

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМ. ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Інженерно-хімічний факультет

(повна назва інституту/факультету)

Кафедра автоматизації хімічних виробництв

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ А.І. Жученко

(підпис) (ініціали, прізвище)

“ 16 ” червня 2019 р.

Дипломний проект

на здобуття ступеня бакалавра

з напрямку підготовки 6.050202 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

на тему: Автоматизація процесу формування вуглецевих виробів

Виконала студентка 4 курсу, групи ЛА-52

_____ Барановська Юлія Василівна

(прізвище, ім'я, по батькові)

_____ (підпис)

Керівник _____ д. т. н., професор Жученко А.І.

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

_____ (підпис)

Консультант Охорона праці _____ к. т. н., доцент Ковтун І.М.

(назва розділу)

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

_____ (підпис)

Рецензент _____

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

_____ (підпис)

Засвідчую, що у цьому дипломному
проекті немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент _____

(підпис)

Київ – 2019 року

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

Інститут (факультет) Інженерно-хімічний факультет
(повна назва)

Кафедра Автоматизації хімічних виробництв
(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Напрямок підготовки 6.050202 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(код і назва)

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

« 14 » березня 2019 р.

ЗАВДАННЯ
на дипломний проект студенту
Барановській Юлії Василівні
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту Автоматизація процесу формування вуглецевих виробів, керівник проекту Жученко Анатолій Іванович, д. т. н., професор
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «12» травня 2019 р. № 1525

2. Термін подання студентом проекту 16 травня 2019 р. _____

3. Вихідні дані до проекту система керування, що забезпечує задані часові показники якості процесу керування

4. Зміст пояснювальної записки

Аналіз процесу формування вуглецевих виробів; розробка математичної моделі процесу формування; дослідження температурних полів; ідентифікація даних; розробка та опис функціональної схеми автоматизації; розроблення та дослідження систем керування процесом з прогнозуючими моделями (МРС-регулятор) та систем керування на основі ПІД-регулятора; охорона праці.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) Функціональна схема автоматизації процесом формування вуглецевих виробів

6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Ковтун І.М., доцент		

7. Дата видачі завдання 18 березня 2019 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Опис технологічного процесу формування вуглецевих виробів	1.04.2019	
2	Розробка математичної моделі процесу	08.04.2019	
3	Дослідження властивостей об'єкта керування	20.04.2019	
4	Розробка та опис функціональної схеми автоматизації	23.04.2019	
5	Розробка та дослідження системи керування процесом	06.05.2019	
6	Порівняння системи керування з ПД-регулятором з системою керування з МРС-регулятором	25.05.2019	
7	Охорона праці	03.06.2019	

Студент

_____ (підпис)

Барановська Ю.В.

(ініціали, прізвище)

Керівник проекту

_____ (підпис)

Жученко А.І.

(ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Дипломний проект виконаний на тему «Автоматизація процесу формування вуглецевих виробів», містить 115 сторінок пояснювальної записки, 47 ілюстрацій, 6 таблиць та 27 літературних джерел.

Метою проекту є створення системи керування технологічним процесом.

В розділах пояснювальної записки виконаний опис технологічного процесу; розроблена математична модель процесу; представлена функціональна схема автоматизації процесу; створено систему керування процесом формування вуглецевих виробів на основі МРС-регулятора.

Розроблені методи керування технологічним процесом можна використовувати для виробництв з подібною структурою.

Ключові слова: вуглецева маса, технологічний процес, прес, керування, заготовка, автоматизація, вимірювання, моделювання, система керування, змінна, параметр, прогноуюча модель.

ABSTRACT

Graduate work on the topic “Automation of carbon products forming process” contains 115 pages of explanatory notes, 47 illustrations, 6 tables and 27 literary sources.

The goal is to develop a control system of technological process.

In the sections of the explanatory note, the description of the technological process are executed; a mathematical model of the process is developed; the functional scheme of process automation is presented; a system for controlling the process of forming carbon products is developed that is based on MPC regulator.

The methods of operating process can be used for similar structure plants.

Keywords: carbon mass, technological process, press, control, cut, automation, measurement, modeling, control system, variables, parameters, predictive model.

ЗМІСТ

стр.

ВСТУП.....	9
I РОЗДІЛ. АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ ВУГЛЕЦЕВИХ ВИРОБІВ ЯК ОБ'ЄКТА ТЕХНОЛОГІЧНОГО КЕРУВАННЯ.....	10
1.1 Загальна характеристика технологічного процесу виробництва вуглецевих виробів.	10
1.2 Опис технологічного процесу формування вуглецевих виробів	12
1.3 Конструктивні особливості пресу	18
1.4 Параметрична схема процесу	28
1.5 Постановка задачі керування.....	29
II РОЗДІЛ. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ ВУГЛЕЦЕВИХ ВИРОБІВ.....	30
2.1 Аналіз існуючих математичних моделей	30
2.2 Процес формування як об'єкт математичного моделювання	32
2.3 Математична модель процесу формування.....	33
2.4 Дослідження властивостей об'єкта керування на основі математичної моделі	40
2.4.1 Постановка задачі дослідження формування вуглецевих виробів.....	40
2.4.2 Температурне поле в режимі підготовки за температури масного циліндру 100°C	43
2.4.3 Температурне поле в режимі підготовки за температури масного циліндру 110°C	49
2.4.4 Температурне поле в режимі пресування зі швидкістю 0,00033 м/с за температури масного циліндру 100°C.....	54
2.4.5 Температурне поле в режимі пресування зі швидкістю 0,00033 м/с за	

					ДД ЛА52.01.00.000 ПЗ масного циліндру			
Лі	Зм.	№ докум.	Підп.	Дата	60	Лист	Аркуш	Аркушів
Розроб.	110	Барандівська	Автоматизація процесу	7	115	
Перев.		Жученко А.І.			формування вуглецевих виробів			
Т. контр.								
Н. контр.								
Затв.		Жученко А.І.						
						КПІ ім. Ігоря Сікорського		

2.5 Ідентифікація залежностей між вхідними параметрами та температурами в контрольних точках.....	65
ІІІ РОЗДІЛ. СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ФОРМУВАННЯ ВУГЛЕЦЕВИХ ВИРОБІВ.....	72
3.1 Аналіз існуючих систем керування	72
3.2 Функціональна схема автоматизації	76
3.3 Синтез систем керування	77
3.3.1 Розробка системи керування на основі ПІД-регуляторів	77
3.3.2 Розробка системи керування на основі MPC (Model Predictive Control).....	83
3.4 Дослідження систем керування.....	89
ІV ОХОРОНА ПРАЦІ	94
4.1 Електробезпека	95
4.2 Виробниче освітлення	98
4.3 Виробничий шум та вібрація	98
4.4 Повітря робочої зони.....	100
4.5 Пожежна безпека	101
ВИСНОВКИ	104
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	105
Додаток 1. Специфікація устаткування, виробів і матеріалів	110

					<i>ДП ЛА52.01.00.000 ПЗ</i>			
<i>Лі</i>	<i>Зм</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підп.</i>	<i>Дата</i>	<i>Автоматизація процесу формування вуглецевих виробів</i>	<i>Лист</i>	<i>Аркуш</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Розроб.</i>	<i>Барановська</i>						<i>8</i>	<i>115</i>
<i>Перев.</i>	<i>Жученко А.І.</i>					<i>КПІ ім. Ігоря Сікорського</i>		
<i>Т. контр.</i>								
<i>Н. контр.</i>								
<i>Затв.</i>	<i>Жученко А.І.</i>							

ВСТУП

Ракетна техніка, космонавтика, авіабудування, ядерна енергетика, хімічне машинобудування, автотранспорт, суднобудування, електроніка та багато інших галузей промисловості отримали розвиток в основному завдяки використанню різноманітних вуглецевих матеріалів. Такі матеріали мають високу міцність, жаростійкість, термостійкість, які регулюються в широких межах показниками щільності, тепло- та електропровідності, спеціальними оптичними й магнітними характеристиками.

При виробництві вуглецевих виробів важливу роль відіграє процес формування, оскільки на цій стадії процесу формуються майже всі спадкові ознаки, які в подальшому обумовлюють якість заготовок.

В теперішній час в умовах ринкової економіки питання виготовлення найкращих виробів із мінімально можливою ціною стало дуже актуальним.. Це стає можливо лише з застосуванням сучасних систем керування.

Автоматизація даних технологічних процесів відіграє вагомому роль для вирішення таких задач, як зменшення кількості браку готової продукції та зниження енергетичних витрат. Тому створення системи керування процесом формування вуглецевих виробів дозволить підвищити економічну ефективність підприємства та дасть можливість вийти на новий етап керування технологічним процесом.

<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підп.</i>	<i>Дата</i>	<i>ДП ЛА52.01.00.000 ПЗ</i>	<i>9</i>

тому що маса під час проходження через мундштук піддається рівномірному стисненню. Однак способом видавлювання маси через мундштук неможливо отримати таку ж високу щільність виробу, як у прес-формі [3].

В наш час в електродній та електровугільній промисловості використовується спосіб гідростатичного пресування. Суть цього способу полягає в тому, що прес-порошок завантажується в еластичну оболонку, яка поміщається в робочий циліндр і здавлюється рідиною. Створюється рівномірний тиск з усіх сторін, що дозволяє отримати виріб високої щільності.

Фізична суть процесу пресування полягає в пластичній деформації матеріалу, який піддається обробці. Деформація у загальному випадку полягає в зміщенні частинок матеріалу відносно одна одної. Пластична деформація протікає тільки за певних умов, коли величина деформуючого зусилля досягає такої величини, при якій матеріал рухається як рідина. Так, як пресування може виконуватись різними способами, то до кожного з них пред'являються особливі вимоги до формуючої суміші та насамперед до пластичних властивостей цієї суміші.

В процесі деформації маси зміна внутрішнього тертя вносить складну залежність. Кам'яновугільний пек та смола, які є сполучниками, значною мірою змінюють в'язкість в залежності від температури; звідси впливає, що внутрішнє тертя для таких мас також залежить від температури, при якій протікає процес деформації. Зі збільшенням тиску внутрішнє тертя пеку швидко збільшується. Внутрішнє тертя у свою чергу не сильно залежить від ущільнення, від утворення поверхонь ковзання та інших видів перегрупування частинок.

Виготовлений електрод складається з великих зерен, сполучених пастою з тонкоподрібненого матеріалу та сполучника. Паста містить найбільшу частину сполучника і тому визначає поведінку маси при

пресуванні. Кількість сполучника, яку необхідно ввести в масу для

ДП ЛА52.01.00.000 ПЗ

отримання однакового пресування при постійному гранулометричному складі тонкоподрібнених

матеріалів, залежить від природи матеріалу.

Антрацит в силу гострогранності його зерен – закритий закупорюючий матеріал, в якому достатня рухливість зерен не проявляється навіть в тому випадку, коли всі зерна обволікаються достатньо товстим шаром сполучника. Антрацит навіть при дуже тонкому подрібненні, без добавок матеріалів (коксу, графіту та інших), які підвищують його пластичність, з точки зору переробки дуже несприятливий матеріал. Не дивлячись на високу міцність, антрацитові суміші схильні до утворення нашарувань, в результаті чого тріщини, які з'являються в обпалених виробках, в більшості випадків є вже на зелених виробках.

Всі види коксів з великою кількістю дрібних пор потребують для свого насичення більше сполучника. Не дивлячись на те, що зерна коксу також тверді, вони можуть переміщатись легше, ніж в антрациті, так, як грані зерен не такі гострі. При достатньому вмісті сполучника досягається висока пластичність для всіх видів тонкоподрібнених коксів [3].

Введення в масу графіту дозволяє покращити її пластичність та полегшити переміщення частинок. Досліди показують, що добавка графіту, навіть у відносно невеликій кількості, зменшує релаксацію та усадку спресованих виробів при обпалюванні, збільшує щільність виробів та стійкість суміші, що є наслідком поліпшення пластичності й полегшенням ущільнення при пресуванні.

Розглянемо більш детально пресування методом видавлювання через мундштук. Пресування видавлюванням дуже сильно відрізняється від пресування в прес-форму. Якщо пресування в прес-форму здійснюється в закритій посудині, то при видавлюванні ущільнена маса безперервно протікає через мундштук. Якщо в прес-формі можливе пресування холодної

та гарячої маси, то видавлюванням можна пресувати тільки гарячу масу.

ДП ЛА52.01.00.000 ПЗ

виробів. Блок маси під дією поршня видавлюється з контейнера через отвір мунштука. Внаслідок цього відбуваються значні переміщення маси, яка знаходиться в контейнері. Чим більше відношення перетину площі контейнера до площі перетину мунштука, тим швидше переміщається маса.

Тиск при пресуванні, як вказувалось вище, визначається складом маси та значною мірою залежить від кількості сполучника, який вводиться в шихту. Чим вищий вміст сполучників, тим нижчий тиск при пресуванні. З підвищенням температури маси тиск також знижується. Однак слід мати на увазі, що збільшення кількості сполучника приводить до збільшення спікливості засипки при обпалюванні та приварювання її до тіла обпалювальних виробів.

Технологічні операції на пресовій установці полягають в підготовці маси, завантаженні її в контейнер пресу та власне пресуванні, а також в транспортуванні та зберіганні пресованих виробів. Через те, що видавлюванням можна пресувати тільки гарячу масу, то необхідно встановити оптимальний температурний режим процесу пресування, тобто визначити температуру завантаженої маси в контейнер, температури стінок контейнера та мунштука.

Відомо, що маса зі змішувача виходить нагрітою до 120 – 140° С. При цій температурі не рекомендується проводити пресування, тому що пресовані вироби (особливо великих розмірів) будуть сильно деформуватися під власним навантаженням. Крім цього, гаряча маса здатна виділяти газу, які ускладнюють процес та погіршують якість пресованих виробів. Температура маси повинна бути такою, щоб з одного боку оберегти вироби від деформації та полегшити поводження з ними, а з іншого боку, зберегти пластичні властивості маси, які забезпечують високу щільність. Такою температурою для виробів середніх розмірів може бути 90 – 100° С при

використанні пекучої температури розм'якшення біля 70° С. При

ДП ЛА52.01.00.000 ПЗ

застосуванні сполучників з вищою температурою розм'якшення відповідно температура маси має бути вищою, і навпаки, при зниженні температури розм'якшення також повинна знизитись температура маси. Розміри вуглецевих виробів також можуть впливати на температуру маси, яка завантажується в контейнер. Для виробів більших розмірів температура маси може бути трохи нижчою.

Температура контейнера повинна дорівнювати температурі завантаженої маси. Якщо стінки контейнера будуть нагріті менш, то прилеглі шари маси охолонуть, і, навпаки, при вищій температурі ці шари перегріються. І в першому, і в другому випадках буде порушена пластичність маси по перетину контейнера, що в свою чергу приведе до порушення умов рівномірного переміщення маси.

Температура циліндричної частини мундштука повинна бути трохи вище температури маси, оскільки в цьому випадку зменшується тертя маси об стінки мундштука та створюються умови для отримання гладкої поверхні в пресованих виробках. Надмірний нагрів мундштука шкідливий, тому що це може призвести до здуття на тілі пресованого виробу.

