

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Інженерно-хімічний факультет
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра автоматизації хімічних виробництв
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»
УДК _____

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри
_____ А.І.Жученко
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ _____ ” _____ 2018 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 151 – Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології
(код і назва)

на тему: Автоматизація процесу пресування у виробництві вуглецевих виробів

Виконала: студент ка 6 курсу, групи ЛА-61М
(шифр групи)

Гоч Ярослава Олександрівна
(прізвище, ім’я, по батькові) _____ (підпис)

Науковий керівник проф., д.т.н., Жученко А.І.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) _____ (підпис)

Рецензент _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) _____ (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2018 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Інженерно-хімічний факультет

(повна назва)

Кафедра автоматизації хімічних виробництв

(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність 151- Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ А.І.Жученко
(підпис) (ініціали, прізвище)

«___» _____ 2018 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Гоч Ярослава Олександрівна

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Автоматизація процесу пресування у виробництві вуглецевих виробів

науковий керівник дисертації Жученко А. І., д.т.н., професор

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

затверджені наказом по університету від «___» _____ 20__ р. № _____

2. Термін подання студентом дисертації _____

3. Об'єкт дослідження Апарат пресування у виробництві вуглецевих виробів

4. Предмет дослідження Температурний режим процесу просування у виробництві вуглецевих виробів

5. Перелік завдань, які потрібно розробити опис технологічного процесу пресування вуглецевих виробів; технологічний процес пресування вуглецевих виробів як об'єкт автоматизації; побудова та дослідження спрощеної

математичної моделі процесу пресування; створення системи керування у процесі пресування вуглецевих виробів, розробка стартап-проекту.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу схема автоматизації функціональна; схема апарату пресування.

7. Орієнтовний перелік публікацій Жученко А. І., Гоч Я. О. Система керування з ітеративним навчанням для процесу пресування вуглецевих виробів [Текст]: Матеріали Четвертої Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів (АКІТ-2017); Київ, 19–20 квітня 2017 р. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2017. – 204 с. : іл. – Бібліогр.: в кінці тез. – 60 пр. ISBN 978-966-622-826-3; Жученко О. А., Цапар В. С., Гоч Я. О. Метод спрощення математичних моделей об'єктів керування з розподіленими параметрами [Текст]: Матеріали Третьої Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів (АКІТ-2016); Київ, НТУУ «КП І», 20–21 квітня 2016 р. – К.: НТУУ «КПІ», 2016. – 138 с. : іл. – Бібліогр.: в кінці тез. – 150 пр. Жученко А. І., Гоч Я. О., Пахомов Д. А. Алгоритм керування з ітеративним навчанням процесом пресування у виробництві вуглецевих виробів Матеріали одинадцятої науково-практичної конференції студентів Автоматизація та Комп'ютерно-інтегровані технології – 2017 (АКІТ-2017); Київ, 19–20 грудня 2017 р. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2017.

Жученко А. І., Гоч Я. О., Хібеба М. Г. Система керування з ітеративним навчанням в процесі пресування вуглецевих виробів [Текст]: Матеріали 5-та Міжнародна конференція “Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології 2018”; Київ, 19–20 квітня 2018 р. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2018.

Гоч Я. О., Хібеба М. Г., Пахомов Д. А. Алгоритм імітації відпалу для знаходження вагових коефіцієнтів в методі керування з ітеративним навчанням [Текст]: Матеріали 5-та Міжнародна конференція “Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології 2018”; Київ, 19–20 квітня 2018 р. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2018.

8. Дата видачі завдання 29.03.2018

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1.	Збір інформації про процес пресування вуглецевих виробів	30.03-05.04	
2.	Дослідження існуючих математичних моделей процесу пресування та створення спрощеної математичної моделі	06.04 – 15.04	
3.	Аналіз існуючих систем керування та створення системи керування з ітеративним навчанням в процесі пресування вуглецевих виробів	16.04-25.04	
4.	Порівняння системи керування з ітеративним навчанням з системою керування з ПД-регулятором.	26.04-05.05	
5.	Написання наукової статті з матеріалів магістерської дисертації	06.05-15.05	

Студент

(підпис)

Гоч Я.О.

(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

(підпис)

Жученко А.І.

(ініціали, прізвище)

Реферат

Магістерська дисертація на тему "Автоматизація процесу пресування у виробництві вуглецевих виробів" містить пояснювальну записку об'ємом 94 сторінок. Пояснювальна записка містить 20 рисунків, 19 таблиць, 3 додатки і 26 літературних джерел. В розділах пояснювальної записки виконаний опис та аналіз технологічного процесу; представлена функціональна схема автоматизації процесу; за експериментальними даними створено та досліджено спрощену математичну модель об'єкта керування, створено систему керування процесом пресування вуглецевих виробів за допомогою методу ПЛС, представлено порівняння системи керування з ітеративним навчанням та систему керування з ПІД-регулятором.

В результаті отримана спрощена математична модель, котра дозволяє будувати на її основі системи керування реального часу, що неможливо зробити на основі початкових складних математичних моделей у зв'язку з тим, що розрахунок останніх вимагає значного часу.

Розроблено систему керування процесом пресування за допомогою методу керування з ітеративним навчанням, яка дозволяє отримати задану температуру заготовки після процесу пресування з мінімальною похибкою.

Ключові слова: графіт, графітований електрод, технологічний процес, схема автоматизації, керування, метод Фур'є, вимірювання, апроксимація, спрощена математична модель, система керування, керування з ітеративним навчанням, ітерація, стартап проект, іновація.

Abstract

The master's dissertation on the topic "Automation of molding process in the production of carbon products" contains an explanatory note of 94 pages. The explanatory note contains 20 drawings, 19 tables, 3 annexes and 26 literary sources. In the sections of the explanatory note, the description and analysis of the technological process are executed; the functional scheme of process automation is presented; According to experimental data, a simplified mathematical model of the control object was created and studied, a system for controlling the process of pressing carbon products using the ILC method was created, a comparison of the control system with iterative training and a control system with a PID regulator was presented.

As a result, a simplified mathematical model is developed which allows building real-time control systems based on it, which can not be made on the basis of initial complex mathematical models, because the calculation of the latter requires a considerable amount of time.

A system of control of the pressing process is developed with the help of a control method with iterative training, which allows obtaining the specified temperature of the workpiece after the pressing process with a minimum error.

Keywords: graphite, graphite electrode. technological process, automation scheme, control, Fourier method, measurement, approximation, simplified mathematical model, control system, control with iterative learning, iteration, startup project, innovation.

ЗМІСТ

ВСТУП

I РОЗДІЛ. ПРОЦЕС ПРЕСУВАННЯ ВУГЛЕЦЕВИХ ВИРОБІВ ЯК ОБ'ЄКТ АВТОМАТИЗАЦІЇ

1.1 Технологія виробництва вуглецевих виробів

1.1.1 Застосування та властивості електродної продукції

1.1.2 Технологічна схема виробництва графітованих електродів

1.2 Пресування вуглецевих виробів

1.2.1 Технологічний режим пресування

1.2.2 Аналіз досліджень процесу пресування

1.2.3 Апарат пресування як об'єкт автоматизації

1.2.4 Постановка задачі

II РОЗДІЛ. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПРЕСУВАННЯ ВУГЛЕЦЕВИХ ВИРОБІВ

2.1 Аналіз існуючих математичних моделей

2.2 Початкова математична модель

2.3 Спрощення математичної моделі процесу пресування вуглецевих виробів

2.3.1 Обґрунтування необхідності спрощення математичної моделі

2.3.2 Спрощення математичної моделі на основі методу Фур'є

2.3.3 Опис програми для отримання спрощеної моделі в програмному середовищі MATLAB

2.3.4 Аналіз спрощеної моделі процесу пресування

2.4 Дослідження процесу пресування на основі математичної моделі (температурні поля)

ІІІ РОЗДІЛ. СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ПРЕСУВАННЯ У ВИРОБНИЦТВІ ВУГЛЕЦЕВИХ ВИРОБІВ

3.1 Аналіз існуючих систем керування.

3.2 Керування з ітеративним навчанням (ІІС)

3.2.1 Обґрунтування використання методу керування з ітеративним навчанням

3.2.2 Алгоритм керування з ітеративним навчанням

3.2.3 Застосування та реалізація методу ІІС в процесі пресування вуглецевих виробів в програмному середовищі MATLAB

3.3 Порівняння методу керування з ітеративним навчанням та ПІД-регулятора в процесі пресування вуглецевих виробів.

ІІІІ РОЗДІЛ. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ.

4.1 Опис ідеї проекту

4.2 Технологічний аудит ідеї

4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

ВИСНОВКИ

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

ДОДАТКИ

Додаток Д1. Специфікація технічних засобів автоматизації до схеми автоматизації процесу пресування вуглецевих виробів

Додаток Д2. Лістинг програми для отримання спрощеної моделі процесу пресування за допомогою методу Фур'є

Додаток Д3. Лістинг програми реалізації методу ІІС для керування процесом пресування у виробництві вуглецевих виробів

Умовні позначення

- ІЛС – керування з ітеративним навчанням;
- ПІД-регулятор – Пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор;
- u_0 – початкове керування;
- k – номер ітерації (циклу роботи);
- e_0 – початкова похибка;
- L, L_2 – вагові коефіцієнти;
- μ_{eff} – ефективний коефіцієнт динамічної в'язкості;
- τ_{shear} – статичне напруження зсуву матеріалу;
- T_1, T_2 – температури поверхні формувальної та калібрувальної зони мундштука;
- T_3, T_4 – температури верхнього лівого та нижнього правого кута калібрувальної зони мундштука;
- T_{apr} – матриці температур, отримані з апроксимації температур $n=1-9$;
- E – середньоквадратична похибка апроксимації,
- n – кількість членів ряду;
- T_{mod} – матриці температур, отримані з спрощених моделей $n_m=1-4$;
- T_{out} – матриця температур в контрольних точках ($T1-T4$), отримана зі складної моделі;
- СРП – системи з розподіленими параметрами;
- АСУТП - автоматизована система управління технологічним процесом;
- P – розподіл Гібса;
- Max та Min – це діапазон температур, в межах яких отримуємо не браковані заготовки;
- Opt – оптимальна температура, при якій отримуємо заготовки з найкращою геометрією.

ВСТУП

Вуглецеві матеріали є незамінними в металургії, електроенергетиці, хімії, машинобудуванні, ракетно-космічній техніці, атомній енергетиці. Вони відрізняються рідкісним набором фізичних і хімічних властивостей. Процес пресування – один з основних етапів технологічного процесу виробництва вуглецевих виробів. Існує гідравлічне пресування та пресування видавлюванням маси через мундштук. Спосіб пресування видавлюванням забезпечує найбільшу продуктивність процесу при рівномірних фізико-механічних властивостях готових виробів. Для дослідження процесу потрібно розробити математичну модель, але процес є складним, тому актуальним є метод спрощення математичних моделей об'єктів керування. Метод дозволяє апроксимувати результати розрахунків температури за початковими складними моделями менш складними моделями. На основі даного методу можна створити сучасні системи керування виробництвом вуглецевих виробів, за допомогою яких отримаємо заданий вихідний параметр з мінімальною похибкою. Одною з таких систем є система керування з ітеративним навчанням, яка представлена та реалізована в магістерській дисертації.

І РОЗДІЛ . ПРОЦЕС ПРЕСУВАННЯ ВУГЛЕЦЕВИХ ВИРОБІВ ЯК ОБ'ЄКТ АВТОМАТИЗАЦІЇ

1.3 Технологія виробництва вуглецевих виробів

1.3.1 Застосування та властивості електродної продукції

Електродна продукція має унікальні фізико-механічні властивості. Основні з них: мала питома вага, висока температура сублімації (близько 3900 К), відсутність плавлення і низький тиск парів вуглецю, хімічна інертність у багатьох корозійно-активних середовищах, мале значення коефіцієнта термічного розширення, високі значення опору термічним ударам, абразивного зносу, здатність до механічної обробки і створенню виробів складних форм, можливість збереження механічних властивостей при температурах до 1973 К, можливість отримання виробів із заданими показниками пористості або щільності, властивість до створення матеріалів з високорозвиненою поверхнею і її фізико-хімічного модифікування, широким діапазоном питомої електропровідності, неповторні антифрикційні і електроконтактні властивості, здатність до створення матеріалів особливо високої чистоти, широко використовуваний в ядерних установках ефект уповільнення швидкості руху нейтронів, отримання високотемпературних конструкційних деталей, теплоізоляції, експлуатованих в інтервалі від декількох сотень до 3500 К [1].

Це зумовило широке застосування в різних галузях: при виробництві якісних сталей, алюмінію, феросплавів, фосфору, хлору, каустичної соди, карбиду кальцію, абразивів, кольорових металів і т.д. Найбільшими її споживачами є виробництва сталі, алюмінію і хімічних продуктів. Для електродної продукції характерний широкий асортимент виробів. Практично найбільш поширена така класифікація: графітована і вугільна продукція, товарні маси.

В технології електродних виробів графіт використовується для:

- поліпшення пресових характеристик маси і підвищення електропровідності електродів.
- ущільнення електричних контактів між електродами і їх металевою арматурою, застосовується графіт марок 'ГЕ-1', 'ГЕ-2' у вигляді паст і порошків.
- дугових електродів (пічних, прожекторних, кінознімальних, кінопроекційних, спектроскопічних і т.п.)
- для виготовлення електродів з графіту, застосовується при електролізі хлористого натрію у виробництві хлору і каустичної соди, використовується графіт марки ЕУЗ -М.
- для виготовлення вугілля для електрозварювання, вугільних трубок для електрофільтрів, вугільних полюсів для гальванічних елементів, використовується графіт марки 'ЕУЗ-Е'.

Переваги:

- низький питомий електроопір;
- висока термостійкість (опірність теплових ударів);
- низький вміст золи в електродах, що позначається на якості виплавленого металу.

Електроди графітові складають основну масу графітованої продукції. Висока термостійкість і електропровідність графітованих електродів роблять їх незамінними у виробництві сталі, машинобудівного чавуну, кольорових металів. При виплавці електросталі електроди працюють в умовах високої температури і піддаються значним механічним і термічним навантаженням. Найбільше навантаження несуть при цьому ніпельні з'єднання електродної свічки. Для експлуатації дугових сталеплавильних печей підвищеної потужності типу ДСП-100НЗА і ДСП-100І6 потрібні електроди, здатні працювати при підвищеній щільності струму. У хімічній промисловості при електролізі водних розчинів і розплавів для отримання хлору, каустичної соди, магнію, берилію та інших хімічних продуктів в якості струмопроводу використовують графітові аноди. Багатокомпонентним складом робочої середовища обумовлені високі вимоги, що пред'являються до електрохімічної стійкості анода (низька окислюваність, задовільна механічна міцність і ін.). До основних видів вугільної продукції відносяться вугільні електроди, подові і бічні блоки, вуглецеві блоки для доменних печей.

Порівняння властивостей вугільних і графітованих електродів показує, що вугільні електроди багато в чому поступаються графітованим. Однак через відносно низьку вартість вугільні електроди широко застосовують в електросталеплавильних печах малої потужності.

Вогнетривкі властивості електродної продукції, низький коефіцієнт термічного розширення, висока теплопровідність, високий опірність тепловим ударам дозволяють використовувати її в якості футеровочних матеріалів для доменних печей та алюмінієвих електролізерів. Поряд з пресованої продукцією на електродних заводах виробляють у великих кількостях анодну, електродну і подову товарні маси.

Графітові електроди в промисловості знаходять своє застосування для робіт з рудно-термічними і сталеплавильними печами, за допомогою яких

виробляють леговані сталі з високою якістю і невеликим вмістом вуглецю, спеціальні і феросплави. Графітові електроди відрізняються збільшеною електропровідністю і підвищеними пресовими характеристиками, мають досить низьким питомим опором, підвищеною стійкістю до теплових впливів. Невеликі домішки золи в складі графітованих електродів підвищують якісний показник отриманого металу.

Застосовуються в дугових сталеплавильних і рудно-термічних печах для виплавки високоякісних легованих і маловуглецевих сталей, феросплавів і спеціальних сплавів. Так само вони використовуються в різних електротермічних установках для виплавки сталі, чавуну, кольорових металів і спеціальних сплавів. Їх призначення підведення електричного струму в піч. Електроди, як правило, комплектуються ніпелями, гнізда для яких є на обох кінцях електрода. Завдяки цьому, електроди з'єднуються один з одним і безперервно подаються в піч. Так само вони використовуються в чавуноливарному виробництві для дугового різання металів. Їх застосування значно знижує відсоток браку.

Застосування графітових електродів:

Електроди графітові марки ЕГ використовуються на дугових сталеплавильних, рафінувальних, феросплавних і руднотермічних печах.

Електроди графітові марки ЕГП використовуються на дугових сталеплавильних печах високої потужності і установках піч-ківш.

Електроди графітові марки ЕГСП використовуються на надпотужних електродугових печах і установках піч-ківш. Електроди графітові імпортованих виробників мають свої маркування.

Електроди графітові для різання (також їх називають пластини, стрижні, плити) виготовляються з графіту марки ГЕ, який за способом отримання і фізико-механічними властивостями подібний до матеріалу графітованих електродів для електродугових сталеплавильних печей. Електроди з графіту застосовуються для дугового різання товстого шару

металу - при розрізанні бронетехніки, обрубка прибутків, видалення поверхневих дефектів на виливках, в чавунно- і сталеливарному виробництві.

Електроди для електроерозійних прошивних верстатів. Інструментами служать графітові або мідні електроди, форма яких відповідає формі деталі. Ці електроди і випалюють необхідну форму. Електрод виготовляється з ізоелектричних графітів (наприклад І-3 (ISEM-3), виробництво Японія).

Вимоги до якості графітованих електродів визначаються умовами їх експлуатації. Найважливішою характеристикою електродів є їх питомий електричний опір, оскільки витрати електродів в сталеплавильних печах мають лінійну залежність від цього показника [1]. Електроди повинні мати високу теплопровідність та малий коефіцієнт температурного розширення, щоб уникнути руйнування електродної свічі внаслідок температурних напружень.

Крім того, електроди сталеплавильних печей зазнають значних механічних навантажень, спрямованих під кутом до їх осі, що робить механічну міцність на вигин та розривання надзвичайно важливим показником якості [3,4]. В табл. 1.1 наведено показники якості графітованих електродів, що виробляються на підприємстві УкрГрафіт (м. Запоріжжя, Україна).

Таблиця 1.1 Показники якості графітованих електродів, що виробляються на підприємстві УкрГрафіт (м. Запоріжжя, Україна).

Номинальний діаметр, мм	Об'ємна густина, г/см ³	Питомий електричний опір, мкОм×м	Термічний коефіцієнт лінійного розширення, 1/К	Межа міцності на вигин, МПа	Мо дуль Юнга, ГПа
Марка ЕГ (для дугових сталеплавильних, рафінувальних, феросплавних та руднотермічних печей)					

80 .. 150	1.63	7.0	2.1	12. 0	8.5
200..350	1.62	7.5	2.2	10. 0	7.0
400..600	1.61	8.0	2.3	9.0	6.5
700	1.60	8.0	2.3	8.0	5.5
Марка ЕГП (для дугових сталеплавильних печей великої потужності та установок піч-ківш)					
200..350	1.74	6.0	2.3	15. 0	9.0
400..600	1.76	6.5	2.5	14. 0	9.5
Марка ЕГСП (для дугових сталеплавильних печей надвеликої потужності та установок піч-ківш)					
200..350	1.73	6.0	1.3	15. 0	11. 0
400..600	1.71	5.5	1.2	13. 0	10. 5
Ніпелі для графітованих електродів					
80..150	1.70	5.0	2.2	17. 0	18. 0
200..550	1.75	4.5	1.0	18. 0	18. 0
600..700	1.80	4.0	1.0	19. 0	19. 0

Якість та властивості графітованих електродів визначають припустиму густину струму при їх експлуатації [2]. Як вже відзначалось, здебільшого цей показник якості електродів обумовлений електропровідністю: чим вона вище, тим вище припустима експлуатаційна густина струму [5]. Сучасні великовантажні дугові сталеплавильні печі, оснащені трансформаторами

великої та надвеликої потужності, вимагають розвинення густини струму на електродах діаметром 550..700 мм до 25..35 А/см² [1], що потребує заходів контролю якості електродної продукції на етапі виробництва.

В табл. 1.2 наведено рекомендовані струмові навантаження при експлуатації графітованих електродів великого діаметра розглянутих марок.

Таблиця 1.2 Рекомендовані струмові навантаження при експлуатації графітованих електродів великого діаметра розглянутих марок.

Номіналь ний діаметр, мм	Номіналь на довжина, мм	Припустима густина струму, А/см ²			
		Марка ЕГ	Марка ЕГП	Марка ЕГСП	
150	1200/1500	18..25	-	-	
200	1200/1800		20..30	25..35	
250		15..20	20..25		
300					25..30
350					
400		1800/2100	15..18		18..22
450	22..28				
500				/2400	
550	2100/2400	10..15	15..20		
600					
700	1800/2100 /2400	12	-	-	

Всі вказані показники якості поліпшуються з підвищенням ступеня графітації вуглецевого матеріалу [6]. Тому отримання продукції із бажаним ступенем графітації та цілісною внутрішньою структурою при відсутності зовнішніх дефектів гарантує високі експлуатаційні характеристики електродних виробів.

1.3.2 Технологічна схема виробництва графітованих електродів

Технологія виготовлення графітованих електродів характеризується багатоетапністю. При цьому кожен з етапів має суттєвий вплив на якість кінцевої продукції [5]. На рис. 1.1 зображено технологічну схему виробництва графітованих електродів.

