTimeIntegrator_DSTATE) + rtb_Gain6;

      (* Outputs for Atomic SubSystem: '<S2>/Subsystem1' *)
      (* RelationalOperator: '<S4>/Compare' incorporates:
      * Constant: '<S4>/Constant' *)
      rtb_Compare_bw := rtb_Sum_o >= 100.0;

      (* RelationalOperator: '<S5>/Compare' incorporates:
      * Constant: '<S5>/Constant' *)
      rtb_Compare_o := rtb_Sum_o <= 0.0;

      (* Switch: '<S3>/Switch1' incorporates:
      * Constant: '<S3>/Constant'
      * Constant: '<S6>/Constant'
      * Constant: '<S7>/Constant'
      * Logic: '<S3>/Logical Operator'
      * Logic: '<S3>/Logical Operator1'
      * Logic: '<S3>/Logical Operator2'
      * Logic: '<S3>/Logical Operator3'
      * Logic: '<S3>/Logical Operator4'
      * Logic: '<S3>/Logical Operator5'
      * RelationalOperator: '<S6>/Compare'
      * RelationalOperator: '<S7>/Compare' *)
      IF NOT (((rtb_Compare_bw AND (rtb_Gain < 0.0)) OR
(rtb_Compare_o AND (rtb_Gain > 0.0))) OR ((NOT rtb_Compare_bw)
AND (NOT rtb_Compare_o))) THEN
        rtb_Gain := 0.0;

```

```

END_IF;
(* End of Switch: '<S3>/Switch1' *)
(* End of Outputs for SubSystem: '<S2>/Subsystem1' *)

(* Saturate: '<S2>/Saturation1' *)
IF rtb_Sum_o >= 100.0 THEN
    (* Output: '<Root>/Control_Power' *)
    Control_Power := 100.0;
ELSIF rtb_Sum_o > 0.0 THEN
    (* Output: '<Root>/Control_Power' *)
    Control_Power := rtb_Sum_o;
ELSE
    (* Output: '<Root>/Control_Power' *)
    Control_Power := 0.0;
END_IF;
(* End of Saturate: '<S2>/Saturation1' *)

(* Update for DiscreteIntegrator: '<S2>/Discrete-Time
Integrator' incorporates:
    * Gain: '<S2>/Gain3' *)
DiscreteTimeIntegrator_DSTATE := ((0.0350222551841516 *
rtb_Gain) * 0.1) + DiscreteTimeIntegrator_DSTATE;

(* Update for DiscreteIntegrator: '<S2>/Discrete-Time
Integrator1' *)
DiscreteTimeIntegrator1_DSTATE := (0.1 * rtb_Gain6) +
DiscreteTimeIntegrator1_DSTATE;
(* End of Outputs for SubSystem: '<S1>/ПІД-регулятор' *)
END_CASE;
END_FUNCTION_BLOCK
VAR_GLOBAL CONSTANT
    SS_INITIALIZE: SINT := 0;
    SS_STEP: SINT := 1;
END_VAR
VAR_GLOBAL
END_VAR

```

Програмне забезпечення системи керування

Б.1 Програмне забезпечення об'єкта

Б.1.1 Список програм

[FBD] Main

[ST] Object

Б.1.2 Основна програма



Б.1.3 Користувальницький функціональний блок

(* Output: '<Root>/Object_Temperature' incorporates:

* Delay: '<S1>/Delay' *)

Object_Temperature := Delay_DSTATE[0];

(* DiscreteTransferFcn: '<S1>/Discrete Transfer Fcn' *)

DiscreteTransferFcn := LREAL#0.001195399957978 *

DiscreteTransferFcn_states;

(* Update for Delay: '<S1>/Delay' incorporates:

* DiscreteTransferFcn: '<S1>/Discrete Transfer Fcn1' *)

FOR k := 0 TO 161 DO

Delay_DSTATE[k] := Delay_DSTATE[k + 1];

END_FOR;

Delay_DSTATE[162] := LREAL#0.003061284570645 *

DiscreteTransferFcn1_states;

(* End of Update for Delay: '<S1>/Delay' *)

(* Update for DiscreteTransferFcn: '<S1>/Discrete Transfer Fcn'

incorporates:

* Gain: '<S1>/Gain1'

* Update for Inport: '<Root>/Object_Power' *)

```

DiscreteTransferFcn_states := (LREAL#0.5 * Object_Power) -
(LREAL#-0.998804600042022 * DiscreteTransferFcn_states);
(* Update for DiscreteTransferFcn: '<S1>/Discrete Transfer Fcn1' *)
DiscreteTransferFcn1_states := DiscreteTransferFcn - (LREAL#-
0.996938715429355 * DiscreteTransferFcn1_states);

```

Б.1.4 Перелік змінних