Спосіб завантаження маси в контейнер залежить від конструкції пресу. Розрізняються преси наявністю або відсутністю операції трамбування. Коли трамбування відсутнє, то масу невеликими порціями завантажують в форкамеру, а потім рухом робочого поршня запресовують в контейнер. Після введення чотирьох – п'яти порцій контейнер заповнюється. У всіх випадках завантаження має бути швидким, для того щоб маса не переохолоджувалась.

Підпресовка важлива в будь-якому випадку, незалежно від способу завантаження маси. Вона збільшує вихідну щільність маси, підвищує щільність пресованих виробів, створює умови для більш спокійного та рівномірного витоку маси через мундштук, а також вирівнює тиск при

пресуванні [3].

ДП ЛА52.01.00.000 ПЗ

17

Зм. Лист № докум. Підп. Дата

1.3 Конструктивні особливості пресу

В електродній промисловості для виробництва всіх видів виробів використовуються тільки гідравлічні преси. Превага гідравлічних пресів перед механічними полягає в наступному: великі можливості отримання зусиль; прості засоби управління швидкостями руху виконавчих механізмів й прості засоби передачі руху та енергії від одного джерела до багатьох окремо розташованих пресових установок.

Гідравлічні преси дозволяють забезпечити: 1) потужне зусилля на великій довжині; 2) постійну або змінну за заданим режимом швидкість пресування; 3) витримку виробу під тиском; 4) складну циклограму технологічного процесу.

Гідравлічні преси приводяться в дію силою тиску рідини. Принцип обладнання та дії гідравлічного пресу заснований на законі Паскаля – тиск рідини в замкненій посудині передається на всі боки з однаковою силою.

В залежності від способу пресування в електродній промисловості використовують два типи гідравлічних пресів: преси для пресування виробів в прес-форму та преси для пресування виробів методом видавлювання маси через мундштук [3].

За конструкцією гідравлічні преси поділяються на вертикальні та горизонтальні. Вертикальні гідравлічні преси застосовують для пресування виробів в прес-формах двома методами – одностороннім і двостороннім, що полягають в способі ущільнення маси з однієї або двох сторін. Двостороннє пресування забезпечує більш рівномірну щільність пресованого виробу.

Вертикальні преси поділяються на установки з нерухомим та поворотним столами. Прес з нерухомим столом зображений на рис. 1.3, він працює наступним чином: в масивній станині 2 встановлений робочий

циліндр 1, в якому знаходиться плунжер 3. До верхньої частини плунжера 3

ДП ЛА52.01.00.000 ПЗ

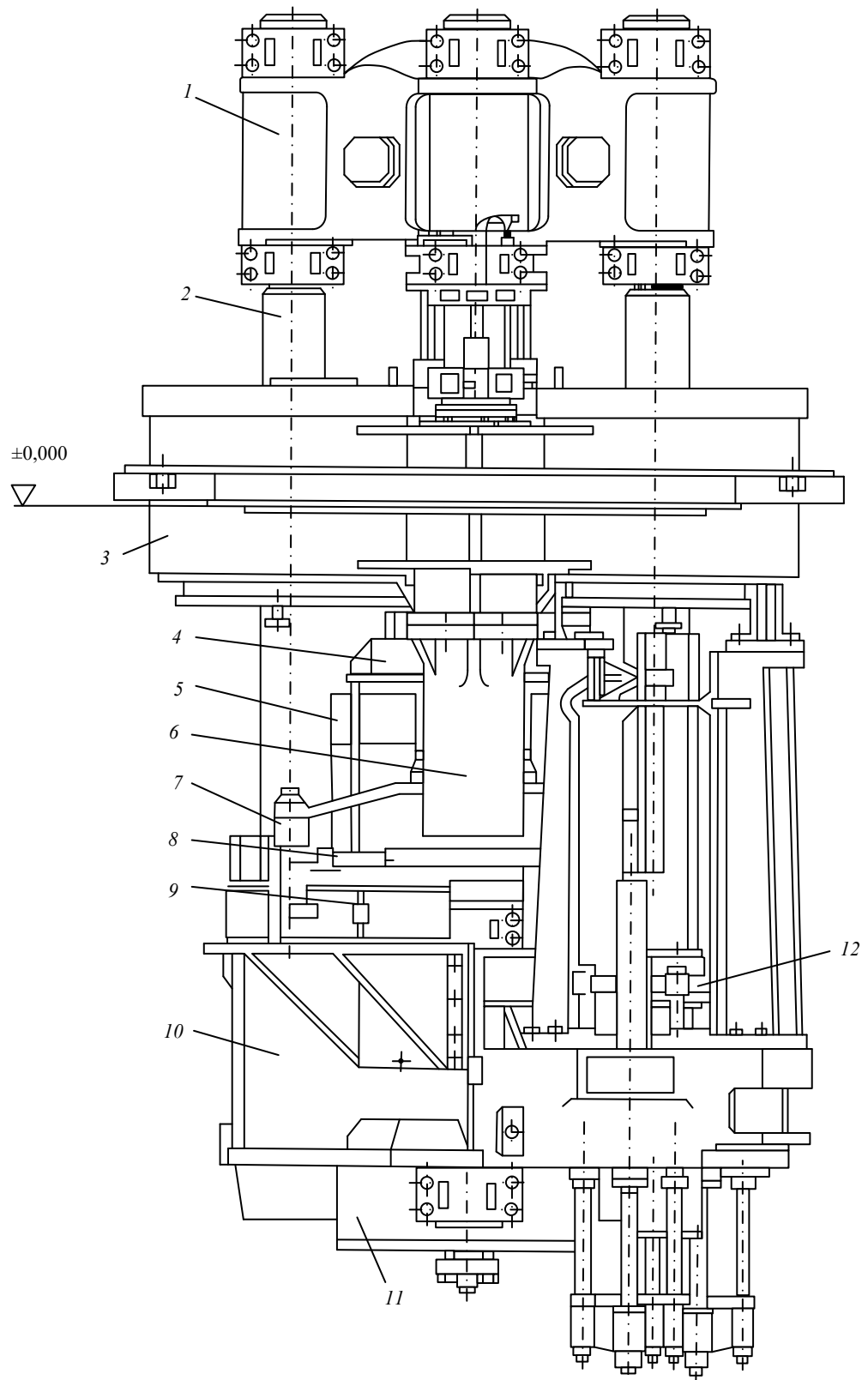


Рис.1.4. Вертикальний прес з поворотним столом: 1 – верхня траверза; 2 – колонна; 3 – поворотний стіл; 4 – поперечини; 5 – поперечний циліндр підйому матриці; 6 – опорна втулка; 7 – зубчасте колесо; 8 – шестерня; 9 – редуктор; 10 – нижня траверза; 11 – головний циліндр; 12 – виштовхувач

Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата	
ДП ЛА52.01.00.000 ПЗ					21

В електродній та електровугільній промисловості переважна кількість пресів має горизонтальне розташування. Горизонтальні преси мають різноманітні конструкції. Головна відмінність в конструкції пресів пов'язана з пристосуванням контейнера для маси.

Преси з поворотними контейнерами використовуються в тих випадках, коли передбачається операція трамбування, при якій електродна маса спеціальними машинами затрамбовується в контейнер пресу. Поворот контейнера використовується і в тому випадку, коли операція трамбування винесена за межі установки. В цьому випадку потрібне пристосування для транспортування та завантаження блока маси в контейнер.

Преси з нерухомими контейнерами застосовуються, коли трамбування маси не проводиться. В цьому випадку маса через завантажувальний отвір форкамери невеликими порціями вводиться в контейнер та запресовується. Для того, щоб заповнити контейнер масою, операція завантаження маси в контейнер здійснюється робочим плунжером.

Горизонтальні преси поділяються на апарати з форкамерним завантаженням та з рухомими контейнерами.

На рис. 1.5 зображений горизонтальний чотирьох колонний прес з нерухомими контейнерами та форкамерою для завантаження маси. Прес має один робочий циліндр 2 та два циліндра зворотного ходу 1 з диференційними плунжерами в задній траверсі 3. Крім цього, він забезпечений додатковою траверзою затвора 12 для підпресовки маси та ножицями 11. Привід затвора та ножиць здійснюється гідравлічними циліндрами подвійної дії.

Основною частиною пресу є дві нерухомі траверси 3 й 8 – траверза головного плунжера та траверза контейнера зі змонтованими в них вузлами та зі з'єднаними колонами 5.

Основна частина пресу монтується на рамі 4, звареної з швелерів та встановленої на бетонному фундаменті.

На передній кінець пресового плунжера надіта пресуюча плита 7, яка

ДП ЛА52.01.00.000 ПЗ

Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата	

передає зусилля безпосередньо на масу всередині контейнера. Контейнер пресу вставлений в траверзу збоку головного плунжера 6. Він представляє собою циліндричну втулку великого діаметра, забезпечену всередині гільзою зі зносостійкої сталі. Гільза вставляється в контейнер на гарячій посадці з підігрівом його до 300° С. Підігрів контейнера здійснюється робочою обігрівальною системою. На вихідному кінці контейнер забезпечений проточкою для з'єднання з мундштуком за допомогою роз'ємного хомуту.

Завантажувальна камера 10 (мундштук) представляє собою ребристий стальний вилівок у формі обичайки з воронкою та шістьма кронштейнами для кріплення до контейнера та його траверзи [3].

<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підп.</i>	<i>Дата</i>	<i>ДП ЛА52.01.00.000 ПЗ</i>	23

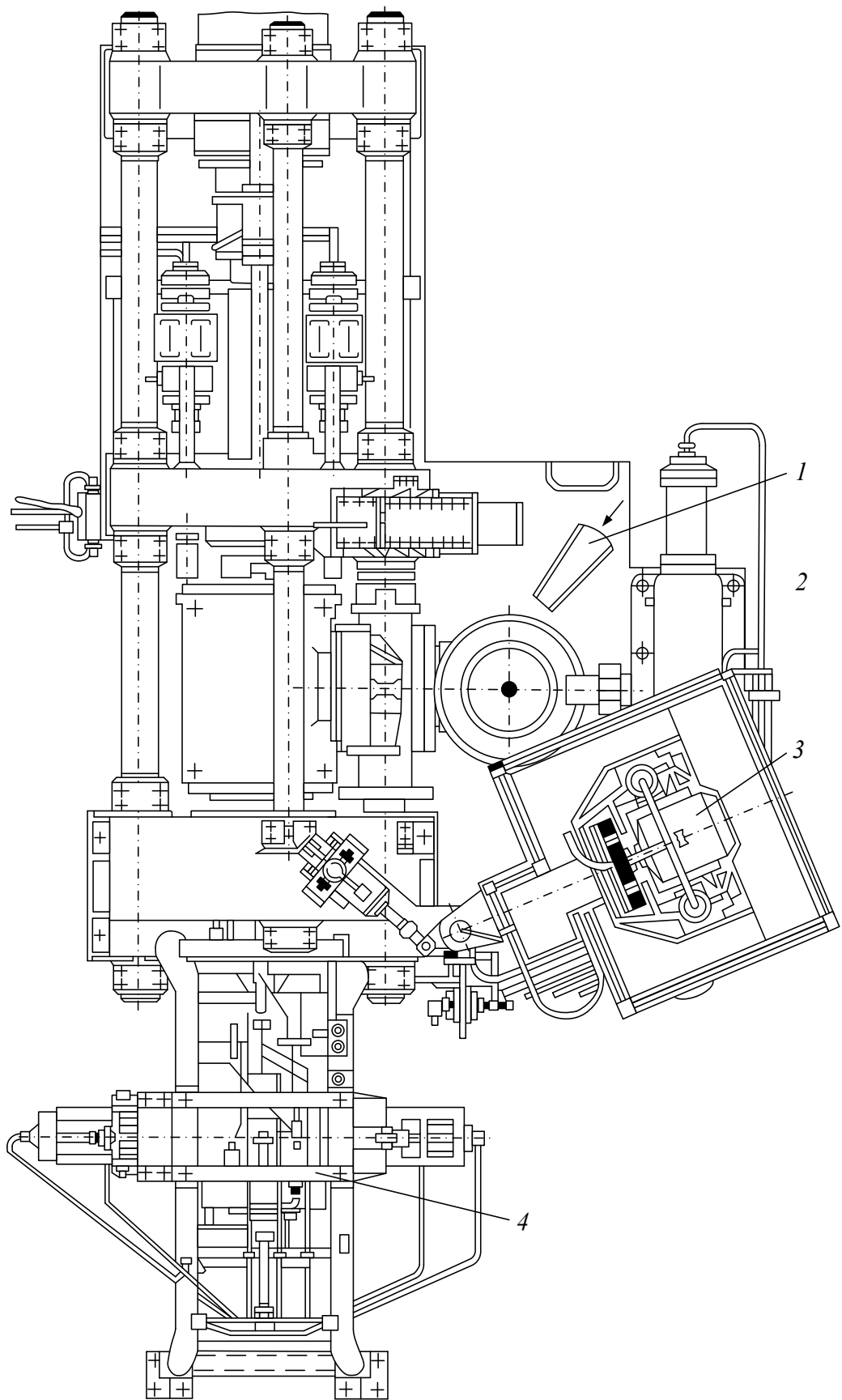


Рис.1.6. Горизонтальний гідравлічний прес з рухомими контейнерами: 1 – завантажувальний пристрій; 2 – кантувач; 3 – трамбовка; 4 – приймальний пристрій

Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата

ДП ЛА52.01.00.000 ПЗ

1.4 Параметрична схема процесу формування вуглецевих виробів

На рис. 1.7 наведена структурно-параметрична схема процесу пресування.

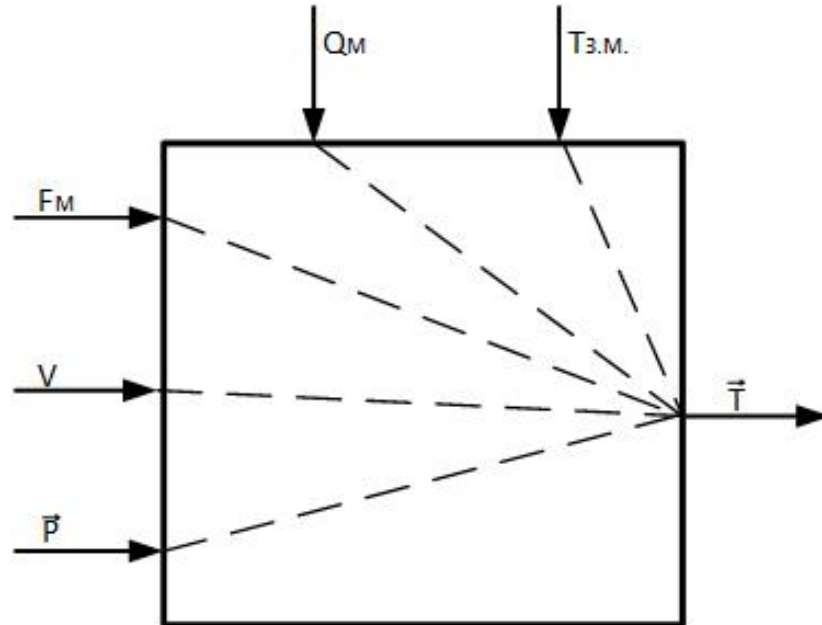


Рис. 1.7. Структурно-параметрична схема можливих каналів регулювання пресу

На схемі позначені такі технологічні параметри:

F_M – витрата матеріалу на вході в прес;

V – швидкість пресування;

\vec{P} – потужність нагрівачів;

Q_M – склад матеріалу, що подається на пресування;

$T_{z.m.}$ – температура завантажувального матеріалу;

\vec{T} – температура в контрольних точках на виході з мундштука.