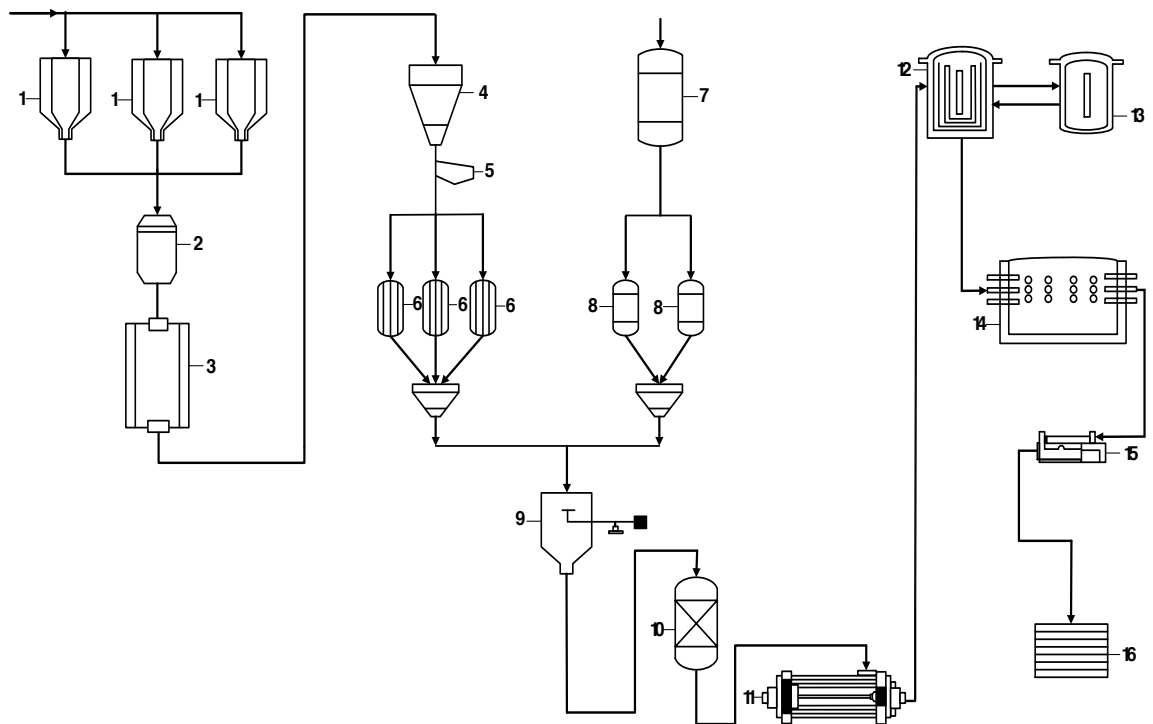


Рис. 1.1 Технологічна схема виробництва графітованих електродів

Сировиною для графітованих електродів слугують продукти нафтової та кам'яновугільної промисловості (елеватори 1). Електродні заготовки формують з маси, в якій наповнювачем є піролізні та крекінгові нафтові кокси, антрацити та термоантрацити, або пекові кокси [6]. Перед використанням тверда сировина проходить низку технологічних операцій, першою з яких є дроблення (дробарка 2). Розмір шматків після операції складає 40 .. 50 мм [2].

Подрібнені вуглецеві матеріали надходять в прожарювальні печі 3, де з

них видаляється волога та леткі речовини. Метою прожарювання є попередня усадка вуглецевих матеріалів, що значно зменшує об'ємні зміни при подальшій термообробці. Після операції густина, механічна міцність та електропровідність вуглецевого матеріалу зростає. Прожарювання здійснюють без доступу повітря або у відновлювальній атмосфері при високих температурах. Видалення летких речовин з вуглецевих матеріалів починається при 245°C і невинно зростає з підвищенням температури. Стабілізація усадки коксів відбувається при температурі прожарювання не нижче 1300°C, а для антрацитів не нижче 1400°C. Час перебування вуглецевого матеріалу в прожарювальній печі залежить від її конструкції та властивостей самого матеріалу і може сягати 1.5 год.

Після охолодження прожарений вуглецевий матеріал надходить в розмельне відділення 4, де за допомогою валкових та молоткових подрібнювачів його розмелюють до зерен розміром 0.5 .. 10 мм, сортують за допомогою віброгрохотів 5 по фракціям та завантажують в сортові дозувальні бункери 6. В якості сполучника використовують середньотемпературний кам'яновугільний пек (див. резервуар з обігрівом 7) - термопластичний матеріал, структура і властивості якого істотно залежать від температури. Пек є остатковою фракцією розгонки кам'яновугільної смоли і має температуру розм'якшення 65 .. 75°C [1].

У відповідності з рецептом необхідну кількість (зважувальне відділення 9) кожної фракції та кам'яновугільного пеку завантажують в змішувачі 10 з паровим обігрівом. Електродну масу готують впродовж 1 .. 5 год при температурі 115 .. 152°C. В цьому інтервалі температур середньотемпературний пек має найбільшу рухливість і плинність [1]. Охолоджена до 70 .. 110°C електродна маса надходить у пресове відділення 11, де з неї формують так звані "зелені" заготовки. Пресування маси

здійснюють формовкою в закриту матрицю, або екструзією через мундштук. Від способу пресування залежить текстура заготовок, яка визначає анізотропні властивості виробів [7]. “Зелені” заготовки охолоджують до затвердіння у водяних ваннах.

Температура охолодження повинна бути близькою до нижньої межі пружнопластичного стану сполучника, що створює умови для релаксації внутрішніх напружень. Охолоджені “зелені” заготовки вертикальними рядами завантажують в кільцеву обпалювальну піч типу “Рідгамер” 12 [8]. Для збереження форми заготовок під час операції обпалення, рівномірності підведення теплоти та запобігання окислюванню простір між рядами заповнюють засипкою з кварцевого піску та гранульованих вуглецевих матеріалів. В печі за допомогою газових пальників підтримується температура 800 .. 1000°C. Операція обпалення триває 200 .. 550 год в залежності від конструкції печі та типу електродних заготовок. При обпаленні відбувається коксування сполучника, що оточує гранули наповнювача, і заготовки спікаються в монолітну композицію. Після охолодження печі до 100 .. 500°C обпалені заготовки вивантажують, перевіряють на відсутність дефектів та направляють у відділення графітації. Для підвищення густини, міцності та зниження проникності електродів деяких видів обпалені заготовки перед графітацією попередньо просочують пеком. Цю операцію здійснюють в автоклавах 13 при температурі 230 .. 250°C під тиском 20 .. 25 кПа [9]. Після просочування заготовки повторно обпалюють.

Графітацію електродних заготовок здійснюють в електричних однофазних печах прямого нагрівання 14. Концентрація значної кількості енергії в невеликому об’ємі дозволяє отримувати температури, що сягають 3300°C. Печі графітації мають періодичну дію. Тривалість кампанії графітації може перевищувати 100 год. Після закінчення кампанії піч остигає впродовж 120 .. 140 год [10], після чого графітовані вироби

вивантажують та перевіряють на відсутність дефектів. Як правило, графітовані вироби піддають механічній обробці 15 для отримання необхідних геометричних розмірів. Кінцевою продукцією графітовані вироби 16 стають після визначення їх сортності шляхом перевірки показників якості (п.р. 1.2) на відповідність технічним умовам.

1.4 Пресування вуглецевих виробів

1.4.1 Технологічний режим пресування

В основному на межі пресування електродних заготовок закладаються всі спадкові властивості, які визначають якість готових виробів. В цілому на властивості електродних пресованих заготовок впливають фактори технологічного і конструктивного характеру, супроводжуючи процес підготовки і пресування вуглецевих мас. До технологічних факторів відносяться енергосилові умови змішування і пресування мас, температурно-швидкісний режим змішування, підготовки і пресування мас, пластичні властивості мас. Конструктивні фактори відображають тип і стан робочих органів основного технологічного обладнання - змішувачів, міксерів-охолоджувачів, пресів і пресового інструмента, спосіб прийому і передачі заготовок на охолоджуючий пристрій, пристрій і спосіб порізки електродних заготовок, особливості конструкції і спосіб обігріву пресового інструмента. Непостійний вплив окремих факторів процесу пресування й особливо відхилення факторів технологічного характеру погіршують стабільність властивостей і якість готових виробів. Найбільш розповсюдженими способами є гідравлічне пресування та пресування видавлюванням маси через мундштук у виготовленні вуглецевих і графітових електродів, футеровочних блоків і багато видів конструкційних виробів для різних галузей промисловості [1].

Промислове пресування вуглецевих заготовок через мундштук пресу включає наступні технологічні етапи:

- заповнення циліндру пресу охолодженою масою;
- підпресовка маси;
- пресування та маркування виробів;
- відрізання заготовки визначеної довжини;

- охолодження водою та огляд заготовки на приймальному столі пресу;
- транспортування заготовки на рольганг для охолодження ;
- транспортування заготовки на стелаж для проведення виробничого контролю.

Спосіб пресування видавлюванням дозволяє отримати заготовки з поперечним розміром від 30 до 1200 мм і забезпечує найбільшу продуктивність процесу при достатньо рівномірних фізико-механічних властивостях готових виробів. Відомий традиційний спосіб виробництва заготовок в промислових умовах потребує більш глибокого його аналізу. Вперше розрахунково-експериментальним шляхом інженером Ж.Г Гролле отримана залежність питомого тиску пресування в мундштуці у вигляді:

$$P' = PSk/S', (1)$$

де P' і P - тиск на масу в мундштуці і контейнері преса; S і S' - перетин контейнера і мундштука; k - дослідно-розрахунковий коефіцієнт [1].

Формулою (1) не враховується вплив контактного і внутрішнього тертя, робочої геометрії мундштука. Відповідно до формули, слід очікувати в осередку деформації питомих тисків більших, ніж в контейнері пресу, що суперечить сучасним уявленням про процес деформації.

Розрахунок тиску пресування за формулами, отриманими на основі енергетичного балансу, найбільш простий і зручний. Однак такі залежності не можуть бути прийняті точними в зв'язку з тим, що між умовно незалежними факторами процесу пресування є глибокий аналітичний взаємозв'язок.

Пресування здійснюють з метою заготовок із заданими геометричними розмірами. За цим способом попередньо ущільнена маса завантажується в контейнери пресу і видавлюється через мундштук, проходячи через три зони деформації (рис. 1.2) [1].

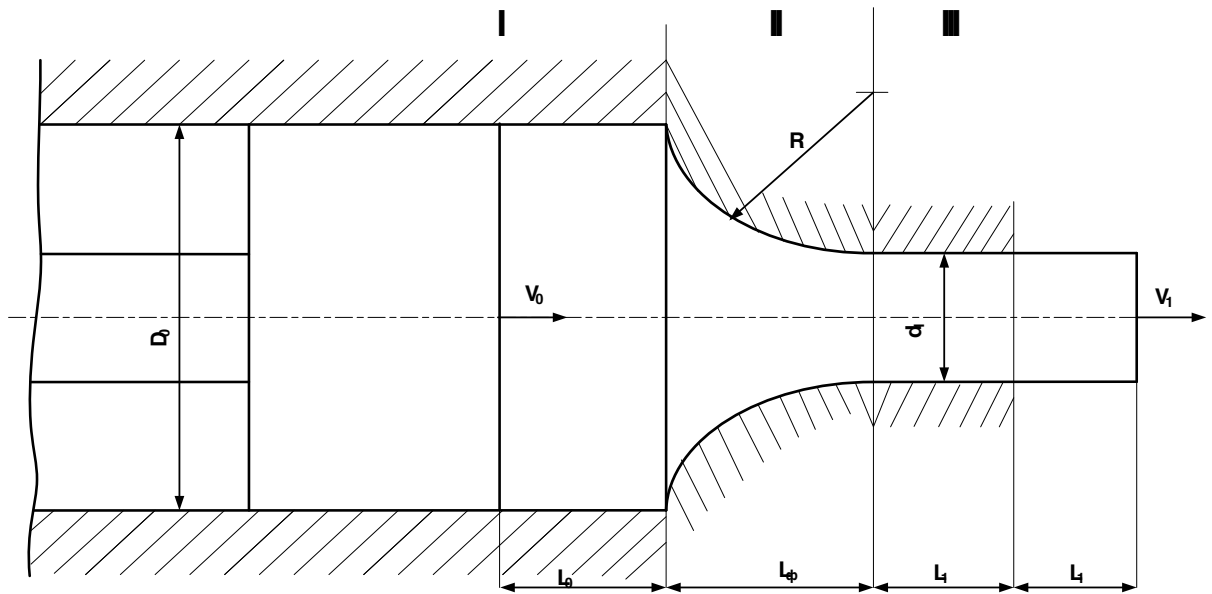


Рис.1.2 Схема осередку деформації

У зоні ущільнення I маса приймає форму круглої заготовки діаметром D_0 і довжиною L_0 .

У формуючій зоні II відбувається зміна форми заготовки до поперечного розміру d_1 . Остаточне формування розмірів заготовки здійснюється в калібруючій зоні III довжиною L_1 . Формуюча зона мундштука довжиною L_ϕ може мати різну форму робочої геометрії радіусом R . Особливість пресування вуглецевої маси полягає в тому, що об'ємна щільність маси після змішування і при пресуванні дуже різна. Зміна форми матеріалу здійснюється переміщенням частинок в нове стійке положення рівноваги зі збереженням загальної маси матеріалу до і після деформації. Умова сталості маси, отримаємо

$$(D_0/D_1)^2 d_{k0}/d_{k1} = L_1/L_0. \quad (2)$$

d_{k0} і d_{k1} - об'ємна щільність матеріалу на вході і виході з мундштука;

L_0 і L_1 - загальна довжина заготовки до і після деформації [1].

Співвідношення в рівності (2) характеризують зміну геометричних розмірів тіла при деформації і мають відповідний зміст і найменування.

Відношення d_{k0}/d_{k1} - коефіцієнт ущільнення і характеризує зміну щільності матеріалу в процесі деформації. При існуючих режимах

підпресування зміна коефіцієнту ущільнення не перевищує 2-3% і його величиною можна знехтувати.

Відношення L_1/L_0 або коефіцієнт витяжки λ характеризує загальний подовження (витяжку) заготовки після деформації.

У загальному випадку коефіцієнти, що характеризують деформацію, можуть бути лінійними, поверхневими і об'ємними, а за своїм значенням абсолютними і відносними. Стосовно до пресування вуглецевих мас найбільш зручно користуватися коефіцієнтом деформації витяжкою λ .

Якщо формуюча зона мундштука ділиться на кілька зон з різною робочою геометрією, то сумарна витяжка при пресуванні дорівнює добутку частинних витяжок в кожній зоні деформації.

З умови сталості об'ємної швидкості матеріалу на вході і виході з мундштука випливає, що швидкість видавлювання заготовок більше швидкості v_0 плунжера на величину витяжки.

При гідравлічному пресуванні швидкість течії частинок в центрі перетину більше, ніж на периферії. Це викликає неоднорідність деформації і напружень. Основними причинами неоднорідності деформації є: умови і величина тертя, вихідна форма заготовки і форма робочої поверхні прес-інструменту, неоднорідність фізико-механічних властивостей пресованого матеріалу.

В умовах нерівномірності деформації зміна форми окремих макро-об'ємів тіла по-різному. В результаті цього в матеріалі виникають взаєморівноважуючі внутрішні напруги. І хоча схема напруженого стану носить характер стиснення, в матеріалі на деяких ділянках виникають напруги розтягу. Це є причиною порушення цілісності пресованого матеріалу - виникнення поперечних тріщин.

Питомі тиски пресування можна визначити відомими методами, які застосовують в інженерній практиці. Один з них полягає в розгляді диференціального рівняння рівноваги елементарних сил, що витрачаються

на виділений елемент осередку деформації спільно й рівнянням пластичності матеріалу. За іншим способом питомі тиски знаходять з розв'язання рівняння енергетичного балансу потужностей деформації з урахуванням втрат на контактне тертя.

З аналізу формул питомого тиску виплає, що енерговитрати на потужність зміни форми становить 20-30%, інша енергія йде на подолання кон-тактних сил опору при найбільших втратах в формуючій зоні. Звідси випливає, що змінюючи умови контактного тертя в зоні формування, можна регулювати тиск пресування. Витрати на подолання сил контактного опору в контейнері преса не перевищують 15-20% [1].

Пресування видавлюванням часто називають прошивним. Під терміном прошивка насправді розуміється не видавлювання маси через формуючу матрицю (мундштук), отримання матеріалів і виробів шляхом продавлювання, прошивки інструментів формуючої заготовки [11].

Пресування видавлюванням дозволяє отримати вуглецеві вироби з великим відношенням довжини до поперечних розмірів.

За допомогою такого типу пресування виробляється найбільша частина вуглецевої продукції – графітовані електроди електросталеплавильних печей для виготовлення первинної сталі, подові блоки алюмінієвих електролізерів. Об'єми світового виробництва складають 600 і 400 тис. тон в рік відповідно. Добре прослідковується тенденція по збільшенню діаметру вироблених електродів від 450 до 800 мм в зв'язку зі збільшенням продуктивності електросталеплавильних печей в основному від 50-100 до 300 т. Довжина електродів збільшується з ростом їх діаметру від 1000 до 2400 мм і регламентується стандартами Міжнародного комітету по стандартам ISO. Подальше збільшення діаметру електродів для дугових електричних печей змінного струму обмежується залежністю скін-ефекту (переважного проходженню струму по поверхневим шарам електрода) від допустимої густини струму. Реальними шляхами подальшого

збільшення діаметра електродів є перехід на експлуатацію печей на постійному струмі і виготовлення трубчатих електродів [11].

Вимушене обмеження максимальних значень діаметру електродів посилюється потужністю, яка збільшується споживаної електричними печами електричної енергії і відповідно густиною струму на електроді від $10-12 \text{ А/см}^2$ до $25-27 \text{ А/см}^2$. Перехід на виробництво електросталі в печах з великим завантаженням виплавленої сталі дозволяє до 3 разів збільшити їх продуктивність та знизити удільну електричну потужність споживаного струму на 1 т. виплавленої сталі. В зв'язку з цим підвищуються вимоги до якості електродів, особливо великого діаметра – до їх густини від $1530-1580 \text{ кг/м}^3$ до $1650-1700 \text{ кг/м}^3$, електричному опору від $7,0-8,0$ до $5,0-6,0 \text{ мОм}\cdot\text{м}$, міцності при вигині від $6-8 \text{ МПа}$ до $10-13 \text{ МПа}$; модулю Юнга від $(6-8)\cdot 10^{-6} \text{ МПа}$ до $(8-10)\cdot 10^{-6} \text{ МПа}$, коефіцієнту лінійного термічного розширення вдовж осі пресування при 500°C від $(1,4-2)\cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}$ до $(1,0-1,2)\cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}$ [11].

Збільшення механічних властивостей і теплофізичних характеристик сприяє опору матеріалу електроду термічному удару.

Безперервна підтримка дуги в печі забезпечується в основному деталлю, яка з'єднує електроди – ніпелем. Їх якість і конструктивне виконання в значній мірі визначають безаварійну роботу електродів і термін їх служби. Через дану причину перераховані властивості у ніпелів повинні бути значно вищими.

Перераховані раніше підвищення технічних характеристик електродів та ніпелів в значній мірі забезпечуються використанням при їх виготовленні голчастого нафтового і пекового коксів, які сприяють зменшенню окиснення при роботі електродів. Пресування видавлюванням в зв'язку з описаними раніше особливостями сприятливо відображається на переважній орієнтації частинок вздовж осі електрода, що призводить до досягненню його

необхідних властивостей. У відповідності з цим виробництво електродів великих перерізів здійснюється з використанням тільки голчастих коксів .

Вуглецеві неграфітовані електроди для анодів і електроди прямокутного перерізу – для катодних блоків алюмінієвих електродних ван для електролізу первинного алюмінію в значній частині виробляють пресуванням видавлюванням і віброформуванням. Це велика частина виробництва вуглецевої продукції, так як на 1 кг виготовленого алюмінію потрібно 0,4 кг вуглецю.

Інші види графітованої продукції складають менше 5% від об'єму електродів для виробництва первинної електросталі. До них відносяться: електроди і нагрівачі опору для вторинної металургії переробки сталі, в тому числі для безперервного лиття високоякісних сталей, видалення газів у вакуумних установках, електромагнітного переміщення сталі.

Суттєве значення має якість графітованої електродної продукції діаметром до 1150 мм при виробництві кремнію та фосфору, де густина струму нижче, ніж в печах для виробництва сталі.

Пресування видавлюванням застосовують при виготовленні електродів діаметром від 75 до 300 мм для різних видів лиття чавуну.

Вуглецеві електроди діаметром до 1600 мм використовуються для виготовлення феросплавів.

Вуглецеві аноди прямокутного перерізу, виготовлені пресуванням видавлюванням, експлуатуються в електролізних виробництвах фтору, натрію, літію, магнію, титану, танталу, ніобію та ряду рідкоземельних елементів.

Розміри вугільних тиглів, що виготовляються визначаються параметрами графітованих заготовок. Розглянутим методом випускаються тиглі діаметром до 1100 мм, які застосовують у високоякісних і вакуумних печах для розливання міді, олов'яної та алюмінієвої бронзи, латуні, мідно-нікелевих та срібно-нікелевих сплавів, уранових концентратів, рідких

металів, оптичних багатокомпонентних стекол, кварцу. На теперішній час виробництво тигельної продукції в більшій мірі базується на ізостатичному пресуванні.

Для отримання електродних заготовок високої якості необхідний правильний вибір температурно-швидкісних і силових умов деформації. Технологічний режим пресування в основному визначається температурою розм'якшення застосовуваного сполучного, асортиментом пресованих виробів і режимом обтиску, формою поперечного перерізу пресованих заготовок, раціональним співвідношенням температури пресуємої маси, контейнера і мундштука [1].

