

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю.М. ПОТЕБНІ

Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота (проект)
другий (магістерський)
(рівень вищої освіти)

на тему Удосконалення сучасних способів теплової обробки матеріалів за допомогою впровадження методів зменшення витрати енергоносіїв

Виконав: студент __ курсу, групи _____
спеціальності 174 «Автоматизація,
комп'ютерно-інтегровані технології» та
робототехніка

(код і назва спеціальності)

спеціалізації _____
(код і назва спеціалізації)

освітньої програми Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології

(назва освітньої програми)

Петровський Ю.Ю.

(ініціали та прізвище)

Керівник к.т.н., доцент. Баріщенко О. М.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент _____
Курілець І. А.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю.М. ПОТЕБНІ

Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології»
та робототехніка

(код та назва)

Спеціалізація _____

(код та назва)

Освітня програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри _____

« _____ » _____ 2024 року

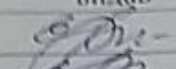
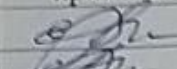

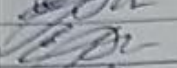










З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЄКТ) СТУДЕНТОВІ

Петровський Юрій Юрійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи (проекту) Удосконалення сучасних способів теплової обробки матеріалів за допомогою впровадження методів зменшення витрати енергоносіїв
керівник роботи Баріщенко Олена Миколаївна, канд.техн.наук, доцент,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від «01» травня 2023 року № 639-с
2. Строк подання студентом роботи 01.03.2024 р.
3. Вихідні дані до роботи: технічна документація, технологічні інструкції, дані, отримані під час проходження виробничої практики
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Визначення особливостей технологічного процесу, розробка технічного завдання, математичне моделювання САР, розробка схема автоматизованої системи регулювання і проведення експерименту, розробка стартапу, визначення і опис небезпечних і шкідливих факторів на виробництві, розрахунок техніко-економічних показників проєкту
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) презентація роботи

6. Консультанти розділів роботи

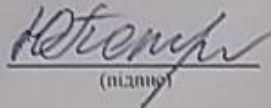
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Барішенко О. М.		
2	Барішенко О. М.		
3	Барішенко О. М.		
4	Барішенко О. М.		
5	Барішенко О. М.		
6	Барішенко О. М.		
7	Барішенко О. М.		

1. Дата видачі завдання 01.09.2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Визначення особливостей технологічного процесу	30.09.2023	викон
2	Розробка технічного завдання	30.10.2023	викон
3	Математичне моделювання САР	30.11.2023	викон
4	Розробка схема автоматизованої системи регулювання і проведення експерименту	31.01.2024	викон
5	Розробка стартапу	01.02.2024	викон
6	Визначення і опис небезпечних і шкідливих факторів на виробництві	15.02.2024	викон
7	Розрахунок техніко-економічних показників проекту	26.02.2024	викон
8	Розробка презентації роботи, проходження нормконтролю	08.03.2024	викон
9	Підготовка доповіді	11.03.2024	викон

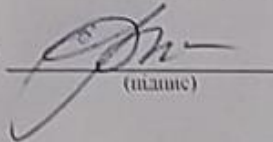
Студент


(підпис)

Петровський Ю.Ю.

(ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проекту)

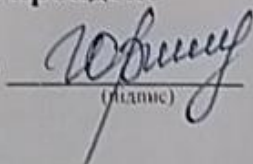

(підпис)

Барішенко О. М.

(ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер


(підпис)

Овчинникова І.А.

(ініціали та прізвище)

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АСУТП – автоматизована система управління технологічними процесами

АРМО – автоматизоване робоче місце оператора

ГПУ – графічний процесор управління

ПІ – пропорційно-інтегральний

ПЛК – програмований логічний контролер

ППК – прилади приймально-контрольні

САР – система автоматизованого регулювання

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	4
ВСТУП	6
1 ОПИС ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ.....	11
1.1 Характеристика процесу теплової обробки вуглецевих сталей.....	11
1.2 Характеристика апаратів для теплової обробки матеріалів з вуглецю .	17
1.3 Опис об'єкту автоматизації.....	27
2 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ	34
3 ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ І РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ САР	43
3.1 Розроблення плану експерименту	43
3.2 Реалізація експерименту і результати моделювання.....	44
4 МОДЕЛЮВАННЯ САР В MATLAB SIMULINK	56
5 РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ	62
6 ОХОРОНА ПРАЦІ	68
6.1. Загальні заходи з охорони праці в цехах термічної обробки	68
6.2 Охорона праці оператора АСУ ТП.....	70
6.3 Пожежна безпека.....	74
7 ТЕХНІКО–ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЕКТУ	76
7.1 Визначення капітальних вкладень.....	76
7.2 Розрахунок річних експлуатаційних витрат.....	77
7.3 Річні витрати на ЗП.....	77
7.4 Розрахунок річних амортизаційних відрахувань.....	78
7.5 Річні витрати на ремонт.....	79
7.6 Витрати електроенергії на живлення	79
7.7 Інші витрати.....	79
7.8 Річна економія експлуатаційних витрат	80
ВИСНОВКИ.....	85
ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА	87

ВСТУП

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ

Динаміка економічного розвитку певної країни чи регіону приводить до поступових змін у суспільстві та природному середовищі. Один з ключових показників цих змін – рівень енергозбереження. Це означає необхідність ефективного використання енергії та зниження витрат у всіх галузях. Енергозбереження вимагає обмеження використання матеріальних ресурсів, зокрема не поновлюваних джерел енергії.

Теплова обробка виробів з вуглецю в сучасній промисловості є важливим процесом, оскільки в Україні спостерігається значне споживання промислових вуглецевих продуктів. Ці продукти широко застосовуються в різних галузях промисловості, де потрібні електротермічні процеси, таких як металургія, машинобудування та виробництво електроніки. Важливою частиною цього процесу є забезпечення необхідного рівня температури, оскільки властивості готової продукції залежать від температурних режимів.

З огляду на широке застосування продуктів теплової обробки виробів з вуглецю у промисловості, інженери активно працюють над розробкою новітніх технологій або вдосконаленням існуючих для виробництва цих продуктів. Новітні технології перш за все спрямовані на зниження витрат енергоносіїв із збереженням якості кінцевої продукції.

Зменшення витрат енергоносіїв в тепловій обробці матеріалів сприяє зниженню витрат енергії та забезпечує більш ефективне використання ресурсів, зниження виробничих витрат підприємства, що може позитивно вплинути на їхню конкурентоспроможність та прибутковість. Менші витрати енергії позитивно впливають на середовище, зменшуючи викиди вуглекислого газу та інших шкідливих речовин, пов'язаних із виробництвом та тепловою обробкою матеріалів. Впровадження нових методів теплової обробки, спрямованих на зменшення витрат енергоносіїв, сприяє

технологічному прогресу та розвитку більш продуктивних та ефективних процесів виробництва.

Зростаюче значення автоматизації технологічних процесів відображається у зменшенні енергетичних витрат, вартості продукції та ризику людського втручання у систему управління. Виключення або мінімізація людського фактору може призвести до покращення швидкості реакції, більш точного аналізу даних та підвищення безпеки виробництва з підвищенням якості продукції. Основною метою автоматизації є підвищення ефективності праці, оптимальне використання ресурсів та поліпшення якості виробленої продукції.

Отже, удосконалення сучасних способів теплової обробки матеріалів шляхом впровадження методів зменшення витрат енергоносіїв є актуальною та перспективною темою, що має великий потенціал для підвищення ефективності виробництва, зниження витрат та збереження навколишнього середовища. Автоматизація процесу прожарювання виробництва вуглецевої сировини не лише дозволяє контролювати та реєструвати режимні параметри виробництва, але й забезпечує можливість дистанційного керування ходом процесів у пристроях.

МЕТА, ОБ'ЄКТ, ПРЕДМЕТ І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Мета роботи: удосконалення автоматизованої системи управління процесом теплової обробки матеріалів з вуглецю.

Об'єкт дослідження: автоматизована система управління процесом теплової обробки матеріалів з вуглецю.

Предмет дослідження: технологічний процес управління процесом теплової обробки матеріалів з вуглецю.

Відповідно до поставленої мети досліджень в роботі сформульовані наступні задачі:

- сформулювати стислу характеристику об'єкта управління;
- провести огляд та аналіз рішень з управління процесом теплової обробки матеріалів з вуглецю;

- розробити математичну модель роботи системи управління процесом теплової обробки матеріалів з вуглецю;
- спроектувати систему автоматичного управління процесом теплової обробки матеріалів з вуглецю;
- виконати імітаційне моделювання ситуаційної системи управління процесом теплової обробки матеріалів з вуглецю;
- проаналізувати адекватність розробленої системи;
- розробити та обґрунтувати стартап проекту;
- розглянути організацію охорони праці, провести аналіз умов праці та визначити заходи зниження впливу небезпечних і шкідливих факторів;
- виконати розрахунок економічного обґрунтування проекту та визначити економічну ефективність впровадженої автоматизованої системи управління технологічним процесом.

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Для дослідження використовуються методи математичного моделювання – створення математичних моделей процесу теплової обробки з використанням різних методів, таких як рівняння теплопереносу, кінетичні рівняння хімічних реакцій. Ці моделі можуть використовуватися для прогнозування поведінки системи та оптимізації управління нею. Використання спеціалізованих програмних засобів для комп'ютерного моделювання та аналізу процесів теплової обробки. Це дозволяє швидко та ефективно проводити різноманітні симуляції та оптимізаційні розрахунки. Застосовано також емпіричні методи – аналіз результатів попередніх досліджень та досвіду виробництва для визначення оптимальних умов теплової обробки матеріалів. А також статистичних методів для обробки та аналізу експериментальних даних з метою виявлення закономірностей та встановлення зв'язків між різними параметрами процесу.

НАУКОВА НОВИЗНА ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

1. Проведено порівняльний аналіз апаратів для теплової обробки вуглецевих сталей.

2. Розроблена математична модель на основі управління тривалістю перебування вуглецевої сировини в електрокальцинаторі і потужністю струму, що подається до електродів.

3. За результатами параметричної ідентифікації було визначено, що структура моделі об'єкта керування відповідає аперіодичній ланці другого порядку без запізнення, з такими розрахованими параметрами як коефіцієнт підсилення -12,8 та постійні часи 23622 с і 7096 с відповідно.

4. Комплексна перевірка на адекватність моделі до об'єкта керування на основі перевірочних даних показала високу відповідність у розмірі 87%, сильний кореляційний зв'язок на рівні 0,994, а також велике значення статичного критерію адекватності Фішера – 601505, що значно перевищує критичне значення 2,7.

5. Розроблено стартап проекту з обґрунтуванням його доцільності в сучасних економічних умовах ринку.

ПРАКТИЧНЕ ЗНАЧЕННЯ

Практичне значення отриманих результатів роботи – розроблена система регулювання спрямована на виготовлення високоякісної продукції з мінімальними витратами на виробництво, а саме на енергоносії.

В майбутньому розроблена САР має перспективи розвитку та модифікацій..

ОСОБИСТІЙ ВНЕСОК

Теоретичні дослідження виконані автором самостійно. Здобувачем визначено стан і тенденції розвитку теоретично-експериментальних досліджень обладнання для термічної обробки матеріалів із вуглецю, сформульовано мету й постановку завдань досліджень, розроблено методи

та способи досягнення поставленої мети, розроблено узагальнену математичну модель теплової обробки вуглецевих матеріалів. Здобувачем також здійснено наукове обґрунтування теоретично-експериментальних досліджень.

СТРУКТУРА МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ

Магістерська робота складається з вступу, семи розділів, загальних висновків, списку літератури із 48 найменування і вміщує 89 сторінок основного тексту, 17 таблиць, 22 рисунка, усього 92 сторінки.

1 ОПИС ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ

1.1 Характеристика процесу теплової обробки вуглецевих сталей

Вуглецеві сталі є сплавами заліза з вмістом вуглецю до 2%, але зазвичай цей вміст не перевищує 1,3%, оскільки вищі значення призводять до збільшення твердості і крихкості матеріалу, що робить їх непрактичними для використання. На сьогоднішній день вуглецеві сталі головним чином використовуються для виготовлення деталей машин, конструкцій та інструментів. Ці матеріали представлені в багатьох стандартах металів, як в українських, так і в міжнародних, у великому розмаїтті марок. Порівняно з легуваними сталями або кольоровими металами та їх сплавами, вуглецеві сталі вважаються найбільш доступними з точки зору вартості матеріалу.

Вуглецеві сталі широко використовуються для виготовлення різноманітних інструментів, конструкцій та деталей машин. Розглянемо основні види вуглецевих сталей. За призначенням їх можна поділити на конструкційні та інструментальні.

Конструкційна сталь використовується для виготовлення деталей машин і конструкцій. Вона повинна мати задовільні технологічні властивості та достатню міцність, пластичність і в'язкість.

Інструментальна сталь (з вмістом вуглецю від 0,65% до 1,35%) використовується для виготовлення різних інструментів для обробки металів, металевих сплавів та деревини.

Сталі за якістю поділяються на звичайну якість (з вмістом сірки до 0,06% і фосфору до 0,07%), якісну якість (сірки не більше 0,04% і фосфору не більше 0,035%) та високоякісну якість (сірки не більше 0,025% і фосфору не більше 0,018%).

Термічна обробка сталі – це процес, в якому сталь нагрівається до певної температури, утримується при цій температурі протягом певного часу, а потім швидко охолоджується. Цей процес змінює структуру

матеріалу, не змінюючи його хімічний склад, і надає сталі необхідні властивості. Приблизно 40% сталі, яка використовується в машинобудуванні для виготовлення деталей машин, приладів та устаткування, піддаються різноманітним видам термічної обробки. Оскільки температура і час є основними факторами в термічній обробці, то будь-який процес цієї обробки можна представити у відповідних координатах.

Термічна обробка включає в себе три основні типи: термічну, хіміко-термічну і деформаційно-термічну. Термічна обробка в свою чергу розділяється на чотири основні групи: відпал першого роду, відпал другого роду, гартування і відпуск.

Відпал – це процес, при якому метал нагрівається та повільно охолоджується для переходу з нестійкого в стійкий стан. Мета відпалювання – поліпшення структури та властивостей сталі, зняття внутрішніх напруг та наклепу, підготовка структури для подальшої термічної обробки. Відпал поділяється на перший і другий роди.

На рисунку 1.1 наведено температурний режим відпалювання сталі.

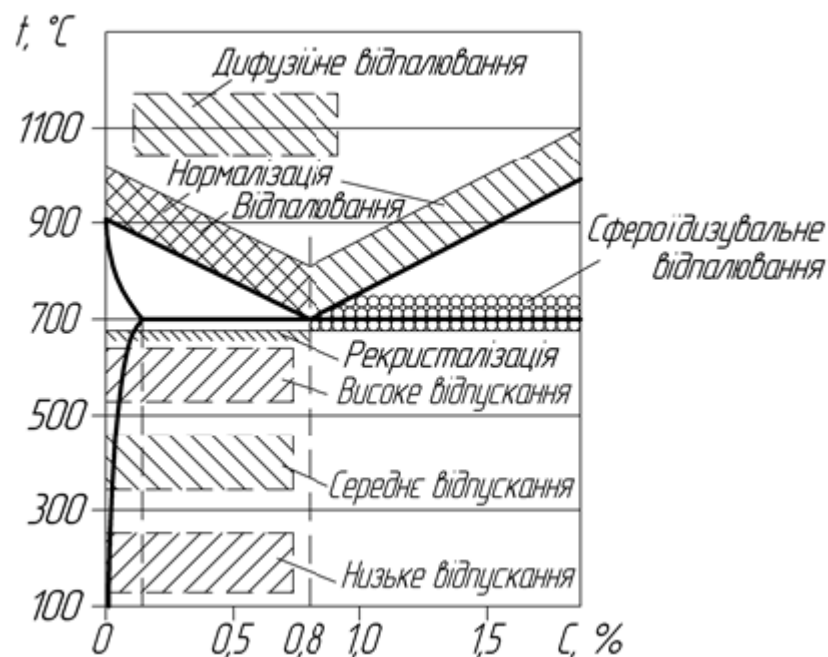


Рисунок 1.1 – Температурний режим відпалювання сталі

Відпал першого роду не пов'язаний з поліморфним перетворенням і призначений для зняття внутрішніх напруг та наклепу у виробках, зменшення хімічної неоднорідності сталі в перерізі зерна. Цей тип відпалювання може бути проведений за температури, яка є нижчою або вищою від фазових перетворень (критичних точок). Він включає відпал для зняття кінцевих напруг, рекристалізаційний та дифузійний (гомогенізація). Температурний режим відпалювання визначається за діаграмою «залізо-вуглець».

Відпал другого роду, також відомий як фазова перекристалізація, - це термічна обробка, яка включає нагрівання сталі до температур, що перевищують критичні температури A_{c1} або A_{c3} , тримання при цій температурі та повільне охолодження. Ця обробка спрямована на досягнення фазових перетворень та отримання структури, що відповідає практично рівноважним структурним і фазовим станам відповідно до діаграми стану системи Fe – Fe₃C. Після відпалу другого роду структура сталей може бути наступною: для доевтектоїдних – Ф + П, для евтектоїдних – П, для заевтектоїдних – П + ЦП.

Оскільки цей вид відпалу забезпечує кращу оброблюваність і мінімальну твердість сталі під час різання, його часто використовують як підготовчу термічну обробку перед процесом різання. Проте у деяких випадках, наприклад, для масштабних виливків, він може використовуватися як фінальна обробка. Основні види відпалу другого роду включають повний, неповний, ізотермічний і нормалізаційний.

Під час неповного відпалу температура нагрівання сталі збільшується на 20-30 °С вище за A_{c1} , але не досягає A_{c3} або A_{cm} . Після тривалої витримки сталь повільно охолоджується разом із піччю. Під час нагрівання відбувається часткова (неповна) перекристалізація сталі, де лише перліт перетворюється в аустеніт, залишаючи Ф + П або П + ЦП вихідну структуру. Для заевтектоїдних сталей цей процес називається сфероїдизацією. Вона дозволяє отримати сталь зі зернистою структурою перліту, що має нижчу твердість, вищу пластичність та поліпшену оброблюваність різанням

порівняно зі сталлю з ламелярною структурою перліту. Для доевтектоїдних сталей неповний відпал також застосовується для поліпшення оброблюваності різанням.

Загартування – це процес, в якому сталь нагрівається вище точки фазових перетворень, утримується при цій температурі протягом певного часу, а потім швидко охолоджується. Основою загартування є поліморфні перетворення заліза, що пов'язані з різкими змінами розчинності вуглецю. Наприклад, при переході через критичну точку A_{c1} (727°C) розчинність вуглецю збільшується у 40 разів (від 0,02% до 0,8%) при нагріванні і зменшується в тій же пропорції при охолодженні. Внаслідок швидкого охолодження отримані сталі мають метастабільну структуру і перенасичені вуглецем.

Вибір температури нагрівання для загартування залежить від вмісту вуглецю у сталі і зазвичай здійснюється на $30\text{-}50^{\circ}\text{C}$ вище за критичну точку A_{c3} для доевтектоїдних сталей (повне загартування) і на $30\text{-}50^{\circ}\text{C}$ вище за критичну точку A_{c1} для заевтектоїдних сталей (неповне загартування). Метою загартування є максимальне підвищення твердості виробу. На рисунку 1.2 наведено графік температур нагрівання сталі під загартування.