З вище наведеної схеми випливає, що найважливішим параметром керування в процесі пресування є температура в контрольних точках на виході з мундштука.

Керувати температурою на виході можна за допомогою таких параметрів як швидкість пресування або потужність нагрівачів.

II РОЗДІЛ. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ ВУГЛЕЦЕВИХ ВИРОБІВ

В даній роботі планується дослідження впливу технологічних змінних на процес формування вуглецевих виробів. Оскільки виконання експериментів на реальному об'єкті представляється на даний момент неможливим, з'являється необхідність використання математичних моделей.

2.1. Аналіз існуючих математичних моделей процесу формування у виробництві вуглецевих виробів

На даний момент існує велика кількість праць, присвячених як процесу екструзії [4-8], так і дослідженню властивостей вуглецевих виробів [9-12], але питання моделювання процесу формування вуглецевих виробів розглядається нечасто. Тому доцільним буде аналізувати й моделі процесів, що мають схожі фізико-хімічні основи та конструкційні особливості апаратів.

В працях [4-7] детально розглянуто теоретичні засади екструзії полімерів. Не дивлячись на те, що для опису даних процесів використовуються рівняння руху, нерозривності та енергії, за допомогою яких можна описати й формування вуглецевих заготовок, але представлені в даних роботах моделі не доцільно використовувати як основу в створенні математичної моделі формування вуглецевих заготовок, адже в них розглядається екструзія саме полімерів (тобто не враховуються особливості вуглецевих матеріалів). До того ж здебільшого розглядається екструзія полімерних матеріалів за допомогою черв'ячних пресів, тоді як формування вуглецевих заготовок відбувається видавлюванням електродної маси через мундштук за допомогою плунжера.

Процес формування через мундштук розглянуто в роботі [8]. В ній, на базі класичних рівнянь ізотермічної напірної течії двох реологічно різних в'язко пластичних середовищ, що не змішуються в циліндричному каналі та

підкорюються закону Оствальда-де-Віля, синтезована модель течії двох

ДП ЛА52.01.00.000 ПЗ

Автори [12] розробили дослідну установку, що дає змогу проводити вимірювання ефективної динамічної в'язкості композитних матеріалів на основі пеку та термообробленої вуглецевої сировини, а також визначили температурні залежності динамічної в'язкості різних за складом вуглецевих композицій, що можуть бути використані при моделюванні процесу формування.

В одній з небагатьох праць, присвячених питанню моделюванню процесу формування саме вуглецевих виробів представлено модель екструзії в'язко-пластичної вуглецевої маси [13], адекватність якої була доведена в цій же роботі, а похибка не перевищувала 4-6%. Оскільки серед всіх розглянутих моделей дана модель єдина доволі точно описує саме процес формування вуглецевих виробів, то доцільним є її використання в подальших дослідженнях.

2.2 Процес формування як об'єкт математичного моделювання

Найважливішим етапом при математичному моделюванні є етап пресування вуглецевої маси. Даний процес відбувається в межах мундштука та масного циліндру. Охолоджена маса подається в форкамеру пресу, звідки плунжером просувається в масний циліндр. У масному циліндрі маса піддається підпресуванню. Після повного заповнення масного циліндру відбувається пресування, яке полягає в видавлюванні маси через отвір мундштука з метою надання заготовці визначеної геометричної форми, розмірів та щільності. Поверхня формуючої та калібруючої зон мундштука підігрівається відповідними індукторами, а краї калібруючої зони додатково підігріваються свічками (рис. 2.1).

					<i>ДП ЛА52.01.00.000 ПЗ</i>	31
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підп.</i>	<i>Дата</i>		

$$\Delta H = H_1 - H_2 = 4\tau_0\rho g d.$$

Отже, у такий спосіб при перевищенні різниці тисків розрахованої величини, рідина почне переміщатись по трубі, а режим її руху буде залежати від величини ΔH .

Існує три режими перебігу в'язко-пластичної рідини: структурний, ламінарний та турбулентний. Для початку руху рідини в структурному режимі необхідною умовою є $\Delta H = H_1 - H_2 > 4\tau_0\rho g d$, при цьому під величиною статичної напруги зсуву слід розуміти величину, яка відповідає тривалому спокою рідини.

Структурний режим перебігу рідини передбачає наявність вздовж стінок труби суцільного ламінарного шару рідини. В центральній частині труби спостерігається ядро течії, де рідина рухається, зберігаючи при цьому структуру твердого тіла. Радіус центрального ядра потоку \tilde{r} визначається з наступної формули:

$$\tilde{r} = \frac{2\tau_0 l}{\rho g \Delta H}.$$

Якщо ΔH збільшується, то розміри ламінарної зони будуть також поступово збільшуватись за рахунок зменшення розмірів ядра потоку доти, поки структурний режим повністю не перейде в ламінарний режим руху рідини (рис. 2.3). У подальшому ламінарний режим поступово перейде в турбулентний.

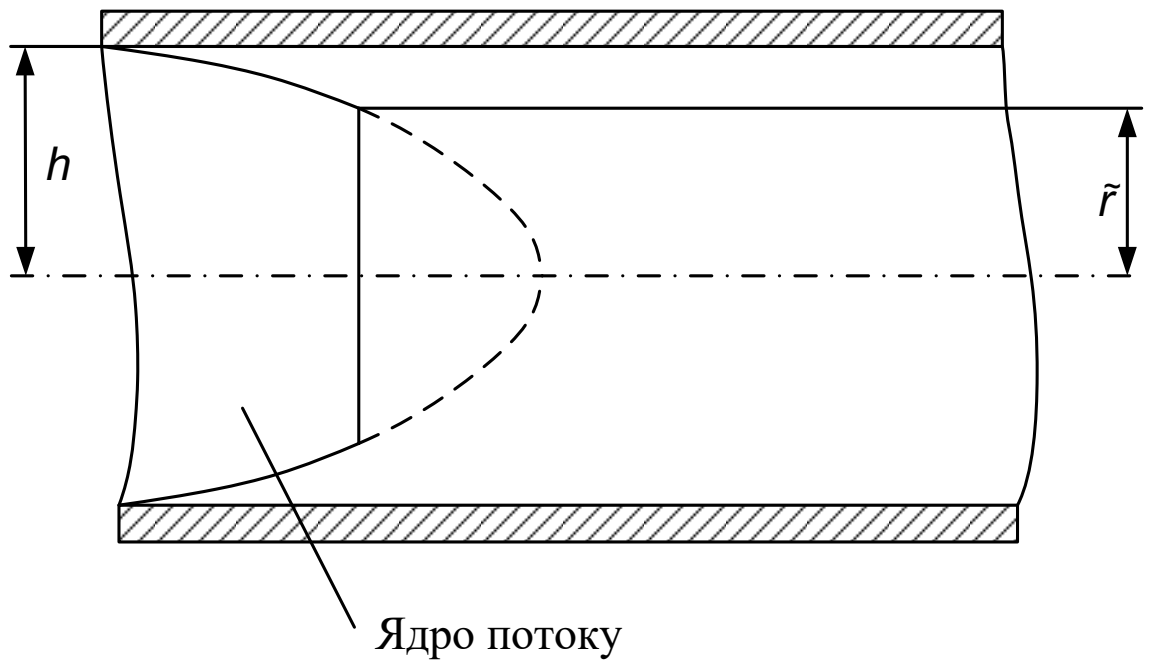


Рис. 2.3. Розподіл швидкості в'язко-пластичної рідини по перетину труби

Для формулювання закону розподілу швидкостей по перетину потоку при структурному режимі руху рідини запишемо функцію для дотичних напруг у відповідності до формули Бінгама:

$$f(\tau) = \frac{\tau - \tau_0}{\mu}.$$

Потім розподіл швидкостей по перетину труби можна виразити наступним чином:

$$u(r) = \frac{h}{\tau_w} \int_{\tau}^{\tau_r} \frac{\tau - \tau_0}{\mu} d\tau,$$

де τ_w – дотична напруга на стінці труби радіусом h ; $u(r)$ – швидкість рідини на відстані r від центра труби.

Після інтегрування цього рівняння отримаємо:

$$u(r) = \frac{h\tau_w}{\mu} \left[\frac{1}{2} \left(1 - \frac{\tau^2}{\tau_w^2} \right) - \frac{\tau_0}{\tau_w} \left(1 - \frac{\tau}{\tau_w} \right) \right].$$

І остаточно:

$$u(r) = \frac{\Delta P}{4\mu l} \frac{1}{2} (h^2 - r^2) - \frac{\tau_0}{\mu} (h - r),$$

$$\Delta P = \frac{\Delta H}{\rho g}$$

Для визначення швидкості в ядрі потоку приймемо $r = \tilde{r}$, де \tilde{r} – радіус ядра потоку. Тоді величина швидкості в цьому ядрі потоку дорівнює:

$$\tilde{u} = \frac{\Delta P}{4\mu l} \frac{1}{2} (h^2 - \tilde{r}^2) - \frac{\tau_0}{\mu} (h - \tilde{r}).$$

Модель Бінгама для визначення напруги зсуву визначається наступним чином:

$$\begin{aligned} \tau &= -\tau_0 + \mu \dot{\gamma} \quad \text{для } |\tau| > \tau_0 \\ \dot{\gamma} &= 0 \quad \text{для } |\tau| \leq \tau_0 \end{aligned}$$

де τ - напруга зсуву, Па; $\dot{\gamma}$ - швидкість деформації, 1/с; τ_0 – напруга текучості, Па; μ - пластична в'язкість, Па · с.

Варто зазначити що, коли напруга зсуву опускається нижче напруги текучості, то рідина являє собою тверде тіло.

В роботі [13] використовується модифікація Папанастасіо, який запропонував важливе рівняння для матеріалів з текучістю, в якому параметри матеріалу контролюють експоненціальне зростання напруги. В простому напруженому потоці модифікація Папанастасіо для моделі Бінгама перетвориться до наступного вигляду:

$$\tau = \tau_0 [1 - e^{-m\dot{\gamma}}] + \mu \dot{\gamma},$$

де m - зростаюча експонента напруги.

За твердженням автора це рівняння дає близькі результати до ідеальної рідини Бінгама при значеннях $m \geq 100$, а також забезпечує кращу наближеність до реальних даних в'язко-пластичних матеріалів при $m < 100$.

Вищенаведене рівняння Папанастасіо використано для завдання властивостей коксопекової маси при моделюванні в'язко-пластичного потоку коксопекової маси в мундштуці.

Враховуючи вище написане, математична модель процесу екструзії коксопекового композиту виражається системою рівнянь, яка включає

нестационарні, нелінійні рівняння неперервності, руху та енергії для				
ДП ЛА52.01.00.000 ПЗ				
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата

ламінарного потоку нестискуваної рідини Bingham-Papanastasiou для преси-маси та рівняння енергії з внутрішнім джерелом тепла для елементів пресового інструмента:

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

де ρ – густина кг/м³; t – час, с; p – тиск, 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} – коефіцієнт ефективності теплопровідності, Вт/(м·К); $\bar{\tau} : \nabla \mathbf{v}$ – член рівняння, який відповідає дисипації механічної енергії, Вт/м³; $(:)$ – оператор подвійного скалярного добутку; q_v – об’ємна густина джерела тепла, Вт/м³.

За початкові умови системи рівнянь беруть розподіл полів компонент вектора швидкості, тиску і температури:

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

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

Для врахування різних етапів процесу пресування застосовуються динамічні граничні умови. Дані граничні умови відображають зміни в розрахунковій області під час підпресування матеріалу, пресуванні окремих заготовлених частин і підготовки для технологічних операцій, а також зміни режиму роботи нагрівальних елементів пресового інструмента.

Для маси, що рухається у внутрішньому просторі мундштука, задаються: у вхідному січенні (перетині) – нормальна швидкість і температура; в вихідному січенні (перетині) – нульовий градієнт тиску і температури; на поверхні контакту маса-елементи пресового інструмента –

умови проковзування і умови абсолютного теплового контакту.

$$\begin{cases} n \cdot v = v_{inlet}(t); \\ T = T_{inlet}(t), \\ n \cdot \nabla p = 0; \\ n \cdot \nabla T = 0, \\ \bar{\tau} = 0; \\ \{T\} = 0; \\ \{n \cdot q\} = 0, \end{cases}$$

де n – зовнішня нормаль до поверхності вхідного або вихідного січення (перетину); τ_{wall} – тензор зміщення напруг на границі контакту маса-тверде тіло, Па; $\{T\} = T^+ - T^-$; $\{n \cdot q\} = n^- \cdot q^+ + n^+ \cdot q^-$.

Для елементів інструмента пресування задаються: умови теплообміну з навколишнім середовищем, умови абсолютного теплового контакту і внутрішнє

джерело тепла.

$$\begin{cases} n \cdot (-\lambda(T)\nabla T) = \alpha(T - T_{\infty}); \\ \{T\} = 0; \\ \{n \cdot q\} = 0; \\ q_v = q(t), \end{cases}$$

де T_{∞} - температура навколишнього середовища, К; q – внутрішнє джерело тепла, який додається нагрівальними елементами, Вт/м³.

Наведена вище система рівнянь складає математичну модель процесу формування вуглецевих виробів, що дає змогу визначити температурне поле як в пресовому інструменті так і в самій електродній масі, розрахувати розподіл швидкостей в заготовці, що пресується, врахувати вплив зміни реологічних властивостей матеріалу на протікання процесу.

Перевірка адекватності даної моделі була проведена авторами [13] за допомогою експериментальних даних, отриманих на промисловому пресовому інструменті.

2.4 Дослідження властивостей об'єкта керування на основі

					математичної моделі	
					ДП ЛА52.01.00.000 ПЗ	
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		38

2.4.1. Постановка задачі дослідження формування вуглецевих виробів

Процес формування вуглецевих виробів є досить складним, з точки зору фізичних процесів, що проходять в ньому. Тому для ефективного керування даним процесом необхідно провести дослідження залежності фізичних полів від зміни технологічних режимів. Оскільки на якість сформованих виробів впливає температурний режим, то доцільним є дослідження саме температурних полів.

В даній праці було досліджено зміну температурного поля в залежності від таких технологічних параметрів: потужності індукторів формувальної та калібрувальної зони мундштука, свічок для додаткового нагріву мундштука, температури поверхні масного циліндру та швидкості пресування. Послідовність технологічних режимів та тривалість моделювання при даних режимах наведено

в таблиці 2.1. При моделюванні зроблено наступне допущення: для дослідження динаміки об'єкту при пресуванні вважаємо за можливе безперервне формування виробів, але насправді тривалість пресування завжди скінченна та визначається завантаженням пресу. Оскільки перехідні процеси в мундштуці та електродній масі мають високу інерційність, то для їх дослідження необхідно проводити моделювання, що займає більше часу, ніж саме пресування.