Застосування сполучного з підвищеною температурою розм'якшення призводить не тільки до зростання тиску пресування, а й до підвищення всього температурного режиму пресування. Тиск пресування визначається гранулометричним складом маси і кількістю сполучного, а також істотно залежить від температури маси, що завантажується в прес, яка в основному визначається розмірами пресованих виробів і режимом обтиску: чим більше розмір виробу і нижче ступінь деформації, тим нижче потрібна температура пресованих мас. Це обумовлено необхідністю збереження геометричних розмірів гарячих заготовок.

Температурний режим пресування круглих електродних заготовок регулюється тільки по зонам пресування. Для блокової продукції потрібно додатково створювати певне температурне поле по периметру калібру, що досягається установкою спеціальних електричних нагрівачів. При цьому прагнуть до того, щоб була різниця температур до 10-30 ° С між кутами і серединою сторони блоку [1].

Виявлено наступну закономірність – у режимах пресування температура завантажується маси для дрібних (50X250 мм), середніх (200-350 мм) і великих (450-710 мм) заготовок становить відповідно 100-110, 90-

100 і 70-90 °С. Температура контейнера пресу 100-110°С, розтруба мундштука 110-130°С, калібру мундштука 140-160°С [1].

Застосуванням мундштуків полегшеної конструкції (внаслідок меншої теплової інерційності) вимагає більш інтенсивної віддачі тепла і більш високої температури мундштука. Найнижчий рівень обігріву калібру (120-130 ° С) встановлюється на мундштуках з короткою калібруючою зоною. Відхилення температури завантажувача маси від допустимої веде до погіршення якості заготовок. Так, при 110 ° С і вище маса погано спресовується по всьому об'єму заготовки, спостерігається підвищений брак по поперечним тріщинам. При температурі маси, близької до температури розм'якшення пеку, внутрішні її обсяги не пропресовуються. Це особливо має наслідок, якщо масу готують до пресування не в камері, а в барабанному охолоджувачі. Усунути такий дефект можна підвищенням температури маси при завантаженні. А це не завжди вдається, тому що заготовка починає втрачати форму і з'являються поперечні тріщини [1].

Згідно з діючими на електродних заводах технологічних процесів, контрольованими параметрами є температурний режим і тиск пресування. Практика пресування показала, що контролю за тиском пресування недостатньо. Так, браковану масу з надлишком сполучного можна спресувати як придатну, застосовуючи переохолодження. У зв'язку з цим необхідний додатковий контроль за швидкістю пресування. Якість пресованих заготовок можна оцінювати по інтенсивності видавлювання, що характеризується величиною зусилля для видавлювання одиничного обсягу маси в 1 с. З технологічного боку інтенсивність видавлювання найбільш повно характеризує процес отримання електродних заготовок, так як враховує спільний вплив температурно - швидкісних і силових умов деформації.

Величина інтенсивності видавлювання для кожного виду заготовок повинна знаходитися в заданому діапазоні, вихід з його меж призводить до браку деформації або тріщин.

В середньому швидкість пресування становить 3-6 см/с при тиску пресування 6,0-12,0 МПа.

Контрольованим параметром є також тиск і час підпресування маси в контейнері: чим більший тиск підпресування, тим більшою мірою відбувається переорієнтація анізотричних зерен наповнювача в об'ємі контейнера пресу. Стає нерівномірним розподіл сполучного по перетину виробів. Подальше видавлювання попередньо підпресованої маси через мундштук супроводжується переорієнтуванням зерен уздовж осі пресування. При малих ступенях деформації цей процес поширюється не на повну глибину перетину заготовки, приводячи до різномірності фізико-хімічних властивостей виробів.

1.2.2 Аналіз досліджень процесу пресування

У багатьох галузях промисловості (металургійної, хімічної, та ін) процес виробництва продукції пов'язаний з формуванням порошкоподібних шихт в спресовані тіла заданої геометричної форми і розмірів. Це обумовлено не тільки необхідністю дотримання технологічного регламенту виробництва, але і вирішення екологічних питань, пов'язаних з транспортуванням сипких матеріалів, раціональної утилізацією техногенних матеріалів. Спресовані тіла мають найбільш сприятливі умови теплопередачі за рахунок теплового контакту частинок матеріалу між собою і сформованої з різних порошкоподібних матеріалів продукції з заданими фізико-механічними властивостями, геометричною формою і розмірами, що забезпечує необхідні умови для їх подальшої технологічної переробки.

Викликає інтерес ряд робіт, які висвітлюють теоретичні уявлення і особливості процесу пресування електродних заготовок. У роботах прийнято до уваги вплив кількості сполучного матеріалу, ступеня деформації, форми мундштука, якості поверхні пресованих заготовок. Залежності представлені в загальному вигляді, використовувати їх в інженерних розрахунках важко через різноманіття властивостей переробляються.

Великий внесок у теорію і практику обробки тиском, вивчення перебігу в'язких і твердих середовищ внесли вчені С.І. Губкін [11], І.М. Павлов, А.П. Чекмарьов, Є.П. Унксов [13], А.Д. Томленов [14] та ін. Відомі закономірності з розрахунку пресування в обробці металів тиском повністю використовувати не можна, оскільки вуглецева маса володіє релаксаційними властивостями при надзвичайно малому опорі матеріалу пластичної деформації.

Відсутність критеріїв і способів оцінки якості складових і пресованих мас не дозволяє знайти надійну основу для математичного опису процесу пресування.

Перші відомі експериментальні роботи відносяться до 30-х років. Було встановлено, що внутрішні шари пресованих заготовок переміщуються з великою швидкістю, ніж зовнішні, приконтатні. Ступінь проникнення деформації шарів залежить від відношення діаметра контейнера преса до діаметру калібру мундштука. Найбільш інтенсивне змішування шарів відбувається в зоні переходу робочої поверхні до калібру мундштука.

Важливе значення має режим попереднього підпресування мас в контейнері пресу, що впливає на якість одержуваних заготовок. Так, в роботі Е.Ф. Чалих тиск підпресування рекомендується не менше 75% зусилля пресу [15]. Необхідність максимального зусилля підпресування не підтверджується досвідченими даними. Слід очікувати, що вибір тиску підпресування при різному ступені анізотрії зерен наповнювача, його величини, може вплинути на якість готових виробів.

Дані по дослідженню однорідності графітованих електродів з застосуванням ізотопу сірки свідчать про підвищений до 26-36% вмісту сполучного в тонкому поверхневому шарі заготовок (до 2 мм). Нерівномірне розподілення сполучного призводить до різної щільності на перетині заготовок. Зазначена обставина пояснюється поверхневим опалюванням матеріалу через більш високу температуру мундштука.

Якість виробів істотно змінюється в залежності від нестачі або надлишку сполучного. Недолік сполучного призводить до низької міцності і високої пористості, а надлишок - до викривлення заготовок, погіршення механічної міцності.

Після припинення силового впливу пружна деформація в тілі заготовки переходить в пластичну, що супроводжується об'ємними змінами - пружною післядією.

Ступінь пружної післядії і зміна поперечних розмірів заготовки залежить від складу маси і її пластичності. Пружна післядія маси з пекового коксу однакового гранулометричного складу змінюється зі зміною температури розм'якшення сполучного.

Пружне розширення коксо-пекової маси менше пружного розширення шихти без пеку того ж складу. Причина пружного післядії, полягає в детекстуризації анізотричних зерен наповнювача після деформації в процесі релаксації матеріалу.

Контроль величини пружної післядії матеріалу і його оцінка дозволяють оперативно управляти ходом технологічного процесу підготовки та пресування мас, застосовуючи регулювання співвідношення сполучного і наповнювача.

Під пластичністю деформацію без порушення цілісності. Пластичність залежить головним чином від фізико-механічних властивостей матеріалу, його складу, температури, швидкості, ступеня деформації.

1.2.3 Апарат пресування як об'єкт автоматизації

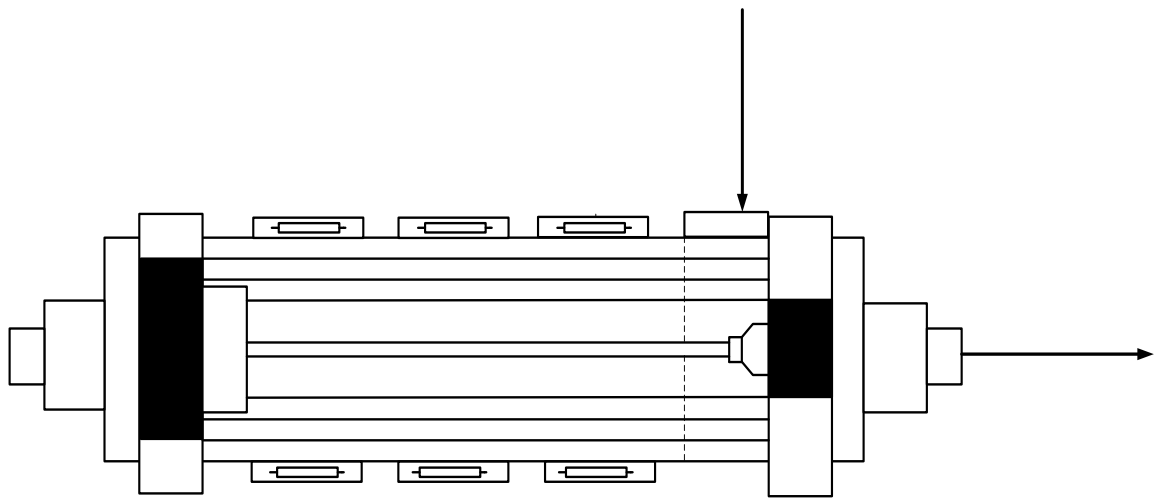


Рис.1.3 Технологічна схема апарату пресування

На рисунку 1.3 зображено схему апарату пресування. На вхід апарату подається електродна маса – суміш вуглецевих матеріалів та кам'яновугільного пеку, охолоджена до 70-90 °С. Результатом пресування є «зелені» заготовки (140-160 °С), які потім завантажують в обпалювальну піч. Для нормальної роботи усього технологічного устаткування, мінімізації можливих людських помилок, збільшення продуктивності, підвищення якості продукту, стабілізації, контролю та технологічних параметрів розроблено схему автоматизації, яка покликана вирішувати всі ці завдання. Схема автоматизації включає низку контурів автоматичного контролю режимних параметрів технологічного процесу, що забезпечують оптимальність та продуктивність.

Контур 1 забезпечує автоматичну реєстрацію температури електродної маси на вході в апарат та включає: термометр опору ТОМ градування 50М (1-1); автоматичний показувальний і реєструвальний.

Контур 2 забезпечує автоматичний контроль температури в контейнері пресу та включає: термоперетворювач опору ТОМ градування 50М (2-1); нормувальний перетворювач НПТ1 (2-2); мікропроцесорний регулятор МІК-21.

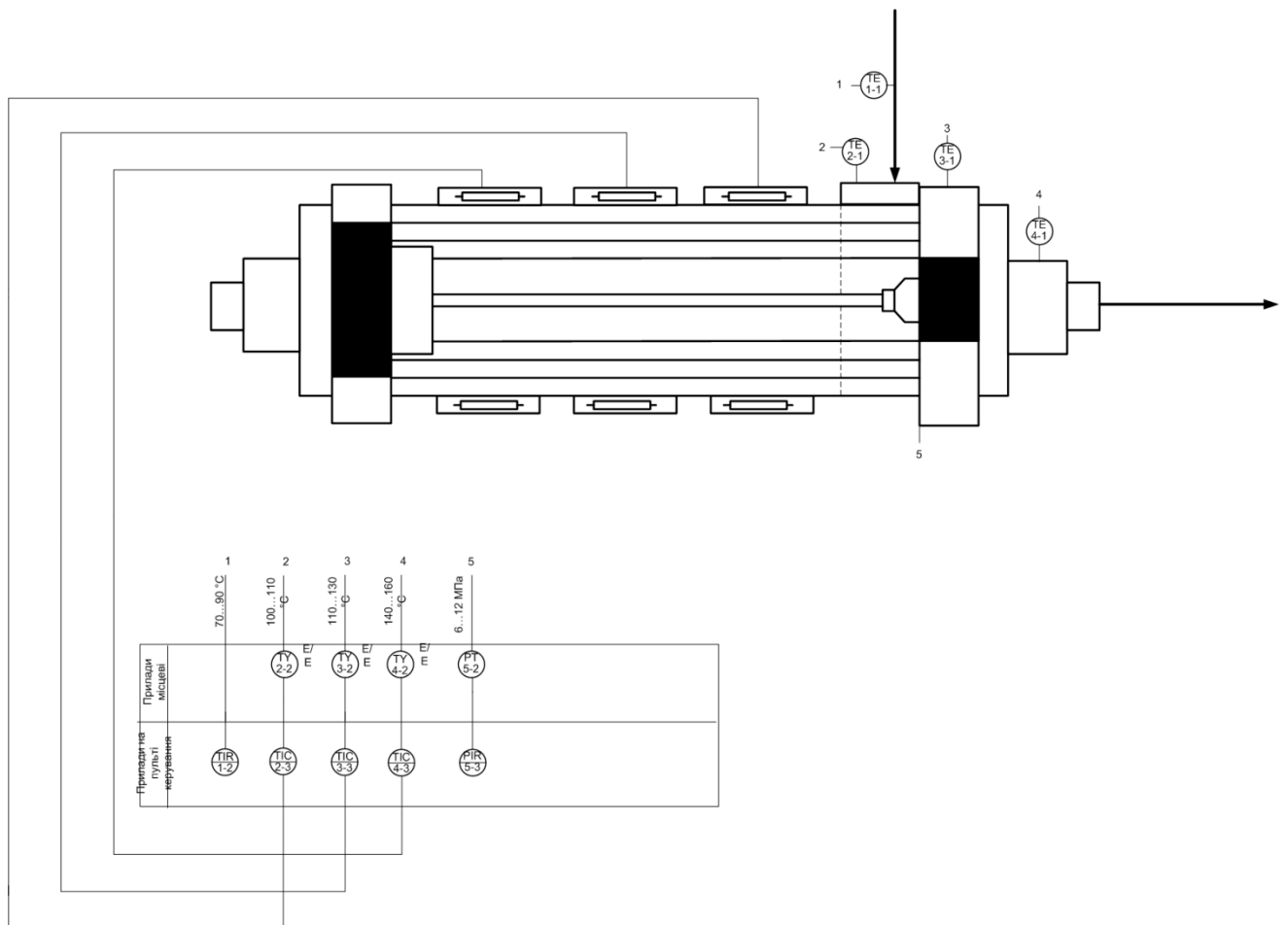
Контур 3 забезпечує автоматичний контроль температури в формувальній зоні пресу та включає: термоперетворювач опору ТОМ градування 50М (3-1); нормувальний перетворювач НПТ1 (3-2); мікропроцесорний регулятор МІК-21 (3-3).

Контур 4 забезпечує автоматичний контроль температури в калібрувальній зоні пресу та включає: термоперетворювач опору ТОП градування 50П (4-1); нормувальний перетворювач НПТ1 (4-2); мікропроцесорний регулятор МІК-21 (4-3).

Контур 5 забезпечує автоматичну реєстрацію тиску в апараті пресу та включає: манометр ДМ05063 (5-1); високоякісний перетворювач тиску S-10 (5-2); автоматичний показувальний і реєструвальний вторинний прилад ДИСК-250ТН(5-3).

Рис.1.4 Схема автоматизації процесу пресування вуглецевих виробів

Специфікація технічних засобів автоматизації на схему автоматизації процесу пресування вуглецевих виробів - Додаток Д1.



1.2.4

вка задачі

Постано

1. Проаналізувати спрощену математичну модель процесу пресування.
2. Дослідити процес пресування на основі математичної моделі.
3. Проаналізувати існуючі системи керування процесу пресування у виробництві вуглецевих виробів.
4. Створити систему керування на основі методу ітеративного навчання в процесі пресування вуглецевих виробів.
5. Порівняти метод керування на основі ітеративного навчання та систему керування з ППД –регулятором в процесі пресування вуглецевих виробів.
6. Розробити стартап-проект для процесу пресування у виробництві вуглецевих виробів.

II РОЗДІЛ. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПРЕСУВАННЯ ВУГЛЕЦЕВИХ ВИРОБІВ

2.1 Аналіз існуючих математичних моделей

Існуюча математична модель процесу пресування представлена у роботі [23]. Розроблена модель пресування враховує великі пластичні деформації в об'ємі. При цьому пружною деформацією інструменту і металу можна знехтувати.

Повна система рівнянь в'язко-пластичного неізотермічного течії сировини в Ейлеровій системі координат стосовно завдань обробки тиском включає в себе рівняння руху без урахування масових сил:

$$\sigma_{ij,j} = 0; \quad (1)$$

Кінематичне співвідношення:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(v_{i,j} + v_{j,i}); \quad (2)$$

визначаючи співвідношення, теорії пластичності Сен-Венана-Мізеса:

$$\dot{\sigma}_{ij} = \frac{2\bar{\sigma}}{3\bar{\varepsilon}}\dot{\varepsilon}_{ij}; \quad (3)$$

рівняння незжимання:

$$v_{i,i} = 0; \quad (4)$$

рівняння теплопровідності:

$$\rho c \dot{T} = (k_1 T, i), i + \beta \bar{\sigma} \dot{\varepsilon}. \quad (5)$$

А також реологічне рівняння, що зв'язує опір деформації зі ступенем деформації, швидкістю деформації і температурою:

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\varepsilon}, \dot{\varepsilon}, T) \quad (6)$$

Також моделюються теплові процеси в заготовці, тому для розрахунку температурного поля при деформації необхідно знати розподіл тепла в заготовці перед пресуванням, тобто початкові теплові граничні умови.

Граничні теплові умови для рівняння теплопровідності задаються у вигляді конвективного теплообміну і тепловіддачі випромінюванням на вільній поверхні, а також умов контактного теплообміну при зіткненні з інструментом з урахуванням виділення тепла на контакті матеріалу з інструментом внаслідок тертя. У загальному випадку при 3-х мірному перебігу всі компоненти тензора деформації не рівні нулю і повинні бути розраховані. Однак, оскільки тензор деформації є об'єктом, який дуже важко візуально уявити (візуалізувати), то для практичних цілей використовували простий показник інтенсивності деформації, або так звану ефективну деформацію, яка включає в себе всі компоненти деформації в наступному вигляді:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_x)^2 + 6(\varepsilon_{xy}^2 + \varepsilon_{yz}^2 + \varepsilon_{xz}^2)} \quad (7)$$

Назва ефективна деформація означає, що це комплексний параметр, який представляє міру всіх компонент деформації і відповідний деформації при простому стисненні без тертя. Аналогічним чином в моделі для візуалізації представлена швидкість деформації у вигляді ефективної швидкості деформації, яка представляє собою похідну від ефективної деформації і вимірюється в 1 / с. Напряга течії, що є аналогом межі текучості, яка зазвичай залежить від трьох параметрів: деформації, швидкості деформації та температури, задається в МПа, і представляє з себе криві зміцнення досліджуваного матеріалу. Оскільки параметри, що впливають на нього, розподілені в обсязі заготовлі нерівномірно, то напряга течії також нерівномірно. Модель також може розраховувати компоненти середніх напруг:

$$\sigma_{cp} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}. \quad (8)$$

Отже, математична модель дозволяє здійснювати пресування заготовки за кілька проходів з урахуванням еволюції накопиченої

деформації. Для створення запланованої системи керування необхідна математична модель, яка враховує всі теплові процеси, адже від них залежить якість кінцевого виробу, тому було створено нову математичну модель процесу пресування вуглецевих виробів.

2.2

Початкова математична модель

Математична модель процесу пресування вуглецевих виробів може бути представлена нестационарною нелінійною системою рівнянь. В даній системі рівнянь включено рівняння нерозривності, руху та енергії для ламінарного потоку нестисливої ідеальної рідини Bingham (1) для пресмаси та рівняння енергії з внутрішнім джерелом теплоти для елементів апарату пресу. В системі рівнянь задаються теплові параметри та характер їх зміни, швидкість пресування, а також зміна електричних параметрів нагрівників:

$$\begin{cases} \nabla \cdot \mathbf{v} = 0; \\ \rho \left[\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} \right] = -\nabla p + \nabla \cdot \bar{\bar{\tau}}; \\ \rho \left[\frac{\partial h}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{v}h) \right] = \nabla \cdot [\lambda_{eff}(T) \nabla T] + \bar{\tau} : \nabla \mathbf{v}, \end{cases} \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial h}{\partial t} = \nabla \cdot [\lambda_{eff}(T) \nabla T] + q_v \quad (2)$$

де \mathbf{v} – вектор швидкості, м/с, ∇ – оператор Гамільтона, м^{-1} , ρ – густина, кг/м^3 ,

t – час, с, p – тиск, Па, $\bar{\bar{\tau}}$ – тензор зсувних напружень, відповідно до моделі Bingham, Па, $h = \int_0^T c_p(T) dT$ – масова ентальпія, Дж/кг, T – абсолютна температура, К; c_p – масова ізобарна теплоємність, Дж/(кг·К); λ_{eff} –

ефективний коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К); $\bar{\tau} : \nabla \mathbf{v}$ – член, що відповідає дисипації механічної енергії, Вт/м³; $(:)$ – оператор подвійного скалярного добутку; q_v – об’ємна густина джерел теплоти, що пов’язана із джоулевою теплотою, Вт/м³.

Ідеальна рідина Bingham є ньютонівською в’язко-пластичною рідиною, під час течії якої в’язкість залежить від градієнта швидкості. В’язко-пластична рідина відрізняється тим, що вона до досягнення деякого критичного внутрішнього напруження (статичне напруження зсуву τ_{shear} поводить себе як тверде тіло і тільки при перевищенні внутрішнього напруження вище за критичну величину починає рухатися як звичайна рідина. Причиною такого явища є те, що в’язко-пластична рідина має просторову жорстку внутрішню структуру, що чинить опір будь-яким внутрішнім напруженням меншим за критичну величину.