```

VAR_INPUT
  Object_Power : LREAL ;
END_VAR
VAR_OUTPUT
  Object_Temperature : LREAL ;
END_VAR
VAR
  DiscreteTransferFcn_states : LREAL ;
  DiscreteTransferFcn1_states : LREAL ;
  Delay_DSTATE : ARRAY [0 .. 162] OF LREAL ;
  k : DINT ;
  i : DINT ;
  DiscreteTransferFcn : LREAL ;
END_VAR

```

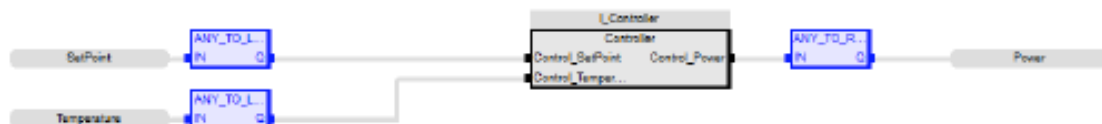
Б.2 Програмне забезпечення регулятора

Б.2.1 Список програм

[FBD] Main

[ST] Controller

Б.2.2 Основна програма



Б.2.3 Користувальницький функціональний блок

(* Gain: '<S1>/Gain' incorporates:

- * Inport: '<Root>/Control_SetPoint'
- * Inport: '<Root>/Control_Temperature'
- * Sum: '<S1>/Sum' *)

```

rtb_Gain := (Control_SetPoint - Control_Temperature) * LREAL#1.0;
(* Outputs for Atomic SubSystem: '<S1>/ПД-регулятор' *)
(* Gain: '<S2>/Gain6' incorporates:
  * DiscreteIntegrator: '<S2>/Discrete-Time Integrator1'
  * Gain: '<S2>/Gain5'
  * Sum: '<S2>/Sum1' *)
rtb_Gain6 := ((LREAL#70.3362704043256 * rtb_Gain) -
DiscreteTimeIntegrator1_DSTATE) * LREAL#0.1318370240044981;
(* Sum: '<S2>/Sum' incorporates:
  * DiscreteIntegrator: '<S2>/Discrete-Time Integrator'
  * Gain: '<S2>/Gain1' *)
rtb_Sum_o := ((LREAL#3.51362893040726 * rtb_Gain) +
DiscreteTimeIntegrator_DSTATE) + rtb_Gain6;
(* Outputs for Atomic SubSystem: '<S2>/Subsystem1' *)
(* RelationalOperator: '<S4>/Compare' incorporates:
  * Constant: '<S4>/Constant' *)
rtb_Compare_bw := rtb_Sum_o >= 100.0;
(* RelationalOperator: '<S5>/Compare' incorporates:
  * Constant: '<S5>/Constant' *)
rtb_Compare_o := rtb_Sum_o <= 0.0;
(* Switch: '<S3>/Switch1' incorporates:
  * Constant: '<S3>/Constant'
  * Constant: '<S6>/Constant'
  * Constant: '<S7>/Constant'
  * Logic: '<S3>/Logical Operator'
  * Logic: '<S3>/Logical Operator1'
  * Logic: '<S3>/Logical Operator2'
  * Logic: '<S3>/Logical Operator3'
  * Logic: '<S3>/Logical Operator4'
  * Logic: '<S3>/Logical Operator5'

```

```

rtb_Gain := (Control_SetPoint - Control_Temperature) * LREAL#1.0;
(* Outputs for Atomic SubSystem: '<S1>/ПД-регулятор' *)
(* Gain: '<S2>/Gain6' incorporates:
  * DiscreteIntegrator: '<S2>/Discrete-Time Integrator1'
  * Gain: '<S2>/Gain5'
  * Sum: '<S2>/Sum1' *)
rtb_Gain6 := ((LREAL#70.3362704043256 * rtb_Gain) -
DiscreteTimeIntegrator1_DSTATE) * LREAL#0.1318370240044981;
(* Sum: '<S2>/Sum' incorporates:
  * DiscreteIntegrator: '<S2>/Discrete-Time Integrator'
  * Gain: '<S2>/Gain1' *)
rtb_Sum_o := ((LREAL#3.51362893040726 * rtb_Gain) +
DiscreteTimeIntegrator_DSTATE) + rtb_Gain6;
(* Outputs for Atomic SubSystem: '<S2>/Subsystem1' *)
(* RelationalOperator: '<S4>/Compare' incorporates:
  * Constant: '<S4>/Constant' *)
rtb_Compare_bw := rtb_Sum_o >= 100.0;
(* RelationalOperator: '<S5>/Compare' incorporates:
  * Constant: '<S5>/Constant' *)
rtb_Compare_o := rtb_Sum_o <= 0.0;
(* Switch: '<S3>/Switch1' incorporates:
  * Constant: '<S3>/Constant'
  * Constant: '<S6>/Constant'
  * Constant: '<S7>/Constant'
  * Logic: '<S3>/Logical Operator'
  * Logic: '<S3>/Logical Operator1'
  * Logic: '<S3>/Logical Operator2'
  * Logic: '<S3>/Logical Operator3'
  * Logic: '<S3>/Logical Operator4'
  * Logic: '<S3>/Logical Operator5'

```

Б.2.4 Перелік змінних