Таблиця 2.1. Технологічні режими, що використовувались в дослідженні

<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підп.</i>	<i>Дата</i>	<i>ДП ЛА52.01.00.000 ПЗ</i>	39

№ п/п	Швидкість пресування, м/с	Потужність індуктора формувальної зони, Вт	Потужність індуктора калібрувальної зони, Вт	Потужність свічок для додаткового нагріву кутів калібрувальної	Температура верхні масного циліндра, °С	Тривалість моделювання, хв
1	0 (режим підготовки)	0	0	0	100	100
2	0	15000	15000	2000	100	100
3	0	15000	15000	4000	100	100
4	0	15000	30000	4000	100	100
5	0	30000	30000	4000	100	100
6	0	0	0	0	110	100
7	0	15000	15000	2000	110	100
8	0	15000	15000	4000	110	100
9	0	15000	30000	4000	110	100
10	0	30000	30000	4000	110	100
11	0.00033 (режим пресування)	0	0	0	100	100
12	0.00033	15000	15000	2000	100	100
13	0.00033	15000	15000	4000	100	100
14	0.00033	15000	30000	4000	100	100
15	0.00033	30000	30000	4000	100	100
16	0.00033	0	0	0	110	100
17	0.00033	15000	15000	2000	110	100
18	0.00033	15000	15000	4000	110	100
19	0.00033	15000	30000	4000	110	100
20	0.00033	30000	30000	4000	110	100
21	0.00053	0	0	0	100	100
22	0.00053	15000	15000	2000	100	100
23	0.00053	15000	15000	4000	100	100
24	0.00053	15000	30000	4000	100	100
25	0.00053	30000	30000	4000	100	100

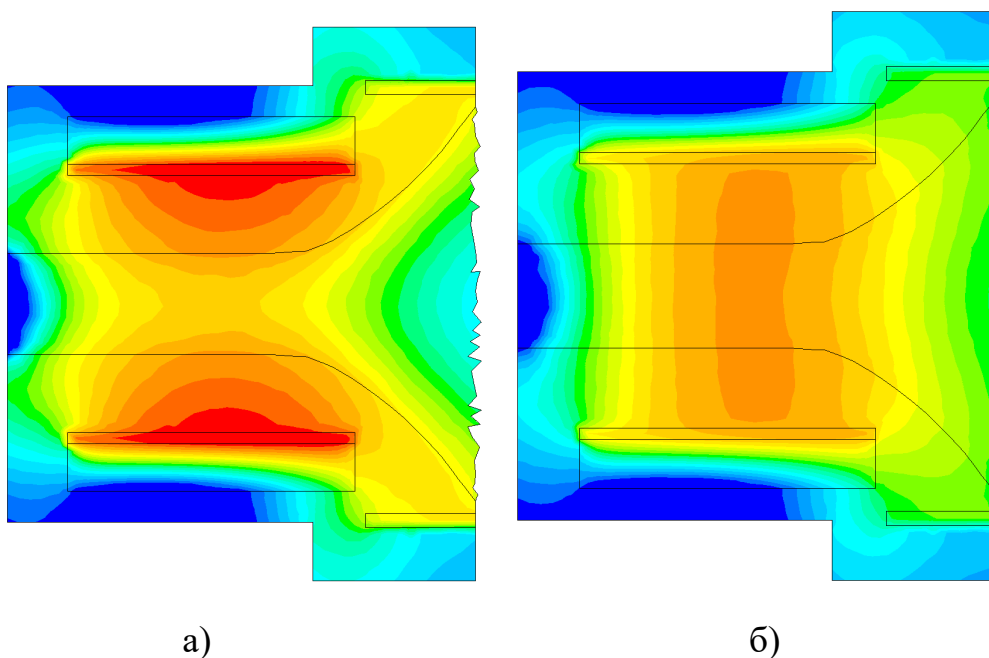
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата
-----	------	----------	-------	------

ДП ЛА52.01.00.000 ПЗ

Збільшення температури в перерізі I пояснюється тим, що початкові температури електродної маси для цього перерізу задавались з урахуванням теплообміну з навколишнім середовищем. Вони були значно нижчі за температуру поверхні мундштука та інших шарів електродної маси (рис. 2.6. (a)), а в подальшому маса в перерізі I нагрівалась в результаті теплообміну з більш нагрітими тілами.

Характер зміни температури в перерізі II змушує замислитись над наявністю транспортного запізнювання, що можна побачити на рис.2.7. (б). Навіть коли починається нагрів, температура в точках на межі електродна маса – поверхня мундштука продовжує зменшуватись наступні 25 хв. Така особливість може негативно вплинути на ефективність роботи системи керування, а тому має бути врахована при її розробці.

Температура в точках, що знаходяться на осі симетрії (T_{16} , T_{26} , T_{36}) зростає (рис.2.7.) в усіх перерізах, що пояснюється теплообміном з більш нагрітими шарами електродної маси.



ших – 11 °С за той самий час. Швидкість зростання температури в точках T_{12} , T_{14} поступово зменшується, що свідчить про малу інерційність. Після перших 25-30 хв нагріву температура в перерізі II починає зростати зі швидкістю 0,04 – 0,06 °С/хв. В перерізі III температура в точках на межі електродна маса – поверхня мундштука починає різко зростати (6 – 8 °С за 100 хв), при цьому швидкість зростання поступово зменшується, що свідчить про малу інерційність. Швидкість зміни температури в точках, що знаходяться на осі симетрії (T_{16} , T_{26} , T_{36}) на пряму залежить від градієнту температур в електродній масі в кожному з перерізів, що й видно на рис.2.7. (а-в).

При подальшому моделюванні зі збільшеною потужністю свічок для додаткового нагріву кутів калібрувальної зони (режим №3) було виявлено значне зростання температури як мундштука, так і електродної маси в зоні між I та II перерізом (рис.2.6. (г)). Очевидно, що найбільш інтенсивно буде збільшуватись температура в точках, що знаходяться біля свічок (20 °С за 100 хв.) та інших точках I перерізу (17°С за 100 хв.) (рис.2.7. (а)). Швидкість нагріву в II перерізі зростає до 0,075 °С/хв, що на перший погляд свідчить про вплив зміни потужності свічок на температури в II перерізі (рис.2.7. (б)). Але при детальному аналізі результатів було виявлено, що збільшення швидкості спричинено інерційністю та транспортним запізненням. Температура ж в III перерізі зростає на 2 °С за 100 хв. Така зміна спричинена поступовим виходом перехідної характеристики на новий рівень та свідчить про незалежність температури в III перерізі від потужності свічок (рис.2.7. (в)).

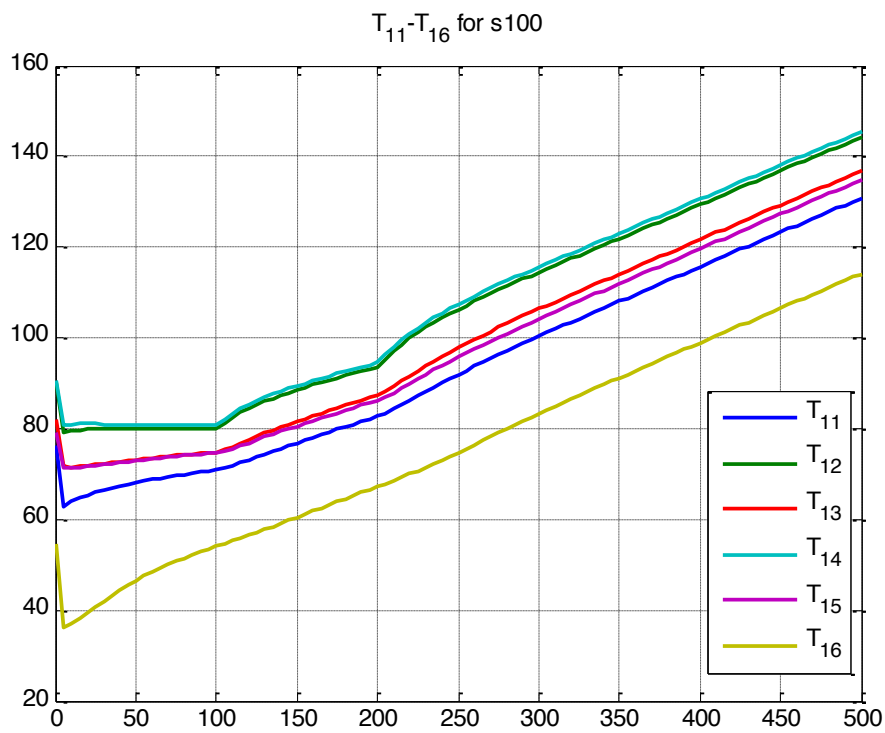
Збільшення потужності індуктора калібрувальної зони (режим №4) призвело до значного збільшення температури мундштука й електродної маси в перерізі II (рис.3.3. (д)). В перерізі I приріст температури склав 15 – 17 °С за 100 хв. Зміна швидкості спричинена поступовим виходом температур на новий рівень і свідчить про незалежність температури в I перерізі від потужності індуктора калібрувальної зони (рис.2.7. (б)). Швидкість зміни

<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підп.</i>	<i>Дата</i>	<i>ДП ЛА52.01.00.000 ПЗ</i>				45

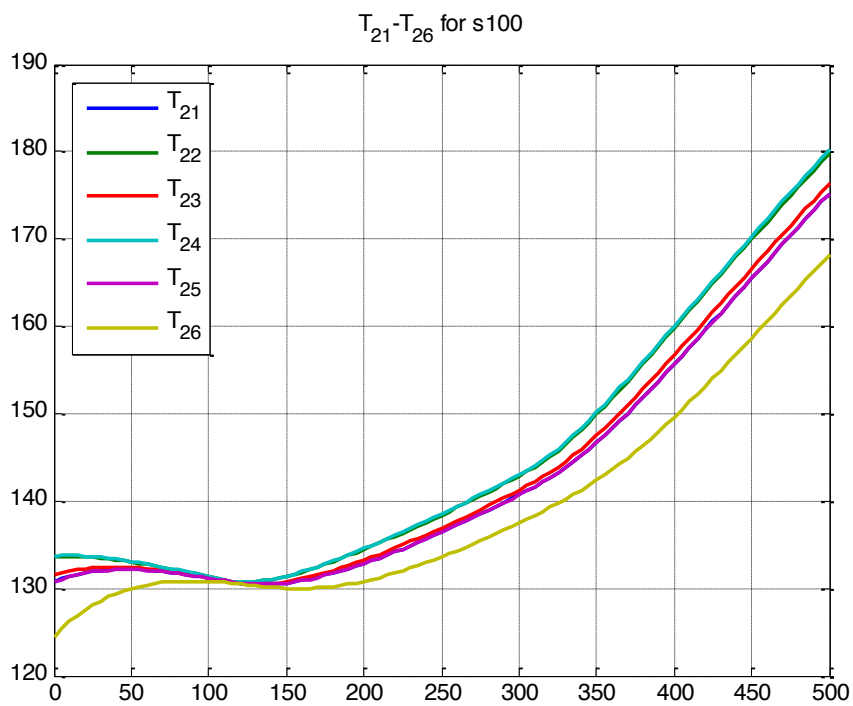
температури в II перерізі перші 25-30 хв не змінюється в порівнянні з попереднім режимом, що ще раз доводить існування транспортного запізнення, але потім значно зростає до 1,8 °C/хв. (рис.2.7. (б)). В III перерізі температура зростає на 1,5 °C, аналіз отриманих результатів показав незалежність температури в III перерізі від потужності індуктора калібрувальної зони.

Моделювання зі збільшеною потужністю індуктора формувальної зони (режим №5) виявило значне зростання температури зони мундштука між індукторами формувальної та калібрувальної зони (рис.2.6. (е)). Температура в I перерізі зменшується на 14 – 15 °C за 100 хв. (рис.2.7. (а)), характер зміни температури в даному перерізі дає змогу зробити висновок про незалежність температури в I перерізі від потужності індуктора формувальної зони. А збільшення швидкості зміни температури в II перерізі до 2 °C/хв може свідчити про доволі значний вплив потужності індуктора формувальної зони на температуру в цьому перерізі. Найбільше зросла температура в III перерізі (15 °C за 100 хв) (рис.3.4. (в)). При цьому динаміка температури свідчить про досить швидку реакцію температури в цьому перерізі на зміну потужності індуктора формувальної зони.

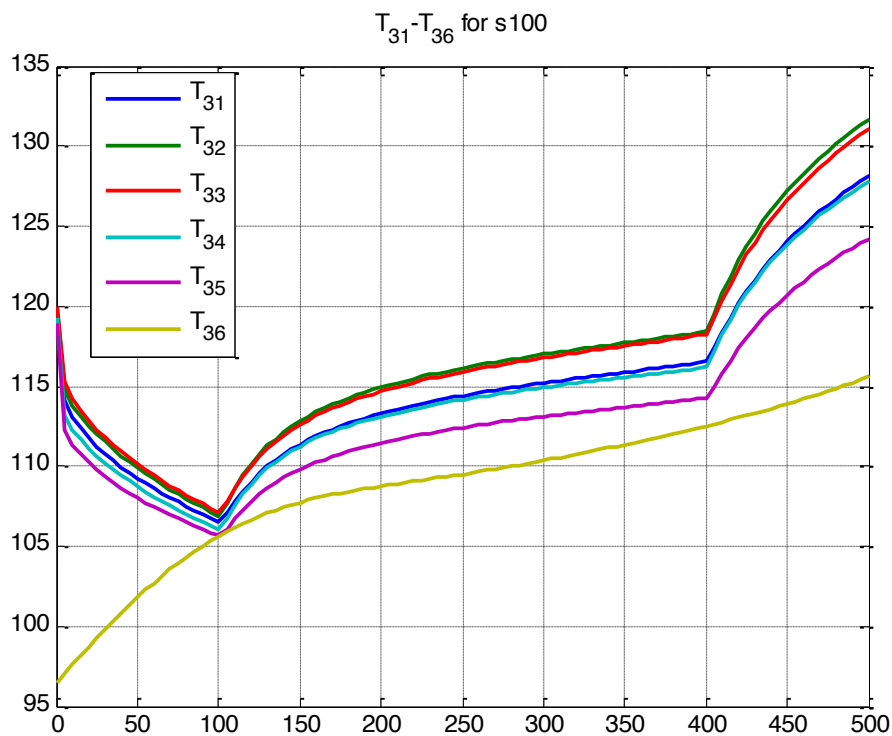
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата	ДП ЛА52.01.00.000 ПЗ	46



a)



б)



в)

Рис.2.7. Динаміка температури в контрольних точках ((а) – I перерізу, (б) – II перерізу, (в) – III перерізу)

2.4.3 Температурне поле в режимі підготовки за температури масного циліндру 110 °С

В даному пункті було досліджено температурні поля при моделюванні режимів 6-10 (табл.2.1.).