Тензор зсувних напружень за моделлю Bingham записується у вигляді:

$$\begin{cases} \bar{\tau} = \left(\mu_{eff} + \frac{\tau_{shear}}{|\dot{\gamma}|} \right) \bar{\dot{\gamma}}, & |\tau| > \tau_{shear}; \\ \bar{\dot{\gamma}} = 0, & |\tau| \leq \tau_{shear} \end{cases} \quad (3)$$

Де μ_{eff} – ефективний коефіцієнт динамічної в’язкості, Па·с, τ_{shear} – статичне напруження зсуву матеріалу, Па; $\bar{\dot{\gamma}} = \sqrt{\frac{1}{2} II_{\dot{\gamma}}} = \sqrt{\frac{1}{2} (\dot{\gamma} : \dot{\gamma})}$ - другий варіант від $\dot{\gamma}$, с⁻¹; $\dot{\gamma} = \nabla \mathbf{v} + \mathbf{v} \nabla$ - швидкість деформації, с⁻¹; $|\tau| = \sqrt{\frac{1}{2} II_{\tau}} = \sqrt{\frac{1}{2} (\bar{\tau} : \bar{\tau})}$ - другий варіант від $\bar{\tau}$, Па.

Регуляризацію моделі Bingham за допомогою введення експоненціального множника, запропонованого в роботах Papantasiou:

$$\bar{\tau} = \left(\mu_{eff} + \frac{\tau_{shear}}{|\dot{\gamma}|} [1 - \exp(-m|\dot{\gamma}|)] \right) \bar{\dot{\gamma}}$$

де m – експоненціальний множник, с.

Для в'язко-пластичної вуглецевої маси використано значення експоненціального множника $m=100$.

За початкові умови системи рівнянь(1), (2) прийнято розподіл полів компонент вектора швидкості, тиску й температури;

$$\begin{cases} v_0 = v(x, y, z) \\ p_0 = p(x, y, z); \\ T_0 = T(x, y, z) \end{cases} (5)$$

де (x, y, z) – декартові координати, м.

Для врахування різних періодів процесу пресування застосовуються динамічні граничні умови 6-8. Дані граничні умови відображають зміни вхідних параметрів системи під час підпресування матеріалу, пресуванні окремих заготовок і простою для технологічних операцій, а також зміна режиму роботи нагрівальних елементів пресового інструменту.

Для маси, що рухається у внутрішньому просторі мундштука, задаються: у вхідному перерізі – нормальна швидкість і температура (6); у вихідному перерізі – нульовий градієнт тиску і температури (7); на поверхні контакту маса-елементи пресового інструменти – умови проковзування і умови абсолютного теплового контакту (8);

$$\begin{cases} n \cdot v = v_{inlet}(t) \\ T = T_{inlet}(t) \end{cases} (6)$$

$$\begin{cases} n \cdot \nabla p = 0 \\ n \cdot \nabla T = 0 \end{cases} (7)$$

$$\begin{cases} \bar{\tau}_{wall} = 0 \\ \{T\} = 0 \\ \{n \cdot q\} = 0 \end{cases} (8)$$

де n – зовнішня нормаль до вхідного чи вихідного перерізу; $\bar{\tau}_{wall}$ – тензор зсувних напружень на границі контакту маса – тверде тіло, Па; $\{T\} = T^+ - T^-$;

$$\{n \cdot q\} = n^- \cdot q^+ + n^+ \cdot q^-.$$

Для елементів пресового інструменту задаються : умови теплообміну з оточуючим середовищем, умови абсолютного теплового контакту та внутрішнє джерело теплоти.

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{n} \cdot (-\lambda(T)\nabla T) = \alpha_{eff}(T-T_{\infty}) \\ \{T\} = 0 \\ \{\mathbf{n} \cdot \mathbf{q}\} = 0 \\ q_v = q(t) \end{array} \right. \quad (9)$$

де T_{∞} - температура оточуючого середовища, К; α_{eff} - ефективний коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К); q_v – внутрішнє джерело теплоти, що вноситься електричними нагрівниками, Вт/м³.

Отже, проаналізувавши математичну модель процесу пресування можна зробити висновок, що вона складна, вимагає багато досліджень, багатоетапних розрахунків, тому актуальною є задача створення спрощеної математичної моделі процесу пресування вуглецевих виробів. За допомогою спрещеної математичної моделі ми зможемо створити оптимальну систему керування для даного процесу.

2.3

Спрощення математичної моделі процесу пресування вуглецевих виробів

2.3.1 Обґрунтування необхідності спрощення математичної моделі

Практично всі реальні об'єкти керування характеризуються певною просторовою протяжністю та, як наслідок цього, не тільки залежністю керованих величин від часу, але й їх розподіленістю у просторовій області, яку займає об'єкт. Тому мова має йти про системи з розподіленими параметрами (СРП), для яких зміна керованих величин як у часі, так і у просторі математично описується диференціальними рівняннями у частинних похідних, інтегральними, інтегро-диференціальними рівняннями або системами рівнянь самої різної природи. Сучасні комп'ютерні системи керування, як правило, будуються на основі математичних моделей керованих процесів. Однак навіть для найбільш простих об'єктів системи з розподіленими параметрами описуються точними математичними моделями достатньо складного виду. При цьому типовим наслідком моделювання поведінки СРП диференціальними рівняннями у частинних похідних є трансцендентний характер залежності відповідних передатних функцій від комплексної змінної або опис цієї залежності у вигляді нескінченних рядів [17] навіть відносно зосереджених вхідних діянь, що суттєво ускладнює їх аналіз та використання при синтезі систем керування. У більш складних випадках, наприклад, для просторово багатовимірних об'єктів зі складною формою границі області зміни просторових координат або при необхідності враховувати суттєві нелінійні ефекти, як правило, взагалі не вдається отримати аналітичний розв'язок рівнянь об'єкта [17]. Названі вище обставини призвели до широкого розповсюдження на практиці спрощених математичних моделей СРП, які описують їх поведінку з потрібною

точністю. У наш час розроблений цілий ряд методів побудови спрощених математичних моделей СРП. Всі вони можуть бути умовно поділені на дві основні групи згідно «предмету апроксимації» [17].

Перша група утворюється різними способами спрощеного представлення самих вихідних диференціальних рівнянь об'єкта, наступний розв'язок яких відомими методами дозволяє отримати задовільні за точністю у визначених конкретних умовах опису властивостей СРП у порівняно простому вигляді.

Методи другої групи базуються на наближеному представленні (як правило, у типовій для систем з зосередженими параметрами (СЗП) формі відповідних передатних функцій) точних розв'язків рівнянь у частинних похідних, які моделюють поведінку СРП.

Можливе послідовне застосування до однієї й тієї самої СРП різних методів апроксимації, що дозволяють, наприклад, спочатку перейти до спрощеного, що допускає точний аналітичний розв'язок, рівнянню об'єкта, для якого потім знайти дробово-раціональне наближення його передатної функції, що визначає результуюче наближення опису вихідної моделі об'єкта у вигляді типових моделей СЗП.

2.3.2

Спрощен

ня математичної моделі на основі методу Фур'є

Одним з найбільш ефективних методів побудови спрощеної математичної моделі СРП є метод розділення змінних (метод Фур'є) [17], що передбачає представлення функції декількох змінних (часу і просторових координат) у формі нескінченного ряду, кожний член якого являє собою добуток двох функцій однієї змінної – часу та просторової координати

$$T(\xi, t) = \sum_{i=1}^{\infty} a_i(t) \varphi_i(\xi), \quad (1)$$

де апріорі невідомі функції $a_i(t)$ та $\varphi_i(\xi)$ мають бути вибрані таким чином, щоб керована змінна $T(\xi, t)$ задовольняла граничним умовам задачі.

На практиці ряд (1) обмежують n членами

$$\hat{T}(\xi, t) = \sum_{i=1}^n a_i(t) \varphi_i(\xi) \quad (2)$$

і тоді задача апроксимації зводиться до визначення невідомих функцій $a_i(t)$ та $\varphi_i(\xi)$ із умови мінімізації певного функціонала похибки апроксимації та дослідженню збіжності $\hat{T}(\xi, t)$ до $T(\xi, t)$ при $n \rightarrow \infty$.

Однак існуючі методи не повністю задовольняють дослідників з різних причин: у зв'язку з обчислювальними труднощами як такими, не завжди виконуються умови збіжності обчислювальних процедур, складно оцінити похибку апроксимації тощо.

У зв'язку з цим, завдання дипломного проекту є на основі способу розділення змінних розроблення методу апроксимації математичних моделей СРП, який спрощує обчислювальні процедури та дозволяє оцінити похибку апроксимації.

Спрощення математичної моделі СРП полягає у апроксимації результатів розрахунків за початковими складними моделями менш складними моделями (моделями із меншою кількістю рівнянь). Таким чином, для проведення апроксимації спочатку треба розрахувати змінні $T(\xi, t)$ (зразки) при різних значеннях вхідних змінних $u(t)$ за допомогою початкової математичної моделі. Для формування більш представницьких зразків доцільно сигнал $u(t)$ вибрати у вигляді послідовності псевдовипадкових двійкових сигналів [18]. Отримані у результаті розрахунків зразки доцільно представити у вигляді матриці

$$T_{\text{зраз}}(k) = \begin{pmatrix} \tilde{T}(\varepsilon_1, t_1) & \tilde{T}(\varepsilon_1, t_2) & \dots & \tilde{T}(\varepsilon_1, t_k) \\ \tilde{T}(\varepsilon_2, t_1) & \tilde{T}(\varepsilon_2, t_2) & \dots & \tilde{T}(\varepsilon_2, t_k) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \tilde{T}(\varepsilon_N, t_1) & \tilde{T}(\varepsilon_N, t_2) & \dots & \tilde{T}(\varepsilon_N, t_k) \end{pmatrix} \quad (3)$$

Ці дані по суті є рядом полів просторових змінних, що складаються з N точок, розрахованих для K моментів часу, які містять у собі інформацію щодо динаміки досліджуваного об'єкту.

Розрахунок розподілених у просторі змінних, що визначають стан досліджуваного процесу, здійснюється за формулою (2). Змінні $T(\xi, t)$ виражаються у вигляді ряду ортонормованих базисних векторів (БВ) $\varphi_i(\xi)$ координати ξ , кожна з яких помножена на функцію часу $a_i(t)$ (коефіцієнти Фур'є).

Далі буде використовуватись наступний запис:

$$a(k) := \text{col}\{a_i(t_k)\}_{i=1}^N \quad (4)$$

$$T(k) := \text{col}\{\tilde{T}(\varepsilon_1, t_k)\}_{i=1}^N \quad (5)$$

$$\varphi_i := \text{col}\{\tilde{\varphi}_i(\varepsilon_1)\}_{i=1}^N \text{ та } \Phi := (\varphi_1 \ \varphi_2 \ \dots \ \varphi_N). \quad (6)$$

Із урахуванням цього рівняння (2) можна записати так:

$$T(k) = \Phi a(k) \quad (7)$$

Оскільки стовпчики Φ формують ортонормований базис, то матриця Φ є ортогональною, що означає $\Phi^T \Phi = \mathbf{I}_N$, де \mathbf{I}_N – одинична матриця $N \times N$. Права частина рівняння (7) містить N базисних векторів і N коефіцієнтів Фур'є. Цей ряд базисних векторів $\{\varphi_i\}_{i=1}^N$ та відповідний ряд коефіцієнтів Фур'є $\{a_i(k)\}_{i=1}^N$ будуть розділені на ряд із n базисних векторів $\{\varphi_i\}_{i=1}^n$ із коефіцієнтами, які визначають апроксимацію $\tilde{T}(k) := \sum_{i=1}^n a_i(k) \varphi_i$ та ряд із $N-n$ базисних векторів $\{\varphi_i\}_{i=n+1}^N$ із коефіцієнтами, що формують ряд Фур'є вектора похибок.

$$\varepsilon_n(k) := T(k) - \tilde{T}(k) = \sum_{i=n+1}^N a_i(k) \varphi_i$$

Через ортогональність матриці Φ вага кожного елемента $\varphi_i a_i$ визначається коефіцієнтами:

$$\|\mathbf{T}\|_2^2 = \sum_{k=1}^K \mathbf{T}^T(k) \mathbf{T}(k) = \sum_{k=1}^K a^T(k) \Phi^T \Phi a(k) = \|a\|_2^2 = \|a_1\|_2^2 + \|a_2\|_2^2 + \dots + \|a_N\|_2^2$$

Для заданих змінних $\{\tilde{T}(k)\}_{k=1}^K$ базисним вектором є такий вектор $\{\varphi_i\}_{i=1}^N$, l_2 -норма коефіцієнтів Фур'є якого задовольняє

$$\|a_1\|_2^2 \geq \|a_2\|_2^2 \geq \dots \geq \|a_N\|_2^2 \quad (8)$$

Це означає, що для будь-якої довжини ряду n , «енергія» $\sum_{i=1}^n \|a_i\|_2^2$ в перших n коефіцієнтах Фур'є є максимальною.

Таким чином, якщо ряд Фур'є обмежується n – членами так, що:

$$T(k) = \Phi a(k) = \begin{bmatrix} \Phi_n & \Phi_{kin} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_n(k) \\ a_{kin}(k) \end{bmatrix}, \quad (9)$$

то квадрат l_2 - норми вектора змінних можна записати як

$$\|T\|_2^2 = \|a_n\|_2^2 + \|a_{kin}\|_2^2 = \|a_n\|_2^2 + \|\varepsilon_n\|_2^2,$$

де $a_n(k) \in \mathbf{R}^n$ – вектор, що містить перші n коефіцієнтів Фур'є, $a_{kin}(k) \in \mathbf{R}^{N-n}$ – вектор, що містить останні $N-n$ коефіцієнтів Фур'є та $\varepsilon_n(k) \in \mathbf{R}^N$, $\varepsilon_n(k) = \phi_{kin} a_{kin}$ – вектор похибок, отриманих внаслідок обмеження ряду. Базисним вектором для такого обмеженого ряду є вектор, що призводить до мінімізації l_2 - норми вектора похибок $\|\varepsilon_n\|_2$.

Для побудови спрощеної моделі (2) потрібно визначити БВ та коефіцієнти Фур'є. БВ $\varphi_i(\xi)$ розраховуються із даних, що сформували матрицю (3). Після цього, рівняння моделі мають бути перетворені на залежність між входами моделі $u(t)$ і коефіцієнтами Фур'є $\{a_i(t)\}_{i=1}^n$. На цьому етапі застосовуються алгоритми системної ідентифікації [19]. Алгоритмами системної ідентифікації визначаються невідомі параметри вибраної структури моделі (наприклад, ряд лінійний алгебраїчних або різницевих рівнянь) на основі даних імітаційного моделювання.

Таким чином, процес спрощення моделі поділяється на два етапи:

1. Визначення
 ряду БВ $\{\varphi_i(\xi)\}_{i=1}^n$ на основі набору даних моделювання $\{\tilde{u}(t_k), \tilde{T}(\varepsilon, t_k)\}_{k=1}^K$, де K – кількість кроків за часом у процесі моделювання. Знак \sim означає, що дані отримані як результат імітаційного моделювання.
2. Вибір
 структури моделі залежності між $u(t)$ та $\{a_i(t)\}_{i=1}^n$ та визначення невідомих параметрів цієї моделі на основі даних $\{\tilde{u}(t_k)\}_{k=1}^K$ та

$\{\tilde{a}_1(t_k), \dots, \tilde{a}_n(t_k)\}_{k=1}^K$, де $\tilde{a}_1(t_k)$ можуть бути розраховані із $\varphi_i(\xi)$ та $\tilde{T}(\varepsilon, t_k)$. Після того, як будуть визначені всі параметри, буде отримана спрощена модель, за допомогою якої можна передбачати зміну у часі коефіцієнтів Фур'є в залежності від траєкторії вхідного сигналу $u(k)$.

Як буде показано нижче, перший крок виконується методами ортогональної декомпозиції набору значень змінних процесу, отриманих у результаті моделювання. Другий крок може бути виконаний двома способами:

- застосуванням методу Гальоркіна [20] до рівнянь початкової складної моделі з метою отримання меншого набору з n рівнянь.
- застосуванням методу системної ідентифікації для отримання ряду $\{\tilde{a}_i(t)\}_{i=1}^n$ із подальшим знаходженням моделі, що найкраще апроксимує зміну $\tilde{a}_i(t)$ у часі при дії відповідного вхідного сигналу $u(t_k)$.

2.3.3

Опис

програми для отримання спрощеної моделі в програмному середовищі MATLAB

В складній моделі досліджуваного процесу пресування існує три вхідних сигнали, які характеризують наявність чи відсутність напруги на нагрівальних елементах: індуктор формуючої зони мундштука, індуктор калібрувальної зони мундштука та свічки для додаткового нагрівання кутів калібрувальної зони.

Використано програмний комплекс призначений для моделювання процесу пресування вуглецевих заготовок на прошивному пресі через мундштук. Програмний комплекс дозволяє моделювати процес пресування заготовок, з урахуванням різних параметрів: часу пресування, часу простою, налаштувань роботи нагрівальних пристроїв (індукторів, свічок) і ін. Процес пресування має виражений циклічний характер. Внаслідок цього зміна температур в обсязі маси і мундштука після кількох «завантажень» виходить на усталений режим, що повторюється.

Чисельна модель розглядає даний процес як багаторазове повторення циклу пресування, який складається з таких етапів: рух маси, закінчення рух маси, опускання плити, простий (прогрівання свіжої маси), всі етапи супроводжуються включенням / виключенням індукторів і нагрівальних свічок.

Як результат моделювання приймаються дані, отримані на останньому розрахунковому циклі.

Вихідні сигнали моделі - температури поверхні формувальної та калібрувальної зони мундштука (T_1 та T_2 відповідно), верхнього лівого та нижнього правого кута калібруювальної зони мундштука (T_3 та T_4

відповідно). Для отримання температурних «знімків» на вхід складної моделі було подано послідовність випадкових вхідних сигналів.

Користуючись програмними засобами MATLAB написано програму (Додаток Д2), за допомогою якої можна розкласти температурні «знімки» за допомогою методу Фур'є.

В програмному забезпеченні MATLAB створено `ident workspace` – масиви з даними, з якими ми працюємо.

Матриці A1-9 - матриці коефіцієнтів Фур'є для відповідного числа членів розкладу (2), (п.2.3.2) .

A_1-9 – транспоновані матриці A1-9;

FI_1-9 - матриці базис векторів (для n=1-9);

X0,X02,X03,X04 - значення змінних стану в початковий момент для моделей ідентифікації з n=1-4;

argXXX (де XXX - різні числа) - моделі ідентифікації для n=1-4 (arg150 - n=1; arg325 - n=2; arg324 - n=3; arg121 - n=4);

er - вектор, елементи якого - квадратичні похибки від апроксимації температур методом Фур'є для n=1-9 (перший елемент n=1, другий n=2 і тд);

in - матриця з трьох рядків, кожен з яких - сигнал, що подавався на вхід складної моделі (перший рядок u1 і тд.);

in1 - та ж матриця, але транспонована;

mss - ті ж моделі ідентифікації, але перетворені в моделі в просторі станів (з ними краще працювати);

out - матриця температур в контрольних точках (T1-T4) отримані з складної моделі;

outarg_1-9 - матриці температур, отримані з апроксимації температур n=1-9 першими членами розкладу (2), (п.2.3.2);

outmodell1-4 - матриці температур, отримані з спрощених моделей з $n_m = 1-4$.

Обраємо перших дев'ять n членів ряду розкладу (2), (п.2.3.2), $n=9$.
Коефіцієнти Фур'є визначаються:

$$A = [a(1) \quad a(2) \quad \dots \quad a(K)] = \Phi^T T$$

де Φ - матриця, що складається з базис векторів.

Для визначення базис-векторів φ_i використовуємо розклад за сингулярними числами. Потрібно оцінити якість розкладу для обраних $n=9$ членів ряду розкладу (2), (п.2.3.2).