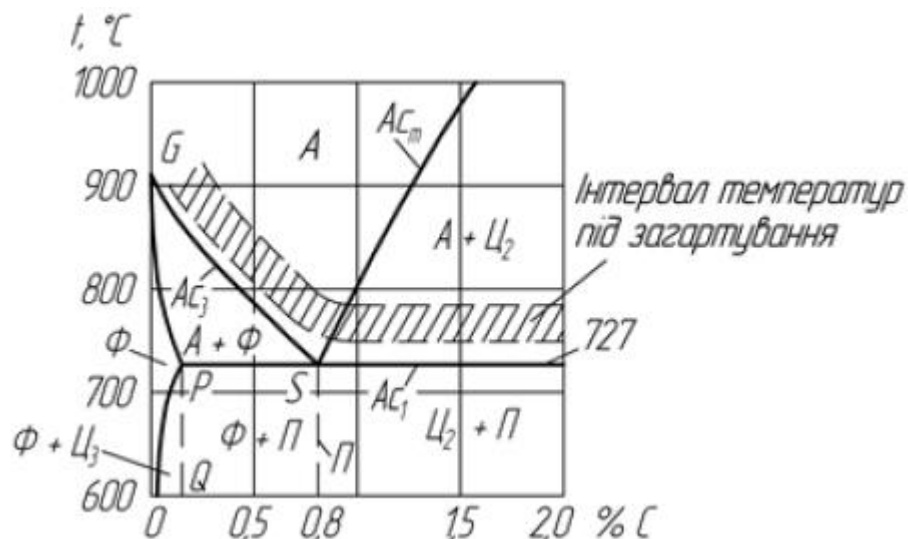


Рисунок 1.2 – Графік температур нагрівання сталі під загартування

Зазвичай неповне загартування доевтектоїдної сталі не застосовується, оскільки при нагріванні до температури, яка нижча за критичну точку A_{c3} ,

лише зерна перліту перетворюються на аустеніт, а ферит залишається без змін.

Після загартування сталь може мати різні структури, такі як сорбіт, тростинка, мартенсит, які є різними стадіями перетворення аустеніту. Ці структури залежать від швидкості охолодження і температури його розпаду. Зі збільшенням швидкості охолодження і зниженням температури розпаду аустеніту формується більш дрібнозерниста феритоцементитна структура. На рисунку 1.3 наведена діаграма ізотермічного розпаду аустеніту в сталі У8.

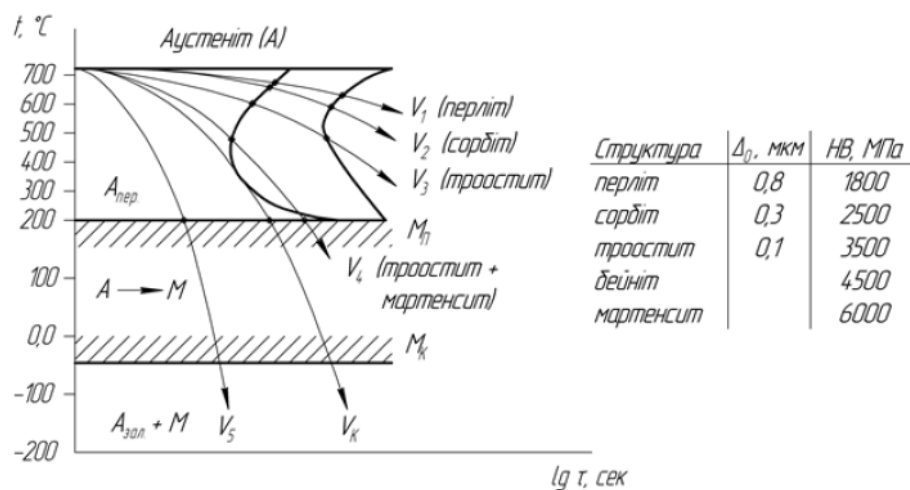


Рисунок 1.3 – Діаграма ізотермічного розпаду аустеніту в сталі У8

При повільному охолодженні утворюється перліт, при збільшеній швидкості – сорбіт, а потім тростинка. Зі зростанням дисперсності структури підвищується твердість сталі.

Відпуск – це процедура термічної обробки, що включає нагрівання загартованої сталі до температур нижче критичної точки A_{c1} , утримання при цій температурі протягом певного часу та охолодження. Головна мета відпуску полягає в зменшенні внутрішніх напруг у металі та досягненні потрібної структури і властивостей.

Процес компактизації структури вуглецевої сировини під час прожарювання слід розглядати як складний фізико-хімічний процес. На

початкових етапах переважають хімічні процеси, але зі збільшенням температури їх вплив поступово зменшується.

Неправильно вважати, що за межами температурного діапазону 1300-1400 °C фізико-хімічні процеси припиняються, а отже, ущільнення та зміна об'єму вуглецевої сировини припиняються. При подальшому підігріванні вуглецевих матеріалів їх ущільнення все ще відбуватиметься досить інтенсивно, хоча сутність цих процесів буде відрізнятися. У процесі прожарювання переважно формуються плоскі вуглецеві структури. Проте при більш високих температурах відбуваються процеси, які сприяють тривимірному впорядкуванню атомів вуглецю.

Зміна фізико-хімічних характеристик вуглецевих матеріалів під час їх прожарювання також залежить від характеру вивільнення газів та початкової усадки матеріалів. Різке збільшення електропровідності, реальної густини та механічної міцності є наслідком інтенсивного процесу піролізу вуглеводнів, що утворюються в матеріалі, та ущільнення матеріалів, яке зумовлене цим процесом. Після завершення процесу піролізу та стабілізації усадки також стабілізуються фізико-хімічні властивості матеріалів.

Під час прожарювання антрациту з підвищенням температури структура матеріалу упорядковується, навіть до виникнення кристалічної решітки графіту, що призводить до зміни його фізико-хімічних властивостей. Ці структурні перетворення включають:

- випаровування легких сполук, включаючи сполуки, які містять сірку;
- збільшення щільності та механічної міцності;
- впорядкування вуглецевої структури;
- підвищення електропровідності.

Збільшення щільності та механічної щільності:

- при температурах 700-750 °C відбувається дистиляція з частковим піролізом, що призводить до виділення летких продуктів. Збільшення пористості спостерігається приблизно до 1200 °C;

- утворений вуглець осідає в порах та на поверхні матеріалу, утворюючи щільний шар, який під час прожарювання збільшує щільність матеріалу;

- одночасно з піролізом відбувається конденсація та полімеризація вуглеводнів з їхнім збагаченням вуглецем, що сприяє усадці матеріалу;

- цей процес завершується утворенням плоских вуглецевих сіток, але на даному етапі ще не відбувається утворення тривимірної впорядкованої структури.

Згідно з дослідженням авторів, рівень температур у зоні прожарювання впливає на якісні характеристики матеріалу, який піддається обробці:

- при температурі понад 1300 °C відбувається видалення летких речовин з матеріалу;

- при температурі понад 1700 °C матеріал втрачає сірку;

- при температурі понад 2200 °C спостерігається часткове або повне графітування матеріалу.

При умові рівномірної теплової обробки матеріалу за цим методом виробу з вуглецю матимуть менший електричний опір, що є одним із ключових якісних показників цих виробів [7], у порівнянні з виробами, що виготовлені з матеріалів, оброблених іншими методами.

1.2 Характеристика апаратів для теплової обробки матеріалів з вуглецю

Виробництво заготовок з вуглецю передбачає їх прожарювання у спеціальних печах, кожна з яких має свою унікальну конструкцію. Вибір структури печі здійснюється з урахуванням технологічних особливостей виробництва, економічної оцінки та місцевих умов на заводі.

Карбонові заготовки піддаються термічній обробці в спеціалізованих печах, які мають різну конструкцію. Вибір структури печі залежить від технологічного процесу, економічної ефективності та умов на місцевому заводі.

Прожарювання антрациту може проводитися у барабанних обертових печах, електрокальцинаторах або ретортних печах, а також може використовуватися комбінована технологія. Основною метою процесу є зменшення вмісту летючих речовин у антрациті, що покращує його фізико-хімічні властивості, корисні для виробництва електродної продукції. Оскільки антрацит потребує складного процесу обробки через його високий ступінь газифікації, то для виготовлення електродів з його використанням потрібно постійно вдосконалювати технології його розжарювання.

Електричні печі відрізняються за своєю конструкцією та технологічними параметрами для обробки сировини. Вони розрізняються за типом теплоносія, умовами теплопередачі і атмосферою, в якій відбувається процес прожарювання. Склад атмосфери під час прожарювання має значний вплив на властивості поверхні матеріалів.

Унікальність електричних печей проявляється у їхній основній ролі – прожарюванні антрацитів та нафтових коксів. Незважаючи на різноманіття конструкцій, вимоги до їх експлуатації зводяться до стандартних операцій: завантаження, вивантаження та підтримка необхідного температурного режиму.

В порівнянні з іншими типами печей, електричні володіють численними перевагами: широкий спектр температурних режимів, можливість автоматизації процесу, простота конструкції та ефективне використання електроенергії. Проте, серед їх недоліків можна відзначити

низький коефіцієнт корисної дії, високий вміст вуглецю у відпрацьованих матеріалах, забруднення атмосфери газами та нерівномірність прожарювання матеріалу.

Усі ці фактори варто розглядати при виборі технології прожарювання, забезпечуючи оптимальний баланс між продуктивністю та якістю виготовлення.

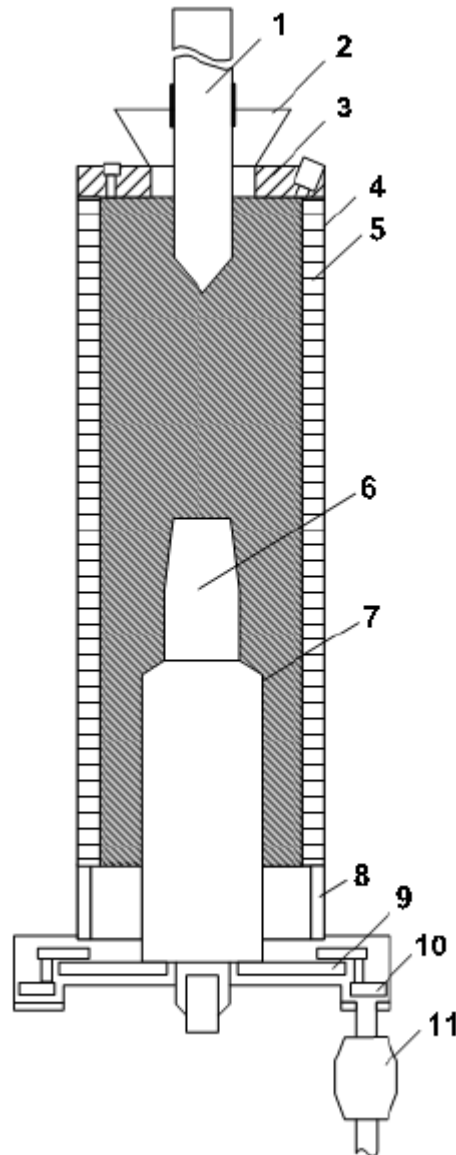
Електрокальцинатор – це вид печі, яка використовується для кальцинування, тобто нагрівання матеріалу до високих температур у відсутності повітря або при мінімальному доступі до нього. Принцип його роботи базується на використанні електричного опору, що перетворюється на тепло під впливом струму.

Основні елементи електрокальцинатора включають в себе нагрівальні елементи, зазвичай це вуглецеві або графітові електроди, які розміщені у печі поруч з матеріалом, який потрібно прожарити. Коли струм проходить через електроди, вони нагріваються до дуже високих температур, що дозволяє передавати тепло на матеріал і розігрівати його.

Матеріал, який потрібно прожарити, зазвичай розміщується в спеціальному контейнері або камері, яка може бути вбудована у піч або підведена до неї. Після нагрівання до необхідної температури матеріал піддається кальцинуванню протягом певного часу, щоб забезпечити необхідний ступінь згорання або видалення зайвих речовин.

Таким чином, електрокальцинатор використовується для прожарювання матеріалів шляхом нагрівання їх електричним струмом до високих температур у відсутності повітря.

Схема промислового електрокальцинатору для теплової обробки вуглецевих матеріалів наведена на рисунку 1.4.



1 – верхній графітований електрод; 2 – завантажувальна воронка;
 3 – пробка; 4 – металевий кожух; 5 – футеровка; 6 – нижній графітований
 електрод; 7 – опора; 8 – обичайка; 9 – стіл; 10 – лопатки механізму
 розвантаження; 11 – дозатор ДТА-200

Рисунок 1.4 – Схема промислового електрокальцинатора для теплової
 обробки вуглецевих матеріалів

Механізм нагрівання матеріалу в електрокальцинаторі базується на конвертації електричної енергії у теплову. Електрокальцинатор функціонує як однофазна піч опору. Між різними частинами прожарюваного матеріалу можуть виникати електричні дуги, що може спричинити місцеві перегриви

та графітацію матеріалу. Звичайно, рівень графітації становить приблизно 10-15%, хоча у деяких випадках ця цифра може досягати й 40%.

Важливою є стабільність та однорідність розмірів частинок матеріалу, що впливає на процес. Розміри частинок не повинні перевищувати 25 мм, при цьому важливо уникати діапазону розмірів між 6 та 25 мм, оскільки він є занадто широким. Замість цього, бажано, щоб розмір частинок був значно вужчим, наприклад, між 6 і 12 або 15 і 25 мм.

Забезпечення симетричного руху матеріалу навколо електрода є критично важливим для нормальної роботи печі. Це гарантує рівномірне прогрівання матеріалу по всьому об'єму печі. Порушення цього процесу може спричинити збільшення температури та провідності матеріалу в місцях застрягання, що в свою чергу призведе до зростання струму і може спричинити перегрівання та навіть плавлення футеровки печі. У таких випадках амперметр може не виявити зниження сили струму при завантаженні свіжого матеріалу.

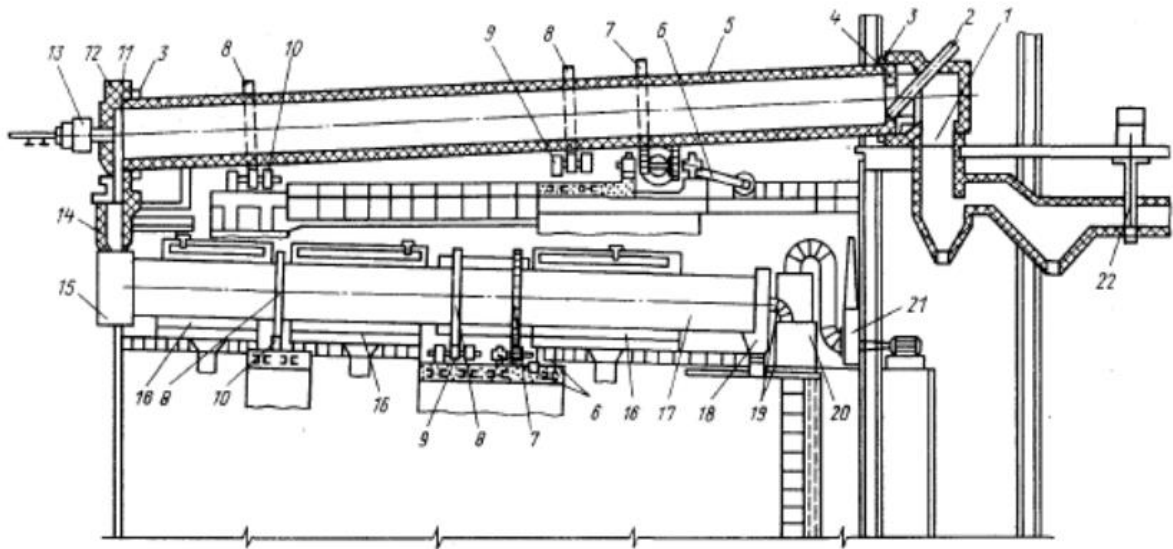
Для виправлення такої ситуації рекомендується призупинити роботу печі, дати трохи охолонути і видалити застряглі частини матеріалу. Це дозволить відновити нормальний хід процесу прожарювання і забезпечити безпеку та ефективність роботи печі.

Витрата електроенергії на прожарювання 1 тонни матеріалу коливається в межах від 400 до 1200 кВт·год. Щодо летючих речовин, які виділяються під час процесу прожарювання, рекомендується їхнє спалювання в утилізаційних установках.

Обертіві печі широко застосовуються у виробництві різних електродних виробів через їхню високу продуктивність та можливість автоматизації процесу прожарювання, що зменшує потребу у багаточисельному обслуговуючому персоналі. Однак, серед недоліків цих печей слід відзначити більший відсоток вуглецю, який згоряє у порівнянні з іншими типами печей. Відсоток чаду може досягати 10%.

Технологічний режим роботи печі визначається об'ємом, який завантажується в барабан печі, швидкістю, з якою матеріал проходить через неї, а також налаштуваннями щодо температури та витяжки.

На рисунку 1.5 наведена структурна схема обертової печі.



1 – пилова камера; 2 – завантажувальна секція; 3 – вузол ущільнення головок печі; 4 – підпірне кільце; 5 – корпус печі; 6 – привід; 7 – зубчастий вінець; 8 – бандаж; 9 – опорна станція (1); 10 – опорна станція (2); 11 – захисне кільце; 12 – нижня головка печі; 13 – газопальниковий пристрій; 14 – перевантажувальна секція; 15 – верхня головка холодильника; 16 – ванна холодильника; 17 – корпус холодильника; 18 – нижня головка холодильника; 19 – повітрозабірник; 20 – рукавний фільтр; 21 – димосос; 22 – шибер

Рисунок 1.5 – Структурна схема обертової печі [11]

Складність та нелінійність обертових печей, разом з великою кількістю некерованих параметрів та збурень, роблять їх складними для математичного опису та управління. Управління ними зводиться в основному до підтримання режимних параметрів, які часто задаються інтуїтивно з метою забезпечення необхідних якісних показників процесу. Це призводить до значної кількості досліджень та розробок у галузі

автоматизації та управління технологічними процесами, зокрема розвитку систем автоматизованого управління та контролю на верхньому рівні. Важливою є робота над розробкою нових технічних засобів контролю та управління, що може сприяти покращенню ефективності та надійності роботи обертових печей.

У системі управління обертовою піччю використовується регулювання швидкості обертання як один з ключових параметрів. Після завантаження матеріалу цей параметр має найбільший вплив на технологічний процес печі. Однак використання лише цього параметра, навіть у поєднанні з іншими стандартними методами керування обертовою печі (наприклад, регулювання розрідження, витрати палива, витрати повітря на спалювання палива та летючих компонентів), не гарантує ефективного управління технологічним процесом.

Барабанні печі широко використовуються у різних галузях промисловості, зокрема в металургії, хімічній промисловості, виробництві будівельних матеріалів та інших галузях. Основним призначенням цих печей є прожарювання та кальцинування різних матеріалів, таких як руди, кокс, вапняк, цемент і багато інших. Барабанні печі дозволяють проводити ці процеси у контрольованих умовах та забезпечують необхідну якість та властивості оброблюваних матеріалів. Також ці печі можуть бути використані для виробництва енергоносіїв, в тому числі для спалювання відходів та біомаси для отримання енергії.

Конструкція барабанної печі є досить складною, але добре збалансованою з точки зору функціональності та міцності. Вона враховує потреби у відповідному тепловому розширенні окремих елементів, що є критично важливим для забезпечення стабільності та довговічності печі. Наявність захисних і підпірних кілець, опорних бандажів, а також ущільнювальних вузлів сприяє збереженню інтегритету конструкції та підтримує ефективну роботу печі протягом тривалого періоду. В цілому, ця конструкція є добре продуманою з точки зору забезпечення надійності

та функціональності барабанної печі.

Корпус печі складається з окремих секцій, що з'єднані між собою зварюванням зі стандартних сталевих листів. На кінці корпусу барабана, де відбувається вхід теплоносія, розміщено захисне кільце. Це кільце служить для екранування гарячого кінця футерування печі і запобігає осьовому зсуву футерування.

Описана конструкція барабанної печі демонструє високий рівень інженерної складності та технічної досконалості. Вона ретельно розроблена з урахуванням найважливіших аспектів, таких як розподіл навантаження, стійкість до температурних відхилень та монтажних дефектів.