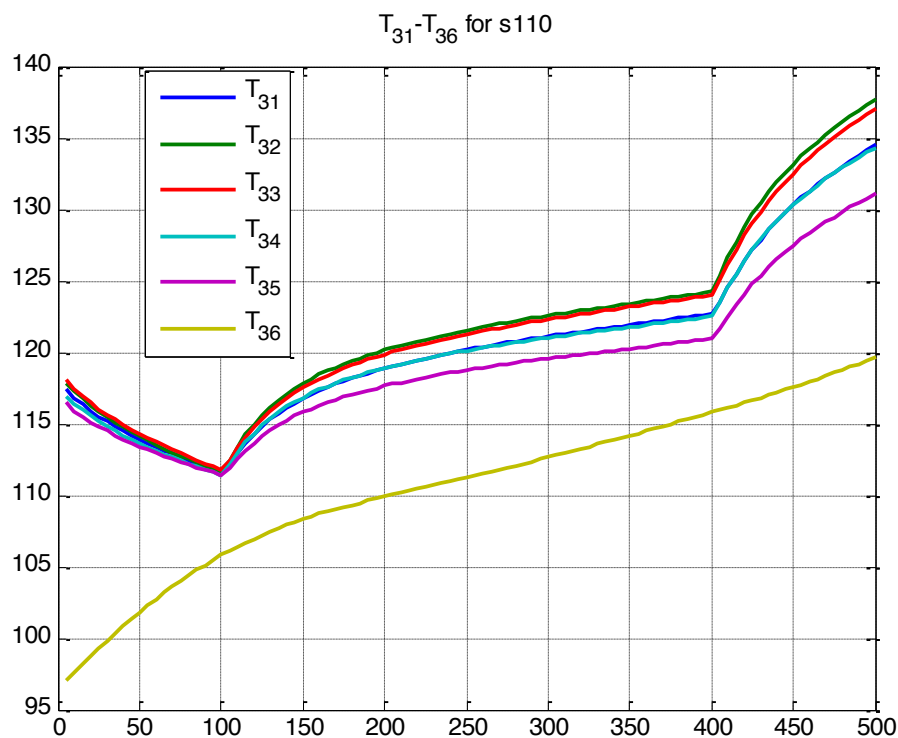
В умовах відсутності нагріву мундштука відбувається інтенсивне охолодження мундштука між II та III перерізом, аналогічно дослідженню в п.2.4.2. Наприкінці режиму №6 (рис.2.8 (в)) температура в перерізі III усе-реднюється тільки в точках, що знаходяться на межі поверхня мундштука – електродна маса. Температура в цих точках досягає 112 °С, що на 5 – 7 °С більше, ніж в попередньому дослідженні. Така зміна спричинена теплообміном між більш нагрітою поверхнею масного циліндра (в порівнянні з п.2.4.2) та шарами електродної маси, що знаходяться біля поверхні масного

При дослідженні динаміки зі збільшеною потужністю свічок для додаткового нагріву кутів калібрувальної зони (режим №8) було виявлено різке зростання температури шарів електродної маси, що знаходяться біля межі електродна маса – поверхня мундштука наприкінці калібрувальної зони (рис.2.8 (в)). Температура в III перерізі зростає в середньому на 2°C за 100 хв. (рис.2.9 (в)), а в точці T_{36} на 3°C за 100 хв, що більше на 1°C в порівнянні з аналогічним режимом попереднього пункту (режим №3), це спричинено теплообміном з більш нагрітими шарами електродної маси. Поступове зменшення росту температури спричинено виходом перехідної характеристики на новий рівень та свідчить про незалежність температури в II та III перерізах від потужності свічок (рис.2.9 (б, в)).

Збільшення потужності індуктора калібрувальної зони (режим №9) призвело до зростання температури мундштука біля перерізу II (рис.2.8 (г)). В III перерізі температура збільшується на 1,5 °C, що відповідає швидкості росту температури в режимі №4, але знову таки наприкінці режиму №9 температура в III перерізі становить 121 – 124 °C, що на 7 – 8 °C більше в порівнянні з тим же режимом №4. Аналіз отриманих результатів підтвердив незалежність температури в III перерізі від потужності індуктора калібрувальної зони.

Моделювання зі збільшеною потужністю індуктора формувальної зони (режим №10) виявило збільшення температури зони мундштука між індукторами формувальної та калібрувальної зони (рис.2.8 (д)). Аналогічно режиму №5 найбільше зросла температура в III перерізі (14 – 15°C за 100 хв.) (рис.2.9 (в)). Наприкінці режиму №10 температура становить 131 – 137,5°C, що на 6 – 7 °C більше ніж в режимі №5.

					ДП ЛА52.01.00.000 ПЗ	51
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		



в)

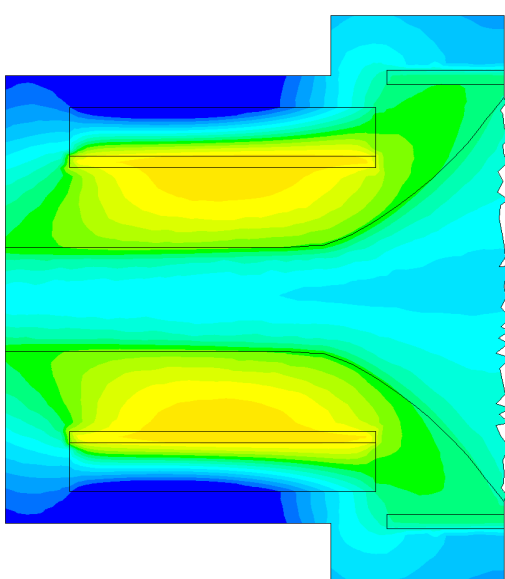
Рис. 2.9. Динаміка температури в контрольних точках ((а) – I перерізу, (б) – II перерізу, (в) – III перерізу)

2.4.4 Температурне поле в режимі пресування зі швидкістю 0,00033 м/с за температури масного циліндру 100 °С

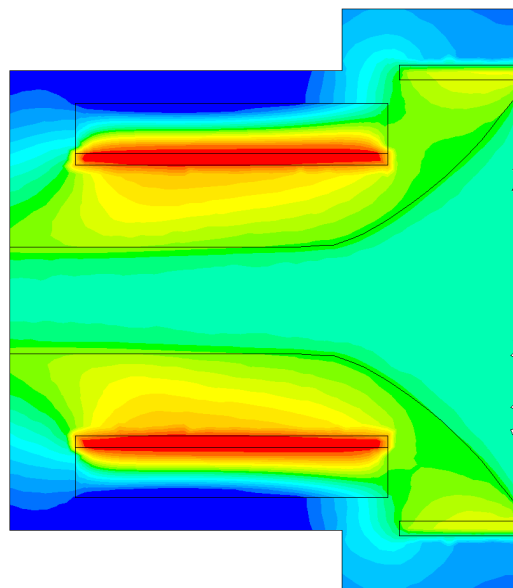
В даному пункті було досліджено температурні поля при моделюванні режимів 11–15 (табл.2.1.).

З початком роботи режиму пресування в умовах відсутності нагріву мундштука (режим №11) відбувається інтенсивне охолодження мундштука й електродної маси. Область мундштука біля індуктора формувальної зони охолоджується нижче температури електродної маси (рис.2.10 (а)), що пояснюється теплообміном з навколишнім середовищем. Наприкінці режиму №11 (рис.2.10 (а)) температура у всьому об'ємі електродної маси в значній мірі усереднюється та становить 95 – 115 °С. Температура в I перерізі перші 15 хв. різко зростає, що спричинено переміщенням більш гарячої електродної маси, що знаходиться між I та II перерізом до I перерізу. Надалі темпе-

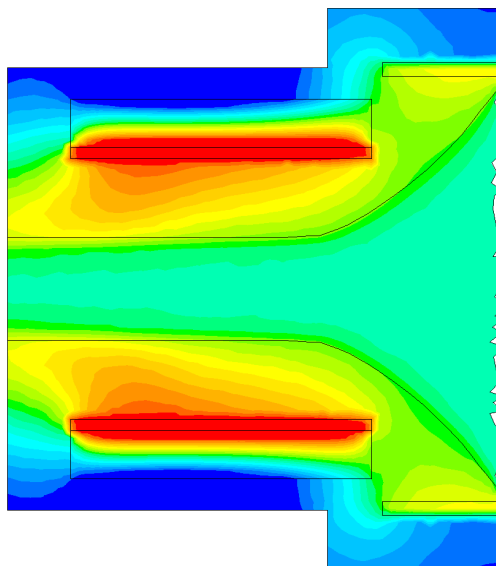
ратура в I перерізі починає зменшуватись зі швидкістю в середньому $0,12^{\circ}\text{C}/\text{хв}$. Температура ж в II перерізі поступово спадає на $17 - 18^{\circ}\text{C}$ за 100 хв, а в III перерізі на $11 - 12^{\circ}\text{C}$ за 100 хв.



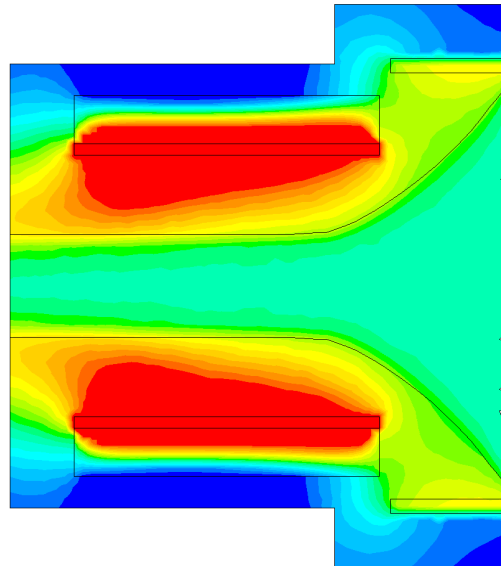
а)



б)

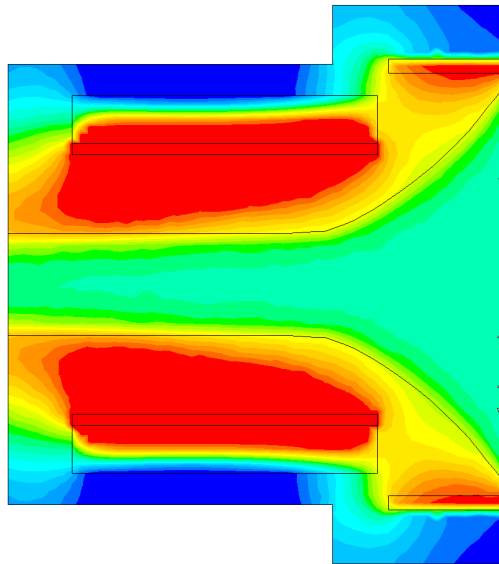


в)



г)

Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата



д)

Рис. 2.10. Температурне поле ((а) – наприкінці технологічного режиму №11, (б) – наприкінці технологічного режиму №12, (в) – наприкінці технологічного режиму №13, (г) – наприкінці технологічного режиму №14, (д) – наприкінці технологічного режиму №15)

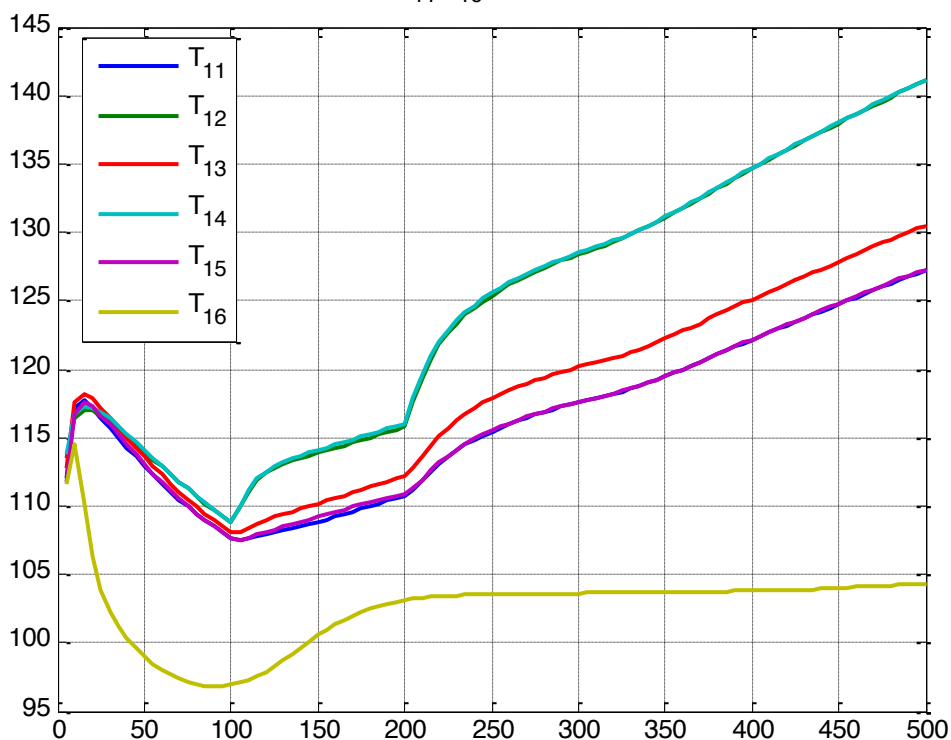
В результаті вмикання всіх нагрівачів (режим №12) значно зростає температура в зоні біля калібрувального нагрівача (рис.2.10 (б)). Температура в перерізі I починає зростати. Приріст температури склав 3 – 7°C. Швидкість зростання температури в точках T₁₂, T₁₄ поступово зменшується (рис. 2.11 (а)),

що свідчить про малу інерційність. Після перших 25 – 30 хв нагріву температура в перерізі II починає зростати зі швидкістю 0,02 – 0,04 °C/хв. В перерізі III температура також починає зростати (4,5 – 6,5°C за 100 хв), при цьому швидкість зростання поступово зменшується, що свідчить про малу інерційність (рис.2.11 (в)).

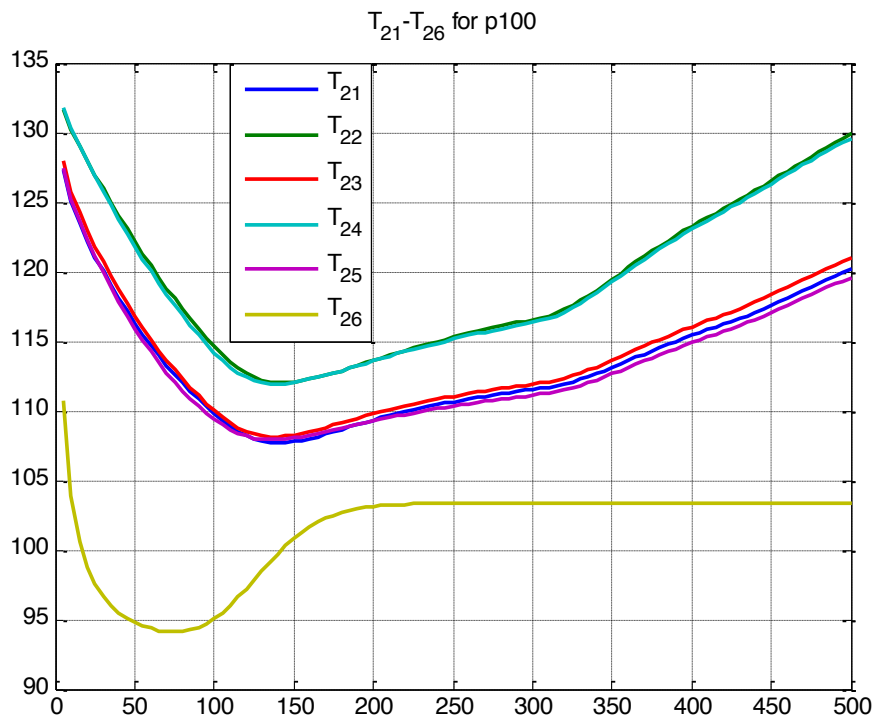
При подальшому моделюванні зі збільшеною потужністю свічок для додаткового нагріву кутів калібрувальної зони (режим №13) було виявлено значне зростання температури лише в області, що знаходиться безпосередньо близько до свічок (рис.2.10 (в)). Найбільше зросла температура в I перерізі (6 – 13 °C за 100 хв.) (рис.2.11 (а)). Швидкість нагріву в II перерізі

0,05 – 0,06°C/хв, що може свідчити про появу впливу потужності індуктора формувальної зони на температуру в цьому перерізі. Це означає, що зміна швидкості пресування впливає також на зв'язок між температурою в II перерізі та потужністю індуктора формувальної зони. Найбільше зросла температура в III перерізі (7,5 – 10°C за 100 хв) (рис.2.11 (в)). При цьому динаміка температури свідчить про досить швидку реакцію температури в цьому перерізі на зміну саме потужності індуктора формувальної зони.