Таблиця 2.1. Значення базис-векторів, що використовуються для апроксимації

ξ_i	1	2	3	4
1	0,4841	0,4832	0,5139	0,5175
2	-0,5008	-0,4082	0,7568	0,0981
3	-0,0434	-0,4377	-0,3711	0,8178
4	0,7160	-0,6389	0,1593	-0,2315
5	$-8,877 \cdot 10^{-6}$	$7,134 \cdot 10^{-6}$	$-2,102 \cdot 10^{-6}$	$3,754 \cdot 10^{-6}$
6	$-2,714 \cdot 10^{-6}$	$2,540 \cdot 10^{-6}$	$1,732 \cdot 10^{-7}$	$-1,173 \cdot 10^{-8}$
7	$-3,689 \cdot 10^{-6}$	$2,753 \cdot 10^{-6}$	$-1,186 \cdot 10^{-6}$	$2,071 \cdot 10^{-6}$
8	$1,733 \cdot 10^{-6}$	$-2,153 \cdot 10^{-6}$	$5,688 \cdot 10^{-9}$	$3,457 \cdot 10^{-7}$
9	$-1,720 \cdot 10^{-6}$	$9,824 \cdot 10^{-7}$	$-7,737 \cdot 10^{-7}$	$1,508 \cdot 10^{-6}$

Таблиця 2.2. Значення коефіцієнтів Фур'є, що використовуються для апроксимації

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	259,175	2,205	-0,749	0,031	$2,538 \cdot 10^{-6}$	$6,43 \cdot 10^{-7}$	$6,27 \cdot 10^{-6}$	$-5,67 \cdot 10^{-6}$	$5,50 \cdot 10^{-6}$
2	259,283	2,643	-0,406	0,011	$3,304 \cdot 10^{-6}$	$5,45 \cdot 10^{-7}$	$1,11 \cdot 10^{-6}$	$-5,31 \cdot 10^{-6}$	$5,96 \cdot 10^{-6}$
3	259,282	2,779	0,088	-0,045	$4,58 \cdot 10^{-6}$	$2,81 \cdot 10^{-7}$	$1,94 \cdot 10^{-6}$	$-4,88 \cdot 10^{-6}$	$6,67 \cdot 10^{-6}$
4	259,620	2,226	0,315	-0,066	$4,93 \cdot 10^{-6}$	$-1,36 \cdot 10^{-6}$	$2,29 \cdot 10^{-6}$	$-4,71 \cdot 10^{-6}$	$6,98 \cdot 10^{-6}$
5	259,962	1,509	0,391	-0,052	$4,62 \cdot 10^{-6}$	$-5,94 \cdot 10^{-7}$	$2,28 \cdot 10^{-6}$	$-4,62 \cdot 10^{-6}$	$7,03 \cdot 10^{-6}$
6	260,224	0,877	0,365	-0,015	$3,95 \cdot 10^{-6}$	$-9,86 \cdot 10^{-7}$	$2,05 \cdot 10^{-6}$	$-4,59 \cdot 10^{-6}$	$6,90 \cdot 10^{-6}$

								6	
	260 ,391	0, 364	0, 270	0, 032	3,11· 10 ⁻⁶	- 1,28·10 ⁻⁶	1,69· 10 ⁻⁶	- 4,61·10 ⁻⁶	6,67 ·10 ⁻⁶
	260 ,484	- 0,046	0, 136	0, 079	2,26· 10 ⁻⁶	- 1,49·10 ⁻⁶	1,29· 10 ⁻⁶	- 4,67·10 ⁻⁶	6,40 ·10 ⁻⁶
	260 ,525	- 0,402	0, 002	0, 114	1,58· 10 ⁻⁶	- 1,63·10 ⁻⁶	9,60· 10 ⁻⁷	- 4,75·10 ⁻⁶	6,16 ·10 ⁻⁶
0	260 ,547	- 0,723	- 0,113	0, 132	1,13· 10 ⁻⁶	- 1,72·10 ⁻⁶	7,32· 10 ⁻⁷	- 4,85·10 ⁻⁶	5,97 ·10 ⁻⁶
1	260 ,119	- 0,608	0, 030	0, 104	1,65· 10 ⁻⁶	- 1,72·10 ⁻⁶	1,03· 10 ⁻⁶	- 4,75·10 ⁻⁶	6,20 ·10 ⁻⁶
2	259 ,637	- 0,432	0, 217	0, 054	2,52· 10 ⁻⁶	- 1,66·10 ⁻⁶	1,49· 10 ⁻⁶	- 4,64·10 ⁻⁶	6,52 ·10 ⁻⁶
3	259 ,661	- 0,752	0, 135	0, 027	2,66· 10 ⁻⁶	- 1,62·10 ⁻⁶	1,53· 10 ⁻⁶	- 4,82·10 ⁻⁶	6,48 ·10 ⁻⁶
4	259 ,777	- 1,185	- 0,033	0, 019	2,44· 10 ⁻⁶	- 1,61·10 ⁻⁶	1,37· 10 ⁻⁶	- 5,06·10 ⁻⁶	6,30 ·10 ⁻⁶
5	259 ,359	- 1,161	0, 009	- 0,008	2,82· 10 ⁻⁶	- 1,55·10 ⁻⁶	1,56· 10 ⁻⁶	- 5,07·10 ⁻⁶	6,40 ·10 ⁻⁶
6	258 ,808	- 1,019	0, 082	- 0,042	3,35· 10 ⁻⁶	- 1,44·10 ⁻⁶	1,81· 10 ⁻⁶	- 5,05·10 ⁻⁶	6,56 ·10 ⁻⁶
7	258 ,726	- 1,323	- 0,100	- 0,047	3,11· 10 ⁻⁶	- 1,36·10 ⁻⁶	1,63· 10 ⁻⁶	- 5,29·10 ⁻⁶	6,35 ·10 ⁻⁶
8	258 ,302	- 1,281	- 0,104	- 0,063	3,31· 10 ⁻⁶	- 1,28·10 ⁻⁶	1,70· 10 ⁻⁶	- 5,33·10 ⁻⁶	6,37 ·10 ⁻⁶
9	257 ,845	- 1,106	- 0,060	- 0,087	3,70· 10 ⁻⁶	- 1,16·10 ⁻⁶	1,87· 10 ⁻⁶	- 5,32·10 ⁻⁶	6,47 ·10 ⁻⁶
0	257 ,924	- 1,340	- 0,251	- 0,083	3,37· 10 ⁻⁶	- 1,08·10 ⁻⁶	1,64· 10 ⁻⁶	- 5,54·10 ⁻⁶	6,23 ·10 ⁻⁶

								6	
1	257 ,670	- 1,252	- 0,231	- 0,100	3,62· 10 ⁻⁶	- 9,99·10 ⁻⁷	1,75· 10 ⁻⁶	- 5,55·10 ⁻⁶	6,29 ·10 ⁻⁶

Відобразимо графічно залежність середньоквадратичної похибки апроксимації від кількості членів ряду (2), (п. 4.2) , що використовуються для апроксимації. Апроксимація дозволяє досліджувати числові характеристики і якісні характеристики об'єкта, зводячи завдання до вивчення більш простих або більш зручних об'єктів. Похибку розраховуємо за формулою:

$$E = \frac{\sum(T_{apr}-T_{out})^2}{84},$$

де T_{apr} – матриці температур, отримані з апроксимації температур $n=1-9$;

T_{out} – матриця температур в контрольних точках (Т1-Т4), отримана зі складної моделі. На графіку зображено: E – середньоквадратична похибка апроксимації, n – кількість членів ряду (2), (п.2.3.2).

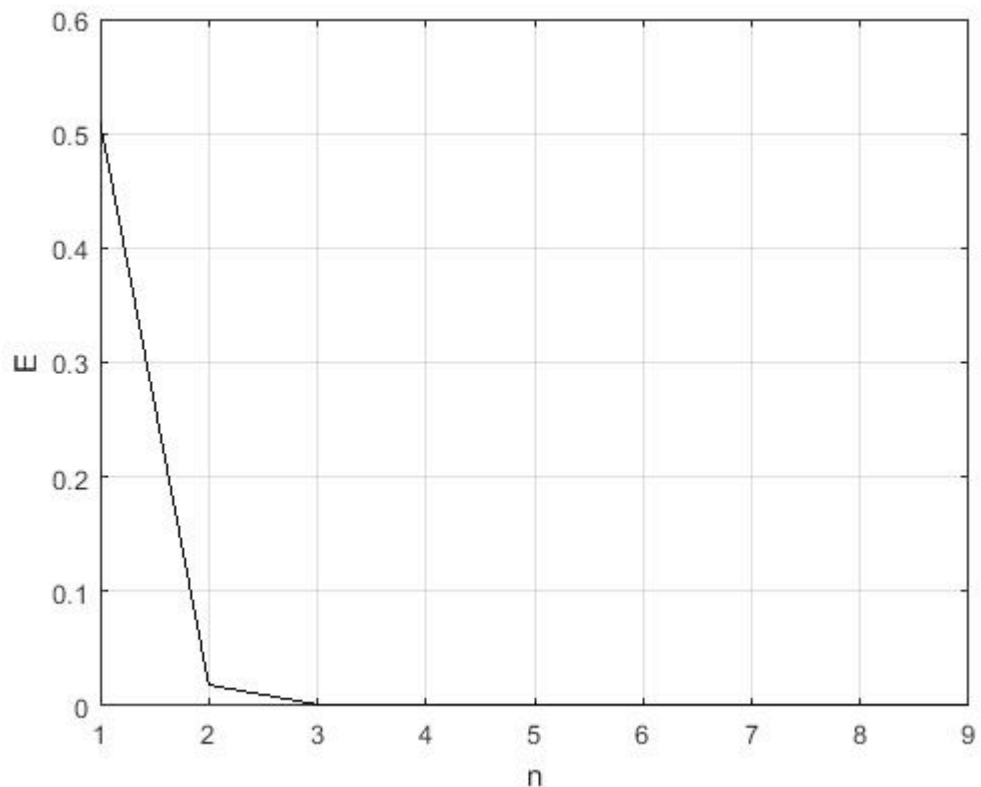


Рис.2.1 Залежність похибки апроксимації від кількості членів ряду (2), (п.2.3.2)

Обираємо n_m , максимально необхідна кількість членів ряду (2), за якої досягається максимальна точність відтворення «знімків». З графіку можемо визначити, що для подальших досліджень приймаємо $n_m=4$.

Ідентифікація залежностей між отриманими значеннями коефіцієнтів Фур'є та вхідними сигналами $u(t)$ проводиться за допомогою Identification Toolbox для $n=1..n_m$. На початку ідентифікації, з workspace обираємо масиви значень коефіцієнтів Фур'є та вхідними сигналами $u(t)$, спостерігаємо за залежностями при зміні моделі. За допомогою Estimate – Polynomial models потрібно обрати модель, яка найточніше описують зв'язок між значеннями коефіцієнтів Фур'є та вхідними сигналами моделі. Найкращий результат з усіх варіантів показали ARX моделі авторегресії зі структурою типу:

$$Ay(t) = Bu(t) + e(t)$$

За допомогою Validation Data перевіriamo точність обраних порядків для поліномів ARX моделі авторегресії. Обираємо Model Output і

отримуємо дані ідентифікаційних моделей, в полі Best Fits зображено досліджувані моделі з порядками їх поліномів та точність у відсотках з порівняною моделлю.

na – порядок полінома A ARX моделі;

nb – порядок полінома B ARX моделі;

nk – запізнювання від входу до виходу.

В таблиці 3 наведено дані про набори оптимальних ідентифікаційних моделей для кожного з n_m та їх точність.

Таблиця 2.3 Дані про оптимальні ідентифікаційні моделі

n_m	na	nb	nk	Точність моделі, %
1	1	5	0	99,86
2	3	2	5	97,54
3	3	2	4	97,20
4	1	2	1	88,31

2.3.4 Аналіз спрощеної моделі процесу пресування

Апарат пресування – об'єкт із розподіленими параметрами, що зумовлює використання спрощеної математичної моделі для даного процесу. Отримання спрощеної математичної моделі складається з декількох етапів, тому необхідно перевірити якість створеної математичної моделі для її подальшого використання в розробці системі керування технологічним процесом.

Для дослідження якості роботи спрощених моделей процесу формування вуглецевих виробів:

1. Перетвор
уюємо знайдену ідентифікаційну модель на модель в просторі станів.
2. Знаходим
о початковий стан моделі.
3.
Симулюємо роботу ідентифікаційної моделі при наших вхідних сигналах, отримуємо коефіцієнти Фур'є.
4.
Розраховуємо вихідні дані (температури) для даної моделі.

Після дослідження якості кожної спрощеної математичної моделі ми можемо обрати правильну, яка максимально точно відображає заданий технологічний процес.

2.4 Дослідження процесу пресування на основі математичної моделі (температурні поля)

Після розрахунку всіх даних для отримання спрощеної моделі, ідентифікації залежностей між отриманими значеннями коефіцієнтів Фур'є та вхідними сигналами $u(t)$, розрахунку вихідних даних (температури) для чотирьох моделей, проведемо дослідження отриманих результатів моделювання процесу за допомогою спрощених моделей та температур, отриманих з складної моделі зображені на рис.2.2 -2.5

На графіках по осі ординат відкладена T – температура, по осі абсцис – i – крок по часу.

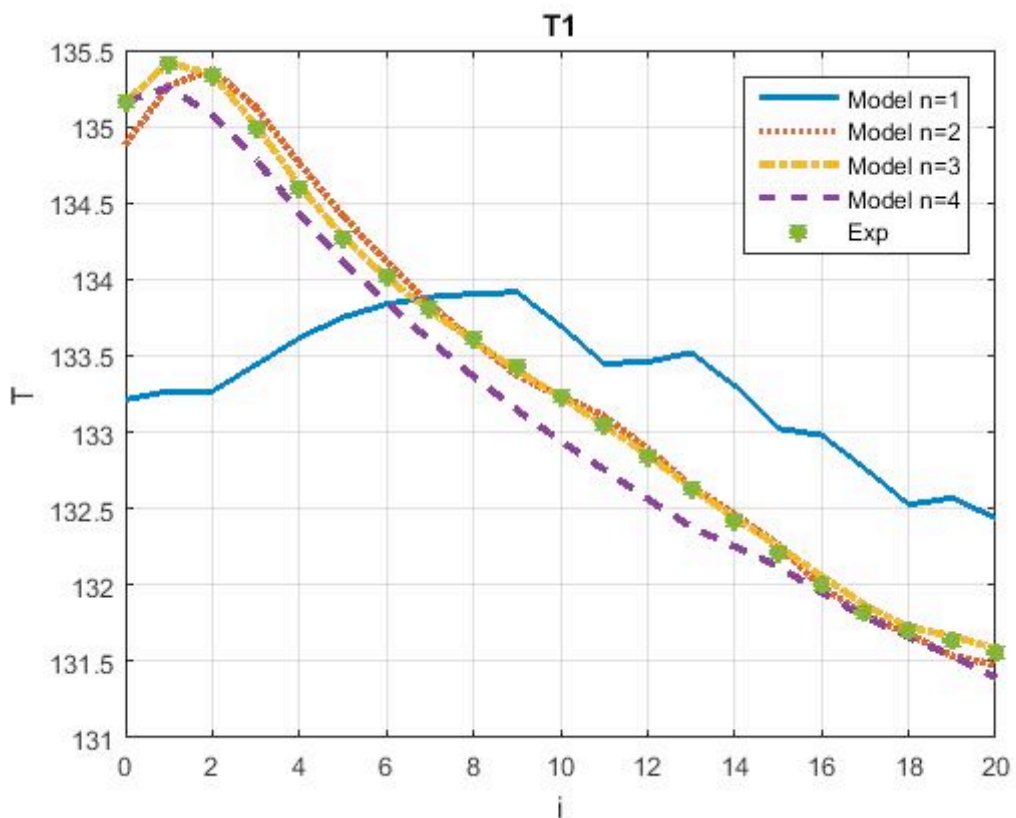


Рис.2.2 Значення $T1$ складної моделі(експериментальні точки) та спрощених моделей

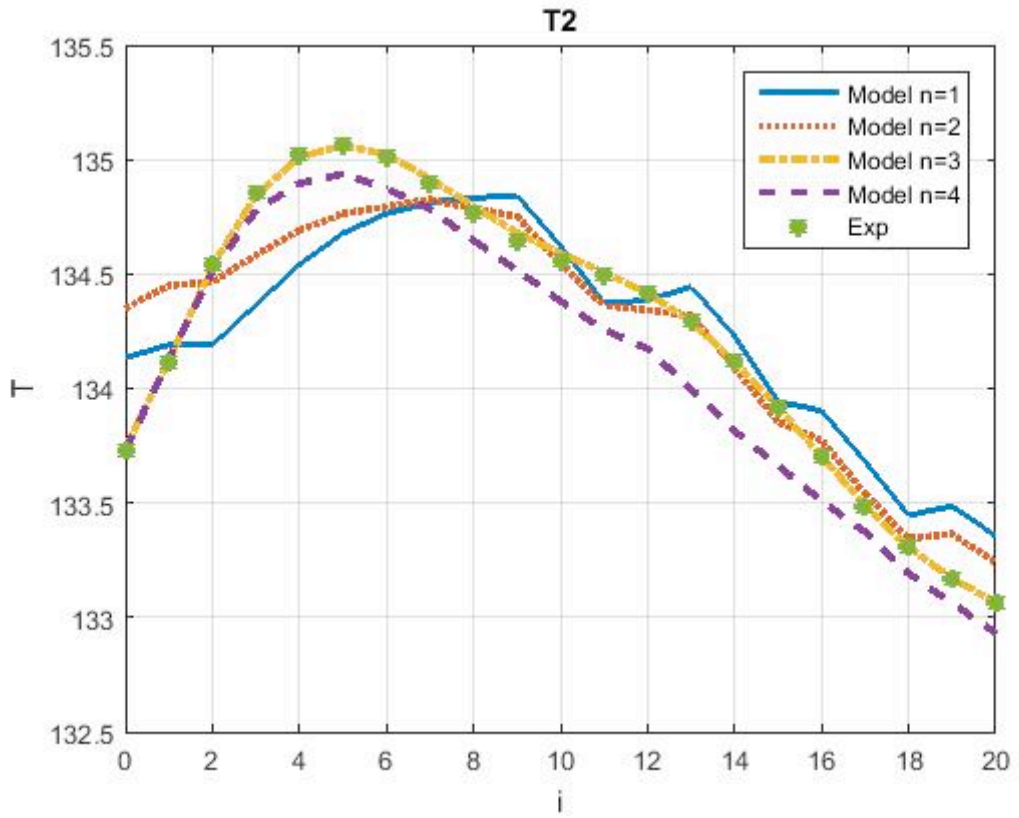
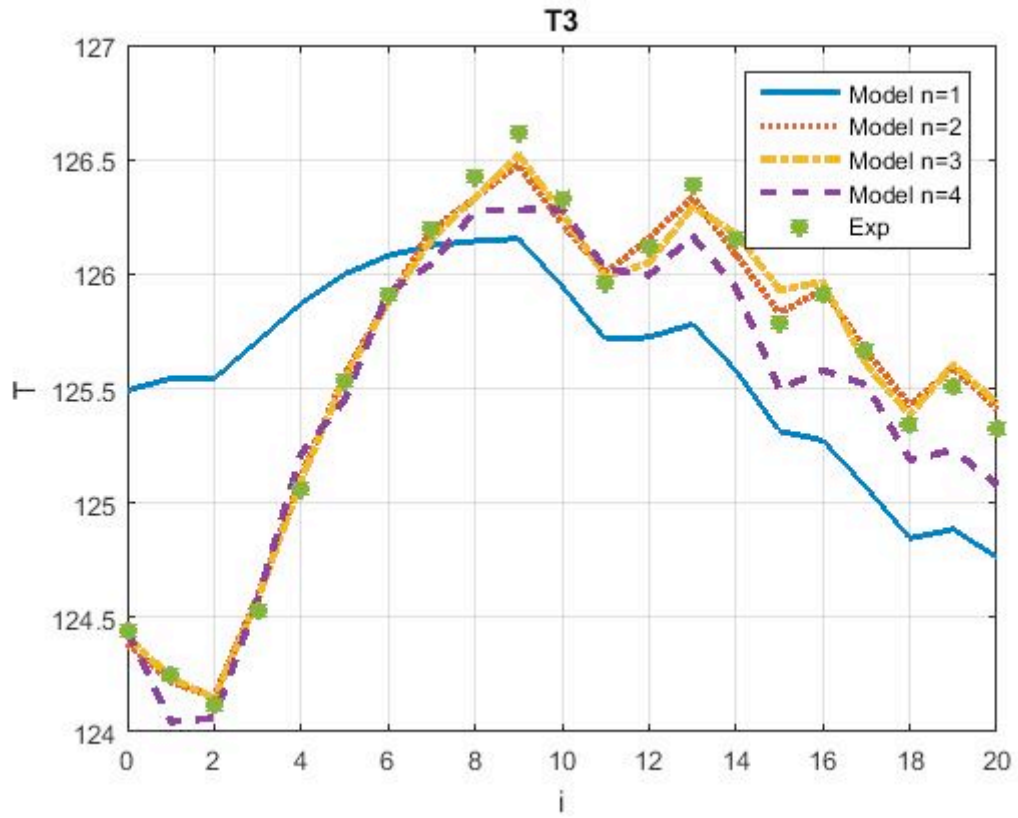


Рис.2.3 Значення T_2 складної моделі (експериментальні точки) та спрощених моделей



P

ис.2.4 Значення T3 складної моделі(експериментальні точки) та спрощених моделей

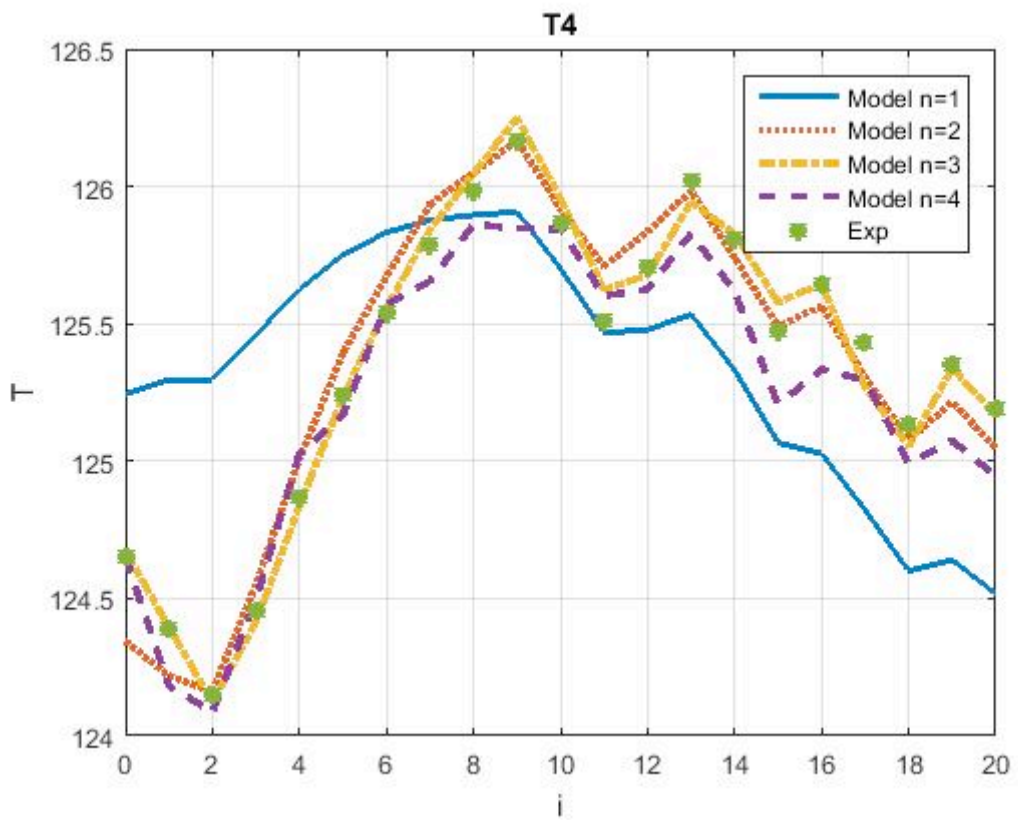


Рис.2.5 Значення T4 складної моделі(експериментальні точки) та спрощених моделей

Розраховано середньоквадратичні похибки відтворення температурних «знімків» для кожної отриманої моделі (табл.4).