Захист від осьового зсуву футерування та використання бандажів на роликах, які спираються на масивні сталеві плити, дозволяють підтримувати стабільну роботу печі навіть у вимогливих умовах експлуатації. Застосування підсилювальних кільцевих насадок також покращує міцність та довговічність конструкції.

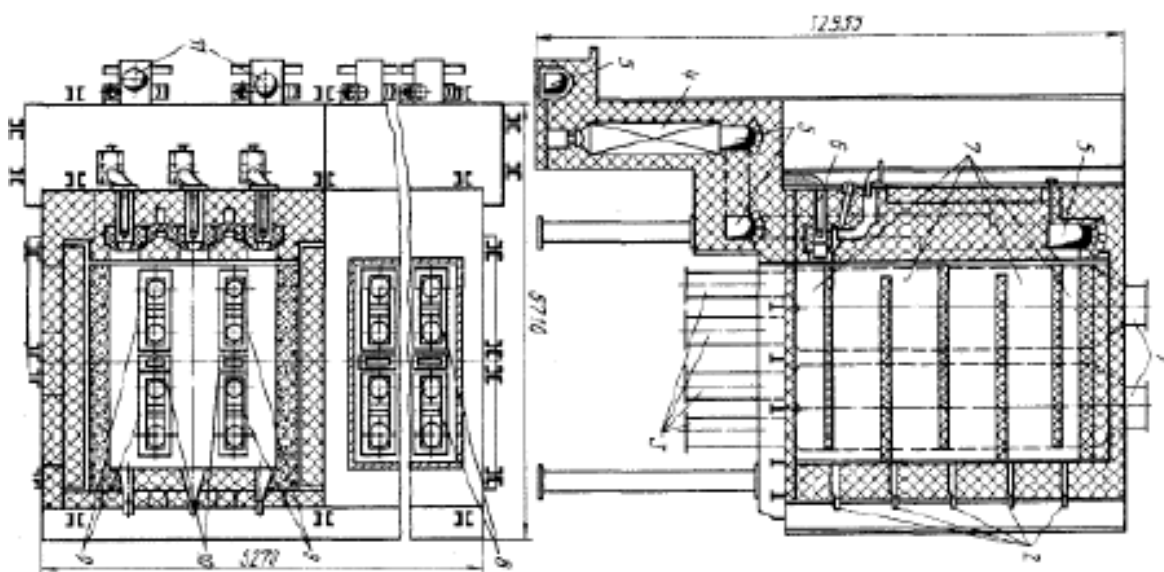
Наголошується важливість ретельного контролю над рівномірністю навантаження та концентричністю елементів конструкції, що свідчить про високий рівень технічного обслуговування та уваги до деталей. Такий підхід сприяє забезпеченню безпеки та ефективності роботи барабанної печі протягом тривалого періоду експлуатації.

Пічний барабан поділяється на три зони відповідно до послідовних технологічних перетворень. Перша зона – зона підсушування та підігріву матеріалів, в якій використовуються гази. Ця зона є найбільшою за довжиною і призначена для максимального використання тепла відходних газів. Температура димових газів на початку зони становить приблизно 1100 °С, а на кінці має бути близько 400 °С. Вища температура газів, яка виходить з печі, ніж 400 °С, свідчить про ненормальні умови роботи. Друга зона – зона прожарювання, довжина якої визначається довжиною зони горіння палива і зазвичай становить 3-4 метри. У разі наявності значної кількості летючих речовин ця зона може збільшитися до 8-10 метрів за рахунок їх згоряння. Ця

зона має найвищі температури, що досягають 1350-1400 °С, та нагріває матеріал до 1200-1250 °С. Третя зона – зона охолодження, розташована перед факелом, тобто в передній частині барабана, від передньої головки до зони прожарювання. Ця зона є найкоротшою і зазвичай має довжину в межах 1,5-2 метри.

Ретортна піч – це спеціальний тип печі, який використовується для проведення термічних обробок матеріалів у вакуумі або в захисній атмосфері. Цей тип печі зазвичай використовується для виробництва кераміки, обробки металів та сплавів, виробництва карбіду кремнію та інших процесів, де важливо контролювати атмосферу навколишнього середовища під час обробки.

На рисунку 1.6 наведена структурна схема восьміретортної печі протivotочного типу.



1 – завантажувальні патрубки; 2 – оглядові люки; 3 – ватержакети; 4 – рекуператор; 5 – газохід; 6 – пальник; 7 – обігрівальні канали; 8 – розсікач; 9 – реторти; 10 – вертикальні канали для летючих; 11 – канал для підведення до пальника гарячого повітря

Рисунок 1.6 – Структурна схема восьміретортної печі протivotочного типу

типу

Основні компоненти ретортної печі включають у себе реторт (заготовку для обробки матеріалу), опалювальні елементи (які нагрівають реторт до потрібної температури), систему контролю температури та атмосфери, а також систему вакууму або подачі захисного газу.

Ретортні печі можуть мати різні конструкції та розміри в залежності від потреб конкретного процесу. Вони є важливим інструментом у виробництві та наукових дослідженнях, де важливо контролювати температуру та атмосферу для досягнення певних властивостей або якості оброблюваних матеріалів.

Операції в ретортних печах, як і в печах інших типів, зводяться до кількох основних етапів. Процес починається з завантаження сировини або матеріалу, який підлягає обробці, у ретортну піч. Цей етап може включати попередню підготовку матеріалу або суміші матеріалів до завантаження. Після завершення технологічного процесу матеріал вивантажується з печі. Це може бути кінцевий продукт або проміжний продукт, який буде використовуватися в подальших технологічних процесах. Контроль теплового режиму в печі є критичним для забезпечення правильного прожарювання або обробки матеріалу. Це включає контроль температури, часу нагрівання та охолодження, а також розподілу температури в різних частинах печі. Керування тяговим режимом включає регулювання потоку газу, витрати палива, аеродинамічних характеристик печі та інших параметрів, що впливають на обмін тепла та масоперенос у процесі обробки.

Ці операції складають основу технологічного процесу в ретортних печах, який може бути додатково ускладнений або доповнений в залежності від конкретного типу обробки матеріалу та специфікацій печі.

Лише електричні печі можуть досягти температур вищих 2000 °C, що необхідно для обробки вуглецевих матеріалів, і тому вони є найбільш підходящим варіантом для таких завдань. В подальших розділах буде розглянута термічна обробка вуглецевих матеріалів в електричних печах шахтного типу.

Тривалість служби ретортних печей обмежена приблизно 3-4 роками через стан футеровки. Досвід експлуатації таких печей у різних галузях промисловості та на електродних заводах показав, що можливо продовжити їх термін служби до 4-6 років і підвищити продуктивність, збільшивши кількість опалювальних каналів з 6 до 7 і організувавши спалювання палива не в одному, а в чотирьох каналах.

Електрокальцинатор є кращим вибором для термічної обробки вуглецевих матеріалів з кількох причин:

- висока температура: можуть досягати дуже високих температур, що необхідно для ефективної обробки вуглецевих матеріалів, таких як антрацит чи вугілля;

- точне керування температурою: забезпечують можливість точного контролю температури, що дозволяє підтримувати оптимальні умови для процесу обробки вуглецевих матеріалів;

- чистий процес: електрокальцинатори працюють на електричній енергії, тому процес обробки є досить чистим порівняно з іншими способами нагрівання, такими як вугілля або газ;

- контрольована атмосфера: можуть створювати контрольовані атмосферні умови, що дозволяє регулювати хімічні властивості та склад оброблюваних матеріалів.

Загалом, електрокальцинатори є ефективними, надійними та досить універсальними для термічної обробки вуглецевих матеріалів.

1.3 Опис об'єкту автоматизації

Електрокальцинатор – ефективний агрегат для проведення високотемпературних процесів прокаливання вуглецевих матеріалів. Сутність цих процесів полягає в розвитку та формуванні кристалічної решітки графіту при температурі 2000-2500 °С. У електрокальцинаторі процеси теплообміну та нагріву матеріалу впливають головним чином на

інтенсивність та результат даного процесу.

Нагрів в основному здійснюється за рахунок виділення тепла в шарі матеріалу, що піддається термічній обробці, під час проходження через нього електричного струму. Тепло також виділяється під час горіння оброблюваного матеріалу та летких речовин, що виділяються з нього.

Теплове поле внутрішнього простору електрокальцинатора розподілене надзвичайно нерівномірно. Встановлено, що концентрація силових ліній струму і найбільше нагрівання (понад 2500 °С) відбувається в зонах, розташованих в міжелектродному просторі поблизу осьової лінії, а матеріал біля стінок електрокальцинатора нагрівається (від 800 до 1200 °С) за рахунок потоку тепла, що йде від центральних найбільш нагрітих зон, збуджених електричним струмом. Цієї температури недостатньо для отримання продукту потрібної якості, що призводить до зниження техніко-економічних показників через необхідність відокремлення непрокаленої частини продукту для повторної обробки.

Для ефективного управління процесом термічної обробки вуглецевої сировини потрібно дослідити вплив технологічних параметрів на фізичні характеристики робочого простору електрокальцинатора, як показано на діаграмі у рисунку 1.7.

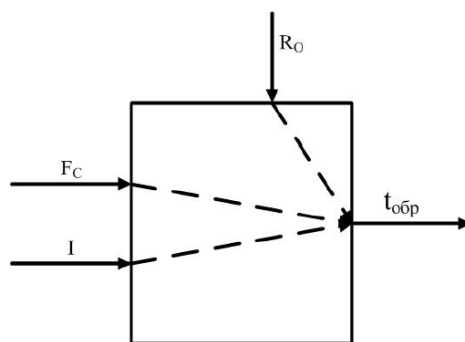


Рисунок 1.7 – Структурно-параметрична схема досліджуваних каналів регулювання в електрокальцинаторі

F_c – це вхідний параметр, що визначає витрату сировини в кілограмах на секунду. Від цього параметра залежить швидкість подачі матеріалу, а отже, і продуктивність апарату. Чим більше витрата сировини, тим вища

швидкість подачі і продуктивність.

I – керування, представлене током в амперах. Від цього току залежить якість виробленої продукції, її розмір, густина та однорідність матеріалу.

RO – збурення, представлене опором матеріалу в омах. Цей параметр пов'язаний з характеристикою матеріалу і не може бути вимірний безпосередньо, тому потрібно постійно проводити контроль якості сировини. Зменшення опору необхідно для підвищення якості продукції, оскільки він впливає на температуру обробки матеріалу.

Отже, об'єкт керування має наступні канали керування:

- сила струму – температурного поля робочого простору електрокальцинатора;
- швидкість вивантаження (завантаження) матеріалу – температурного поля робочого простору електрокальцинатора».

В даній випускній кваліфікаційній роботі магістра досліджено зміну температурного поля робочого простору електрокальцинатора в залежності від сили струму, що підводиться до зміни швидкості завантаження/вивантаження матеріалу і зменшення використання електроенергії.

1.5 Постановка задачі

У випускній кваліфікаційній роботі магістра розробляється система керування, спрямована на виготовлення високоякісної продукції з мінімальними витратами на виробництво. Для досягнення цієї мети ми плануємо створити високоточну математичну модель процесу прожарювання вуглецевої сировини в електрокальцинаторі шахтного типу. Оскільки процес має складну та нелінійну (динамічну) характеристику, для розробки системи керування необхідно створити спрощену модель процесу. Ця спрощена модель повинна досить точно відтворювати результати моделювання складної початкової моделі, але при цьому забезпечувати

значно менший час розрахунку.

Зокрема, досліджується, як зміна сили струму впливає на ефективність теплового режиму, швидкість завантаження та вивантаження матеріалу, а також зменшення використання електроенергії. Завдання включає наступні кроки:

- проведення експериментів або моделювання зміни сили струму в електрокальцинаторі;
- вимірювання температурного поля робочого простору при різних значеннях сили струму;
- аналіз впливу зміни сили струму на температурне поле та ефективність процесу;
- розробка методики оптимізації сили струму для досягнення оптимального температурного режиму та зменшення використання електроенергії;
- впровадження системи автоматизованого управління та контролю технологічним процесом (АСУТП) для підтримки оптимальних параметрів роботи електрокальцинатора.

Отже, ця робота спрямована на оптимізацію електротехнологічного процесу в електрокальцинаторі шляхом впровадження системи керування та контролю, що ґрунтується на вивченні впливу зміни сили струму на температурне поле та ефективність процесу.

Для розробки ефективної системи керування в електрокальцинаторі потрібно:

- побудувати математичну модель процесу прожарювання на основі експериментальних даних;
- дослідити динаміку об'єкту на основі отриманої моделі;
- проаналізувати існуючі системи керування в аналогічних процесах та синтезувати оптимальну систему керування;
- забезпечити високу якість продукції та зменшення енерговитрат

через ефективне регулювання параметрів процесу;

- порівняти розроблену систему з існуючими підходами до керування процесом прожарювання матеріалів з вуглецю;

- визначити можливі ризики, які можуть виникнути під час експлуатації електрокальцинатора, і розробити алгоритми їх запобігання.

Дана випускна кваліфікаційна робота магістра висвітлює важливі аспекти управління процесом прожарювання матеріалу з вуглецю в електрокальцинаторі. Зокрема, вона розглядає режим прожарювання, який контролюється за допомогою параметрів струму джерела живлення. Описаний процес вивантаження чергової порції матеріалу важливий для забезпечення постійності у виробничому процесі.

Система керування, яка підтримує процес вивантаження постійним, вимагає активного експерименту для отримання параметрів об'єкта керування. Це важливий крок у розробці ефективної системи керування, яка забезпечить стабільність процесу та високу якість виробництва. Такий підхід дозволяє забезпечити оптимальні умови роботи електрокальцинатора і досягти поставлених виробничих цілей – економії енергоносіїв.

Для ефективної системи керування за вибраним каналом, що визначається як «швидкість вивантаження (завантаження) матеріалу – сила струму», необхідно провести активний експеримент з метою визначення параметрів об'єкта керування.

Система керування має працювати з наступними сигналами:

- вхідний сигнал – значення змінного струму 15...20 кА;

- вихідний сигнал – пропорційне керування продуктивністю вивантаження матеріалу 1,2...1,6 т/год.

Система живлення електрокальцинатора генерує струм у діапазоні від 0 до 5 А, що відповідає силі струму від 0 до 20 кА, яка подається на електроди електрокальцинатора. Змінний струм у діапазоні від 0 до 5 А вимірюється за допомогою безконтактного датчика струму, який генерує вихідний сигнал у діапазоні від 4 до 20 мА, пропорційний вимірюваному

значенню.

Дозатор вивантаження матеріалу має трифазний електропривод потужністю близько 3,0 кВт при напрузі близько 380 В, який управляється частотним перетворювачем з каналом керування у діапазоні від 4 до 20 мА. Управління технологічним обладнанням, зокрема електрокальцинатором, здійснюється програмованим логічним контролером. Використано канал керування «швидкість вивантаження матеріалу – сила струму прожарювання» (непрямий метод вимірювання температурного поля робочого простору електрокальцинатора).

До складу контуру керування електрокальцинатором входять дозатор вивантаження матеріалу та датчик струму розжарювання. Збільшення сили струму вимагає більшого вивантаження матеріалу з електрокальцинатора, а зменшення сили струму – меншого. Таким чином, для визначення параметрів у моделі об'єкту керування обрано кількість матеріалу для вивантаження, а реальним значенням є змінний струм електродів розжарювання.

За структурною схемою системи дослідження формується керуючий вплив, яким є масові витрати вивантаження, які регулюються за допомогою контролю струму розжарювання в електрокальцинаторі.

Витрати вивантаження можуть змінюватися від 1,2 до 1,6 тонн на годину, а номінальний струм очікується від 15 до 20 кА.

Програмований логічний контролер здійснює керування активним експериментом з метою отримання необхідних даних для створення математичної моделі електрокальцинатора за обраним каналом керування «масова витрата вивантаження – сила струму». Зв'язок між програмованим логічним контролером та персональним комп'ютером, що має систему SCADA, реалізується через інтерфейс RS-485.

Висновки. У даному розділі були розглянуті основні технології і устаткування термічної обробки матеріалів з вуглецю. Було обрано електрокальцинатор, як ефективний, надійний та досить універсальний

апарат для термічної обробки вуглецевих матеріалів. В даному розділі також були розглянуті важливі аспекти розробки системи керування для електрокальцинатора з метою виробництва високоякісної продукції з мінімальними витратами електроенергії.

2 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ

Прямий контроль температури всередині електрокальцинатора практично здійснити складно, тому для дослідження за допомогою обчислювального експерименту та оптимізації процесу доцільно створити його математичну модель.

Аналіз техніко-економічних показників є важливим для визначення оптимального управління електрокальцинатором. Один з найбільш загальних показників ефективності процесу – це його рентабельність протягом визначеного періоду часу, такого як тиждень, місяць або рік.

$$R_B = \frac{Q_B}{C_B}, \quad (2.1)$$

де Q_B – прибуток від реалізації продукції;

C_B – собівартість продукції.

Прибуток від реалізації продукції обчислюється шляхом віднімання собівартості виробництва від доходу, отриманого від продажу продукції.

$$Q_B = \sum_{i=1}^N a_i F_i - \sum_{j=1}^M b_j S_j - Q_E, \quad (2.2)$$

де a_i , F_i – ціна одиниці та кількість одиниць i -го виду реалізованої продукції, відповідно;

b_j , S_j – відповідно, ціна одиниці та кількість одиниць j -го виду сировини, що використовувалась у виробництві;

N , M – кількість видів реалізованої продукції та сировини, відповідно;

Q_E – експлуатаційні витрати на виробництво.

Собівартість продукції включає в себе витрати на експлуатацію та вартість сировини, необхідної для виготовлення продукції.

$$C_B = Q_E + \sum_{j=1}^M b_j S_j \quad (2.3)$$

Використання рентабельності як критерію оптимального керування процесом термообробки стикається з деякими викликами:

- зміна ціни на сировину та енергоносії ускладнює розрахунки за цим критерієм;
- процес термообробки не є завершальним у виробничому процесі, тому визначення ціни готової продукції на цьому етапі стає проблематичним.

Отже, використання рентабельності як основного критерію оптимального керування може бути недоцільним. Замість цього, прибуток від реалізації продукції та собівартість готової продукції можуть бути більш адекватними критеріями для оптимального керування.

Використання прибутку від реалізації продукції як критерію оптимального керування також має свої недоліки, схожі на ті, що виявлені при аналізі рентабельності. Зокрема, зміна цін на сировину та енергоносії може ускладнити розрахунки за цим показником, а також процес термообробки не є завершальним у виробничому процесі, тому визначення прибутку від реалізації продукції на цьому етапі може бути проблематичним.

Щодо собівартості готової продукції як критерію оптимального керування, хоча цей показник може враховувати експлуатаційні витрати, сировину та готову продукцію, його штучне зменшення може бути недоцільним, оскільки це може не враховувати зміну продуктивності

процесу. Мінімізація цього критерію може призвести до зменшення продуктивності.

Отже, для оптимального керування процесом термообробки важливо враховувати різні аспекти, включаючи зміну цін, ефективність процесу та експлуатаційні показники, і можливо використання комбінації різних критеріїв для досягнення оптимальних результатів.

Продуктивність процесу термообробки в електрокальцинаторі може вимірюватись кількісно (у штуках виробленої продукції):

$$K_{\text{заг}} = \sum_{i=1}^n k_i, \quad (2.4)$$

де k_i – кількість виробленого i -го виду продукції, штук; або масово (кг, тон)

$$G_{\text{заг}} = \sum_{i=1}^n q_i, \quad (2.5)$$

де q_i – вага i -го виду продукції, кг.

Використання масового методу (кг, т) для оцінювання продуктивності процесу термообробки вуглецевої сировини є більш об'єктивним, оскільки це дозволяє отримати конкретні числові значення, які можна порівняти та аналізувати.