```
VAR_INPUT
  Control_SetPoint : LREAL ;
  Control_Temperature : LREAL ;
END_VAR
VAR_OUTPUT
  Control_Power : LREAL ;
END_VAR
VAR
  DiscreteTimeIntegrator_DSTATE : LREAL ;
  DiscreteTimeIntegrator1_DSTATE : LREAL ;
  rtb_Gain : LREAL ;
  rtb_Gain6 : LREAL ;
  rtb_Sum_o : LREAL ;
  rtb_Compare_bw : BOOL ;
  rtb_Compare_o : BOOL ;
END_VAR
```

Програмне забезпечення людино-машинного інтерфейсу

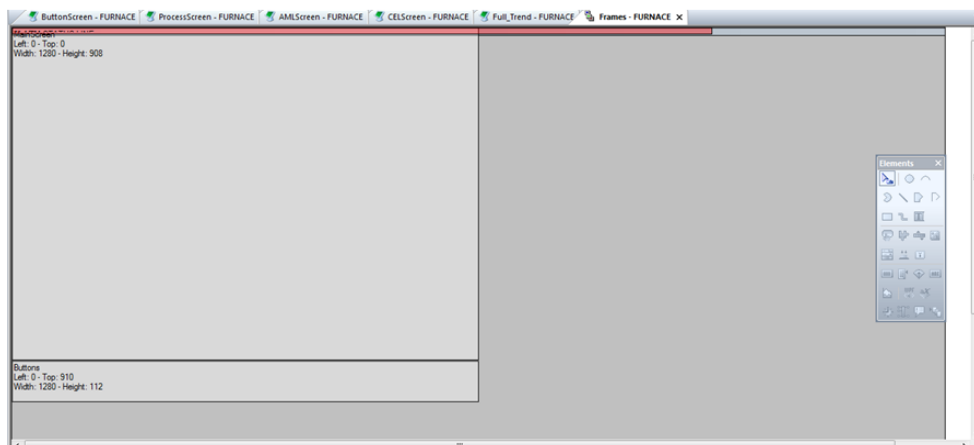
В.1 Драйвера

State	Identification	Description	File name
Filter text	Filter text	Filter text	Filter text
	Driver for internal variables		Intern
	Driver for mathematics variables		MATHDR32
	Driver for system variables		SYSDRV
	VIPA		S7TCP32
	zenon Logic: Controller		STRATONNG

В.2 Перелік змінних

Name	Identification	Measur...	Net address	Data block	Offset	Bit num...	Alignm...	Symbol...	Driver	Data type	Decimals	Start offset
Filter text	Filter text	Filter...	Filter text	Filter text	Filter text	Filter...	Filter...	Filter...	Filter text	Filter...	Filter text	Filter text
Power		%	0	0	0	0	0		S7TCP32 - VIPA	REAL	0	0
Temperature		*C	0	0	0	0	0		S7TCP32 - VIPA	REAL	2	0
Controller/Global/Power		%	0	0	0	0	0		STRATONNG - zenon Logic...	REAL	0	0
Controller/Global/Temperature		*C	0	0	0	0	0		STRATONNG - zenon Logic...	REAL	2	0
Controller/Global/SetPoint		*C	0	0	0	0	0		STRATONNG - zenon Logic...	REAL	1	0

В.3 Шаблони зображень



В.4 Функції

Sta...	Name	Type	Parameter
Filter text	Filter text	Filter text	Filter text
	SwitchProcessScreen	Screen switch	ProcessScreen (Standard)
	SwitchCELScreen	Screen switch	CELScreen (Standard)
	SwitchButtonScreen	Screen switch	ButtonScreen (Standard)
	SwitchAMLScreen	Screen switch	AMLScreen (Standard)
	Switch_FullTrend	Screen switch	Full_Trend (Extended Trend) - NEW DIAGRAM[HD]
	ReloadProject	Reload project online	changed objects
	Exit	Exit Runtime	

В.5 Зображення

Name	Screen type	Frame	Background color	Start function	End function
Filter text	Filter text	Filter text	Filter text	Filter text	Filter text
ButtonScreen	Standard	Buttons	#D2B48C	< no function l...	< no function l...
main	Standard	MainScreen	#D2B48C	SwitchButtonS...	< no function l...
ProcessScreen	Standard	MainScreen	#D2B48C	< no function l...	< no function l...
AMLScreen	Alarm Message List	MainScreen	#D2B48C	< no function l...	< no function l...
Full_Trend	Extended Trend	MainScreen	#D2B48C	< no function l...	< no function l...
CELScreen	Chronological Event List	MainScreen	#D2B48C	< no function l...	< no function l...