Похибку розраховуємо за формулою:

$$E = \frac{\sum(T_{mod}-T_{out})^2}{84},$$

де T_{mod} – матриці температур, отримані з спрощених моделей $n_m=1-4$;

T_{out} – матриця температур в контрольних точках (T1-T4), отримана зі складної моделі.

Зобразимо на графіку відповідність середньоквадратичної похибки відтворення температурних «знімків» для кожної моделі:

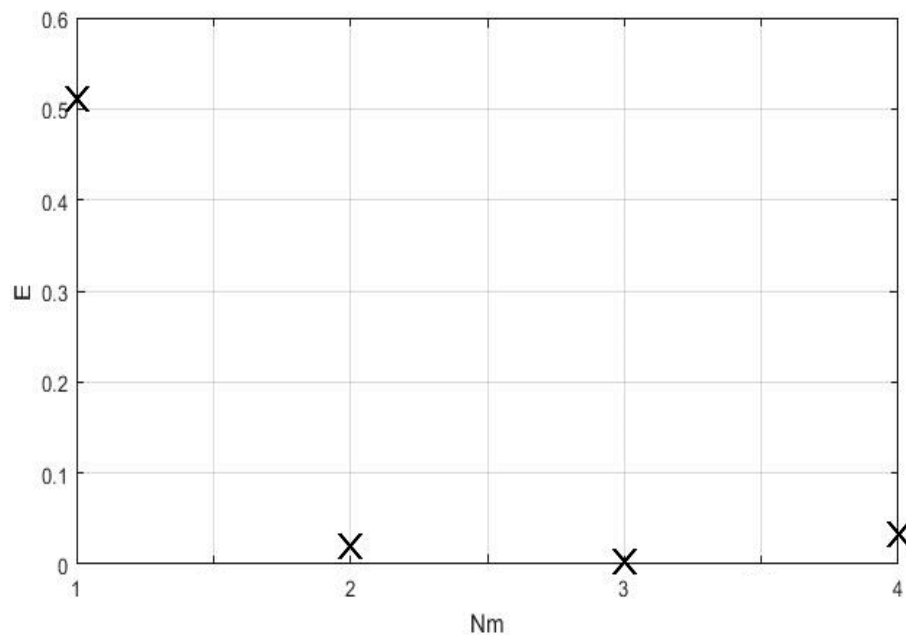


Рис.2.6 Відповідність середньоквадратичної похибки відтворення температурних «знімків»

E – середньоквадратична похибка відтворення температурних «знімків»,

Nm – спрощена модель (1-4).

Таблиця 2.4 Середньоквадратичні похибки відтворення температурних «знімків»

n_m	1	2	3	4
Похибка	0.5101	0.0189	0.0024	0.0335

Після проведених досліджень, аналізуючи отримані графіки та середньоквадратичні похибки можемо сказати, що найкращою моделлю для нашої початкової моделі є модель з $n=3$, похибка має значення 0.0024. Модель з $n=2$ має більшу похибку при ідентифікації 0.0189, але наближено до моделі з $n=3$ описує початкову модель. Модель з $n=1$ показала низьку точність апроксимації та велику похибку ідентифікації.

Хоча модель з $n=4$ має високу точність апроксимації, але присутня велика похибка при ідентифікації порівняно з іншими моделями.

Отже, дослідження структури спрощеної моделі для процесу пресування показало, що на вибір моделі, яка найбільш точно описує початкову модель впливає не тільки похибка при апроксимації перших членів розкладу методом Фур'є, а й вибір структури моделі ідентифікації та похибка відтворення температурних «знімків». Це дає змогу правильно обрати спрощену модель для подальшої розробки систем керування процесу.

III РОЗДІЛ. СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ПРЕСУВАННЯ У ВИРОБНИЦТВІ ВУГЛЕЦЕВИХ ВИРОБІВ

3.1 Аналіз існуючих систем керування.

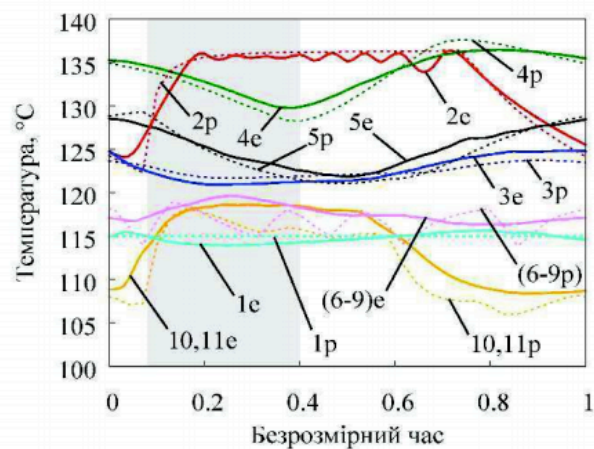
Існують числові дослідження процесу пресування вуглецевих виробів проведені з використанням експериментальних даних, що отримані на промисловому пресі [21].

Методи числового аналізу дозволяють оцінити вплив на тепловий стан та показники пресування вуглецевих виробів таких параметрів:

- швидкість пресування;
- потужність нагрівника в 3-х температурних зонах;
- температуру маси, що завантажується.

Проведена серія числових розрахунків із варіюванням окремих параметрів при сталому значенні всіх інших величин та режиму роботи апарату пресування.

Для числової реалізації математичної моделі [21] застосовано метод скінченних об'ємів. Числові дослідження процесу пресування вуглецевих виробів проведені з використанням експериментальних даних, що отримані на промисловому пресі.



Т. 1–11 – точки вимірювання температури; e – осереднене експериментально визначене значення температури; p – температура, що отримана в результаті моделювання

Рис.3.1 Розрахунки та експериментальні дані по точках вимірювання температури для кампанії пресування

На рис.3.1 зображено порівняння результатів розрахунків та експериментальних даних по точках вимірювання температури для кампанії пресування.

Порівняння результатів показують збіжність 4-6%, що є задовільними для проведення процесу пресування вуглецевих заготовок. Однак при дослідженні були змінені інші параметри заготовок, такі як швидкість пресування та потужність, що не призводить до безбракової продукції.

Здійснене порівняння розрахункових та експериментальних даних та визначені фактори, які впливають на безбракову продукцію. Досліджено параметри, які здійснюють вплив на перебіг процесу, а саме на потужність нагрівника, швидкість пресування заготовок, температуру маси, що завантажується. Однак варіації значень параметрів призводять до змін в процесі, які перевищують допустиму похибку для якісної продукції вуглецевих виробів [21].

Метою магістерської дисертації є реалізація методу керування, який буде забезпечувати якість кінцевого технологічного продукту, оптимальність та енергоефективність процесу пресування вуглецевих виробів. Одним з таких методів є керування з ітеративним навчанням *ILC* (*Iterative Learning Control*), за допомогою якого керування з кожною ітерацією покращується та вихідні параметри наближаються до заданих.

Проаналізовано систему керування з ітеративним навчанням, яку представлено у роботі [22]. Запропонований алгоритм керування з ітеративним навчанням, показав, що керування, яке покращується від однієї ітерації до наступної значно підвищує ефективність процесу в умовах початкових невизначеностей.

Тому доцільним є застосування даного методу для досліджуваного об'єкту автоматизації апарату пресування та спрощеної математичної моделі процесу пресування у виробництві вуглецевих виробів. Завданням є вибір закону керування для методу керування з ітеративним навчанням та визначення вагових коефіцієнтів, які будемо використовувати для методу *ILC*.

3.2 Керування з ітеративним навчанням (ILC)

3.2.1 Обґрунтування використання методу керування з ітеративним навчанням

Ітеративний метод навчання – це відносно нова концепція в теорії керування. Метод відомий приблизно протягом двох десятиліть та було доведено, що керування з ітеративним навчанням покращує ефективність класичного контролю зворотного зв'язку. Він виник з необхідністю контролювати динамічні системи, яку передбачають виконання задач, що повторюються і більш конкретно для систем, де бажані вихідні значення є функцією часу і завдання виконується багаторазово (повторно). Класичним прикладом є робот в автомобільній промисловості, що дотримується заданої траєкторії і з'єднується (зварює) в конкретних точках впродовж траєкторії. Як правило, робот налаштовується один раз через зворотній зв'язок або керування з прямою передачею (з прогнозуванням, по збуренню) або навіть поєднання обох. Після налаштування, будуть здійснюватись повторення, що виконуються однаково. Очевидним недоліком цього підходу, що якщо похибка між виміряною траєкторією та еталонною траєкторією обумовлена неправильним вибором траєкторії руху вхідного сигналу, то робот буде повторювати цю похибку в кожній спробі, тобто якщо є похибка у виконанні, то вона буде повторюватись на кожній ітерації.

Щоб подолати цю проблему, один з винахідників ILC, Арімото висловив припущення, що як інформація з попередніх завдань чи пробних так і інформація з поточного завдання повинна використовуватись для покращення дії керування під час поточного випробування. Іншими словами, контролер повинен ітеративно вивчати коректні дії керування, щоб мінімізувати різницю між вихідним та заданим сигналом. Він назвав це метод «процес покращення». Цей підхід можна назвати імітацією навчального процесу кожного розумної істоти. Інтелектуальні істоти

прагнуть вчитися, виконуючи пробний процес (наприклад, вибір контрольного входу) та спостереження за кінцевим результатом вибору цього контрольного входу. Після цього вони намагаються змінити свою поведінку (тобто отримати новий контрольний вхід), щоб отримати більш високу продуктивність під час наступного випробування.

Основа загальної ідеї ІЛС – процедура, яка генерує керування так, що якість керування покращується від одного циклу роботи (ітерації) до наступного.

Пресування – один з визначальних технологічних процесів у виробництві вуглецевих виробів. Процес пресування є періодичним. Під час ведення процесу необхідно забезпечувати заданий температурний режим, тому процес формування вуглецевих виробів характеризується значною енергоємністю.

Метод ітеративного навчання використовується для керування систем, що працюють в періодичному режимі, тому його доцільно використати для керування процесом пресування вуглецевих виробів.

Актуальною є задача підвищення ефективності процесу пресування.

Розв'язання даної задачі передбачає створення ефективної системи оптимального керування даним процесом.

Алгоритм керування за допомогою методу ітеративного навчання варто застосувати для температурного режиму в процесі пресування вуглецевих виробів, який визначає якісні показники технологічного продукту.

Даний метод враховує невизначеності на початковому етапі та здійснює керування ітеративно, тобто зміни стану об'єкта від однієї ітерації до наступної.

Термін керування за допомогою ітеративного навчання в даний час використовується для опису алгоритмів керування, які призводять до "процесу покращення", який запропонував Арімото. У даній роботі

розроблено і реалізовано оптимальний ітераційний алгоритм навчання у процесі пресування вуглецевих виробів.

3.2.2 Алгоритм керування з ітеративним навчанням

Ітерація в процесі пресування – обробка кожної заготовки вуглецевого виробу.

Блок-схема на рисунку 3.2 ілюструє основні етапи алгоритму ітеративного навчання. Вимірюються вхідні дані u_0 – початкове керування та визначається e_0 – початкова похибка. Розраховуємо матрицю підсилення $K(t)$ [1]. Розраховуємо $\xi_{k+1}(t)$ – прогнозувальну умову в зворотному часі:

$$\xi_{k+1}(t)=[I+K(t)\Gamma R^{-1}\Gamma^T]^{-1}\{\Phi^T \xi_{k+1}(t+1)\}+C^T Q e_k(t+1),$$

де k – номер ітерації (циклу роботи); t – поточний час; R , Q – вагові матриці;

Φ , Γ , C – дискретні системні матриці, $e_k(t+1)$ – попередня похибка.

Проаналізувавши характеристики та параметри впливу на досліджуваний об'єкт ми повинні обрати закон керування за яким будемо моделювати першу ітерацію.

Розраховуємо поточне керування:

$$u_{k+1}(t)=u_k(t)-(\Gamma^T K(t)\Gamma+R)^{-1} \Gamma^T K(t)\Phi[x_{k+1}(t)-x_k(t)]+R^{-1}\Gamma^T \xi_{k+1}(t),$$

де $u_{k+1}(t)$ – поточне керування, $u_k(t)$ – попереднє керування, $x_{k+1}(t)$ – поточний стан, $x_k(t)$ - попередній стан.

Даний вираз свідчить про те, що ідеальне керування може бути визначено ітеративно, використовуючи значення змінних стану x_k .

На виході алгоритму отримуємо показники поточної ітерації $u_{k+1}(t)$, $x_{k+1}(t)$ та $e_{k+1}(t)$, зберігаємо їх в пам'яті та починаємо наступну ітерацію з перерахунку прогнозуючої умови, але вже з новими вхідними даними. Похибка $e_{k+1}(t)$ повинна зменшуватись з кожної ітерацією та на останній ітерації повинна наближатись до нуля.

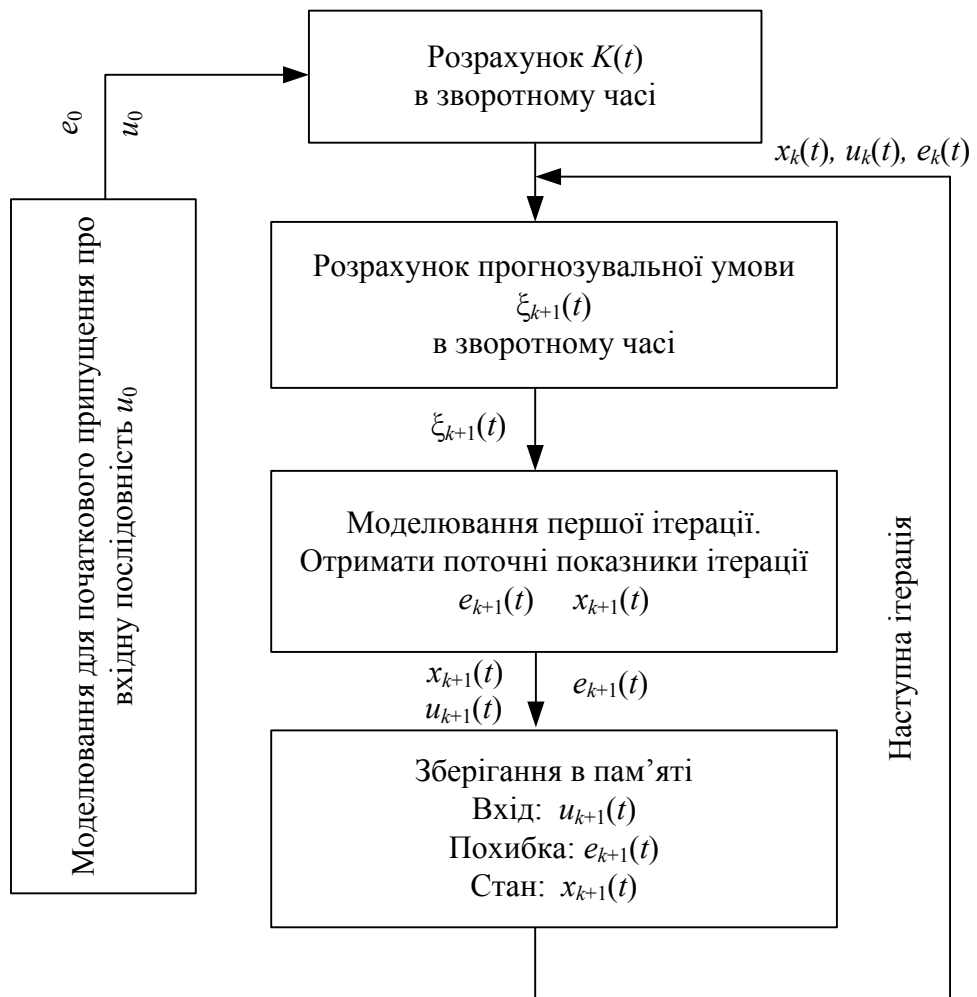


Рис.3.2 Основні етапи алгоритму реалізації методу ітеративного навчання

Даний алгоритм завершується тоді, коли вихідні дані рівні заданому виходу, тому важливо обрати правильно вхідні дані, щоб кількість ітерацій була меншою і наш об'єкт швидко «навчався».

3.2.3 Застосування та реалізація методу ІЛС в процесі пресування вуглецевих виробів в програмному середовищі MATLAB

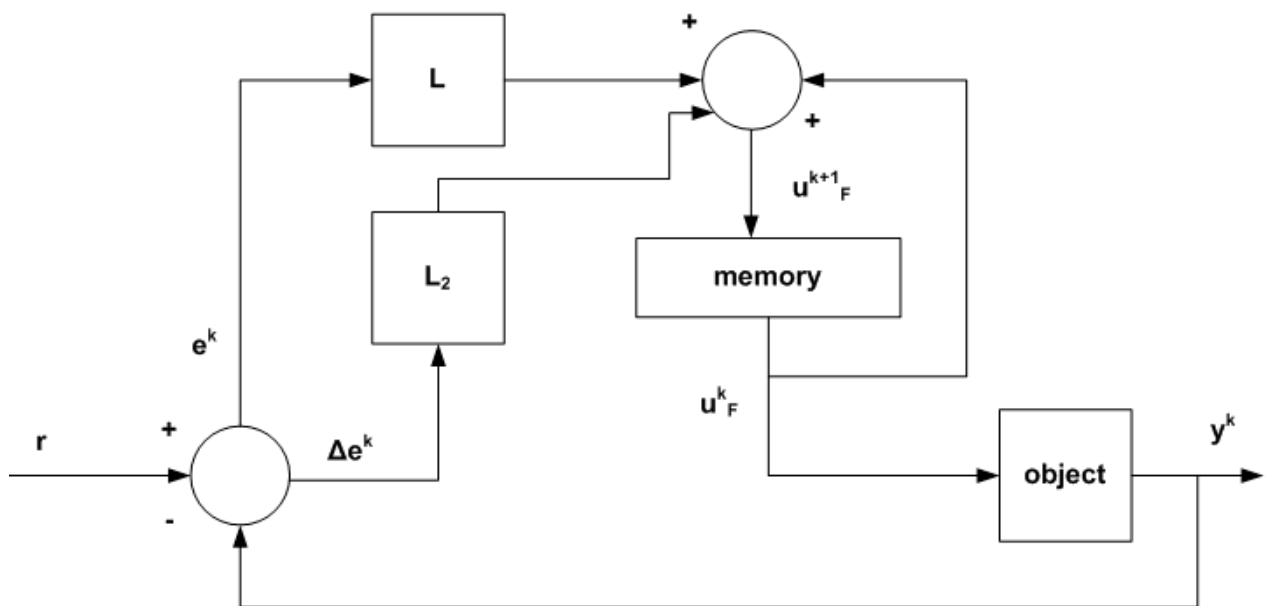
Керування з ітеративним навчанням використовується для процесів, які багаторазово виконують один і той же цикл роботи.

Для застосування методу ІЛС необхідно виконання умов:

1. Об'єкт неодноразово виконує певну ітерацію, але тривалість її фіксована $T > 0[s]$.
2. Бажаний вихід $y(t)$, ($t \in [0, T]$) є заданим.
3. Для кожної ітерації початкові стани є однаковими.

Проаналізувавши дані фактори можна сказати, що даний метод можна застосувати для створення системи керування в процесі пресування вуглецевих виробів.

Розроблено систему керування в процесі пресування вуглецевих виробів в програмному забезпеченні MATLAB за схемою зображеною на рисунку 3.3.



3.3 Схема роботи системи керування з ітеративним навчанням.

На схемі зображені параметри: r – матриця завдання, k – номер ітерації, e^k – похибка k -тої ітерації, Δe^k – різниця вперед похибки k -тої ітерації, L, L_2 – вагові коефіцієнти, u^{k+1} – поточне керування, u^k – попереднє керування, y^k – матриця вихідних значень.

З урахуванням особливостей динаміки апарату пресування було реалізовано керуванням з ітеративним навчанням по закону :

$$u(k+1)=u(k)+ Le(k)+L_2(e(k,t)-e(k,t-1)/dt).$$

Перший доданок $u(k)$ – попереднє керування, для першої ітерації початкове керування дорівнює нулю, якщо алгоритм працює коректно, результат від цього не зміниться. Другий доданок $Le(k)$ – матриця вагових коефіцієнтів помножена на похибку та третій доданок – аналог похідної для дискретних систем.

Коли k достатньо великий (прямує до нескінченності) представляємо похибку як функцію від L та L_2 . Для того, щоб знати матриці вагових коефіцієнтів L та L_2 необхідно застосувати алгоритм імітації відпалу - загальний алгоритмічний метод розв'язання [задачі глобальної оптимізації](#) для знаходження глобального мінімуму. Алгоритм ґрунтується на імітації фізичного процесу, який відбувається при кристалізації речовини, в тому числі при відпалі металів. За допомогою моделювання такого процесу шукається така точка або безліч точок, на якому досягається мінімум деякої числової функції. Рішення шукається послідовним обчисленням точок кожна точка «претендує» на те, щоб краще попередніх наближати рішення. На кожному кроці алгоритм обчислює нову точку і знижує значення величини (спочатку позитивної), що розуміється як «температура». Алгоритм зупиняється після досягнення точки, яка виявляється при температурі нуль.