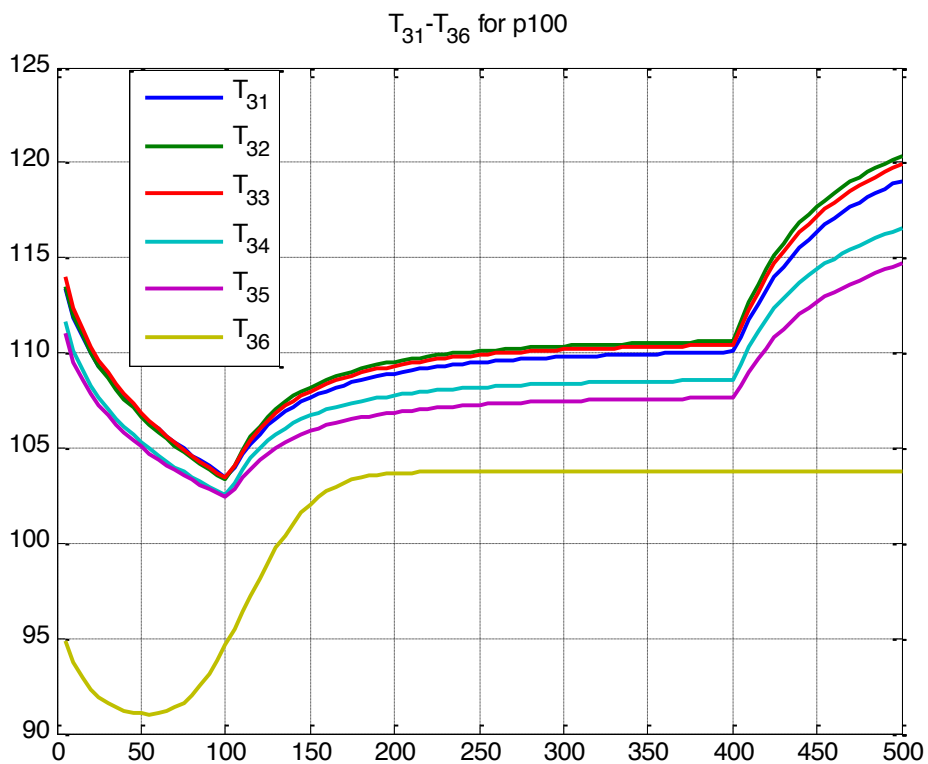
$T_{11}-T_{16}$ for p100



a)



б)



в)

Рис. 2.11. Динаміка температури в контрольних точках ((а) – I перерізу, (б) – II перерізу, (в) – III перерізу)

2.4.5 Температурне поле в режимі пресування зі швидкістю 0,00033 м/с за температури масного циліндру 110 °С

Дане дослідження включає в себе аналіз результатів моделювання режимів №16 – 20 (табл. 2.1.).

Зі збільшенням температури масного циліндру в умовах відсутності нагріву мундштука (режим №16) відбувається інтенсивне охолодження мундштука й електродної маси. Область мундштука біля індуктора формувальної зони так само як і в п.2.4.4 охолоджується нижче температури електродної маси (рис.2.12 (а)).

На відміну від режиму підготовки в режимі пресування зміна температури масного циліндру впливає на динаміку температури не лише в формувальній зоні мундштука, а й в усьому його об'ємі.

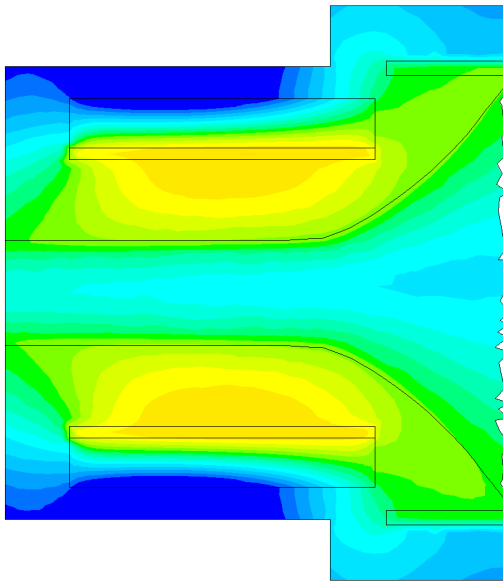
Наприкінці режиму №16 (рис.2.12 (а)) температура в усьому об'ємі електродної маси в значній мірі усереднюється та становить 95 – 115 °С. Температура в I перерізі знову росте перших 15 хв, після чого починає різко спадати зі швидкістю 0,12 °С / хв, що відповідає швидкості в режимі №11.

Температура ж в II перерізі поступово спадає на 17 – 18 °С за 100 хв, а в III перерізі на 6 – 7 °С за 100 хв, що на 5 °С менше ніж в режимі №11. Таким чином для режима №16 справедливим є твердження лише про наявність значного впливу зміни температури масного циліндру на температури в III перерізі та формувальній зоні мундштука. Відсутність значного впливу на весь інший об'єм пояснюється великою інерційністю реакції на зміну температури масного циліндру, що є наслідком геометричних особливостей мундштука. Так чи інакше при моделюванні наступних режимів наявність впливу зміни температури масного циліндра на температурні поля в усьому об'ємі мундштука стає очевидною.

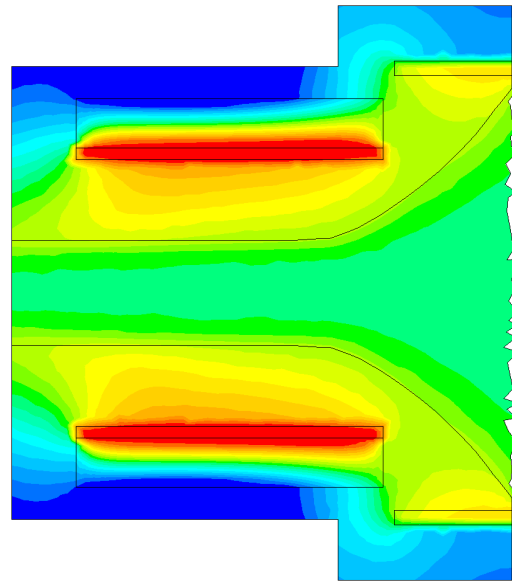
Температура в точках T₁₆, T₂₆, T₃₆ зростає до 104 – 105 °С (рис. 2.13), тоді, як в попередньому дослідженні (п.2.4.4) температура в даних точках

					ДП ЛА52.01.00.000 ПЗ	59
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

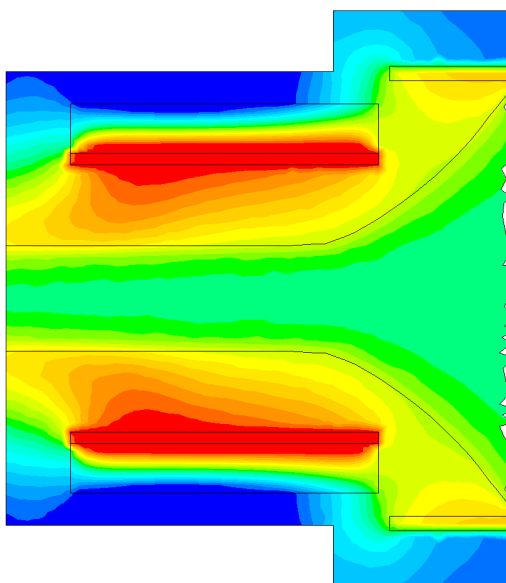
встановлюється на рівні 103,5 – 104,5 °С, що, очевидно є наслідком теплообміну з більш нагрітими шарами електродної маси.



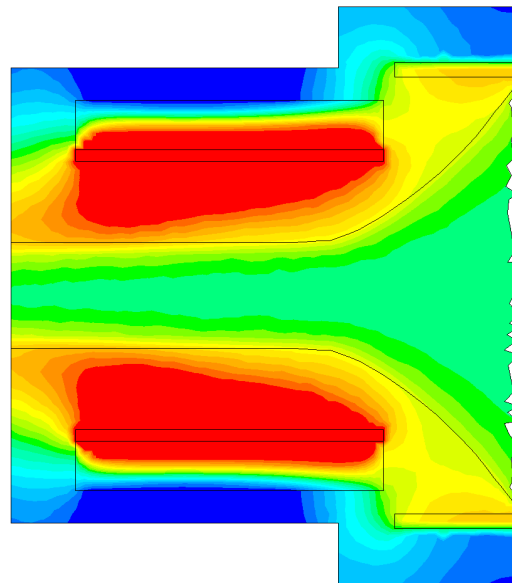
а)



б)

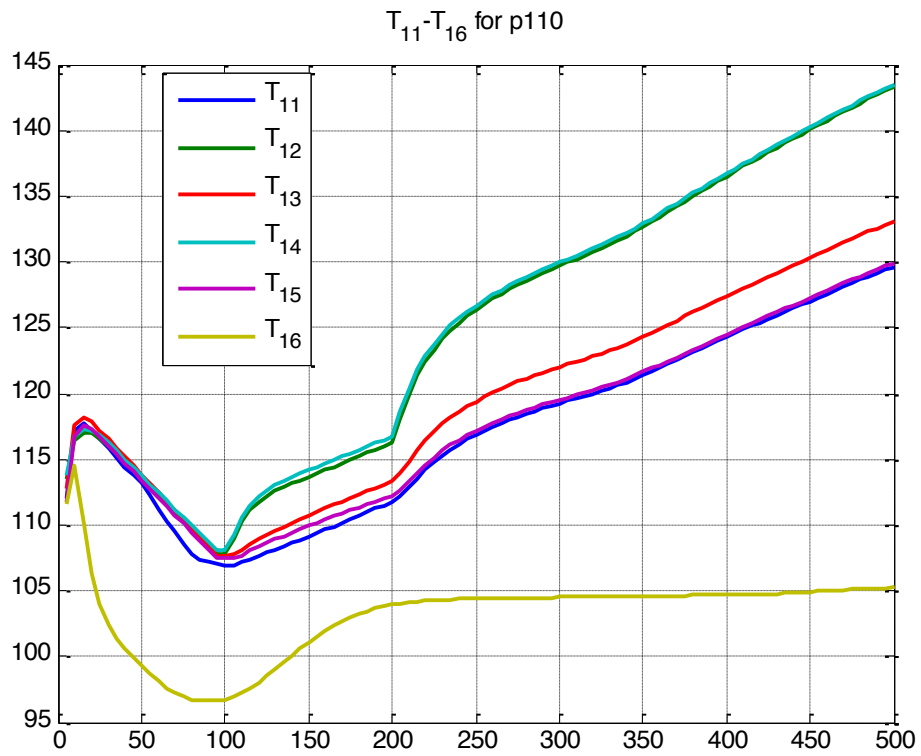


в)

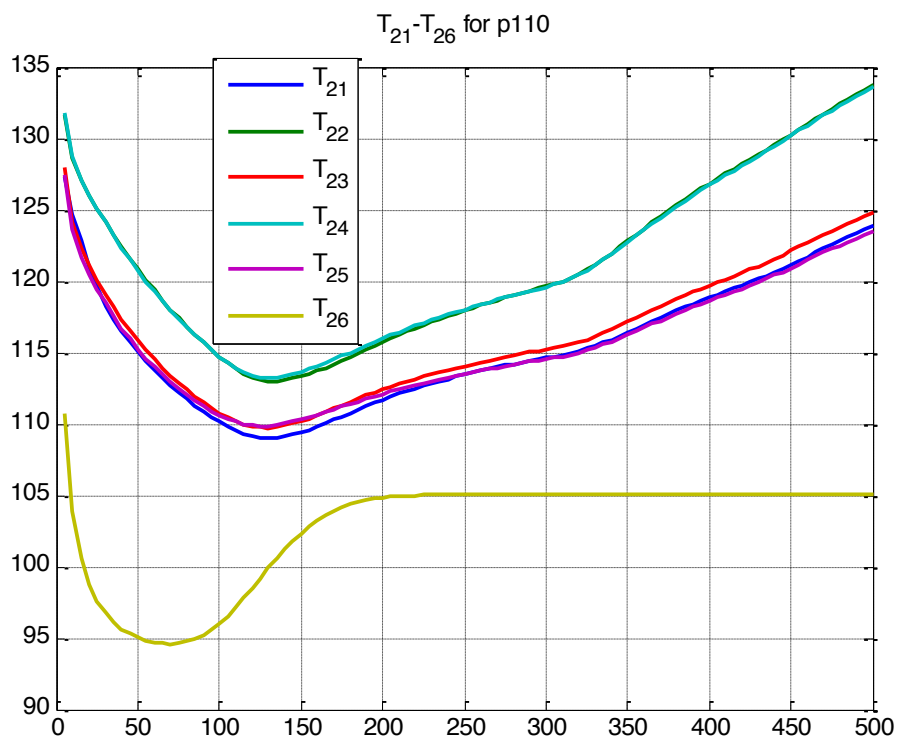


г)

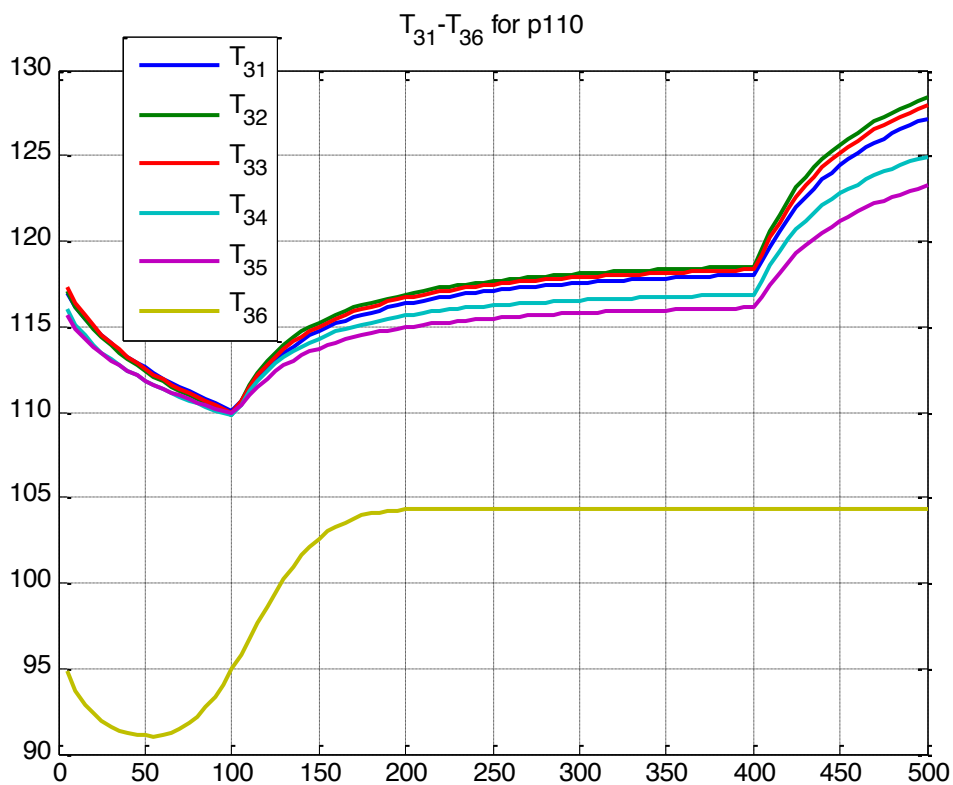
вплив температури масного циліндра на температурні поля мундштука в режимі пресування.



a)



б)



в)

Рис. 2.13. Динаміка температури в контрольних точках ((а) – I перерізу, (б) – II перерізу, (в) – III перерізу)

2.5 Ідентифікація впливу вхідних параметрів на температури в контрольних точках

Процес формування як об'єкт математичного моделювання є об'єктом з розподіленими параметрами, його математична модель являє собою систему нелінійних нестационарних рівнянь у частинних похідних. Час розрахунку такої моделі досить значний, що ускладнює дослідження об'єкту та унеможлиблює використання такої моделі в системах керування в реальному часі. Тому постає задача ідентифікації динаміки температур у характерних контрольних точках. Для цього необхідно обрати контрольні точки та провести ідентифікацію їх динаміки в залежності від технологічних параметрів. За контрольні було обрано точки, що характеризують динаміку температур наприкінці кожної зони мундштука (рис.2.16).