Застосування продуктивності як самостійного критерію оптимального керування має сенс у випадках, коли планується використання методів, які можуть підвищити продуктивність процесу термообробки без погіршення інших техніко-економічних показників. Також цей критерій корисний, коли процес термообробки є «вузьким місцем» у технологічному процесі

виробництва, і підвищення продуктивності може позитивно вплинути на ефективність роботи всього виробничого комплексу.

Враховуючи ці фактори, продуктивність може бути важливим критерієм для оптимального керування процесом термообробки вуглецевої сировини, особливо якщо це дозволяє підвищити загальну ефективність виробництва без значного погіршення інших показників.

Підвищення продуктивності процесу термообробки може справді призвести до збільшення енерговитрат та інших ресурсів, оскільки більша кількість сировини обробляється за той самий час, що може вимагати більше енергії та ресурсів для підтримки процесу. Це є суттєвим недоліком використання продуктивності як єдиного критерію оптимального керування.

Щодо використання показників якості проходження процесу, таких як однорідність властивостей матеріалу на виході з апарату, і питомий електричний опір, це може бути корисним підходом. Якість проходження процесу може бути критичною для досягнення високої якості готової продукції, а питомий електричний опір може вказувати на ефективність проходження матеріалу через процес.

Отже, врахування якості проходження процесу та інших важливих показників, разом з продуктивністю, може забезпечити більш комплексний підхід до оптимального керування процесом термообробки вуглецевої сировини.

Математична задача оптимального керування процесом термообробки вуглецевої сировини полягає у визначенні таких параметрів, як температура, час та інші фактори, щоб досягти певної мети, наприклад, максимізації якості продукції або мінімізації витрат.

$$K_{\text{опт}} \rightarrow \min \quad (2.5)$$

$$\Omega_{\text{н}} \leq \Omega \leq \Omega_{\text{в}} \quad (2.6)$$

де $\Omega_H \leq \Omega \leq \Omega_B$ – вектор поточних значень технологічних змінних, вектор нижніх та верхніх припустимих значень цих змінних, відповідно.

Мінімізація критерію оптимальності можлива за рахунок зменшення енерговитрат і збільшення дійсної продуктивності роботи електрокальцинатора. Зменшення енерговитрат може бути досягнуто за допомогою оптимізації процесу термообробки, наприклад, шляхом підбору оптимальних параметрів нагріву, ефективного управління тепловим режимом та використання енергоефективних технологій. Збільшення дійсної продуктивності роботи електрокальцинатора може бути досягнуто за рахунок оптимізації технологічних процесів, вдосконалення системи контролю та управління, використання більш ефективних матеріалів тощо. Такий підхід дозволяє досягти комплексної оптимізації процесу термообробки вуглецевої сировини, що сприяє підвищенню ефективності та зниженню витрат виробництва.

Дійсна продуктивність електрокальцинатора визначається як:

$$G_{\text{пр}} = K_{\text{пр}} G_{\text{заг}}, \quad (2.7)$$

де $K_{\text{пр}}$ – коефіцієнт, що характеризує частку продукції належної якості в усій масі обробленого матеріалу;

$G_{\text{заг}}$ – загальна продуктивність електрокальцинатора.

Для збільшення $G_{\text{пр}}$ потрібно максимізувати $K_{\text{пр}}$, тобто забезпечити такі умови, при яких весь термічно оброблений матеріал можна буде застосовувати в подальших стадіях виробництва вуглецевих виробів. Продукцію вважають якісною у випадку, коли її питомий електричний опір не перевищує задане стандартом значення:

$$\rho \leq \rho_{\text{ст}}, \quad (2.8)$$

Згідно з дослідженнями, нерівномірний розподіл джерел теплоти під час процесу електронагріву в електрокальцинаторі може спричинити нерівномірний нагрів матеріалу, зокрема, перегрів центральної частини сировини. Це може призвести до недостатньої якості продукції через нерівномірність розподілу температури по об'єму матеріалу.

Забезпечення цієї умови можливе лише при рівномірному нагріві матеріалу до певної температури. Дослідження, проведені в промислових умовах, показали, що в процесі електронагріву спостерігається нерівномірний розподіл джерел теплоти як по висоті, так і по радіусу електрокальцинатора [10]. Це викликає перегрів центральної частини вуглецевої сировини, що знаходиться між електродами, що в свою чергу призводить до збільшення нерівномірності розподілу сили струму по радіусу, так як зі збільшенням температури питомий електроопір шару матеріалу знижується [11]. В результаті матеріал, що рухається на периферії біля футеровки електрокальцинатора, нагрівається по більшій мірі за рахунок теплообміну, його температура стає набагато нижчою за температуру центральних шарів і, як наслідок, якість продукції не задовольняє поставленим вимогам [8]. Саме тому необхідно підібрати такий режим обігріву, при якому для кожного шару сировини нагрів від джоулевої теплоти та теплообміну в сумі даватиме однакову швидкість нагріву. Також потрібно враховувати, що нагрів вуглецевої сировини до температур 2600-2800°C призводить до того, що велика кількість сировини графітується і вміст штучного графіту в вихідному продукті становить 40-60%. З одного боку, це забезпечує дуже низький питомий електричний опір матеріалу, але автори [12] вказують на те, що збільшення вмісту штучного графіту негативно впливає на пластичні властивості електродної маси. Це в свою чергу може призводити до збільшення кількості браку на наступних етапах виробництва, а, отже, виникає необхідність визначення оптимальної температури термообробки вуглецевої сировини, що забезпечить

відповідність властивостей заданим значенням і при цьому не призведе до значного погіршення пластичних властивостей матеріалу.

Для покращення якості продукції та уникнення збільшення вмісту штучного графіту, який може негативно вплинути на пластичні властивості, необхідно забезпечити рівномірний нагрів матеріалу. Це може бути досягнуто за допомогою оптимізації режиму обігріву, щоб для кожного шару сировини нагрів від джоулевої теплоти та теплообміну в сумі давав однакову швидкість нагріву.

Також важливо здійснювати контроль температури термообробки вуглецевої сировини, щоб забезпечити відповідність властивостей матеріалу вимогам якості та водночас уникнути погіршення його пластичних характеристик. В цьому контексті дослідження та оптимізація технологічних процесів виграють важливу роль у забезпеченні ефективності та якості виробництва.

Виходячи з вище написаного, потрібно ввести обмеження на температуру термообробки:

$$T_n \leq T \leq T_v, \quad (2.9)$$

де T , T_n , T_v – відповідно, дійсне значення температури термообробки, її нижнє та верхнє допустимі значення.

При управлінні цим процесом важливо враховувати, що значне збільшення активної потужності струму може призвести до плавлення вогнестійкої футеровки та утворення на її поверхні гарнісажу. Цей гарнісаж складається з піролітичного вуглецю разом із спеченими шматками вуглецевої сировини. Присутність таких ділянок на поверхні футеровки може вимагати зупинки агрегату для очищення оплавлених шматків.

Тому існує обмеження на потужність струму, що подається до електродів. Це обмеження повинне враховувати як властивості джерела

струму, так і той факт, що висока активна потужність струму може спричинити плавлення вогнестійкої футеровки та відмову апарату.

$$0 \leq P \leq P_B, \quad (2.10)$$

де P , P_B – відповідно, поточне значення потужності струму та її верхнє допустиме значення.

Ще одним обмеженням на управління є тривалість перебування вуглецевої сировини в електрокальцинаторі. Цей час контролюється через подачу матеріалу через живильник та обертання розвантажувального стола. Обмеження визначається, з одного боку, часом, необхідним для рівномірного нагріву до заданої температури, і, з іншого боку, мінімальною продуктивністю апарату.

$$\tau_H \leq \tau \leq \tau_B, \quad (2.11)$$

де τ_H, τ_B – відповідно, дійсне значення часу термообробки, його нижнє та верхнє допустиме значення.

Отже, об'єднуючи критерій оптимальності та обмеження математично постановка задачі керування електрокальцинатором у виробництві вуглецевих виробів виглядає таким чином:

$$\left\{ \begin{array}{l} K_{\text{опт}} = \frac{(P_B(W_{\Pi} + W_T) + P_M G_M)}{G_{\text{пр}}} \rightarrow \min \\ \rho \leq \rho_{\text{СТ}} \\ T_H \leq T \leq T_B \\ 0 \leq P \leq P_B \\ \tau_H \leq \tau \leq \tau_B \end{array} \right. \quad (2.12)$$

Розв'язання цієї задачі має на меті забезпечити оптимальне функціонування процесу термообробки вуглецевої сировини з точки зору

ефективного використання ресурсів та енергії. Це має призвести до підвищення ефективності виробництва вуглецевих продуктів в цілому.

Висновки. Обрання критерію оптимального керування, що базується на питомій собівартості експлуатаційних витрат процесу, є обґрунтованим, оскільки ефективне використання ресурсів та оптимізація витрат є ключовими аспектами у підвищенні конкурентоспроможності підприємства. Аналіз техніко-економічних показників дозволяє об'єктивно оцінити вартість процесу термообробки та визначити його вплив на загальну вартість продукції. Розробка математичної моделі процесу термообробки вуглецевої сировини в електрокальцинаторі є ключовим кроком у вдосконаленні системи керування. Ця модель дозволить уточнити взаємозв'язки між різними параметрами процесу та розробити оптимальні стратегії керування для досягнення поставлених цілей ефективності та якості продукції. Такий підхід дозволить підприємству забезпечити стабільність виробництва, знизити витрати та підвищити якість продукції, що є ключовими факторами успішної діяльності на ринку.

3 ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ І РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ САР

3.1 Розроблення плану експерименту

Система дослідження дозволяє формувати різноманітні керуючі впливи і подавати їх на підсистему керування електрокальцинатора. Об'єкт керування не накладає обмежень на керуючі впливи, тому можливо досліджувати його за допомогою методу активного експерименту.

З метою проведення ідентифікації об'єкта керування за допомогою методу активного експерименту необхідно отримати його динамічну характеристику, дані для побудови статичної характеристики, характеристику при П-образному керуючому впливі, а також перевірочні дані. Це дозволить визначити основні параметри та зв'язки системи, що стане основою для подальшого налаштування і оптимізації системи керування.

Розроблено план експерименту:

Налаштування системи дослідження:

- перевірити налаштування приладів вимірювання;
- переконатися у правильному з'єднанні обладнання;
- підготувати програмне забезпечення для реєстрації даних.

Отримання динамічної характеристики:

- установити керуючий сигнал на мінімальне значення та досягти усталеного режиму;
- запустити процес реєстрації;
- збільшити керуючий сигнал до максимального значення та досягти усталеного режиму.

Зупинити процес реєстрації.

Отримання даних для побудови статичної характеристики:

- установити керуючий сигнал на мінімальне значення та досягти усталеного режиму;
- запустити процес реєстрації;
- послідовно змінювати керуючий сигнал на рівні 20%, 40%, 60%, 80% та 100% і досягти усталеного режиму після кожної зміни;
- зупинити процес реєстрації.

Отримання даних при П-образному впливі:

- установити керуючий сигнал на мінімальне значення та досягти усталеного режиму;
- запустити процес реєстрації;
- збільшити керуючий сигнал до максимального значення та досягти усталеного режиму;
- зменшити керуючий сигнал до мінімального значення та досягти усталеного режиму;
- зупинити процес реєстрації.

Отримання перевірочних даних:

- установити керуючий сигнал на мінімальне значення та досягти усталеного режиму;
- налаштувати псевдовипадковий керуючий вплив;
- запустити процес реєстрації;
- зупинити процес реєстрації після упродовж часу, еквівалентного десяти перехідним процесам;
- завершити експериментальний процес.

3.2 Реалізація експерименту і результати моделювання

Керуючий сигнал змінюється від 1,2 до 1,6 тонн на годину відповідно до технічних характеристик обладнання, де максимальна сила струму становить 20 кА при мінімальній масовій витраті вивантаження, та

мінімальна сила струму складає 15 кА при максимальній масовій витраті вивантаження.

Оскільки перехідний процес очікується тривати близько 40 годин, то всі необхідні характеристики об'єкта керування будуть записані з інтервалом в 100 секунд. Тобто під час моделювання в MATLAB час буде стиснутий у 100 разів, оскільки крок моделювання складає 1 секунду. При побудові кінцевої моделі всі обчислені часові показники слід помножити на 100. На першому етапі експерименту система налаштована так, що керуючий вплив може приймати значення дискретно від 0 до 100%, а фактичне значення може бути від 0 до 0,4 тонн на годину. Це досягається відповідним управлінням частотним перетворювачем дозатора для вивантаження матеріалу з електрокальцинатора. Мінімальні витрати вивантаження в 1,2 тонни на годину задаються як нижня межа обмеження вхідного сигналу в системі керування.

На другому етапі було проведено вимірювання динамічної характеристики об'єкта керування. Для цього спочатку встановлювався керуючий сигнал на рівні 0 тонн на годину (0%). Після досягнення усталеного режиму, коли струм досягав 20 кА, керуючий сигнал підвищувався до 0,4 тонн на годину (100%).

Після досягнення усталеного режиму при силі струму 15 кА експеримент завершувався.

На рисунку 3.1 наведені графіки отримання динамічної характеристики.

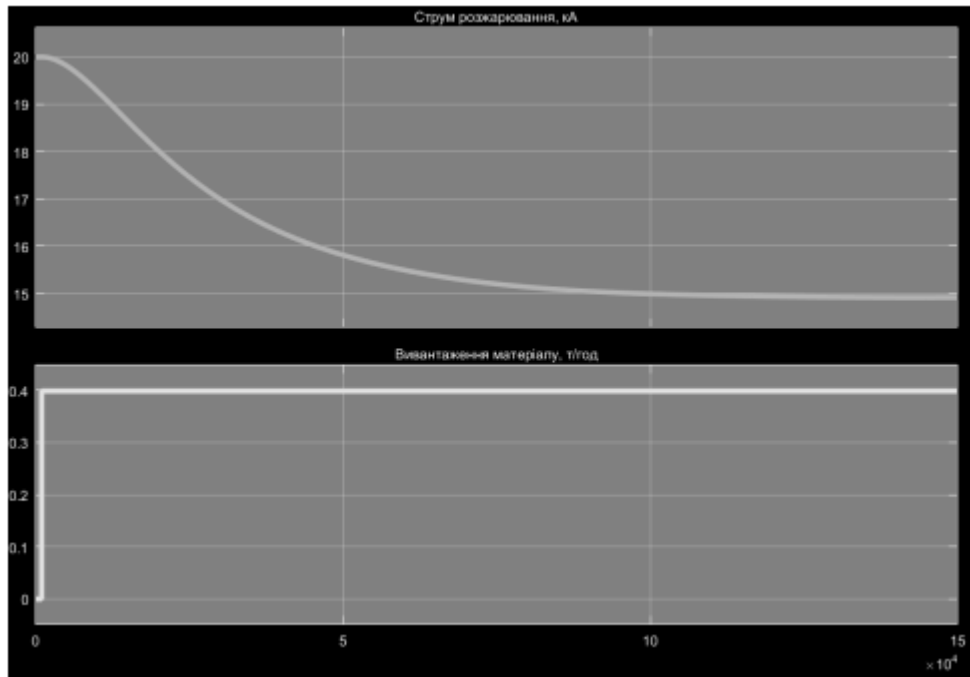


Рисунок 3.1 – Отримання динамічної характеристики

Було виконано отримання даних для побудови статичної характеристики (рис. 3.2).

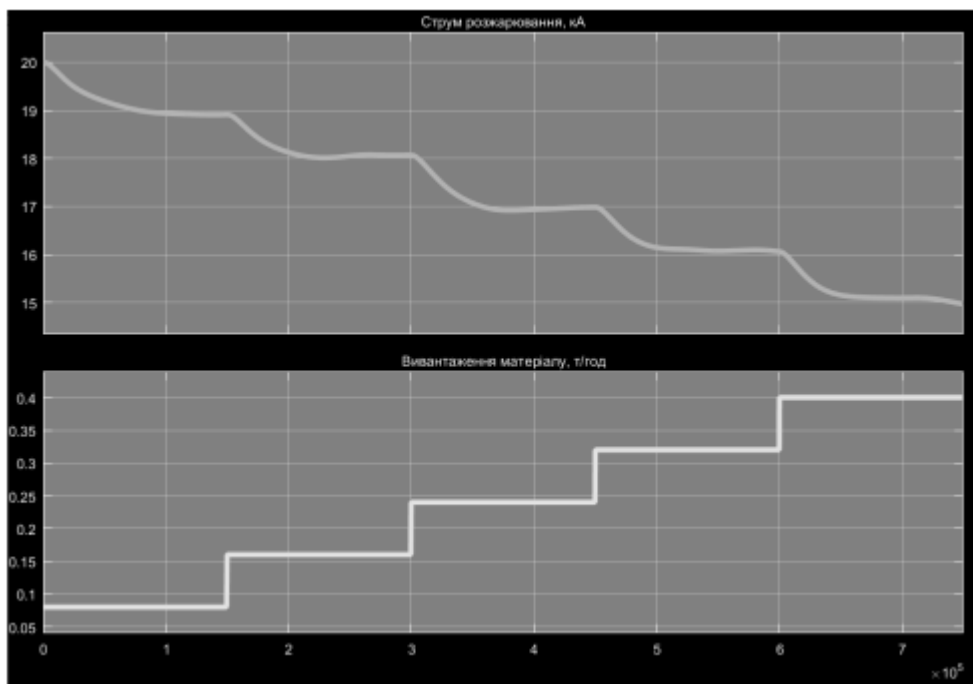


Рисунок 3.2 – Отримання даних для побудови статичної характеристики

Для цього спочатку було встановлено керуючий сигнал на рівні 0 тонн на годину (0%). Після досягнення усталеного режиму, керуючий сигнал було змінено на 0,08 тонн на годину (20%). Після досягнення усталеного режиму цей процес повторювався для інших рівнів керуючого сигналу: 0,16 тонн на годину (40%), 0,24 тонн на годину (60%), 0,32 тонн на годину (80%) та 0,40 тонн на годину (100%). Після досягнення усталеного режиму експеримент було завершено.

Результат отримання даних при П-образному керуючому впливі наведено на рисунку 3.3.

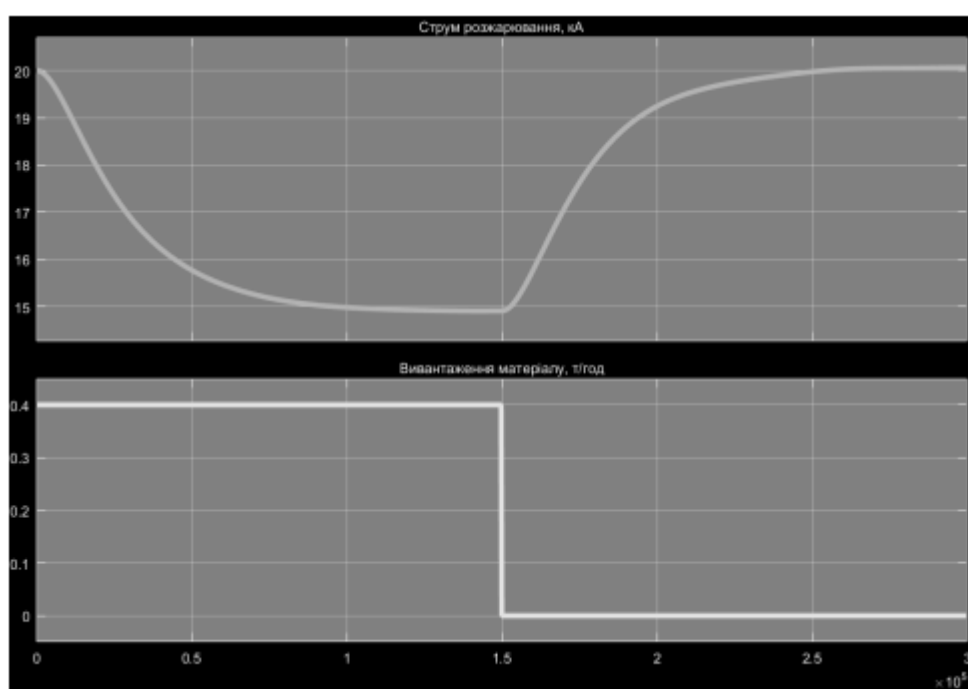


Рисунок 3.3 – Отримання даних при П-образному керуючому впливі

Проведено експеримент з отриманням даних за П-образному керуючому впливі. Спочатку керуючий вплив було встановлено на рівні 0 тонн на годину (0%). Після досягнення усталеного режиму, керуючий вплив було збільшено до 0,4 тонн на годину (100%). Потім, після досягнення нового усталеного режиму, керуючий вплив знову було зменшено до 0 тонн на годину (0%). Після досягнення усталеного режиму експеримент було завершено. Далі проводилось отримання перевірочних даних.