Алгоритм імітації відпалу схожий на градієнтний спуск, але за рахунок випадковості вибору проміжної точки повинен буде потрапляти в локальні мінімуми рідше, ніж градієнтний спуск. Алгоритм імітації відпалу не гарантує знаходження мінімуму функції, однак при правильній політиці

генерації випадкової точки в просторі, як правило, відбувається поліпшення початкового наближення.

Так як маємо 3 входи (індуктор формуючої зони мундштука, індуктор калібрувальної зони мундштука та свічки для додаткового нагрівання кутів калібрувальної зони) і похибки по 4 виходам (температури поверхні формувальної та калібрувальної зони мундштука (T_1 та T_2 відповідно), верхнього лівого та нижнього правого кута калібрувальної зони мундштука (T_3 та T_4 відповідно)), то L та $L2$ мають бути матрицями 4×3 . Оскільки обидві матриці 4×3 , то маємо 24 невідомих коефіцієнтів, від яких залежить, якою стане сумарна похибка при достатньо великій кількості ітерацій. Функція залежності похибки від 24 коефіцієнтів доволі складна і має велику кількість локальних мінімумів для пошуку глобального мінімуму, тому для знаходження матриць L та $L2$ в програмному забезпеченні *MATLAB* було написано функцію, яка реалізує алгоритм імітації відпалу.

Із 24 змінних було вибрано 6, які змінюються рандомним методом.

$$\text{Початкові значення } L = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0.05 \\ 0 & 0 & 0.005 \\ 0 & 0.009 & 0 \\ -0.01 & 0 & -0.01 \end{pmatrix};$$

$$L2 = \begin{pmatrix} -100 & -10 & -10 \\ -100 & -10 & -10 \\ 300 & -50 & 0 \\ -100 & -100 & -200 \end{pmatrix};$$

Значення функції в точці визначається $de = e_{\text{new}} - e$.

e_{new} – значення функції в новій точці, e – значення функції в початковій точці. Визначається ймовірність, що «краще» значення наступне по порядку за розподілом Гібса:

$$P = \begin{cases} 1, & de < 0 \\ \exp\left(-\frac{dE}{T}\right), & de \geq 0. \end{cases}$$

Робота алгоритму заключається в тому, що він порівнює значення функції в початковій точці та згенерованій новій, таким чином шукає «краще» значення. Отримано значення L та L_2 для нашого закону керування :

$$L_{\text{new}} = \begin{pmatrix} -83,45 & -214,54 & -97,19 \\ -2,66 & -34,17 & -132,37 \\ 75,20 & -226,84 & 100,09 \\ -212,36 & -46,31 & -227,82 \end{pmatrix};$$

$$L_{2\text{new}} = \begin{pmatrix} -173,25 & 47,46 & -3,60 \\ 8,94 & -150,24 & 10,06 \\ -30,73 & -12,20 & 10,29 \\ -94,18 & 23,07 & -106,25 \end{pmatrix}.$$

На рисунку 3.4 зображено результат алгоритму імітації відпалу, пошук глобального мінімуму функції.

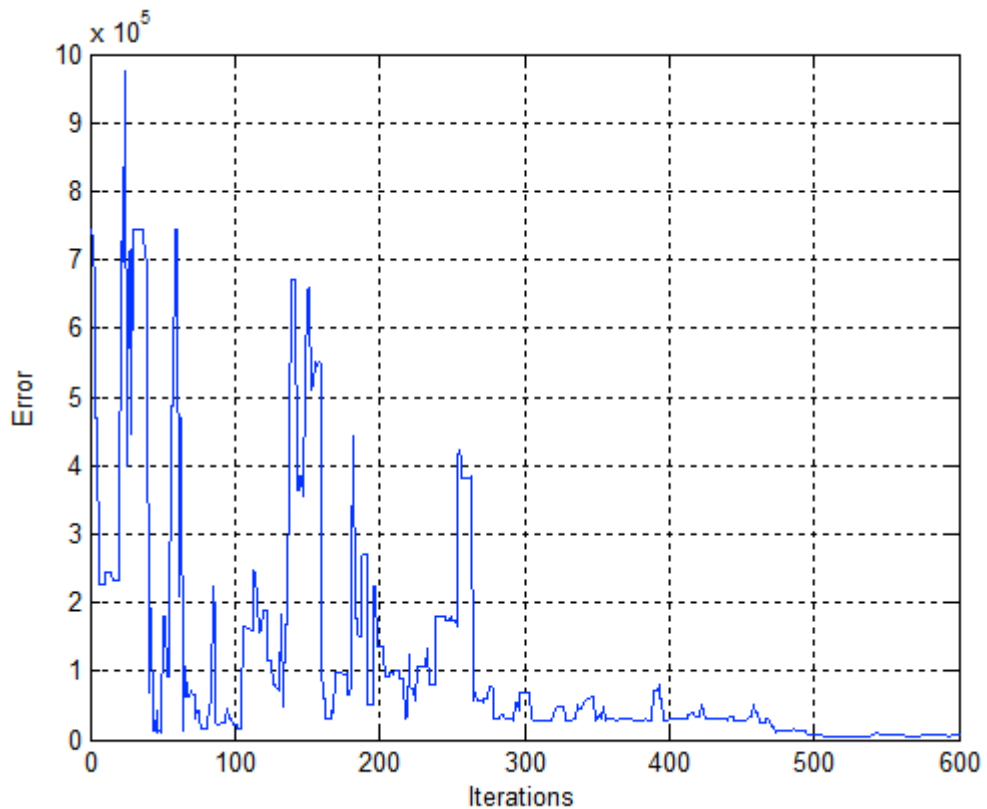


Рис. 3.4 Результат роботи алгоритму імітації відпалу

Після знаходження вагових коефіцієнтів ми можемо реалізовувати метод керування з ітеративним навчанням для процесу пресування вуглецевих виробів.

Спочатку заповнюємо матрицю керувань та похибок початковими значеннями, задаємо вагові коефіцієнти, тоді ітераційно перераховуємо матрицю керувань. Розраховуємо коефіцієнти Фур'є з i -ю матрицею керувань та матрицю температур. Визначаємо відхилення від завдання для кожної температури в кожний момент часу. Розраховуємо похибку керування в даній ітерації та реалізуємо закон керування. Потім моделюємо наступну ітерацію, перераховуючи матрицю керування та похибок, знову реалізуємо закон керування, але вже для другої ітерації. Таким чином працює система керування з ітеративним навчанням в процесі пресування вуглецевих виробів..

На рисунках 3.5 та 3.6 зображено зміну температур в контрольних точках з ітераціями. Max та Min - це діапазон температур, в межах яких ми отримуємо не браковані заготовки, а Opt - оптимальна температура, при якій ми отримуємо заготовки з найкращою геометрією.

Max визначаються з вимог до мінімально допустимого заданого радіусу структурної частини потоку, а Min з вимог до мінімально допустимої товщини ламінарної частини потоку. Таким чином, за умов нульової початкової матриці керувань, а також початку кожної ітерації пресування з перегрітого стану пресу, застосування ІЛС системи керування дає змогу отримувати не браковані заготовки вже за 20 ітерацій пресування.

Досліджувані температури вийшли на заданий рівень на 20 ітерації, але для повного дослідження було проведено 500 ітерацій, з наступною ітерацією якість заготовок покращувалась. Тобто за допомогою даної системи керування ми можемо досягнути не тільки початкового рівня температури для заготовок без браку, а й покращувати якість з кожною ітерацією.

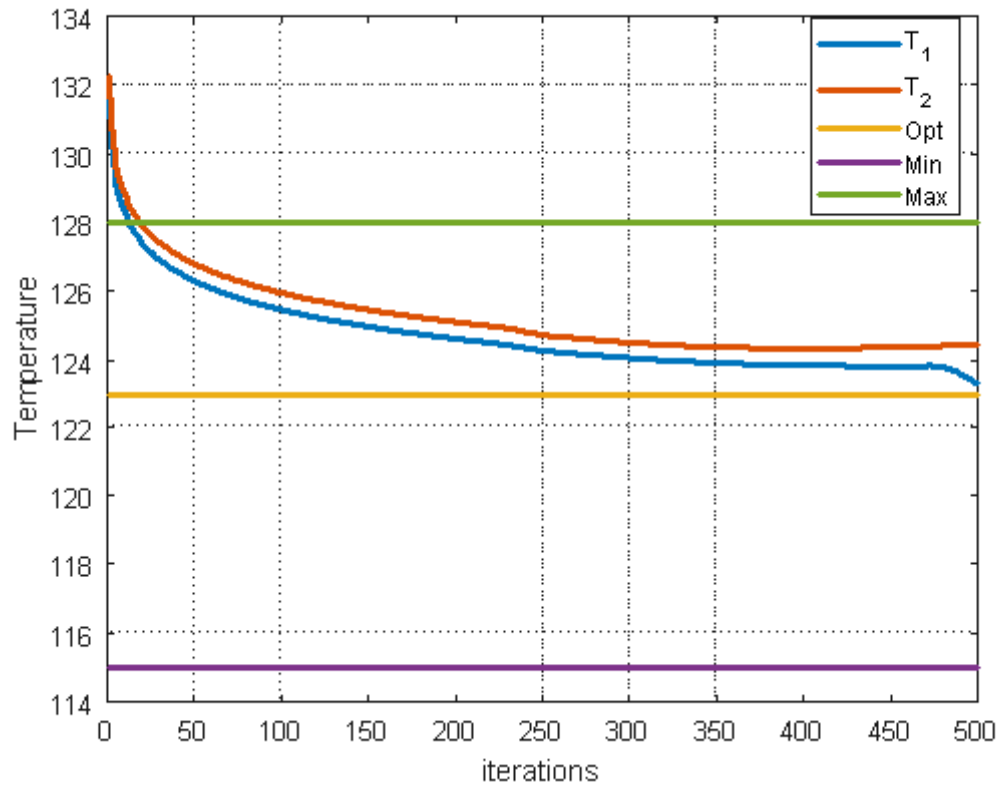


Рис. 3.5 Графік залежності температур T_1 та T_2 від кількості ітерацій

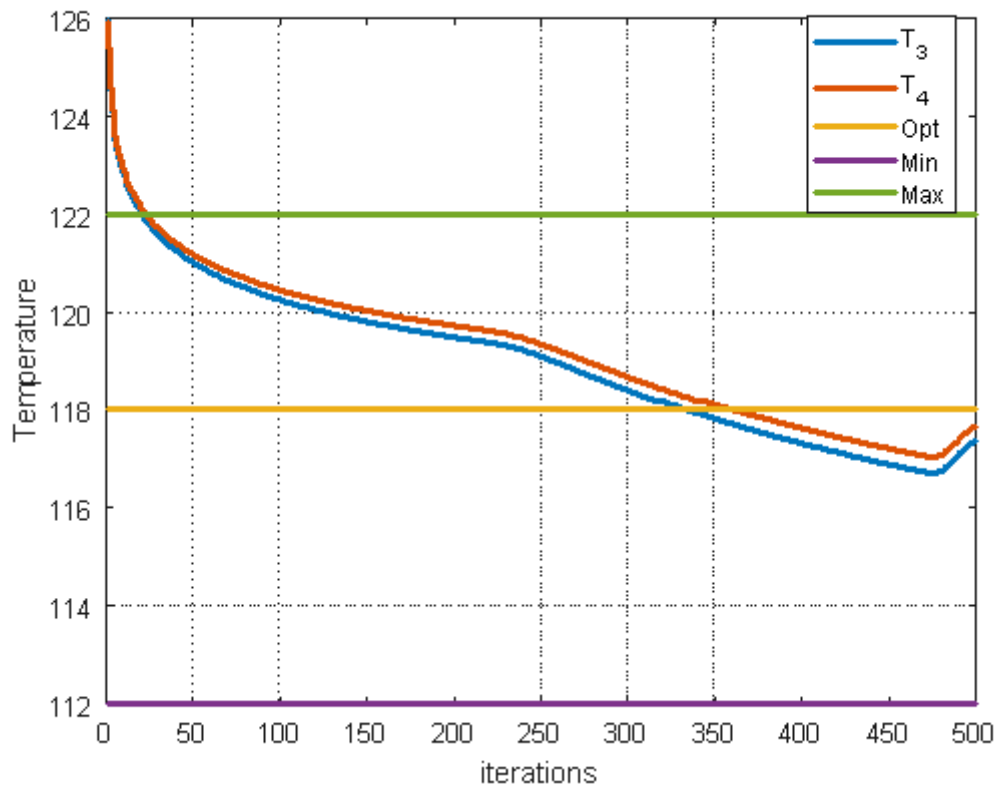


Рис. 3.6 Графік залежності температур T3 та T4 від кількості ітерацій

Зобразимо на графіку залежність похибки від ітерації, а саме на осі X – кількість ітерацій, по осі Y - сума квадратів всіх похибок на кожній ітерації $\sum e^2_k$.

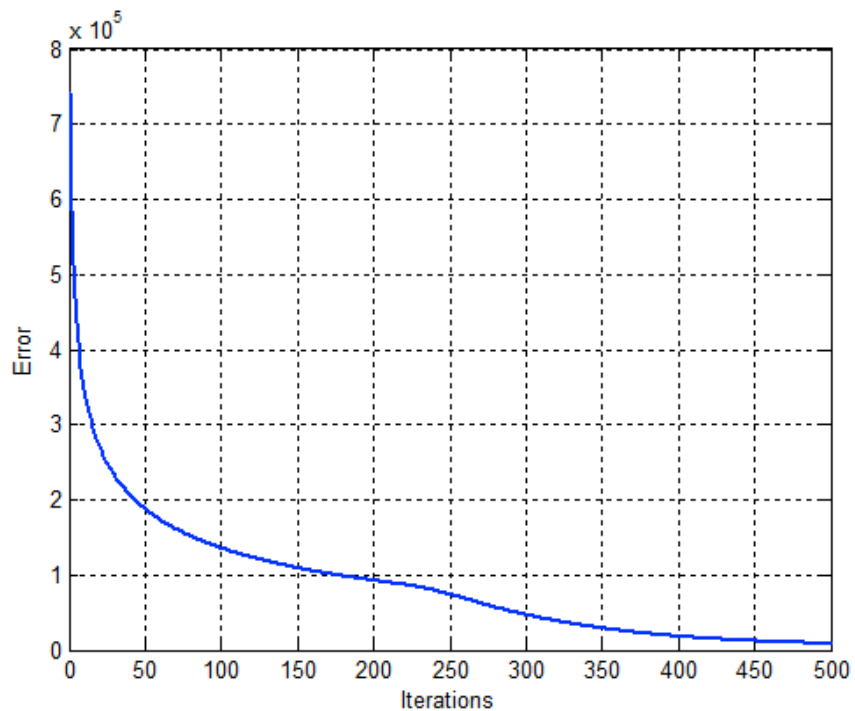


Рис. 3.7 Залежність похибки керування від ітерацій роботи алгоритму

Враховуючи початкові умови, апарат пресування є перегрітим на першій ітерації, нульовий вектор керування та те, що на кожній ітерації початкові температури однакові даний результат є оптимальним для процесу.

3.3 Порівняння методу керування з ітеративним навчанням та системи керування з ПІД-регулятором в процесі пресування вуглецевих виробів.

Для того, щоб оцінити роботу системи керування з ітеративним навчанням необхідно порівняти її з іншою системою керування, для порівняння було вибрано ПІД-регулятор.

Пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД) регулятор - пристрій в керуючому контурі зі зворотним зв'язком. Використовується в системах автоматичного управління для формування керуючого сигналу з метою отримання необхідної точності і якості перехідного процесу. ПІД-регулятор формує керуючий сигнал, який є сумою трьох доданків, перший з яких пропорційний різниці вхідного сигналу і сигналу зворотного зв'язку (сигнал розузгодженості), другий - інтеграл сигналу розузгодженості, третій - похідна сигналу розузгодженості.

Створено систему керування з ПІД-регулятором процесом пресування у виробництві вуглецевих виробів за допомогою програмних засобів Simulink. Схему роботи системи заборажено на рисунку 3.8.

Маємо 3 входи, константи які зображені на схемі, які подаються на суматори, далі на блоки ПІД-контролер, сигнали з яких виходять та об'єднуються у вектор і подаються на рівняння керування, далі матриця множиться на коефіцієнти φ та виводиться графік залежності температур від часу, рис.3.9.

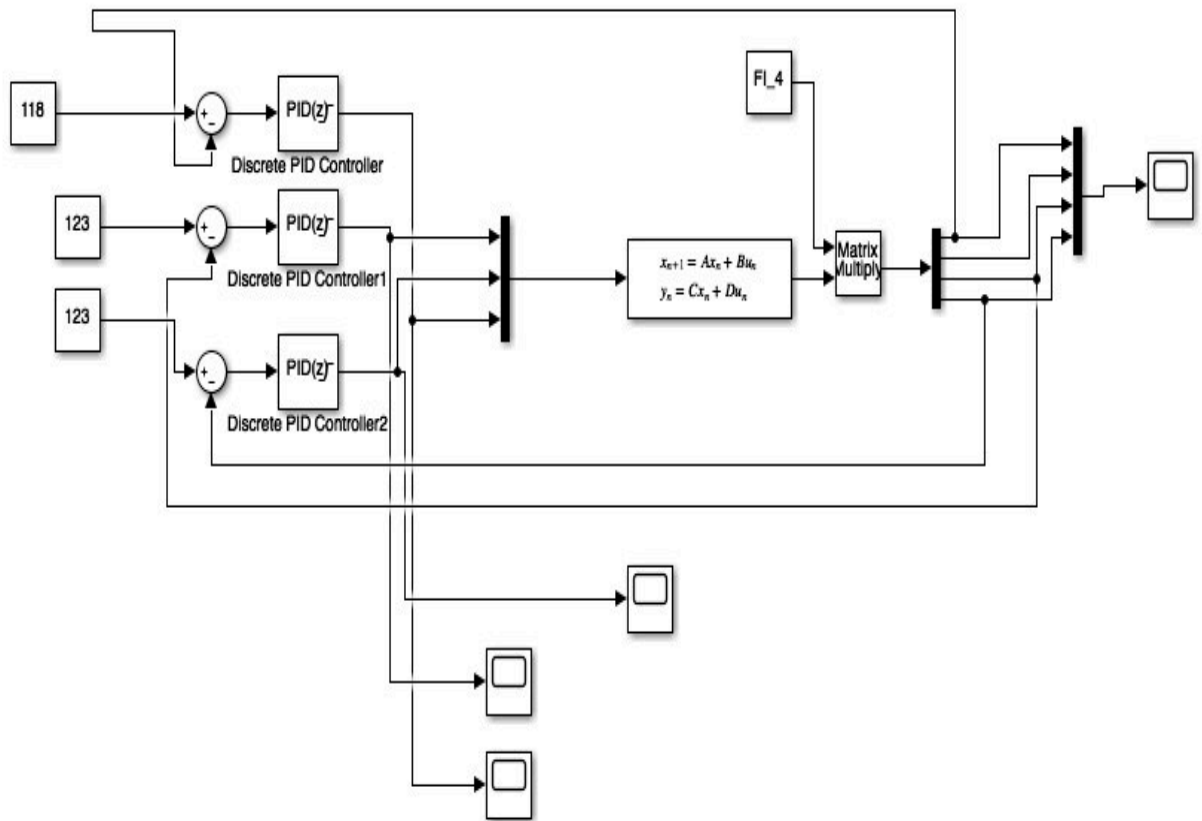


Рис. 3.8 Схема роботи системи керування з ПД- регулятором

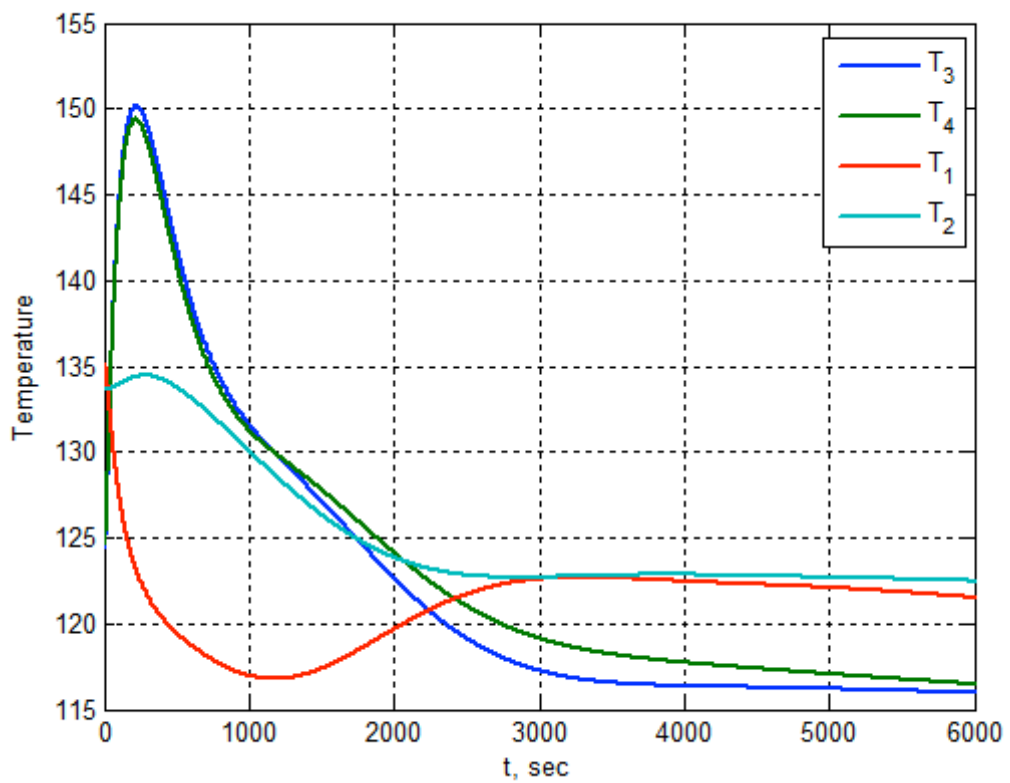


Рис. 3.9 Залежність температур від часу (ПД-регулятор)

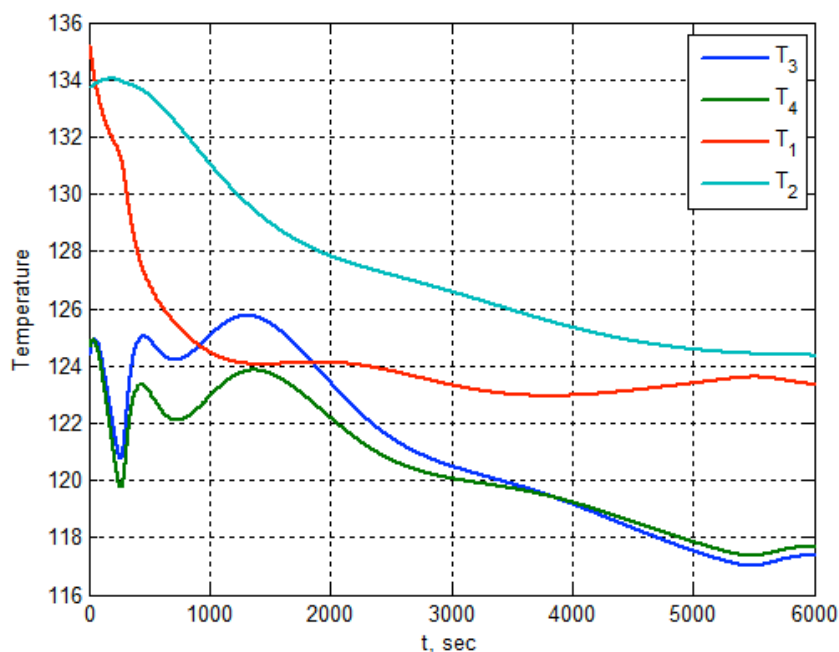


Рис 3.10 Графік залежності температур від часу на останній ітерації (ILC)

Порівнявши два графіки можна сказати, що система керування з ітеративним навчанням працює краще, адже перерегулювання менше та температури швидше виходять на заданий рівень. Дана оцінка підтверджує, те що в періодичних процесах важливим є врахування досвіду набутого на попередній ітерації для проведення наступної, що реалізує метод керування з ітеративним навчанням та покращення якості продукту на кожній наступній ітерації.