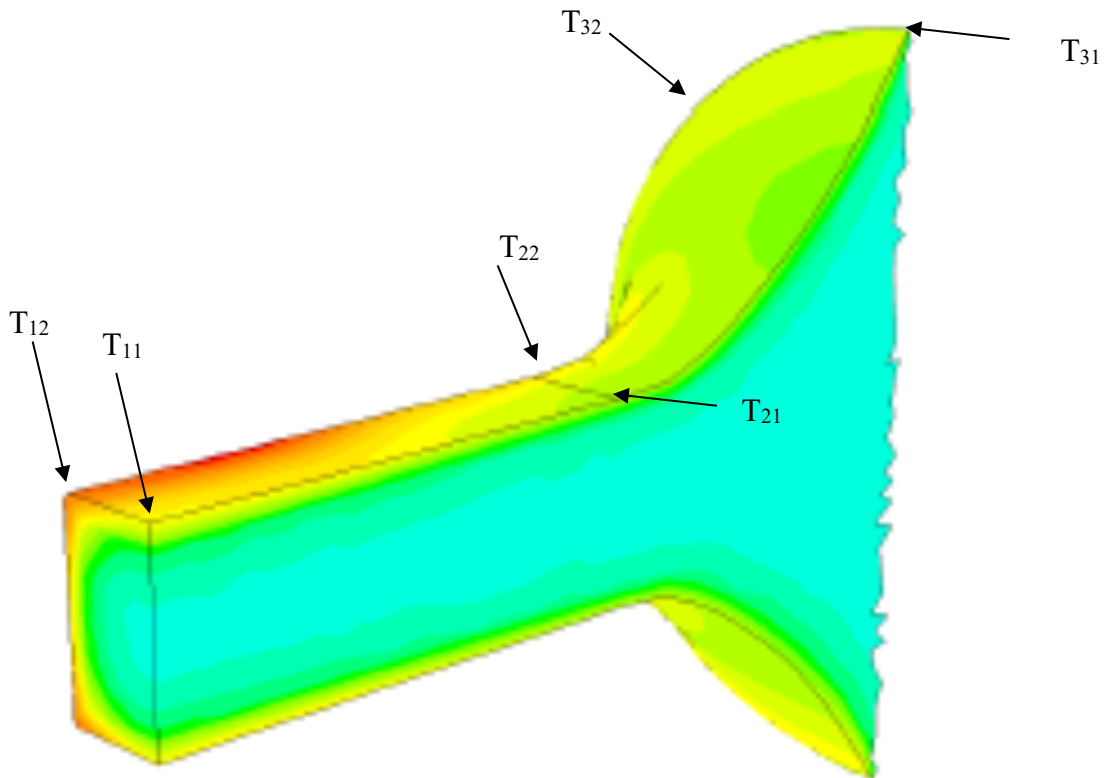


Рис.2.16. Розташування контрольних точок

На температури в контрольних точках впливають наступні технологічні параметри: потужність нагрівачів (індуктор формувальної зони, калібрувальної зони та свічок для додаткового нагріву наприкінці калібрувальної зони) (P_1, P_2, P_3), швидкість пресування (V) та температура завантаженого матеріалу (T_3). В результаті вищенаведених досліджень було виявлено, що на температури в контрольних точках вплив мають потужність нагрівачів, встановлених до цих точок в напрямку осі пресування. Вплив інших нагрівачів вважається нульовим, що й відображено в результатах ідентифікації. Окрім вищевказаних технологічних параметрів на температурні поля впливає також склад матеріалу, що є не вимірювальним збуренням і буде враховано у вигляді випадкового сигналу.

Ідентифікація була проведена на основі даних дослідження, наведеного вище в середовищі *Matlab* за допомогою аперіодичних ланок I та II-го порядків з запізнюванням.

Результати ідентифікації наведені на рис.2.17 – 2.22 та в табл. 2.2.

Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		
					ДП ЛА52.01.00.000 ПЗ	65