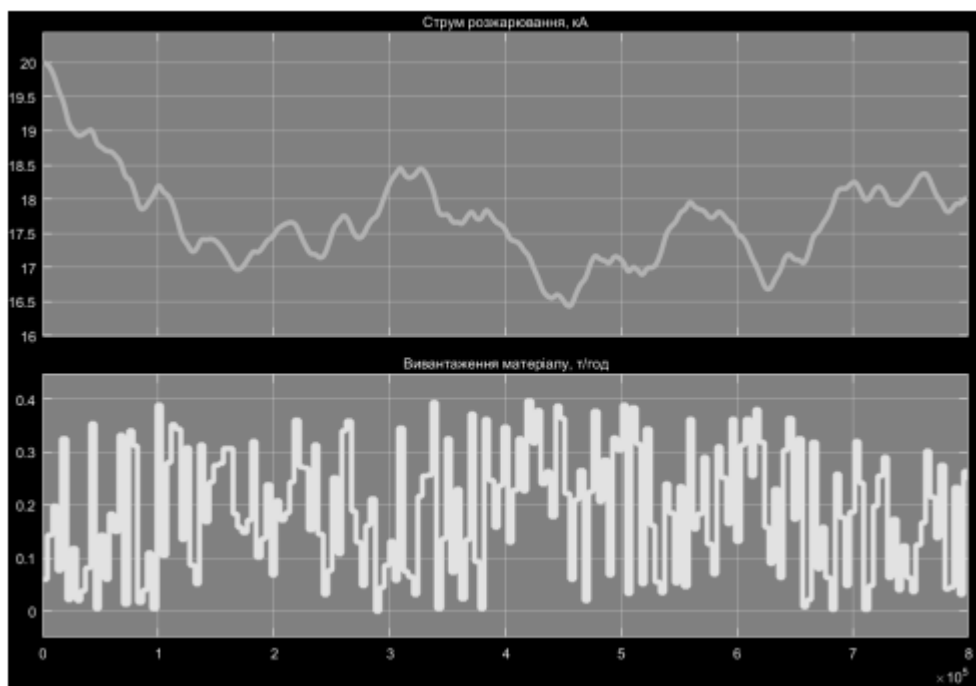


Рисунок 3.4 – Отримання перевірочних даних

Для цього спочатку було встановлено керуючий вплив на значення 0 тонн на годину (0%). Після досягнення усталеного режиму було встановлено керуючий вплив на випадкове значення в діапазоні від 0 до 0,4 тонн на годину (від 0 до 100%), з кроком зміни керуючого сигналу 100 с. Все це відбувалося протягом 800000 секунд.

В результаті виконання плану експерименту було проведено докладне дослідження об'єкта керування. Були отримані динамічна характеристика, дані для побудови статичної характеристики, дані при П-образному керуючому впливі та перевірочні дані.

Дані отримані в SCADA системі ZENON було імпортовано до математичного пакета MATLAB з метою подальшої обробки

На рисунку 3.5 показані результати з видалення статичної складової для динамічної, статичної, П-образної та перевірочної характеристик.

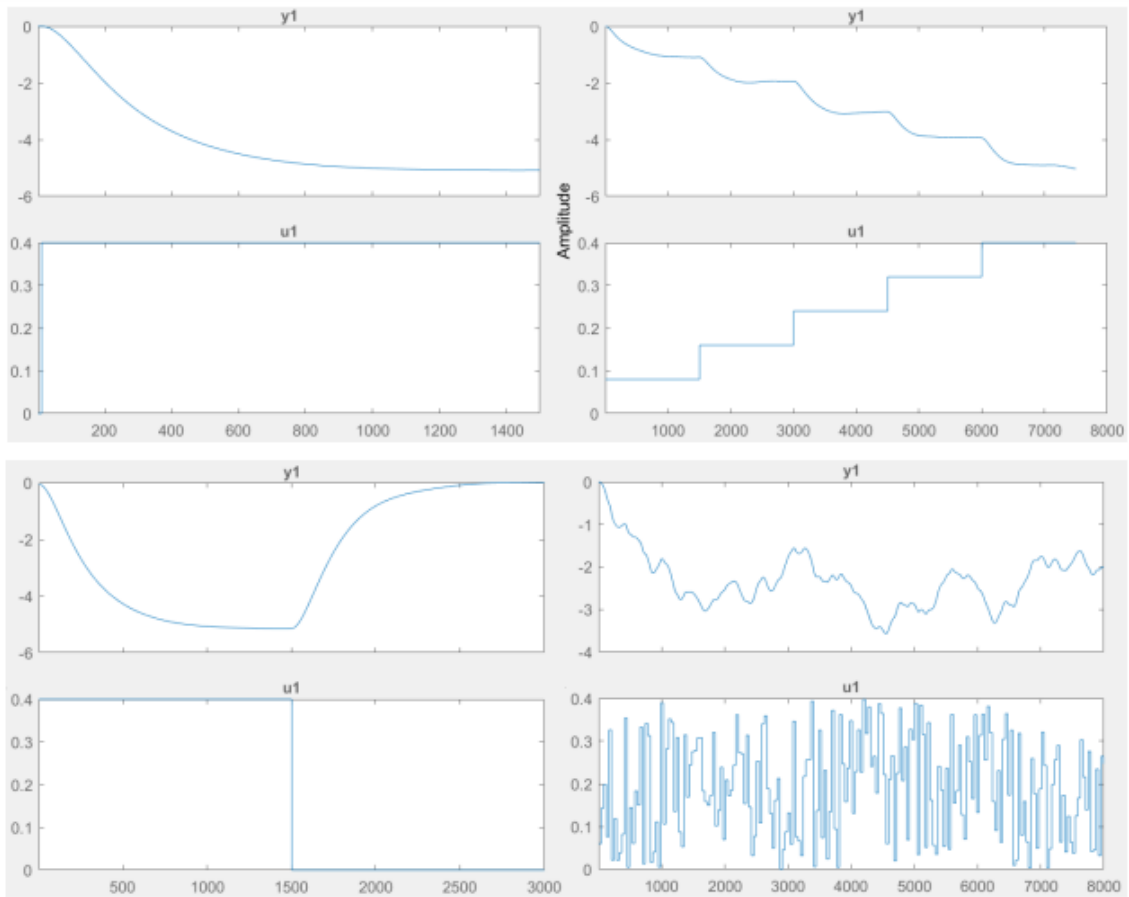


Рисунок 3.5 – Динамічна, статична, П-образна та перевірна характеристики з видаленими статичними складовими

Для оцінки структури моделі об'єкта керування розглянемо динамічну характеристику самого об'єкта керування (див. рис. 3.6).

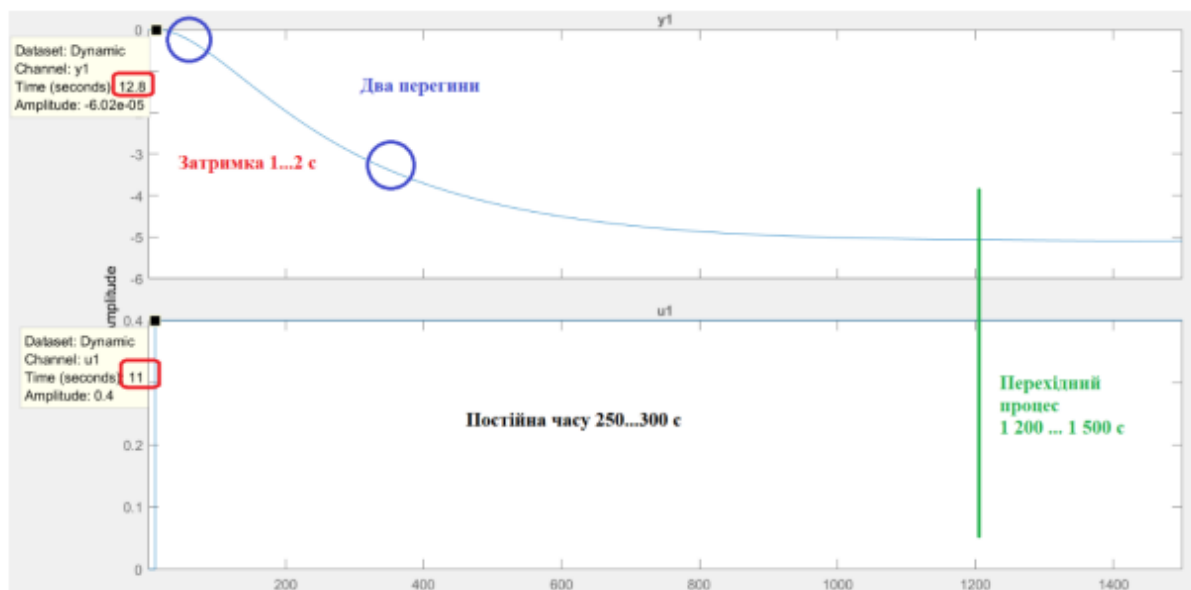


Рисунок 3.6 – Динамічна характеристика

Аналізуючи об'єкт керування на лінійність, ми спостерігаємо, що після застосування керуючого впливу - вивантаження матеріалу на рівень 0,4 т/год (100 %), вихідний сигнал у вигляді струму розжарювання не миттєво змінюється. Це дає підставу припустити, що об'єкт має невелике запізнення приблизно на рівні 1-2 с. Це зазвичай пов'язано з інерційністю датчика температури, реакційним часом дозатора вивантаження та конструктивними особливостями технологічного обладнання.

Додатково, на динамічній характеристиці не спостерігається інерції, характер перехідного процесу є монотонним, а кількість перегинів становить два. Час перехідного процесу приблизно 1 500 с, а постійна часу становить близько 250-300 с. Враховуючи ці відомості, можна зробити висновок, що модель об'єкта керування може бути представлена у вигляді аперіодичної ланки другого порядку з запізненням.

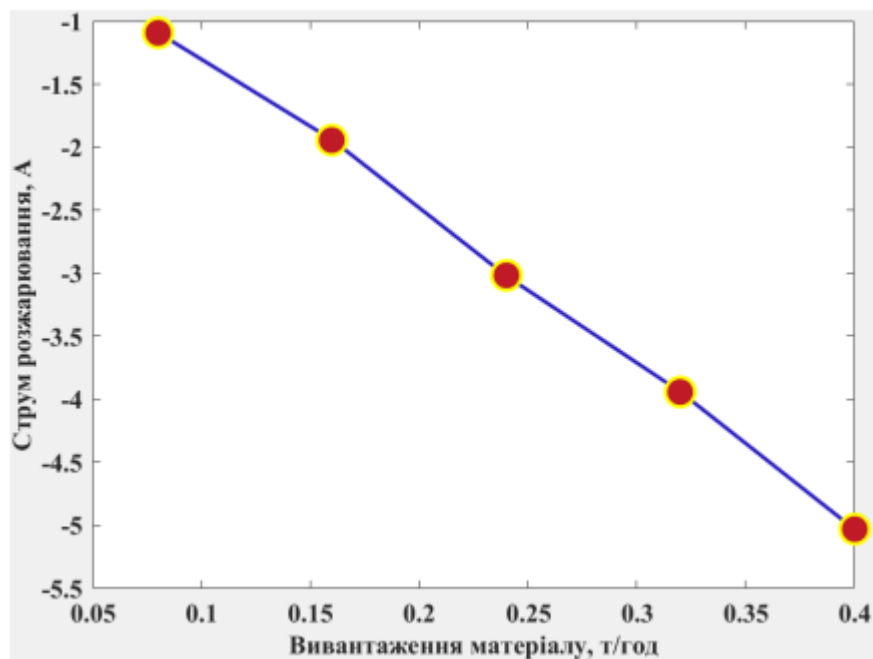


Рисунок 3.7 – Статична характеристика

За статичною характеристикою та отриманими коефіцієнтами посилення досліджуваній об'єкт виявився лінійним у всьому діапазоні керуючих впливів. Це означає, що його поведінка може бути адекватно

описана за допомогою лінійних моделей, що спрощує процес управління та прогнозування його реакцій на зміни вхідних параметрів.

Також важливою є та обставина, що відхилення коефіцієнту посилення у всьому діапазоні менше за величину технічної похибки 10%. Це свідчить про достатню стабільність та надійність моделі, що є дуже важливим для успішного використання її в системі керування. Такий результат дозволяє з впевненістю використовувати лінійні моделі для подальшого аналізу та оптимізації роботи об'єкта керування.

Проаналізуємо характеристику, отриману при П-образному керуючому впливі (рис. 3.8).

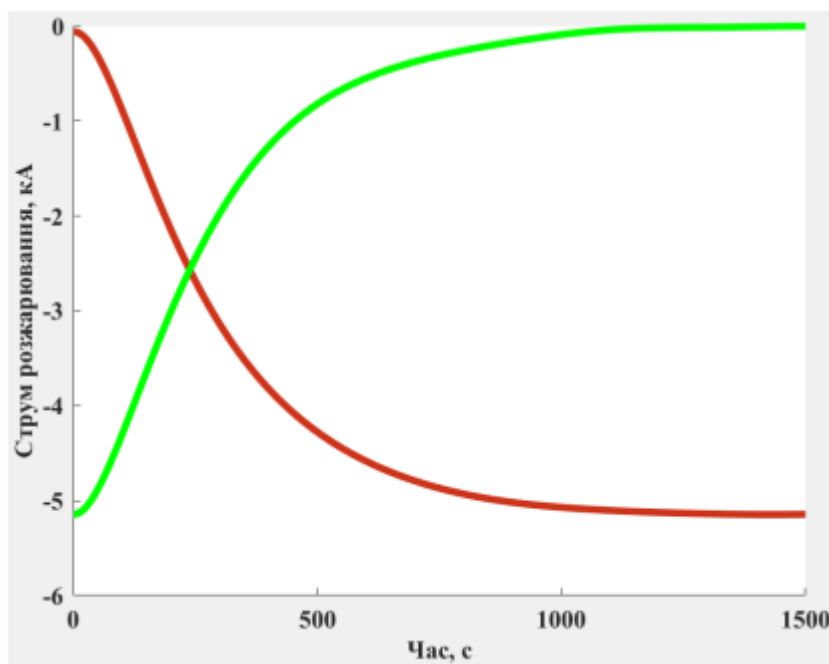


Рисунок 3.8 – Аналіз симетричності характеристика при П-образному керуючому впливі

З рисунку видно, що збільшення вивантаження матеріалу з 0 т/год (0 %) до 0,4 т/год (100 %) призводить до зменшення струму розжарювання з 0 кА до -5 кА, а відповідне зменшення вивантаження з 0,4 т/год (100 %) до 0 т/год (0 %) призводить до збільшення струму розжарювання з -5 кА до 0

кА. З цього можна зробити висновок, що об'єкт не виявляє інтегруючих властивостей і проявляє характер самовирівнювання.

Отримавши П-характеристику, ми встановили, що середнє квадратичне відхилення в межах технічної похибки не перевищує 10%. Це означає, що час перехідного процесу, форма та параметри підйому та спаду є симетричними. Отже, можна стверджувати, що об'єкт керування є симетричним і може бути адекватно описаним за допомогою однієї лінійної моделі. За результатами структурної ідентифікації встановлено, що об'єкт керування є лінійним і симетричним, має два дійсних від'ємних домінуючих корені та ланку чистого запізнення. Отже, можна припустити, що модель об'єкта керування може бути представлена аперіодичною ланкою другого, або вищого порядку з запізненням.

$$W(s) = \frac{k \cdot e^{-\tau s}}{(T_1 s + 1) \cdot (T_2 s + 1)}, \quad (3.1)$$

де $W(s)$ – передавальна функція моделі об'єкта керування;

s – оператор диференціювання;

k – коефіцієнт посилення;

τ – час запізнення, с;

T_1, T_2 – постійні часу, с.

Для параметричної ідентифікації використовувалося програмне забезпечення System Identification Toolbox, що входить до складу математичного пакета MATLAB. До цього програмного забезпечення імпортувалися підготовлені дані без статичної складової, що були позначені як «Dynamic». Динамічні дані використовувалися для розрахунку параметрів моделі об'єкта керування, тоді як перевіірочні дані, позначені як «Check», використовувалися для оцінки відповідності отриманої моделі реальному об'єкту керування. Для визначення параметрів моделі об'єкта

керування використовувався метод «Process Models». За допомогою «Model output» показана відповідність отриманих моделей P1, P1D, P2, P2D, P3 та P3D до перевірочних даних отриманих на об'єкті керування Check наведено на рисунку 3.9.

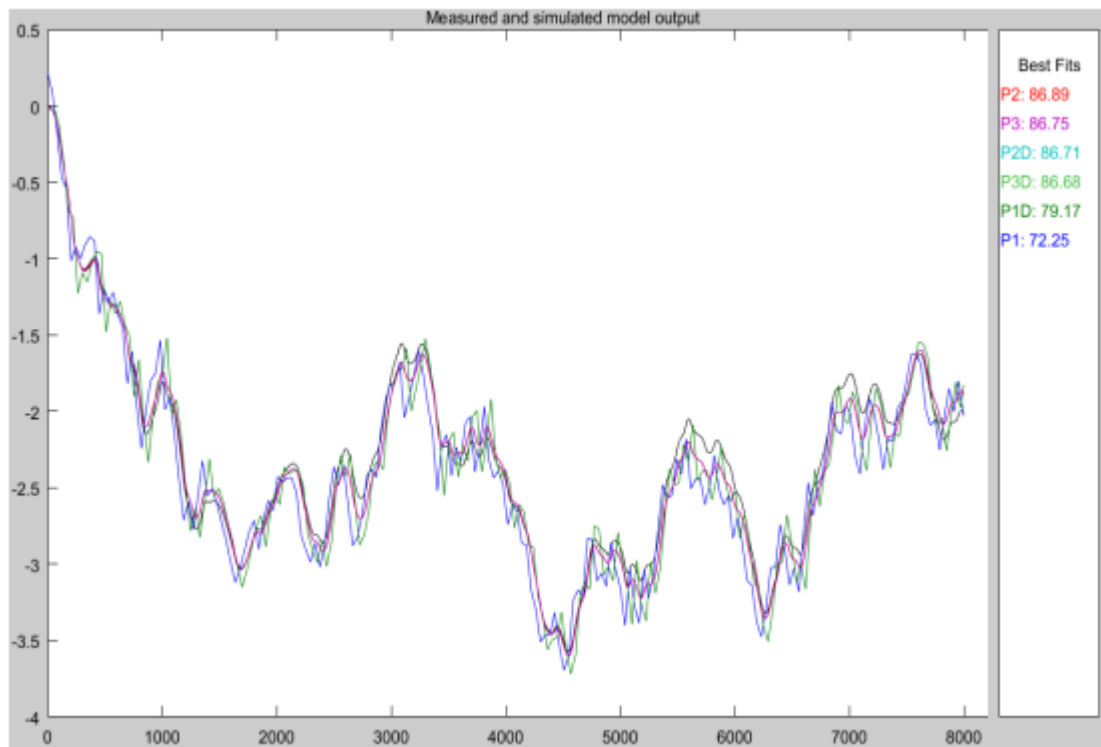


Рисунок 3.9 – Перевірка результатів розрахунків

Результати аналізу моделей виявили, що модель P2 має найкращу відповідність за нормалізованим середньоквадратичним похибкам (НСКП), як для моделі без затримки, так і для моделі з затримкою. Це вказує на те, що модель P2 найкраще апроксимує реальний об'єкт керування серед розглянутих.