IV РОЗДІЛ. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ.

4.1 Опис ідеї проекту

Створення боту, який буде надсилати повідомлення про аварійну ситуацію на ПК чи смартфон інженера для миттєвого реагування при керуванні процесом. Бот буде надсилати повідомлення при відхиленні параметрів процесу від зазначеного діапазону (температура в апараті пресу, тиск в апараті пресу, концентрація вуглецю в електродах на виході з пресу). В повідомленні буде текст – Попередження! Передаварійна ситуація температура в апараті пресу підвищилась до 1470 С (норма 1000-1450 С) та зображення графіку зміни даного параметру за останні 10 годин роботи апарату пресування. Повідомлення буде надсилатись на ПК чи смартфон, щоб інженер міг миттєво реагувати.

Цільова аудиторія – виробництва з реальними процесами. Інвестори – інжинірингові компанії, які займаються розробкою ПО для промисловості.

Конкуренти – SCADA системи. Такі як Trace Mode, WinCC.

Переваги – бюджетність, адаптивність до різних об'єктів, швидка розробка та встановлення.

Бюджет – 100 000 грн.

Куди витратити гроші – розробка бота, встановлення датчиків на об'єкті та підключення бота. Де шукати гроші – інтернет платформа startup.ua.

Команда – 4 людини (розробник боту, інженер для вивчення апарату процесу, інженер для дослідження виробництва, інженер з експлуатації).

4.2 Технологічний аудит ідеї

Таблиця 4.1. Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Модернізація виробництва	Автоматизація процесу, передбачення аварій	Програма для автоматизації реального технологічного процесу з передбаченням аварійного режиму
2	Бюджетність	Низька ціна	Нижча ціна, ніж на існуючі програми з АСУТП. (Автоматизація систем управління технологічними процесами)
3	Автоматизація різних видів виробництва	Адаптивність до різних типів технологічних процесів	Адаптивність до різних технологічних процесів, можливість охопити декілька галузей виробництва.

Таблиця 4.2. Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Опис базової потреби споживача, яку задовольняє товар (згідно концепції), її основної функціональної вигоди Модернізація виробництва та невеликі витрати для підприємства.		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	МБ	Вр/Тх /Тл/
	1.Компактність	500 МБайт	50 000грн/Сучасний інтерфейс/Інформаційна безпека даних
	Якість: стандарти, нормативи, параметри тестування тощо. Нульова похибка при відображенні процесу в реальному часі, коректна робота програми (тестування перед реалізацією)		
	Пакування -		
Марка: назва організації-розробника + назва товару Noch chat-bot agency, chat-bot програма для АСУТП.			
III. Товар із підкріпленням	До продажу Знижка при замовленні повного пакету послуг		

	Після продажу Технічна підтримка продукту
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: Авторське право, торгова марка, секретний алгоритм інновації програмного забезпечення.	

Таблиця 4.3 Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники, грн	Рівень цін на товари-аналоги, грн	Рівень доходів цільової групи споживачів, грн	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу, грн
1	100 000-5000 000	250000 – 5000 000	3000000– 5000000	30 000 - 1000000

Таблиця 4.4 Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Якісний продукт за мінімальну ціну	Маркетингові дослідження(попит споживачів) Встановлення безпосередніх контактів із споживачами та покупцями товарів. Стимулювання руху товарів до споживача, проведення рекламних заходів, розпродажу і т.п. Участь у плануванні асортименту. Фінансування витрат на функціонування каналу збуту, фінансування збутових операцій. Обслуговування проданих товарів.	Канал нульового рівня, або канал прямого маркетингу складається з виробника, який продає свій товар безпосередньо споживачам	Пряма система збуду продукції – безпосередньо споживачу продукції

4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Таблиця 4.5 Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
<p>1. Вказати тип конкуренції</p> <ul style="list-style-type: none"> - монополія/олігополія/монополістична/чиста 	<p>Монополістична.</p> <p>Різноманітність продукту та послуг у розробці ПЗ.</p> <p>Важливою є реклама, нецінові ознаки товару, що впливають на вибір клієнта.</p> <p>Легкий вхід нової фірми та легкий вихід з галузі ІТ.</p>	<p>Великий асортимент продукції та послуг з розробки програмного забезпечення, потужна реклама, акції та бонуси при замовленні послуг та доступність при відкритті нового підприємства.</p>
<p>2. За рівнем конкурентної боротьби</p> <ul style="list-style-type: none"> - локальний/національний/... 	<p>Національний.</p> <p>Велика кількість аутсорсингових компаній, які пропонують свої послуги у різних країнах.</p>	<p>Можливість продавати свій продукт та послуги не тільки в Україні, а й закордоном.</p>
<p>3. За галузевою ознакою</p> <ul style="list-style-type: none"> - міжгалузева/внутрішньогалузева 	<p>Внутрішньогалузева.</p> <p>Галузь ІТ технологій має переваги, над іншими, адже стрімко розвивається зараз. Це проявляється і у фінансовій складовій і в трудових ресурсах і т.д. тому йде внутрішньогалузева конкуренція за потенційного клієнта та людські ресурси.</p>	<p>Залучення інвесторів у свій бізнес, набір висококваліфікованих кадрів в команду та реклама для потенційних клієнтів.</p>
<p>4. Конкуренція за видами товарів:</p> <ul style="list-style-type: none"> - товарно-рідова - товарно-видова - між бажаннями 	<p>Товарно-рідова.</p> <p>Різні шляхи задоволення потреб клієнта, а саме автоматизація виробництва може бути виконана різними шляхами(програма, чат-бот і т.д.)</p>	<p>Великий асортимент продукції та послуг з розробки програмного забезпечення та аргументи, чому той чи інший спосіб кращий для клієнта.</p>

<p>5. За характером конкурентних переваг - цінова / нецінова</p>	<p>Цінова. В сучасних умовах саме така конкуренція актуальна для більшості галузей.</p>	<p>Зниження цін на певні послуги, а саме в моєму стартапі представлення бюджетної програми чат-боту для виробництв.</p>
<p>6. За інтенсивністю - марочна/не марочна</p>	<p>Марочна. В галузі розробки ПЗ важливу роль відіграє торгова марка, адже реклама, її популярність та репутація на ринку є важливим критерієм у виборі потенційного клієнта.</p>	<p>Розробка товарної марки та її популяризація за допомогою реклами.</p>

Таблиця 4.6 Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товаризамінники
аналізу	<p>Навести перелік прямих конкурентів –</p> <p>Vis-design, Inbot, In-create, Telebot, Evergreens і т.д.</p>	<p>Визначити бар'єри входу в ринок</p> <p>Легко увійти на ринок, але потрібно залучити інвесторів, що є не просто, представити свій продукт якісно та доцільно в сучасних умовах.</p>	<p>Визначити фактори сили постачальників</p> <p>Мої послуги-інтелектуальний продукт. Постачальниками можуть бути тільки комп'ютерне обладнання, яке досить широко представлене на сучасному ринку.</p>	<p>Визначити фактори сили споживачів</p> <p>Конкуренція, різноманітність послуг, ціни, реклама.</p>	<p>Фактори загроз з боку замінників</p> <p>Загрози є, адже може бути більш точний продукт, бюджетніший, менше енергозатратний, зкожним днем технології розвиваю</p>

					ться.
В исн овк и:	Визначити інтенсивність конкурентної боротьби з боку прямих конкурентів Конкуренти інтенсивно використовують методи конкуренції(різноманітність продукції, реклама і т.д). Мій стартап представляє новий продукт, якого немає у конкурентів та ще є бюджетним в порівнянні з іншими послугами.	- чи є можливість входу в ринок? - чи є потенційні конкуренти? Строки виходу їх на ринок? Можливо увійти на ринок, якщо є потрібні кошти для цього. Потенційні конкуренти є, адже з кожним днем відкривається все більше нових технологій. Термін виходу на ринок – 1 рік.	Чи постачальники диктують умови роботи на ринку? Які? Постачальники диктують умови тим, що постійно модернізують комп'ютерне обладнання, що призводить до розробки нового ПЗ на різних операційних системах.	Чи клієнти диктують умови роботи на ринку? Які? Клієнти диктують умови роботи, а саме ціну, особливо в сучасних умовах не всі виробництва можуть автоматизувати процес на підприємстві або ж модернізувати його.	Обмеження для роботи на ринку через товари заміни Менше замовлень від клієнтів та менше інвестицій.

Таблиця 4.7 Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1.	Політична ситуація в країні	Складна політична ситуація зумовлює обмеження в галузі модернізації виробництва, виділення коштів для цього.
2.	Наявність конкурентів	Велика конкуренція, хоча ринок вийти легко, але залучити інвесторів та заслужити довіру у потенційних клієнтів не просто.
3.	Загальний рівень техніки та технологій	З кожним днем технології розвиваються і швидко з'являються нові послуги та продукти на ринку.
4.	Національний рівень підприємства	Можливість отримати інвестиції та замовлення від клієнтів з інших країн.

Таблиця 4.8 Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін «Hoch chat-bot agency»

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з Hoch chat-bot agency						
			3	- 2	- 1	0	+1	+2	+3
1.	Політична ситуація в країні	3				+			
2.	Наявність конкурентів	15				+			
3.	Загальний рівень техніки та технологій	18			+				
4.	Національний рівень підприємства	15			+				

4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Таблиця 4.9 Вибір цільових груп потенційних споживачів

п ю / п п	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
	Малі підприємства	Бюджетність та ефективність чат-боту допоможе малому підприємству модернізувати виробництво, такі підприємства готові до такого продукту.	Латентний попит, що тільки виявляється у вигляді невеликих замовлень.	Висока конкуренція	Увійти не легко, адже висока конкуренція
	Середні підприємства	Автоматизація частини виробництва або ж повністю всього технологічного процесу, підприємства готові до модернізації частини виробництва, до повністю автоматизації всього процесу в сучасних умовах не готові.	Повноцінний попит – на автоматизацію частини виробництва.	Невисока конкуренція.	Конкуренція менша, але інвестицій потребується більше.
	Великі підприємства	Автоматизація повністю всього виробництва, великі підприємства не готові до таких змін.	Попит, що постійно зменшується в зв'язку з політичною ситуацією.	Висока конкуренція	Увійти складно, великі інвестиції та висока конкуренція.

Які цільові групи обрано:

Обрано малі та середні підприємства, які є потенційними клієнтами нашої послуг та продукції.

Таблиця 4.10 Визначення базової стратегії розвитку

№п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1	Великі об'єми замовлень	Співвідношення ціна -якість	Фірма здатна протистояти своїм прямим конкурентам навіть у разі цінової війни і в змозі отримувати прибуток при ціні, мінімально допустимій для конкурентів; сильні клієнти не можуть добитися зниження ціни нижче рівня, прийнятного для найбільш сильного конкурента.	Стратегія лідерства по витратах
2	Унікальні властивості продукту	Ринкове позиціонування	По відношенню до прямих конкурентів диференціація знижує ступінь замінності товару, посилює прихильність марці, зменшує чутливість до ціни і тим самим підвищує рентабельність; прихильність клієнтів послабляє їх тиск на фірму і перешкоджає приходу на ринок нових конкурентів.	Стратегія диференціації

Таблиця 4.11 Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проєкт «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
1	Так	Так	Так, буде копіювати розробку програми для технологічних процесів та адаптивність до різних типів процесів	Стратегія наслідування лідера
2	Ні	Так	Ні	Стратегія заняття конкурентної ніші. Стратегія лідера

Таблиця 4.12 Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проект	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проєкту (три ключових)
1	Бюджетність, якість, точність	Стратегія диференціації	Інновація, адаптивність, низька ціна, підходить для малого та середнього бізнесу.	Унікальні властивості продукту Адаптивність Бюджетність

4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Таблиця 4.13 Концепція маркетингових комунікацій

/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
	Вибір оптимального партнера для модернізації виробництва, із співвідношенням «ціна-якість», хороша репутація торгової марки	Веб-сайти, youtube, Поради знайомих фахівців.	Бюджетність, унікальність, точність, адаптивність.	Повідомити про унікальну пропозицію модернізувати виробництво для оптимальної роботи + бонус знижка на тех.підтримку продукту	З нашим продуктом виробництва стане сучасним та продукти внішим. Алгоритм + контроль =результат. Оптимальність автоматизації процесів- вибір інженерів

Програма просування мого стартапу:

1. Сайт компанії.
2. Налаштування контекстної реклами (індексація в пошукових системах).
3. Реклама в соц.мережах.
4. Реклама в youtube (ролики про чат боти, їх застосування та ефективність для підприємств).

ВИСНОВКИ

У магістерській дисертації досліджено процес пресування у виробництві вуглецевих виробів. За допомогою системних засобів MATLAB створено спрощену математичну модель процесу. Проведено дослідження структури спрощеної моделі для процесу пресування, яке показало, що на вибір моделі, яка найбільш точно описує початкову модель впливає похибка при апроксимації перших членів розкладу методом Фур'є, вибір структури моделі ідентифікації та похибка відтворення температурних «знімків». Дані твердження дають змогу правильно обрати спрощену модель для розробки систем керування процесу.

Досліджено, що для зменшення кількості дефектів пресування важливою умовою є дотримання температурних режимів та тиску в апараті пресування, що забезпечується технічними засобами автоматизації .

Запропоновано систему керування з ітеративним навчанням в процесі пресування вуглецевих виробів. Основа загальної ідеї – процедура, яка генерує керування так, що якість керування покращується від одного циклу роботи (ітерації) до наступного. Даний метод враховує невизначеності на початковому етапі та здійснює керування ітеративно, тобто зміни стану об'єкта від однієї ітерації до наступної.

Досліджувані температури вийшли на заданий рівень на 20 ітерації, але для повного дослідження було проведено 500 ітерацій, з наступною ітерацією якість заготовок покращувалась. Дана система керування не тільки досягає результату безбракової продукції, а й прокращує якість заготовок з кожною наступною ітерацією.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Санников А.К. Производство электродной продукции / А.К. Санников, А.Б. Сомов, В.В. Ключников [и др.] – М. : Металлургия, 1985. – 129 с.
2. Жученко А. І., Коржик М. В., Кутузов С. В. Керування процесом графітації при виробництві электродної продукції [Текст] : монографія. – К.: НТУУ «КПІ», Вид. дім «Києво-Могилянська академія», 2013. – 224 с.: іл. – Бібліогр.: 201–217. – 300 прим.
3. Белов Г.В. Технический контроль качества изделий из углеродных материалов / Г.В. Белов. – М. : Издательство стандартов, 1991. – 92 с.
4. Белов Г.В. Метрологическое обеспечение качества углеродных материалов / Г.В. Белов. – М. : Металлургия, 1992. – 256 с.
5. Соседов В.П. Графитация углеродистых материалов / В.П. Соседов, Е.Ф. Чалых.– М. : Металлургия, 1987. – 176 с.
6. Шулепов С.В. Физика углеграфитовых материалов / С.В. Шулепов. – М. :Металлургия, 1972. – 256 с.
7. Карзунова Р.В. Влияние способа прессования на свойства графита / Р.В. Карзунова // Совершенствование технологии и улучшение качества электродной продукции : Сб. научн. тр. – Челябинск : ГосНИИЭП, 1973. – Вып. 5. – С. 71–91.
8. Пат. 69350 Україна, МПК7 F27B 5/00, C01B 31/00. Спосіб випалювання вуглецевих виробів в багатоканерній кільцевій печі / Є.М. Панов, І.В. Пулінець, М.В. Коржик [та інш.] ; заявл. 19.10.2011 ; опубл. 25.04.2012, Бюл. № 8.
9. Островский В.С. Искусственный графит / В.С. Островский, Ю.С. Виргильев, В.И. Костиков. – М. : Металлургия, 1986. – 272 с.
10. Данцис Я.Б. Электротермические процессы химической технологии / Я.Б. Данцис, В.А. Ершов, Г.М. Жиров [и др.] – Л. : Химия, 1984. – 464 с.

11. Фиалков А.С. Процессы и аппараты производства порошковых углеграфитовых материалов / А.С. Фиалков – М.: Аспект Пресс, 2008. – 687 с.
12. С. И. Губкин. Пластическая деформация металлов. Т.1-3. — М.: Metallurgizdat, 1960-61.
13. Унксов Е.П. и др. Теория пластических деформаций металлов - М.: Машиностроение, 1983. - 598 с.
14. Томленов А.Д. Теория пластического деформирования металлов - М.: Metallurgiya, 1972. - 408 с.
15. Чалых Е.Ф. Технология и оборудование электродных и электроугольных предприятий - М.: Metallurgiya, 1972. - 432 с.
16. Лукінюк М.В. Автоматизація типових технологічних процесів: технологічні об'єкти керування та схеми автоматизації [Текст] : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл., які навчаються за напрямом «Автоматизація і комп'ют.-інтегр. технології / М.В. Лукінюк. – К.: НТУУ «КПІ», 2008. – 236 с. : іл. – Бібліогр.: с. 230–231. – 200 пр. –ISBN 978-966-622-287-2.
17. Рапопорт Э. Я. Структурное моделирование объектов и систем управления с распределенными параметрами / Э. Я. Рапопорт. – Москва: Высшая школа, 2003. – 239 с.
18. Assi A. H. Engineering Education and Research Using Matlab / Assi., 2011. – 490 с.
19. Эйкхофф П. Основы идентификации систем управления / П. Эйкхофф. – Москва: Мир, 1975. – 683 с.
20. Astrid P. Model Reduction for Process Simulations: A Proper Orthogonal Decomposition Approach : PhD thesis, Eindhoven University of Technology / Astrid, P. – Eindhoven, 2004.

21. Карвацький А. Я. Числові дослідження кампанії формування великогабаритних вуглецевих виробів методом екструзії через мундштук. / А.Я. Карвацький, Т.В. Лазарєв, М.В. Коржик // Вісник НТУ «ХП», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях – Харків: НТУ «ХП». – 2016 - №25 (1197). - С. 99-106.
22. Жученко О. А., Керування циклічними процесами з ітерційним навчанням. / О. А. Жученко, М. Г. Волощук // Вісник НТУ «КП», Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження – Київ: НТУ «КП». – 2017 - №1 (16).- С. 107-114.
23. Лазарєв Т.В. Математична модель процесу екструзії в'язко-пластичної вуглецевої маси / Т.В. Лазарєв, А.Я. Карвацький, С.В. Лелека, А.Ю. Педченко // Вісник НТУ «ХП», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях – Харків: НТУ «ХП». – 2016 - №12 (1184). - С. 31-37.
24. Vita V. Design, implementation and evaluation of an optimal iterative learning control algorithm [Text] / V. Vita, A. Vitas, G.E. Chatzarakis // WSEAS transactions on circuits and systems – 2011– Issue 2, Vol.10 – P. 39–48. – ISSN 1109-2734.
25. A computationally efficient algorithm of iterative learning control for discrete-time linear time-varying systems [Text] / W.B.J. Hakvoort, R.G.K.M. Aarts, J. van Dijk, J.B. Jonker // Automatica – 2009 – Vol.45 – P. 2925-2929 – ISSN 0005-1098.
26. Джонс М. Т. Программирование искусственного интеллекта в приложениях. [Текст] / М. Т. Джонс – М.: ДМК Пресс, 2004. – 312 с. – Библиогр.: 309-311 С. – С. 25–42. – ISBN 5-94074-275-0.