Помилка остаточного передбачення також показала, що модель P2 має майже однакову точність з моделями P2D, P3 та P3D. Отже, модель P2 може бути ефективно використана для прогнозування та керування процесом.

Аналіз даних параметричної перевірки обраної моделі додатково підтверджує вибір моделі P2. Виявлені параметри відповідають

аперіодичній ланці другого порядку без затримки, що підтверджується затримкою, яка практично не впливає на параметри моделі.

Отже, враховуючи всі ці результати, модель P2 (86,89 %) є найбільш підходящою для опису об'єкта керування та його подальшого використання в реальних системах. Для параметричної перевірки обраної моделі можна звернути увагу на наступне, що за динамічною характеристикою час затримки $\sim 1 \dots 2$ с, постійна часу $250 \dots 300$ с, а за результатами моделювання ці показники складають відповідно 0 с та $235,35 + 70,959 = 306,309$ с,

Характеристики моделі керування наведена на рисунку 3.10.

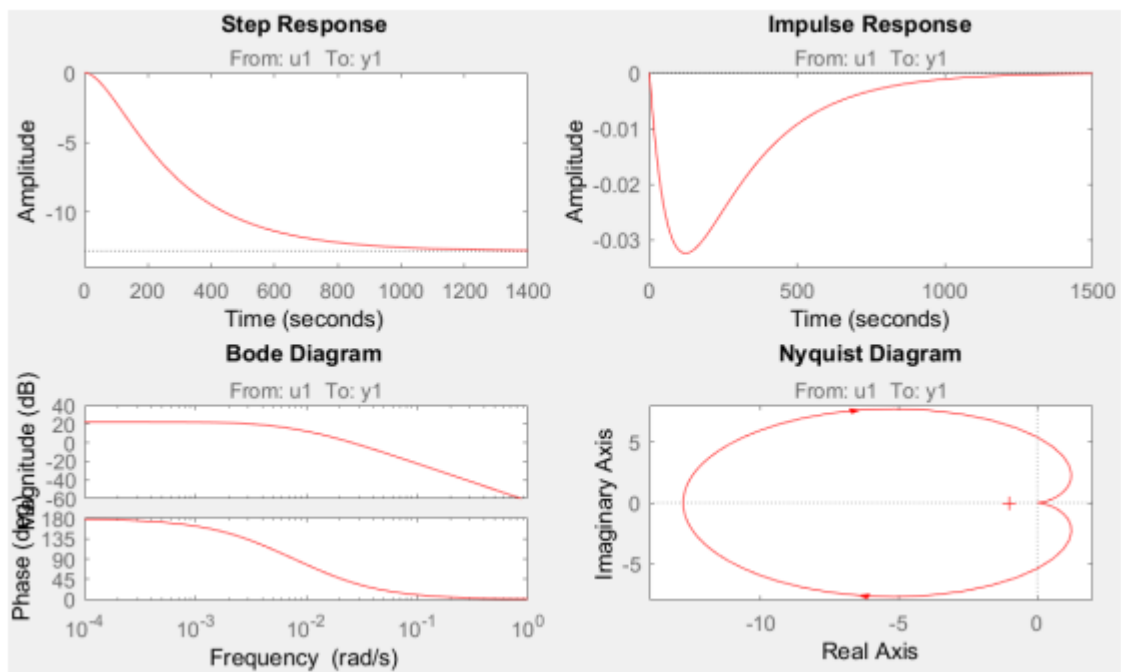


Рисунок 3.10 – Характеристики моделі керування

За результатами параметричної ідентифікації отримана модель P2 у вигляді передавальної функції, яка відповідає об'єкту керування за перевірочними даними на 87 %:

$$W(s) = \frac{-12,783}{(235,35s + 1) \cdot (70,959s + 1)}$$

Висновки. Після аналізу експериментальних даних, отриманих з об'єкта керування, встановлено, що його структурна модель може бути представлена як аперіодична ланка другого або більш високого порядку з невеликим запізненням. За результатами параметричної ідентифікації було визначено, що структура моделі об'єкта керування відповідає аперіодичній ланці другого порядку без запізнення, з такими розрахованими параметрами як коефіцієнт підсилення $-12,8$ та постійні часи 23622 с і 7096 відповідно.

4 МОДЕЛЮВАННЯ САР В MATLAB SIMULINK

Знаходження даного програмного керування та всі послідуочі розрахунки в даному розділі проводяться за допомогою програмного пакету MatLab.

Під час налаштування моделювання було задано час моделювання 8000 с, що відповідає кількості перевірочних даних. Блоки для запису перевірочних даних та результатів моделювання були додані до змінних Object і Model відповідно. Крок запису був встановлений на 1 с, що відповідає первинним даним з масштабом часу 1:100.

На рисунку 4.1 представлена модель об'єкту керування. До входу моделі було додано статичний коригуючий зсув, що становить 1,2 т/год (мінімально можливе значення за технологічними обмеженнями вивантаження матеріалу з електрокальцинатору).

На виході моделей також було додано статичний коригуючий зсув, який зміщує мінімально можливе значення струму розжарювання до 15 кА.



Рисунок 4.1 – Модель об'єкту керування

На рисунку 4.2 представлена модель отримання даних для перевірки на адекватність. До виходу моделі P2 був доданий статичний зсув характеристики, який відповідає коригуванню вихідної характеристики відповідно до реальних даних, отриманих з об'єкту керування. Це важливо, оскільки для ідентифікації у System Identification Toolbox деякі дані були видалені. Порівняння характеристик отриманої моделі P2 та моделі Simulink

відбувається з чистими перевірочними даними, над якими не здійснювалися дії, які могли б їх «скомпрометувати». Це гарантує об'єктивність порівняння та адекватність моделі до реальних умов.

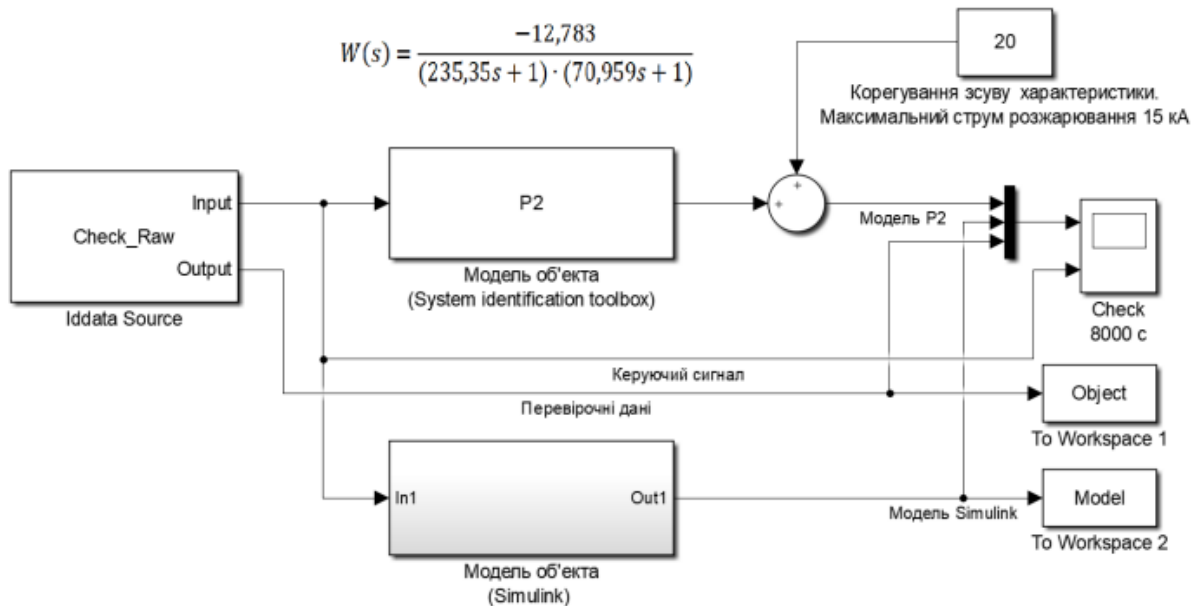


Рисунок 4.2 – Модель отримання даних для перевірки на адекватність

Результати моделювання показують, що вихідні дані отримані з моделі System Identification Toolbox (позначені як «Модель P2») і моделі, побудованої на основі передавальної функції (позначені як «Модель Simulink»), збігаються з перевірочними даними (див. рис. 4.3).

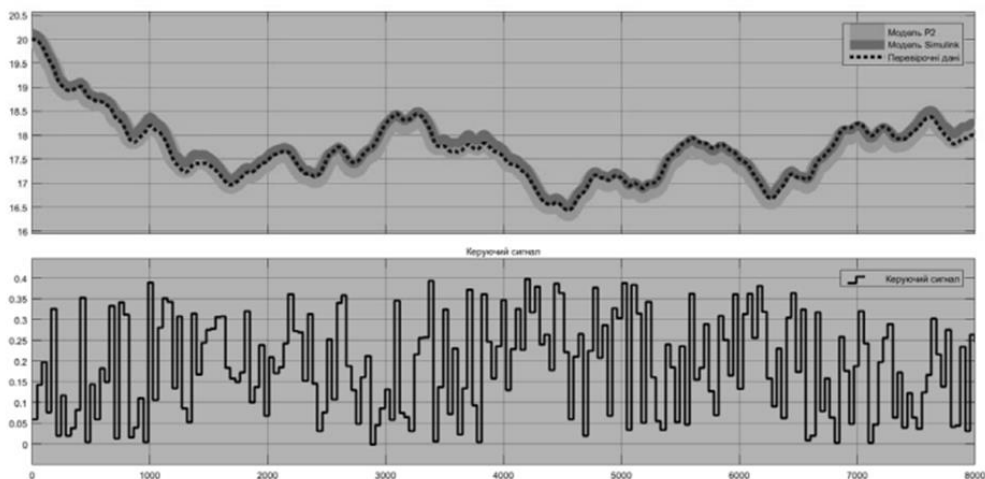


Рисунок 4.3 – Результат отримання даних для перевірки на адекватність

Під час оцінки відповідності моделі важливо, щоб її показники були на рівні, що перевищує 80%. Для перевірки адекватності моделі необхідно, щоб коефіцієнт кореляції перевищував 0,8, і довірчий інтервал досягав 0,9. У певних випадках ці критерії можуть бути змінені.

Модель об'єкта керування у середовищі імітаційного моделювання Simulink показана на рисунку 4.4. Схема моделювання динамічної характеристики представлена на рисунку 4.5.



Рисунок 4.4 – Остаточна модель об'єкта керування

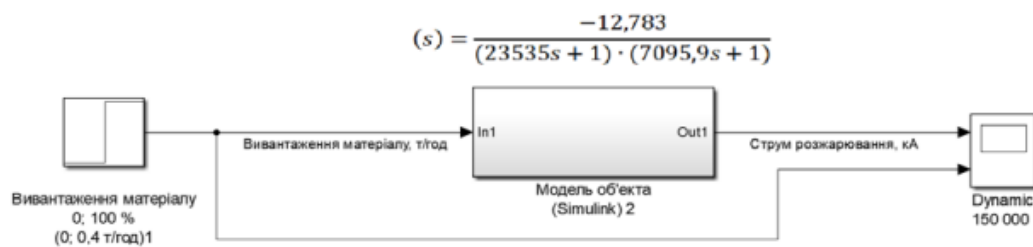


Рисунок 4.5 – Модель об'єкта керування

Нижче приведено код програми для розв'язання даної задачі.

```
clear;
[A, B, C, D] = tf2ss(1.624, [1 2.914 0.02261]);
tau = 0.5; t_f = 500; samples = t_f/tau;t=(0:samples-1).*tau;
x_zad = [0; 197];
q = 1; Q = [q 0; 0 q/10];
R = 3.65;
syms u;
x = sym('x',[length(A) 1]);
```

```

l = sym('l',[1 length(A)]);
H = (1/2)*((x - x_zad)'*Q*(x - x_zad) + (u^2)*R) + l*(A*(x) + B*u);
for i = 1:length(A)
    M_x(i) = x(i) + diff(H, l(i))*tau;
end
syms next_x(u, x1,x2)
next_x(u,x1,x2) = M_x(:);
for i = 1:length(A)
    M_l(i) = l(i) + diff(H, x(i))*tau;
end
syms next_l(x1,x2,l1,l2)
next_l(x1,x2,l1,l2) = M_l(:)';
%%
for i = 1:samples
    U(i) = 0;
end
X(:,1) = -x_zad;
Y(:, 1) = C*X(:, 1);
for i=1:samples-1
    X(:, i+1) = X(:, i) + (A*(X(:, i)) + B*U(i))*tau;
    Y(:, i+1) = C*X(:, i+1);
end
l_i(samples, :) = zeros(1, length(A));
for i=samples:-1:2
    e_x = num2cell(X(:, i));
    e_l = num2cell(l_i(i,:));
    l_i(i-1, :) = next_l(e_l{:}, e_x{:});
end
u_l(l) = solve(diff(H, u), u);
U_opt = U;

```

```

for i=1:samples
    e_1 = num2cell(l_i(i,:));
    U_opt(i) = u_1(e_1{:});
end
X_opt = [0; 0];
for i=1:samples-1
    e_1 = num2cell(l_i(i,:));
    X_opt(:, i+1) = next_x(U_opt(i), X_opt(1, i), X_opt(2, i));
    Y_opt(i) = C*X_opt(:, i);
end
%%
plot(t, U_opt)
%%
plot(X_opt')
%%
plot(t(2:end), Y_opt)

```

Результати моделювання цієї характеристики об'єкта керування зображено на рисунку 4.6.

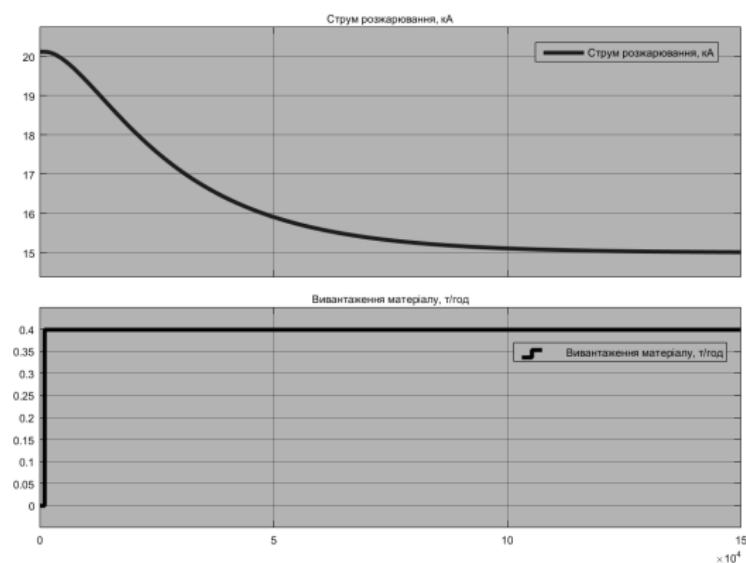


Рисунок 4.6 – Результат моделювання динамічної характеристики об'єкта керування

Висновки. Комплексна перевірка на адекватність моделі до об'єкта керування на основі перевірочних даних показала високу відповідність у розмірі 87%, сильний кореляційний зв'язок на рівні 0,993, а також велике значення статичного критерію адекватності Фішера – 601505, що значно перевищує критичне значення 2,7.

Узявши до уваги аналіз технологічного процесу, структури об'єкта керування, результатів експериментів і ідентифікації, модель вважається адекватною для об'єкта керування і може бути використана при подальшому синтезі системи керування для електрокальцинатору.

5 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ

Ідея стартапу: створення системи аналізу ефективності процесу, так як незначні зміни (наприклад, такі як зміна режиму апаратів) зможуть значно підвищити ефективність процесу.

Таблиця 5.1 - Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Система аналізу ефективності процесу пароперегрівання	1. Застосовується на виробництвах з новітнім обладнанням для ефективного керування процесом і випуску продукції гарної якості	Вигодою буде те, що при високій якості продукції, завдяки системі аналізу ефективності собівартість продукції буде менша
	2. Застосовується на виробництвах з застарілим обладнанням, але при використанні системи аналізу ефективності процесів можна збільшити енергоефективність	Збільшивши енергоефективність та зекономивши, придбати нове обладнання

Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту наведено в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 - Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик проекту

Техніко-економічні характеристики ідеї	Проекти (потенційні) товари/концентрації конкурентів				W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
	Мій проект	Конкурент1	Конкурент2	Конкурент3			
Експерти	+	+	+	-			+
Навчання/тренінги	+	+	-	+			+
Масштабність проектів	-	+	-	-	+		
Рівень сервісу	+	+	+				+
Досвід на ринку	+	+	-	-	+		
Вартість послуг	+	-	+	+			+
Просування своїх послуг	-	+	+	-		+	

Планується надавати наступні послуги з технічного консалтингу щодо створення системи аналізу ресурсо- та енергоефективності. Основні види діяльності проекту:

- оцінювання підприємств з метою визначення їх екологічної та енергетичної ефективності. Розробка технічних рекомендацій, спрямованих на підвищення ефективнішого використання ресурсів з урахуванням екологічних, економічних та соціальних аспектів;

- технічна консультація та експертна підтримка у здійсненні заходів щодо зниження рівнів споживання енергії та ресурсів;

– незалежне технічне оцінювання роботи обладнання, виробничих технологій та виконання вимірювань;

– розробка рекомендацій щодо передачі технології; співпраця з національними та міжнародними фінансовими установами для отримання фінансування;

– розбудова потенціалу національних експертів у питаннях навколишнього середовища та енергоефективності.

Так як консалтинг – це перш за все люди, спеціалісти, експерти, то проект має всі необхідні ресурси для реалізації проекту.

Послуги надаються за існуючою практикою РЕЧВ. Що потрібно доробити? Це адаптувати методика аналізу ресурсо- та енергоефективності під реалії українського виробництва. Автори проекту повністю ознайомлені з методикою проекту.

Таблиця 5.3 - Технологічна здійсненність ідеї проекту

Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
Створення системи аналізу ефективності процесів на виробництві	Технологія надання послуги: спочатку пропонувати свої послуги по собівартості для напрацювання контактів та досвід реалізації проекту	Необхідно доробити методика ресурсо- та енергоефективного виробництва, а саме адаптувати для умов українських виробництв.	Так, доступні

Таблиця 5.4 - Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
Кількість головних гравців, од	3
Загальний обсяг продаж, грн./ум.од	90 тис. грн.
Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Для надання послуг потрібно отримати довіру клієнта
Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	ні
Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	87 %

За результатами аналізу таблиці 5.5 можна зробити висновок що ринок є привабливим.

На цьому етапі проводиться маркетингове дослідження для виявлення характеристик і потреб потенційних клієнтів. Інформація, отримана в результаті проведення дослідження, дозволяє визначити такі ознаки, за якими можна розділити ринок на сегменти.

Таблиця 5.5 - Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів товару
Підвищення енерго та ресурсо ефективності підприємства	Українські виробництва	Фактори, що формують поведінку клієнта: Стандарти	До компанії постачальника конфіденційність по мінімуму переривати

при цьому не роблячи інвестицій в дороге новітнє обладнання		Вартість послуг Сроки реалізації Сроки рентабельності	існуючий процес і відволікати працівників
---	--	---	---

Першим кроком розроблення ринкової стратегії та вибір стратегії конкурентної поведінки передбачає визначення стратегії охоплення ринку завдяки опису та аналізу цільових груп потенційних споживачів (табл.5.6)

Таблиця 5.6 - Вибір цільових груп потенційних споживачів

Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
Цільова група – українські виробництва	Готові сприймати, адже є необхідно, що б бути конкурентно-спроможним	Великий попит	Інтенсивність конкуренції в сегменті залежить в масштабів наданих послуг	-
Які цільові групи обрано: українські виробництва				

За результатами аналізу потенційних груп споживачів так як проект реалізується в одному сегменті – обирається стратегія концентрованого маркетингу.

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу (матриці аналізу сильних та слабких сторін, загроз та можливостей).

Таблиця 5.7 - SWOT- аналіз стартап-проєкту

<p>Сильні сторони:</p> <ul style="list-style-type: none"> – збільшення енергоефективності процесу, підприємства; – зниження затрат на ресурси; – вартість послуг; – врахування потреб споживачів. 	<p>Слабкі сторони:</p> <ul style="list-style-type: none"> – термін реалізації
<p>Можливості:</p> <ul style="list-style-type: none"> – підвищення репутації; – стійкий дохід. 	<p>Загрози:</p> <ul style="list-style-type: none"> – інфляційні процеси; – високий рівень безробіття.

Висновки. Підсумовуючи проведений аналіз проєкту можна сказати, що існує можливість ринкової комерціалізації, адже є високий попит і потреба в такій системі, а динаміка ринку стрімко зростає. І не дивлячись на стан конкуренції, конкурентоспрожність проєкту висока, адже є доволі вагомі переваги такі як ціна/якість наданих послуг.

6 ОХОРОНА ПРАЦІ

6.1 Загальні заходи з охорони праці в цехах термічної обробки

Згідно «Правила охорони праці при термічній обробці металів Закону України «Про охорону праці», при термічній і хіміко-термічній обробці металів можливий вплив на працівників різних небезпечних і шкідливих виробничих факторів, у тому числі:

- незахищені рухливі елементи виробничого устаткування;
- заготовки, готові вироби або деталі, що пересуваються;
- транспортні засоби, що рухаються;
- аерозолі фіброгенної дії (пилу);
- несприятливий мікроклімат робочої зони;
- підвищена температура поверхонь устаткування і матеріалів;
- знижена температура при обробці деталей холодом;
- підвищена або знижена температура повітря робочої зони;
- небезпечний рівень напруги в електричному ланцюзі, замикання якого може відбутися через тіло людини;
- підвищений рівень електромагнітного випромінювання (ультрафіолетового, видимого, інфрачервоного, лазерного, мікрохвильового, радіочастотного);
- підвищена напруженість магнітного поля;
- підвищений рівень шуму на робочому місці;
- знижена освітленість робочого місця;
- пожежо- і вибухонебезпека;
- хімічні фактори загальнотоксичного, дратівного, канцерогенного впливу на організм працівника;
- важкість і напруженість праці.

При обслуговуванні електропечей мають бути дотримані наступні вимоги безпеки:

- усі струмопровідні частини електропечей, з якими можливе зіткнення обслуговуючого персоналу, мають бути ізольовані або захищені;
- обгороджування і прилади контролю, до яких підводиться електроживлення, мають бути заземлені;
- електричні печі повинні мати блокування для автоматичного відключення нагрівальних елементів при відкриванні дверей печі.
- при експлуатації електротермічного устаткування повинні використовуватися ізоляційні засоби індивідуального захисту : рукавиці, діелектричні галоші, килимки і тому подібне;
- при обслуговуванні електротермічного устаткування Правилами експлуатації електроустановок передбачені спеціальні заходи безпеки для захисту обслуговуючого персоналу від дії високих температур і теплового випромінювання. Усі механізми управління і обслуговування печей мають бути встановлені так, щоб робітник не піддавався дії високих температур і шкідливих газів. Різниця температур на поверхні печей і навколишнього повітря не повинна перевищувати 45-60°C.

Основні фактори електричного характеру включають протікання струму через тіло людини, напругу, яка діє на неї, опір її тіла, а також частоту струму. Проходження електричного струму через організм людини супроводжується термічним, електролітичним, біологічним та механічним ефектами. Ураження струмом призводить до електролізу органічних речовин в організмі, порушення біологічних процесів, скорочення м'язів та пошкодження тканин.

Основними факторами неелектричного характеру є шлях струму через тіло людини, індивідуальні особливості та стан організму, тривалість дії струму, а також раптовість і непередбачуваність його дії. Шлях струму через тіло людини має важливе значення для визначення важкості ураження. Особливо небезпечним є протікання струму через життєво важливі органи,

де вплив струму безпосередньо відбувається. Джерелами електробезпеки в дільниці є термічні печі, дробеструменевий апарат, баки для гартування та промивальний бак. Все це обладнання працює від змінного електричного струму, та, у випадку несправності та/або неправильної експлуатації може призвести до ураження струмом. Для захисту працівників від ураження електричним струмом застосовують заземлення, захисні розділення електромереж, технічні огляди обладнання, перевірка несправностей лише у знеструмленому стані, електрозахисні засоби, підтримання сухого, незапиленого приміщення з вологістю не вище 75% та регулярні інструктажі з правил електробезпеки.

6.2 Охорона праці оператора АСУ ТП

На основі аналізу роботи існуючого обладнання і посадових обов'язків оператора АСУТП у приміщенні обладнаному ПК з ВДТ сформовані заходи по забезпеченню безпеки праці.

Приміщення, у якому здійснюються заходи пов'язані з виконанням посадових обов'язків та проведенням досліджень та розрахунків (розробкою, модернізацією, удосконаленням, тощо), є спеціалізованим, яке обладнане ПК з ВДТ.

Для запобігання ураження електричним струмом встановлено електроустаткування, яке відповідає вимогам ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні стандартні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин», «Правил улаштування електроустановок» (далі – «ПУЕ»), ДСТУ Б В.2.5-82:2016 «Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом», НПАОП 40.1-1.32-01 «Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок», НАПБ А.01.001-2014 «Правила пожежної безпеки в Україні» та буде використовуватися згідно вимог НПАОП 40.1-1.01-97 «Правила безпечної

експлуатації електроустановок» (далі – «ПБЕЕ»), НПАОП 40.1-1.21-98 «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів» (далі – «ПБЕЕС») та НПАОП 0.00-7.15-18 «Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями».

Згідно «ПУЕ», за ступенем небезпеки ураження електрострумом, робоче місце оператора АСУТП приміщення належить до 1-го класу, тобто є приміщенням без підвищеної небезпеки, у якому відсутні умови, що створюють підвищену та особливу небезпеку.

Згідно глави 1.7 – «Заземлення і захисні заходи від ураження електричним струмом» – «ПУЕ», обладнання має основну ізоляцію струмовідних частин, яка забезпечує захист від прямого дотику та подвійну, яка складається з основної та додаткової ізоляції, для забезпечення захисту від ураження електричним струмом у разі пошкодження основної ізоляції.

Відповідно до вимог п. 6.7.4. НПАОП 40.1-1.21-98 «ПБЕЕС» усі доступні для доторкання металеві деталі електрообладнання у приміщенні з ПК, які можуть опинитись під напругою, у випадку пошкодження ізоляції, з'єднані з заземлюючим пристроєм.

Оскільки робоче місце оператора АСУТП за ступенем небезпеки ураження електрострумом належить до 1-го класу, тому відповідно до вимог п. 6.7.6 НПАОП 40.1-1.21-98 «ПБЕЕС» та додатку №1 до НПАОП 40.1-1.01-97 «ПБЕЕ» користувачі ПК пройшли інструктаж з електробезпеки з оформленням в журналі інструктажу та мають I групу з електробезпеки.

Ймовірність механічного травмування може виникнути внаслідок нераціонального розташування робочих місць, захаращення робочих місць або у зв'язку з недбалістю та неухважністю обслуговуючого персоналу. Для виключення травматизму згідно ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин» зроблено більш зручне та раціональне розташування робочих місць, таким чином збільшена відстань між ними, яка відповідає нормованим значенням (площа на одне робоче місце має

становити не менше ніж $6,0 \text{ м}^2$, а об'єм не менше ніж $20,0 \text{ м}^3$). Поверхня підлоги є рівною, неслизькою, з антистатичними властивостями.

У зв'язку із стресовими ситуаціями та нервово-емоційними навантаженнями у працівників може виникнути ймовірність захворювань загально-невротичного характеру.

З метою зниження нервово-емоційного напруження, стомлення зорового аналізатора, поліпшення мозкового кровообігу, подолання несприятливих наслідків гіподинамії, запобігання втоми, згідно ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин» для робітників із застосування ЕОМ, передбачені регламентовані перерви для відпочинку тривалістю 15 хвилин через кожні дві години, а також обладнані побутові приміщення для відпочинку під час роботи, кімната психологічного розвантаження. В кімнаті психологічного розвантаження передбачені пристрої для приготування й роздачі тонізуючих напоїв, а також місця для занять фізичною культурою

Для оптимізації відносин у колективі проводяться тренінги з залучанням психологів на теми: «Адаптація у новому колективі», «Поведінка в суспільстві».

Для запобігання кістково-м'язових порушень робочі місця користувачів ПК оператора АСУТП відповідають ергономічним вимогам з урахуванням характеру і особливостей трудової діяльності згідно з ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин».

Висота робочої поверхні столу з ПК регулюється в межах 680-800 мм, а ширина і глибина – забезпечує можливість виконання операцій у зоні досяжності моторного поля (рекомендовані розміри: ширина – 600-1400 мм, глибина – 800-1000 мм). Робочий стіл має простір для ніг висотою 600 мм,

шириною – 500 мм, глибиною (на рівні колін) – 450 мм, на відстані витягнутої ноги – 650 мм.

Заходи з виробничої санітарії і гігієни праці для робочого місця оператора, обладнаного ПК з ВДТ розроблені відповідно до вимог Державних санітарних норм та правил «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу», ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин» і НПАОП 0.00-7.15-18 «Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями».

Основними причинами недостатньої або надмірної освітленості робочих місць є несправність або хибний вибір освітлювальних приладів, неправильне розташування робочих місць по відношенню до джерел освітлення.

Незадовільна освітленість на робочому місці або на робочій зоні може бути причиною зниження продуктивності та якості праці, отримання травм. Недостатнє або надмірне освітлення викликає зоровий дискомфорт, що виражається у відчутті незручності або напруженості. Тривале перебування в умовах зорового дискомфорту призводить до розсіювання уваги, зменшення зосередженості, зоровій і загальній втомі.

Робоче місце оператора АСУТП обладнаному ПК з екранним пристроєм (далі – «ЕП»), згідно ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин» та ДБН В.2.5-28-2018 «Природне і штучне освітлення» передбачене природне та штучне освітлення.

Природне освітлення здійснено через світлові прорізи, які орієнтовані на південь і забезпечують коефіцієнт природної освітленості (КПО) не нижче 1,5%. Для захисту від прямих сонячних променів, які створюють

прямі та відбиті відблиски на поверхні екранів і клавіатури, передбачено сонцезахисні пристрої, на вікнах встановлені жалюзі.

Метеорологічні умови для приміщенні з комп'ютеризованими робочими місцями – температура, відносна вологість та швидкість переміщення повітря цілком відповідають вимогам ДСН 3.3.6.042-99 «Державні санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень». Роботи у приміщенні з ПК, належать до категорії Іб – легка робота, тому передбачені наступні оптимальні значення параметрів мікроклімату:

- у холодний період року: температура 21-23°C; відносна вологість: 40-60%; швидкість переміщення повітря: 0,1 м/с;
- у теплий період року: температура 22-24°C; відносна вологість: 40-60%; швидкість переміщення повітря: 0,2 м/с.

6.3 Пожежна безпека

Пожежа – ситуація, що найбільш часто зустрічається на підприємстві. Цехи оснащуються всіма необхідними засобами пожежогасіння та протипожежною сигналізацією. Категорія приміщень за пожежною небезпекою (СП 12.13130-2009) – А. Цех теплової обробки матеріалів відноситься до II ступеня вогнестійкості. Систему протипожежного захисту становить комплекс організаційних і технічних засобів, спрямованих на запобігання впливу на людей небезпечних факторів пожежі та обмеження матеріальних збитків від неї.

Протипожежний захист забезпечується:

- максимально можливим застосуванням негорючих і важкогорючих речовин і матеріалів замість пожежонебезпечних;
- обмеженням кількості горючих речовин і їх розміщення;
- ізоляцією горючого середовища;
- запобіганням поширенню пожежі за межі вогнища;
- застосуванням засобів пожежогасіння;

- застосуванням конструкції об'єкта з регламентованими межами вогнестійкості та горючістю;
- евакуацією людей;
- системами протидимного захисту;
- застосуванням засобів пожежної сигналізації та засобів сповіщення про пожежу;
- організацією пожежної охорони промислових об'єктів.

Систему запобігання пожежі становить комплекс організаційних заходів і технічних засобів, спрямованих на виключення можливості виникнення пожежі.

Запобігання пожежі досягається:

- усуненням утворення горючого середовища;
- усуненням утворення горючого (або внесення до неї) запалювання;
- підтриманням температури горючого середовища нижче максимально допустимої і іншими заходами.

В цехах і підрозділах всі машини і механізми укомплектовані вогнегасниками і ящиками з піском, в приміщеннях, на робочих місцях укомплектовані пожежні щити, організовані в кожному підрозділі куточок по пожежній безпеці з інструкціями по пожежній безпеці.

Блискавко-захисні пристрої знаходяться в справному стані, електричні лінії та електричне обладнання заземлено. Вогнегасники термін використання яких скінчився своєчасно заправляються. Досліджуване підприємство повністю відповідає встановленим вимогам пожежної безпеки відповідно до визначеної категорії.

Висновки. В даному розділі подані рекомендації що до охорони праці і пожежної безпеки, що відповідають законодавству України.

7 ТЕХНІКО–ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЕКТУ

7.1 Визначення капітальних вкладень

У зв'язку з розробкою ситуаційної системи регулювання (САР) процесом теплової обробки матеріалів з вуглецю у електрокальцинаторі проводиться техніко-економічне обґрунтування проекту.

До складу АСУТП управління процесом теплової обробки матеріалів з вуглецю входять 5 шаф управління (ШУ) вартістю 68000 гривень за одиницю.

Сума капіталовкладень ($K_{об}$) на устаткування без урахування ПДВ включає вартість придбаного устаткування ($V_{уст}$) та витрати на транспортні ($V_{тр} = 6\%$) і заготівельно-складські ($V_{зс} = 5\%$) операції у визначених відсотках від $V_{уст}$.

$$K_{об} = V_{уст} + V_{тр} + V_{зс}, \quad (7.1)$$

де $V_{уст} = V_{ШУ}$

$$V_{ШУ} = 680000 \cdot 10 = 6800000, \text{ грн.}$$

$$K_{об} = 6800000 \cdot (1 + 0,06 + 0,05) = 7548000, \text{ грн.}$$

Додаткові капіталовкладення $K_{САР}$ на модернізацію САР складаються з таких витрат:

$$K_{САР} = K_{дм} + K_{об} + K_{м}, \quad (7.2)$$

де $K_{дм}$ – витрати на демонтаж існуючої апаратури ($K_{дм} = 0,05 \cdot K_{об}$, грн);

$K_{м}$ – витрати на монтаж нового устаткування ($K_{м} = 0,4 \cdot K_{об}$, грн).

$$K_{дм} = 0,05 \cdot 7548000 = 377400, \text{ грн.}$$

$$K_{м} = 0,4 \cdot 7548000 = 303200, \text{ грн.}$$

$$K_{САР} = 377400 + 303200 + 7548000 = 8228600, \text{ грн.}$$

Данні по розрахунку зведені в таблиці 7.1 .

Таблиця 7.1 – Визначення капітальних вкладень.

Визначення капітальних вкладень	
Витрати на монтаж нового устаткування K_M	323200 грн.
Сума капіталовкладень $K_{об}$	7548000 грн.
Витрати на демонтаж існуючої апаратури $K_{дм}$	377400 грн.
Вартість придбаного устаткування $V_{уст}$	6800000 грн.
Додаткові капіталовкладення модернізацію САУ $K_{САУ}$	8228600 грн.

7.2 Розрахунок річних експлуатаційних витрат

Експлуатаційні витрати ($V_{САУ}$), пов'язані з обслуговуванням нової САУ складаються з річних витрат на:

- зарплату персоналу ($V_{зп}$);
- амортизацію нового обладнання (V_a);
- поточний ремонт нового обладнання (V_p);
- електричну енергію для живлення нового обладнання ($V_{ел}$);
- інші експлуатаційні витрати (V_i).

$$V_{САУ} = V_{зп} + V_a + V_p + V_{ел} + V_{ін}. \quad (7.3)$$

7.3 Річні витрати на ЗП

Річні витрати на ЗП обслуговуючого персоналу визначається за формулою:

$$V_{зп} = n \cdot \text{ФОП}, \quad (7.4)$$

де n – чисельність обслуговуючого персоналу ($n = 50$ роб.);

ФОП – середньорічний фонд оплати праці одного робітника з

обов'язковими нарахуваннями на соціальні збори.

Розрахуємо середньорічний фонд оплати праці одного робітника з обов'язковими нарахуваннями на соціальні збори:

$$\text{ФОП} = \Phi_{\text{зп}} \cdot K_{\text{ін}}, \quad (7.5)$$

де $K_{\text{ін}} = 1,1$

$\Phi_{\text{зп}}$ – щорічна витрата на зарплату робітника з урахуванням нарахувань на ФОП, грн.

$$\Phi_{\text{зп}} = 12 \cdot \text{ЗП} \cdot H_{\text{зп}}, \quad (7.6)$$

де ЗП – середня місячна зарплата робітника (ЗП = 8500 грн.);

$H_{\text{зп}}$ – нарахування на ФОП складають 20%.

Тоді:

$$\Phi_{\text{зп}} = 12 \cdot 8500 \cdot (1+0,2) = 122400, \text{ грн.}$$

$$\text{ФОП} = 122400 \cdot 1,1 = 134640, \text{ грн.}$$

$$B_{\text{зп}} = 50 \cdot 134640 = 6732000, \text{ грн.}$$

7.4 Розрахунок річних амортизаційних відрахувань

Амортизаційні відрахування (B_a) на реновацію придбаного устаткування на соціальні збори визначаються за виразом:

$$B_a = K_{\text{сав}} \cdot H_A / 100, \quad (7.7)$$

де H_A – річна норма амортизації на реновацію ($H_A = 24\%$);

$$B_a = 1332000 \cdot 24/100 = 319680, \text{ грн.}$$

7.5 Річні витрати на ремонт

Ці витрати обчислюють через коефіцієнт $K_p = 3\%$ від загальної суми капіталовкладень.

$$V_p = K_p \cdot K_{CAУ}, \text{ грн.} \quad (7.8)$$

$$V_p = 0,03 \cdot 1332000 = 39960, \text{ грн.}$$

7.6 Витрати електроенергії на живлення

Річні витрати на живлення САР визначаються так:

$$V_{ел} = P_{ел} \cdot T_{ф} \cdot K_з \cdot СВ^{од}_{ел}, \text{ грн.} \quad (7.9)$$

де $P_{ел}$ – встановлена електрична потужність САР ($P_{ел} = 3,5$ кВт);

$T_{ф}$ – фактичний термін роботи САР за рік ($T_{ф} = 7800$ год.);

$K_з$ – коефіцієнт для врахування реального споживання ($K_з = 0,8$);

$СВ^{од}_{ел}$ – собівартість виробленого 1кВт · год ($СВ^{од}_{ел} = 90$ коп.)

$$V_{ел} = 3,5 \cdot 7800 \cdot 0,8 \cdot 0,90 = 19656 \text{ грн.}$$

7.7 Інші витрати

Інші витрати визначаються так:

$$V_{ін} = 0,25 \cdot (V_a + V_{зп} + V_p) \quad (7.10)$$

$$V_{ін} = 0,25 \cdot (319680 + 6732000 + 39960) = 1772910 \text{ грн.}$$

Підставляючи отримані значення маємо загальну суму річних експлуатаційних витрат (V_{CAP} , грн.):

$$V_{CAP} = 6732000 + 319680 + 39960 + 19656 + 1772910 = 8884206 \text{ грн.}$$

Данні по розрахунку зведені в таблиці 7.2.

Таблиця 7.2 – Розрахунок річних експлуатаційних витрат

Розрахунок річних експлуатаційних витрат	
Зарплата персоналу $V_{зп}$	6730000 грн.
Амортизація нового обладнання V_a	319680 грн.
Поточний ремонт нового обладнання V_p	39960 грн.
Електричну енергію для живлення нового обладнання $V_{ел}$	19656 грн.
Інші експлуатаційні витрати $V_{ін}$	1772910 грн.
Експлуатаційні витрати V_{CAP}	8884206 грн.

7.8 Річна економія експлуатаційних витрат

Економія (E) від впровадження САР визначається за виразом:

$$E = E_{п} + E_{н} + E_{вп} - V_{CAP}$$

де $E_{п}$ – економія від зменшення кількості пусків через зниження відмов конвертера, грн.;

$E_{н}$ – економія у зв'язку з підвищенням надійності роботи, грн.;

$E_{вп}$ – економія у зв'язку зі скороченням витрат електроенергії на власні потреби через впровадження САР, грн.;

V_{CAP} – вартість річних експлуатаційних витрат.

Економія ($E_{п}$) від зменшення кількості пусків через зниження відмов визначається за виразом:

$$E_{\Pi} = (1 - K_{\text{від}}) \cdot t_{\text{від}} \cdot c_{\Pi} \cdot CB_{\text{ел}}^{\text{од}} / 100, \quad (7.11)$$

де $P_{\text{в}}$ – встановлена електрична потужність ($P_{\text{в}} = 10^6$), кВт;

$t_{\text{від}}$ – відрізок часу виведення системи з мережі при його відключенні ($t_{\text{від}} = 9$ год);

c_{Π} – число скорочених пусків ($c_{\Pi} = 1$);

$CB_{\text{ел}}^{\text{од}}$ – собівартість 1 кВт*год виробленої електроенергії ($CB_{\text{ел}}^{\text{од}} = 5$ коп);

$K_{\text{від}}$ – коефіцієнт корисного навантаження за час $t_{\text{від}}$ ($K_{\text{від}} = 0,7$).

Тоді

$$E_{\Pi} = (1 - 0,7) \cdot 10^6 \cdot 9 \cdot 1 \cdot 5 / 100 = 135000 \text{ грн.}$$

Економія ($E_{\text{н}}$) у зв'язку з підвищенням надійності роботи ЕС і додатковим виробленням електроенергії ($dE_{\text{в}}$) визначається за виразом:

$$E_{\text{н}} = (CB_{\text{ел}}^{\text{од}} - CBM_{\text{ел}}^{\text{од}}) \cdot W_{\text{в}}, \quad (7.12)$$

де $CBM_{\text{ел}}^{\text{од}}$ – собівартість 1 кВт · год з урахуванням додаткової роботи апарату після модернізації САР визначається за виразом:

$$CBM_{\text{ел}}^{\text{од}} = CB_{\text{ел}}^{\text{од}} (1 - A_{\Pi} \cdot (1 - W_{\text{в}} / (W_{\text{в}} + dW_{\text{в}}))) \quad (7.13)$$

де A_{Π} – доля умовно-постійних витрат в собівартості 1 кВт · год:

$$A_{\Pi} = 1 - B_{\Pi} / СВП, \quad (7.14)$$

$$B_{\Pi} = 183,45 \cdot 10^6 \text{ грн.},$$

$$СВП = 210,3 \cdot 10^6 \text{ грн.},$$

$$A_{\Pi} = 1 - 183,45 \cdot 10^6 / 210,3 \cdot 10^6 = 0,27$$

$$W_B = 7 \cdot 10^9 \text{ кВт*год.}$$

$$СВМ_{\text{ел}}^{\text{од}} = 5 \cdot (1 - 0,128 \cdot (1 - 7 \cdot 10^9 / (7 \cdot 10^9 + 24 \cdot 10^6))) = 0,45 \text{ коп.}$$

Тоді:

$$E_H = (5 - 0,45) \cdot (7 \cdot 10^9 + 24 \cdot 10^6) / 100 = 31959200 \text{ грн.}$$

Економія ($E_{\text{ВП}}$) у зв'язку зі скороченням витрат електроенергії на власні потреби через модернізацію САР визначається за виразом:

$$E_{\text{ВП}} = (СР^{\text{од}}_{\text{ел}} - СРМ^{\text{од}}_{\text{ел}}) / 100 \cdot WM_p, \text{ грн.} \quad (7.15)$$

де WM_p – річний обсяг реалізованої ел.енергії зі скороченими витратами на власні потреби на 20%,

$$WM_p = W_B \cdot (1 - qM^{\text{ВП}} / 100), \text{ кВт} \cdot \text{год}, \quad (7.16)$$

де $qM^{\text{ВП}} = 0,8 q^{\text{ВП}}, \quad (7.17)$

$$q^{\text{ВП}}_C = 4,22\%.$$

$$WM_p = 7,8 \cdot 10^9 \cdot (1 - 3,38 / 100) = 7,54 \cdot 10^9, \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

Собівартість продукції, з урахуванням зменшення витрат на власні потреби $СРМ^{\text{од}}_{\text{ел}}$ визначається за виразом:

$$СРМ^{\text{од}}_{\text{ел}} = СР^{\text{од}}_{\text{ел}} (1 - A_{\text{П}} * (1 - W_p / WM_p)) \quad (7.18)$$

$$СРМ^{\text{од}}_{\text{ел}} = 5 \cdot (1 - 0,27 * (1 - 6,76 * 10^9 / 7,54 * 10^9)) = 4,92 \text{ коп.}$$

$$E_{\text{ВП}} = (5 - 4,92) / 100 \cdot 7,54 \cdot 10^9 = 603200, \text{ грн.}$$

Підставляючи числові значення, розрахуємо економію (E) від провадження САР:

$$E = 31959200 + 603200 + 135000 - 3944277 = 2875312, \text{ грн.}$$

Приріст чистого прибутку визначається так:

$$d\Pi = K_e \cdot E, \text{ грн.} \quad (7.19)$$

де K_e – коефіцієнт економічної ефективності ($K_e = 0,7$):

$$d\Pi = 0,7 \cdot 2,9 \cdot 10^6 = 7889000, \text{ грн.}$$

Термін окупності (T_o) додаткових капіталовкладень ($dK = K_{CAУ}$) визначається:

$$T_o = K_{CAУ} \cdot (1 + \alpha_a + \alpha_p + \alpha_{зсв}) / d\Pi, \text{ років} \quad (7.20)$$

де α_a – додаткові нарахування на амортизацію ($\alpha_a = 0,14$);

α_p – додаткові нарахування на поточний ремонт ($\alpha_p = 0,01$);

$\alpha_{зсв}$ – доля загально станційних витрат, визначена додатковими капіталовкладеннями ($\alpha_{зсв} = 0,20$).

$$T_o = 8884206 \cdot (1 + 0,14 + 0,01 + 0,20) / 7889000 = 2 \text{ роки.}$$

Данні по розрахунку зведені в таблиці 7.3.

Таблиця 7.3 – Річна економія експлуатаційних витрат

Розрахунок економічного ефекту від впровадження САР процесу теплової обробки матеріалів з вуглецю у електрокальцинаторі	
Економія від модернізації САР E	2875312 грн.
Економія від зменшення кількості пусків через зниження відмов САР Eп	135000 грн.
Економія у зв'язку з підвищенням надійності ЕС Eн	31959200 грн.
Економія у зв'язку зі скороченням витрат електроенергії на власні потреби Eвп	603200 грн.
Вартість річних експлуатаційних витрат BCAУ	8884206 грн.
Приріст чистого прибутку dΠ	7889000 грн.
Термін окупності додаткових капіталовкладень T _o	2 роки

Висновок. В результаті проведеного розрахунку економічних показників були визначені капітальні витрати на будівництво, щорічні витрати, чистий приведений прибуток, внутрішня норма прибутку, індекс доходності, термін окупності проекту, рентабельність і так далі.

Термін окупності проекту 2 року, що свідчить про його ліквідність, тобто можливості повернути витрачені спочатку засоби на реалізацію проекту за можливо менший термін.

ВИСНОВКИ

В першому розділі кваліфікаційної роботи магістра проведений порівняльний аналіз апаратів для теплової обробки вуглецевих сталей свідчить про глибоке дослідження та оцінку різних технологічних можливостей. Це допомагає знайти оптимальні рішення для покращення процесу обробки вуглецевих сталей.

В другому розділі розроблена математична модель на основі управління тривалістю перебування вуглецевої сировини в електрокальцинаторі і потужністю струму, яка враховує ключові параметри процесу.

В третьому розділі проведене експериментальне моделювання розробленої системи за допомогою програми Matlab. За результатами параметричної ідентифікації було визначено, що структура моделі об'єкта керування відповідає аперіодичній ланці другого порядку без запізнення, з такими розрахованими параметрами як коефіцієнт підсилення $-12,8$ та постійні часи 23622 с і 7096 с відповідно. Результати параметричної ідентифікації показують, що модель об'єкта керування є досить точною та адекватно відображає реальні процеси. Великі значення статичного критерію адекватності та кореляційний зв'язок свідчать про високу відповідність моделі.

В четвертому розділі проведена комплексна перевірка на адекватність моделі до об'єкта керування на основі перевірочних даних показала високу відповідність у розмірі 87% , сильний кореляційний зв'язок на рівні $0,994$, а також велике значення статичного критерію адекватності Фішера – 601505 , що значно перевищує критичне значення $2,7$.

В п'ятому розділі кваліфікаційної роботи магістра було запропоновано стартап-проект зі створенням системи що оцінює ефективність процесу.

В шостому розділі подані рекомендації що до охорони праці, що відповідають законодавству України.

В сьомому розділі проведено техніко-економічні розрахунки. Термін окупності проекту 2 роки, що свідчить про його ліквідність, тобто можливості повернути витрачені спочатку засоби на реалізацію проекту за можливо менший термін.

Отже, розроблена модель є ефективним інструментом для управління процесом електрокальцинатора, а проект в цілому є перспективним і може принести значні прибутки при впровадженні на підприємствах металообробної галузі.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Конституція України : офіц. текст. Київ : КМ, 2013. 96 с.
2. Про охорону праці : Закон України від 14.10.1992 р. № 2694-ХІІ *Голос України*. 2022. 19 серпня. С. 10–22.
3. Жидецький В. Ц. Основи охорони праці : підручник вид. 5-те, доп. К. : Знання, 2014. 373 с.
4. ДСанПіН 3.3.2.007-98. Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин. [Чинний від 1998-12-10]. Вид. офіц. Київ, 1998. 18 с. (Інформація та документація).
5. 90/270/ЄЕС. Про мінімальні вимоги безпеки та здоров'я при роботі з екранними пристроями. [Чинний від 1990-05-29]. Брюссель : Рада Європейських співтовариств, 1990. 14 с. (Інформація та документація).
6. ПУЕ-2021. Правила улаштування електроустановок. [На заміну ПУЕ-86; чинний з 2021-01-01]. Київ : Міненерговугілля України, 2021. 617 с. (Інформація та документація).
7. ДСТУ Б В.2.5-82:2016. Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом. [На заміну ДБН В.2.5-27-2006 ; чинний від 2017-04-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 109 с. (Інформація та документація).
8. НПАОП 40.1-1.32-01. Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок. [На заміну глав 5.4 5.5 7.1 7.2 7.3 7.4 7.6 Правил устроювання електроустановок, затв. Міненерго СРСР 06.07.1984 р. ; чинний від 2002-01-01]. Київ : Мінпраці України, 2001. (Інформація та документація).
9. НАПБ А.01.001-14. Правила пожежної безпеки в Україні. [На заміну НАПБ А.01.001-04 ; чинний від 2014-12-30]. Київ : МВС України, 2014. 91 с. (Інформація та документація).

10. НПАОП 40.1-1.01-97. Правила безпечної експлуатації електроустановок. [На заміну НАОП 1.1.10-1.01-85 ; чинний з 1997-10-06]. Київ : Держнаглядохоронпраці, 1997. 97 с. (Інформація та документація).

11. НПАОП 40.1-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. [На заміну ДНАОП 0.00.1.21-84 ; чинний з 1998-01-09]. Київ : Мінпраці України, 1998. 89 с. (Інформація та документація).

12. НПАОП 0.00-7.15-18. Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроям. [На заміну НПАОП 0.00-1.28-10 ; чинний від 2018-05-18]. Київ : Мінсоцполітики України, 2018. 6 с. (Інформація та документація).

13. ДБН В.2.5-28-2018. Природне і штучне освітлення. [На заміну ДБН В.2.5-28-2006 ; чинний з 2019-03-01]. Київ : Мінрегіон України, 2018. 133 с. (Інформація та документація).

14. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. [Чинний від 1999-12-01]. Київ : МОЗ України, 1999. 106 с. (Інформація та документація).

15. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. [На заміну СНиП 2.04.05-91 ; крім розділу 5 та додатка 22. ; чинний від 2014-01-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2013. 149 с. (Інформація та документація).

16. ДСТУ EN 2:2014. Класифікація пожеж (EN 2:1992; EN 2:1992/A1:2004, IDT). [На заміну ГОСТ 27331-87; чинний з 01.01.2016]. Київ : Мінекономрозвитку України, 2014. 7 с. (Інформація та документація).

17. ДСТУ Б В.1.1-36:2016. Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою. [На заміну НАПБ Б.03.002-2007 ; чинний від 2017-01-01]. Київ: Мінрегіонбуд України, 2016. 66 с. (Інформація та документація).

18. ДБН В.1.1-7:2016. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. [На заміну ДБН В.1.1.7-2002 ; чинний від 2017-06-01]. Київ Мінрегіон України, 2017. 47 с. (Інформація та документація).
19. ДБН В.2.5-56:2014. Системи протипожежного захисту. [На заміну ДБН В.2.5-56:2010 ; СНиП 2.04.05-91 (розділи 5 та 22) ; чинний від 2015-07-01]. Київ : Мінрегіон України, 2014. 191 с. (Інформація та документація).
20. Правила експлуатації та типових норм належності вогнегасників. [На заміну НАПБ Б.03.001-2004 ; чинний від 2018-02-23]. Київ : МВС України, 2018. 23 с. (Інформація та документація).
21. Авраменко В. С., Авраменко А. С. Проектування інформаційних систем : навч. посіб. Черкаси : Черкаський національний університет ім. Б. Хмельницького, 2017. 434 с.
22. Автоматизовані системи управління технологічними процесами: довідник / за заг. ред. Б. Б. Тимофеева ; уклад. Н. Г. Скрипаненко. Київ : Техника, 2003. 351 с.
23. Ананьєв В. П. Синтез і налагодження квазіоптимальних систем підпорядкованого регулювання в металургії: навч. посіб. Київ : Просвіта, 2007. 344 с.
24. Анзимиров Л. В. SCADA TRACE MODE – нові технології для сучасних АСУТП : навч. посіб. Київ : *Автоматизація в промисловості*. №2. 2007. 113 с.
25. Арбузов В. В., Лакиза А. М., Войцицкий В. В., Недельчев П. А., Литвиненко И. А. Створення інтегрованої розподіленої АСУТП енергопостачальної компанії із застосуванням системи TRACE MODE : стаття. Київ : *Промислові АСУ і контролери*. № 7. 2005. 45 с.
26. Вітров И. В. CoDeSys – щоденний інструмент програміста ПЛК// *Автоматизація в промисловості*, № 8. 2012. 45 с.
27. Вимоги до ергономіки та технічної естетики. URL: <http://wikipage.com.ua/1x400f.html> (дата звернення: 13.11.2023).

28. Вимоги до системи. URL: <https://mydocx.ru/2-120435.html> (дата звернення: 13.11.2023).

29. Кустов К. І., Шершевер М. А. Автоматичне регулювання і регулятори. Київ : Металургія, 2007. 180 с.

30. Манько О. О. Основи проектування систем автоматизації : методичні вказівки та завдання до виконання контрольної роботи. Рівне, 2012. 40 с.

31. Манько О. О., Кутя В. М. Основи проектування систем автоматизації : методичні вказівки до виконання розрахунково-графічної роботи. Рівне, 2010. 31 с.

32. Метрологія, технологічні вимірювання та прилади : методичні вказівки до вик. курс. Проекту // уклад.: К. С. Архангельська, О. Й. Рішан. Київ : НУХТ, 2005. 223 с.

33. Ковалевський В. М. Технічні засоби автоматизації – 2 : методичні вказівки до практичних занять з кредитного модуля «Електричні системи керування». Київ : НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2017. 60 с.

34. Ніколаєнко А. М. Мікропроцесорні та програмні засоби автоматизації : методичні вказівки до курсового проекту. Запоріжжя : ЗДІА, 2016. 34 с.

35. Мочалін В. Н., Кочнев Н. В. Моделювання та дослідження систем автоматичного управління з використанням ПЕОМ : навч. посіб. Київ : КГП, 2005. 178 с.

36. Основи охорони праці : підручник. 2-ге видання, доповнене та перероблене / К. Н. Ткачук, М. О. Халімовський, В. В. Зацарний, Д. В. Зеркалов та ін. за ред. К. Н. Ткачука і М. О. Халімовського. Київ : Основа, 2006. 448 с.

37. Трегуб В. Г. Основи проектування систем автоматизації з елементами САПР : метод. вказівки до практичних занять. Київ : НУХТ, 2008. 67 с.

38. Кваско М. З., Жураковський Я. Ю., Жученко А. І., Миленський В. В. Проектування систем керування : конспект лекцій. Київ : НТУУ «КПІ», 2015. 279 с.

39. Промислові мікропроцесорні мережі. URL: <http://um.co.ua/8/8-11/8-110801.html> (дата звернення: 15.11.2023).

40. Рішан О. Й. Метрологія, технологічні вимірювання та прилади : Курс лекцій для студентів спеціальностей: 7.092501 «Автоматизоване управління технологічними процесами» та 7.092502 «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва» ден. та заочн. форм. навчан. Київ : НУХТ, 2007. 162 с.

41. Сідлецький В. М., Трегуб В. Г. Проектування систем автоматизації : методичні рекомендації до виконання курсового проекту для студентів напряму 6.050202 «Автоматизація та комп'ютерно – інтегровані технології» денної та заочної форм навчання : Київ, 2013. 46 с.

42. Трегуб В. Г. Проектування, монтаж та експлуатація систем автоматизації : навч. посібник. Київ : НМК ВО, 2015. 80 с.

43. Степанюк А.Р. Пічне обладнання у хімічних та нафтопереробних процесах : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. 172 с.

44. Голодний, О.С. Заєць. С.С. Термічна обробка вуглецевих сталей: *XI всеукраїнська науково-практична конференція студентів та аспірантів «Погляд у майбутнє приладобудування»*. Київ :КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 98 с.

45. Закономірності процесу високотемпературного оброблення сипучих вуглецевих матеріалів в електричних печах : монографія / Т. В. Лазарєв, А. Я. Карвацький, Є. М. Панов та ін. Київ: НТУУ «КПІ», 2016. 154 с.

46. Оптимізація систем теплопостачання із використанням економіко-математичного моделювання : монографія / за заг. ред. О. М. Гаврися. Харків: НТУ «ХПІ», 2015. 209 с.

47. Жученко О. А., М. Г. Хібеба. Постановка задачі керування електрокальцинатором у виробництві вуглецевих виробів. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія : Технічні науки. Вип. 34. 2017. 178 с.*

48. Лакомський В.І., Пальті А.М., Юрченко Д.Д. Комп'ютерне моделювання теплових і електричних процесів в електрокальцинаторі. *Сучасна електрOMETалургія. № 2 (103). 2011. 90 с.*