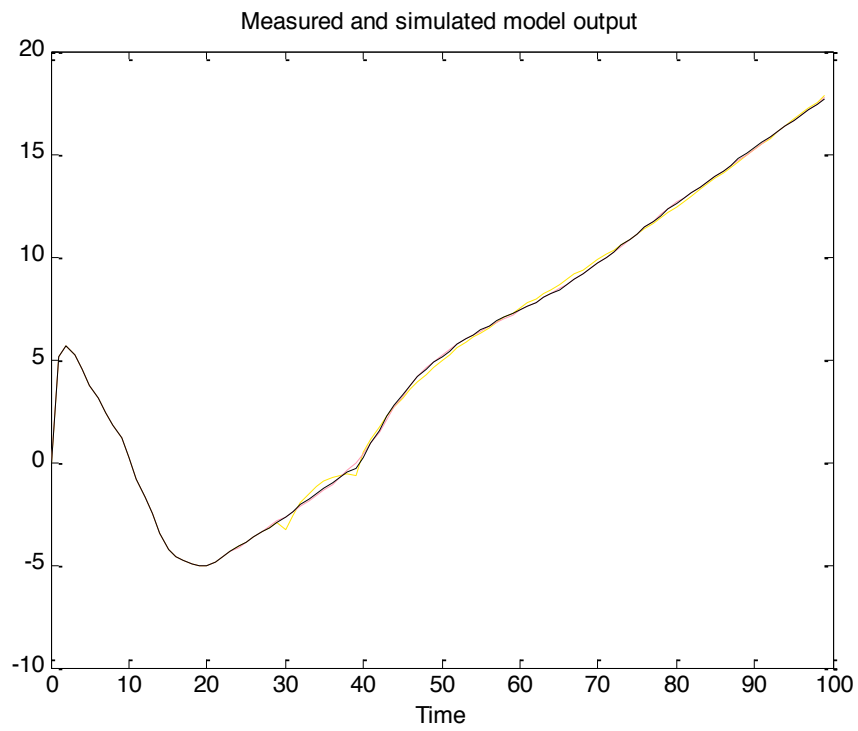


Рис.2.17. Результат ідентифікації для контрольної точки T11

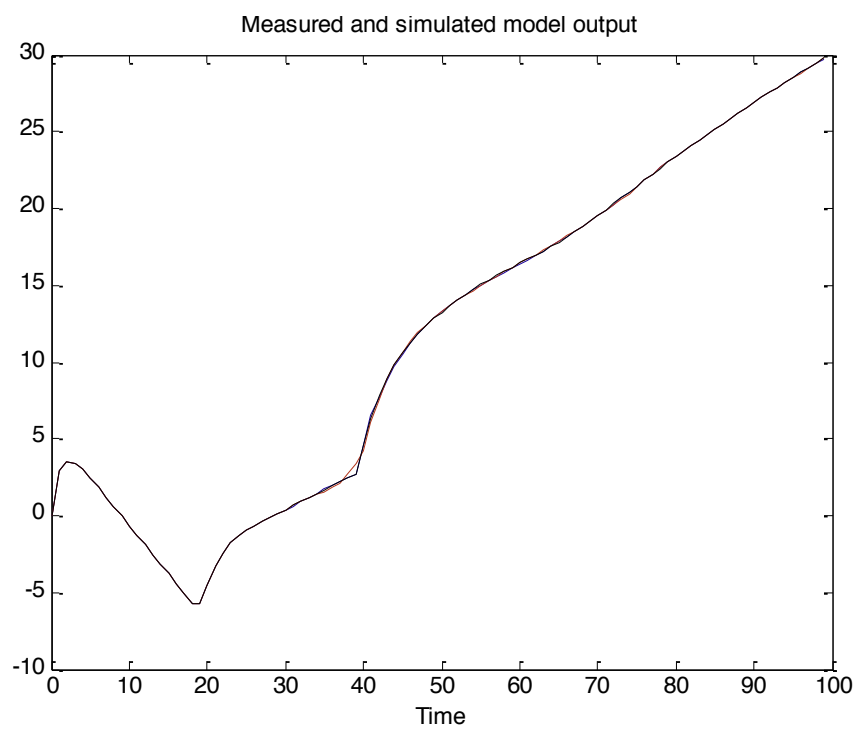


Рис.2.18. Результат ідентифікації для контрольної точки T12

Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата

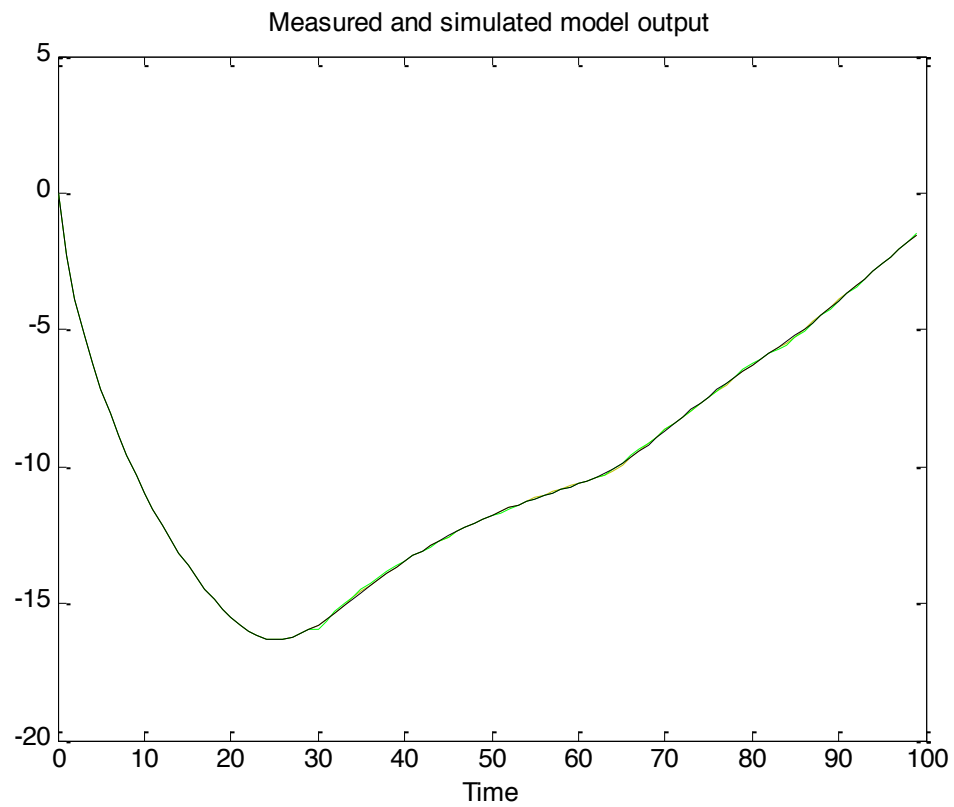


Рис.2.19. Результат ідентифікації для контрольної точки T21

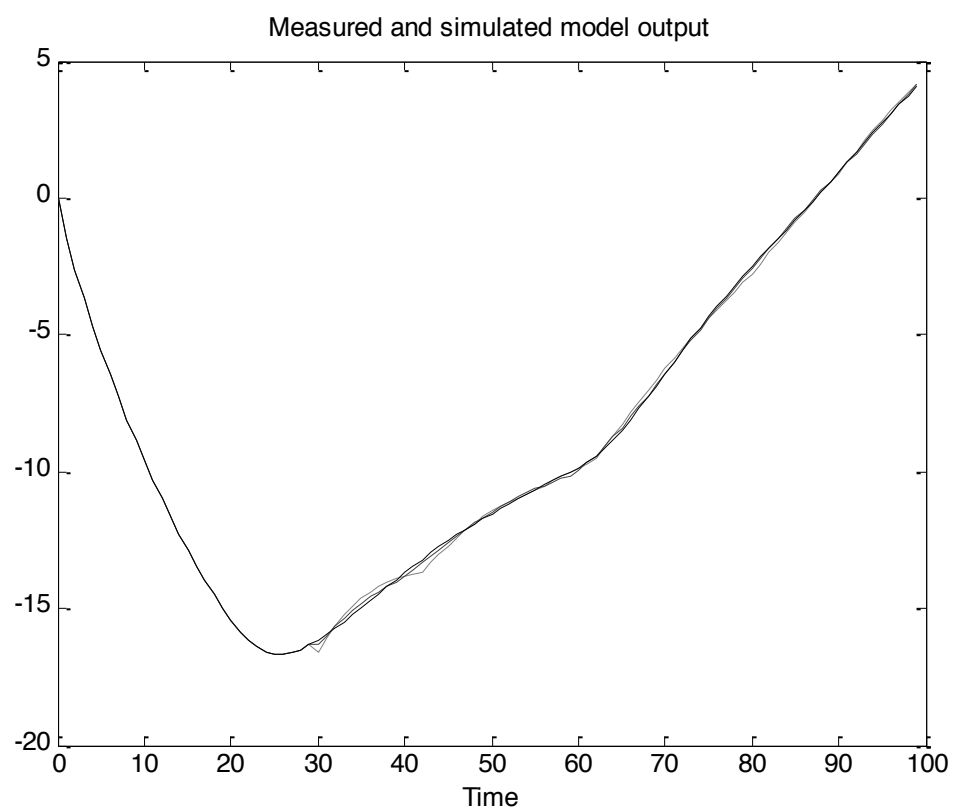


Рис.2.20. Результат ідентифікації для контрольної точки T22

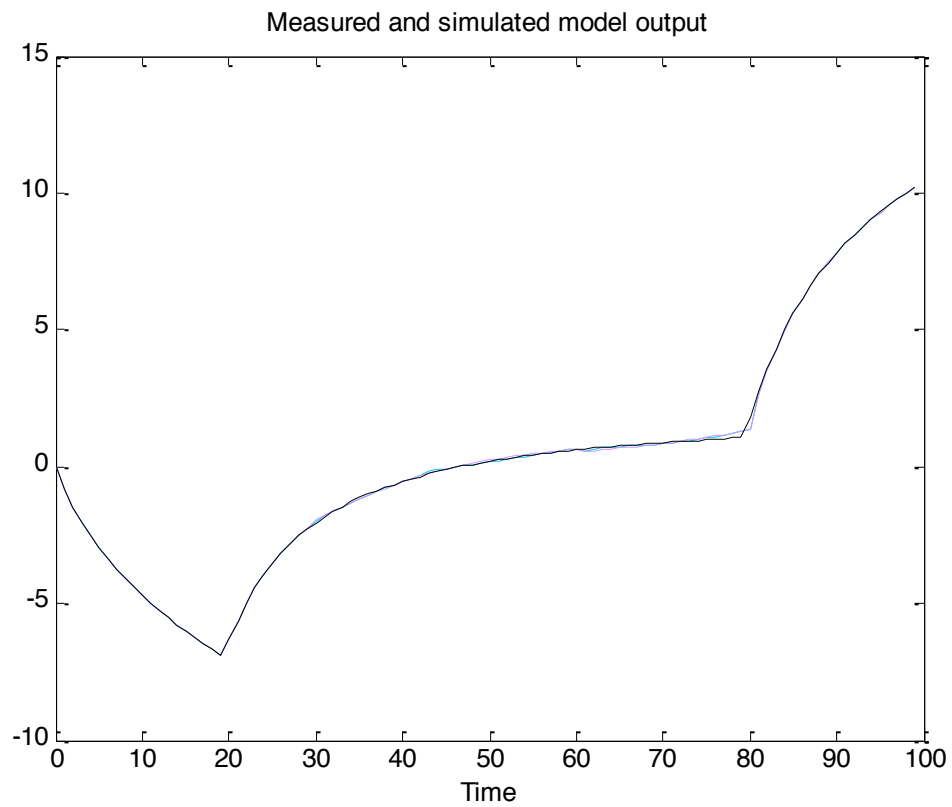


Рис.2.21. Результат ідентифікації для контрольної точки Т31

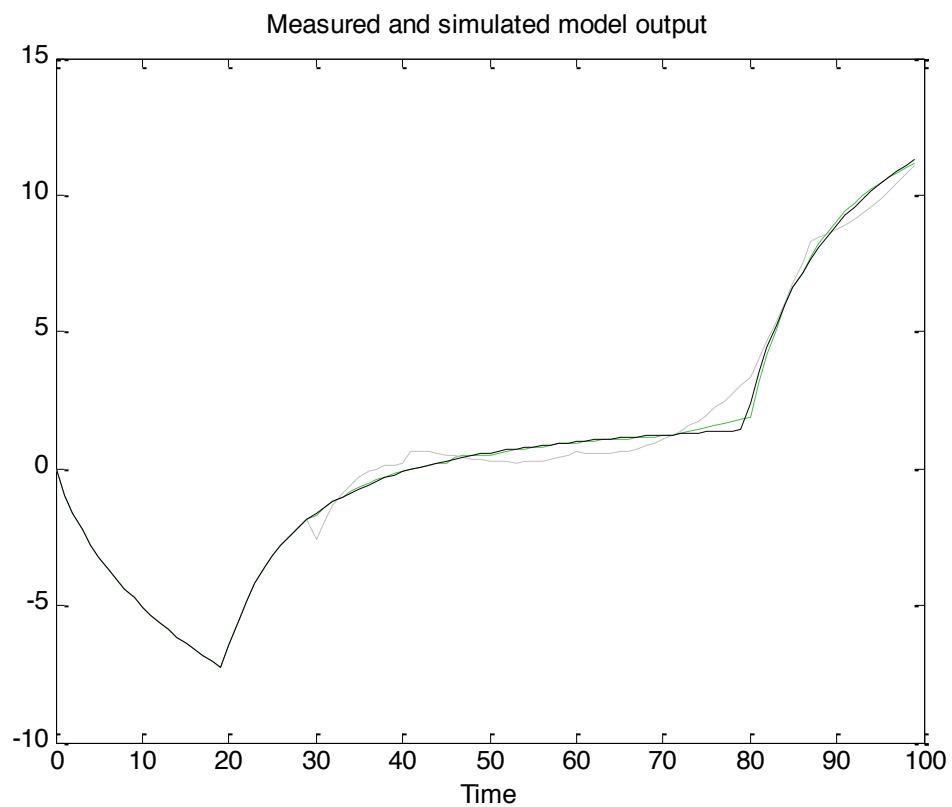


Рис.2.22. Результат ідентифікації для контрольної точки Т32

Табл. 2.2. Передавальні функції, отримані в результаті ідентифікації

Точка	Канал	Передавальна функція I порядку	Точність %	Передавальна функція II порядку	Точність %
T_{11}	$P_1 \rightarrow T_{11}$	$\frac{26}{87.8s + 1} e^{-30s}$	98.17	$\frac{26}{2528.2s^2 + 115.5s + 1}$	99.26
	$P_2 \rightarrow T_{11}$	$\frac{45.2}{52.3s + 1} e^{-14s}$		$\frac{45.2}{1519.1s^2 + 87.1s + 1}$	
	$P_3 \rightarrow T_{11}$	$\frac{33.6}{17.8s + 1}$		$\frac{33.6}{228.4s^2 + 25.4s + 1}$	
	$V \rightarrow T_{11}$	$\frac{-42.3}{47.8s + 1} e^{-9s}$		$\frac{-42.3}{1319.1s^2 + 77.3s + 1}$	
	$T_3 \rightarrow T_{11}$	$\frac{5.2}{67.8s + 1} e^{-9s}$		$\frac{5.2}{1328.3s^2 + 95.6s + 1}$	
T_{12}	$P_1 \rightarrow T_{12}$	$\frac{28.5}{88.2s + 1} e^{-31s}$	99.03	$\frac{28.5}{2572.8s^2 + 117.2s + 1}$	99.17
	$P_2 \rightarrow T_{12}$	$\frac{49.1}{52.6s + 1} e^{-13.8}$		$\frac{49.1}{1522.4s^2 + 85.2s + 1}$	
	$P_3 \rightarrow T_{12}$	$\frac{34.1}{17.6s + 1}$		$\frac{34.1}{227.2s^2 + 24.6s + 1}$	
	$V \rightarrow T_{12}$	$\frac{-41.1}{46.2s + 1} e^{-8.7s}$		$\frac{-41.1}{1310.2s^2 + 77.3s + 1}$	
	$T_3 \rightarrow T_{12}$	$\frac{5.2}{67.8s + 1} e^{-9s}$		$\frac{5.2}{1328.3s^2 + 95.9s + 1}$	
T_{21}	$P_1 \rightarrow T_{21}$	$\frac{38.5}{49.2s + 1} e^{-14s}$	97.97	$\frac{38.5}{1567.2s^2 + 76.1s + 1}$	99.31
	$P_2 \rightarrow T_{21}$	$\frac{17.3}{43.6s + 1} e^{-14.9}$		$\frac{17.3}{1589.4s^2 + 69.5s + 1}$	
	$P_3 \rightarrow T_{21}$	0		0	
	$V \rightarrow T_{21}$	$\frac{-49.1}{35.1s + 1} e^{-4.2s}$		$\frac{-49.1}{573.2s^2 + 53.4s + 1}$	
	$T_3 \rightarrow T_{21}$	$\frac{6.7}{36.4s + 1} e^{-4s}$		$\frac{6.7}{564.3s^2 + 55.1s + 1}$	
T_{22}	$P_1 \rightarrow T_{22}$	$\frac{40.8}{49.4s + 1} e^{-14.1}$	99.11	$\frac{40.8}{1566.1s^2 + 76.5s + 1}$	99.42
	$P_2 \rightarrow T_{22}$	$\frac{19.2}{43.3s + 1} e^{-14.7}$		$\frac{19.2}{1590.6s^2 + 67.6s + 1}$	
	$P_3 \rightarrow T_{22}$	0		0	
	$V \rightarrow T_{22}$	$\frac{-49.6}{34.8s + 1} e^{-4.2s}$		$\frac{-49.6}{571.4s^2 + 54.1s + 1}$	
	$T_3 \rightarrow T_{22}$	$\frac{7.9}{36.6s + 1} e^{-4.1s}$		$\frac{7.9}{564.8s^2 + 55.6s + 1}$	

T_{31}	$P_1 \rightarrow T_{31}$	$\frac{27.9}{36.2s + 1} e^{-7s}$	98.79	$\frac{27.9}{792.1s^2 + 54.6s + 1}$	99.46
	$P_2 \rightarrow T_{31}$	0		0	
	$P_3 \rightarrow T_{31}$	0		0	
	$V \rightarrow T_{31}$	$\frac{-49.9}{27.1s + 1} e^{-2.6s}$		$\frac{-49.9}{356.7s^2 + 42.1s + 1}$	
	$T_3 \rightarrow T_{31}$	$\frac{6.7}{24.4s + 1} e^{-3.1s}$		$\frac{6.7}{389.1s^2 + 37.7s + 1}$	
T_{32}	$P_1 \rightarrow T_{32}$	$\frac{28.9}{36.1s + 1} e^{-6.3s}$	93.22	$\frac{28.9}{779.2s^2 + 52.1s + 1}$	97.72
	$P_2 \rightarrow T_{32}$	0		0	
	$P_3 \rightarrow T_{32}$	0		0	
	$V \rightarrow T_{32}$	$\frac{-49.6}{27.3s + 1} e^{-2.7s}$		$\frac{-49.6}{357.4s^2 + 43.2s + 1}$	
	$T_3 \rightarrow T_{32}$	$\frac{7.7}{24.1s + 1} e^{-2.9s}$		$\frac{7.7}{390.7s^2 + 36.2s + 1}$	

Із наведених вище графіків та таблиці можна зробити висновок, що ідентифікація аперіодичною ланкою II-го порядку з запізнюванням має значно кращий результат для всіх контрольних точок ніж ідентифікація аперіодичною ланкою I-го порядку. Були отримані перехідні характеристики з точністю більше 99%. Тому в подальшому при налаштуванні регуляторів ми будемо розглядати саме передавальні функції, які були отримані шляхом ідентифікації аперіодичною ланкою II-го порядку.

Існує лінійна залежність між вмістом пеку та температурою матеріалу, а точніше коефіцієнтом теплопровідності. В роботі [1] досліджено вплив кількості пеку в пресованій масі на товщину прогрітого матеріалу, з якого відбувається виділення пеку для змащування. При недостатній товщині прогрітого матеріалу може відбуватись прилипання маси до поверхні мундштука, це може призвести до нерівномірного розподілу швидкостей, а в подальшому до порушення структури пресованої заготовки. В свою чергу нерівномірність температури на сторонах калібрувальної зони мундштука приведе до меншого опору тертя та кращому ковзанню матеріалу на поверхні мундштука з більш високою

температурою прогріву. В результаті відбудеться перерозподіл швидкостей по перетину екструдуючої маси.

ІІІ РОЗДІЛ. СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ФОРМУВАННЯ ВУГЛЕЦЕВИХ ВИРОБІВ

3.1 Аналіз існуючих систем керування

Основною ідеєю в процесі пресування є отримання так званих «зелених» заготовок високої якості, а на це впливають фактори технологічного й конструктивного характеру. Для того, щоб отримати якісні вуглецеві заготовки, необхідно обрати температуро-швидкісні та силові умови деформації.

Відповідно до діючих технологічних процесів контрольованими параметрами в процесі пресування є температурний режим та тиск пресування. Для кожного виду заготовок інтенсивність видавлювання знаходиться в заданому діапазоні, а вихід за його межі спричиняє брак (деформацію або тріщини).

В літературі [1,14] представлено керування даними параметрами за допомогою технологічних регламентів виробництва. Такий підхід не враховує вплив властивостей електродної маси, що випресовується на перебіг технологічного процесу, а отже й не може забезпечити оптимальність даного процесу.

В праці [15] описано алгоритм розробки оптимального керування індукторами пресу з критерієм оптимальності по мінімізації енергозатрат на підігрів поверхні мундштуку. Внаслідок того, що необхідні температури в контрольних точках задані як обмеження в задачі оптимізації, знайдене за цим алгоритмом керування не забезпечує оптимальність технологічних параметрів процесу, а отже й отримана при такому керуванні продукція буде мати не оптимальні, а допустимі показники якості. До того ж в цій роботі не описано алгоритм вибору обмежень на температури та не враховано вплив швидкості пресування на перебіг технологічного процесу.

					ДП ЛА52.01.00.000 ПЗ	71
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

Автори [16] представили модель екструзії в'язко-пластичних матеріалів та запропонували систему керування, що враховує зміну реологічних властивостей, які й розраховуються даною моделлю. На жаль, в роботі представлена лише концепція такої системи керування і відсутня структура та алгоритм розробки даної системи.

В роботі [17] автори пропонують алгоритми для підвищення ефективності обробки інформації при реєстрації контрольованих параметрів в системі автоматичного керування температурами та струмами індукторів в мундштуці пресу в процесі формування вуглецевих заготовок. Результати можуть бути використані при практичній реалізації системи керування для підвищення ефективності і точності вимірювань, а отже й підвищення якості керування. Структура та алгоритм системи керування в даній роботі не представлені.

Автори [18] запропонували методику перетворення математичної моделі теплопередачі в мундштуці преса в систему звичайних диференціальних рівнянь для вузлових температур, що забезпечує високу ефективність її подальшої чисельної реалізації. Отримані в реальному часі значення температур використовуються для встановлення оптимальних значень температурних завдань для релейного закону регулювання, що забезпечує стабілізацію температур як в обсязі мундштука, так і по поверхні заготовок подових блоків. Оптимальні значення температурних завдань визначались за допомогою методу упорядкованого перебору. В праці ніяким чином не враховується вплив швидкості пресування на якість виробів.

В праці [19] запропоновано адаптивну систему керування роботою гідравлічного пресу, що містить засоби вимірювання параметрів руху повзуна і двокаскадний гідравлічний підсилювач, перший каскад якого утворений постійними дроселями і різноспрямованими соплами з розташованою між ними керованою заслінкою, з'єднаними по мостовій схемі, а другий каскад виконаний у вигляді чотирьохлінійного

	дросельовального	розподільника	золотникового	типу, включеного в	
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата	ДП ЛА52.01.00.000 ПЗ
					72

діагональ моста і регулює швидкість повзуна. Також система має насосно-акумуляторну станцію, що забезпечує живлення циліндрів преса і гідравлічного підсилювача. Запропонована система забезпечує зниження динамічних навантажень на елементи пресу за рахунок стабілізації швидкості руху повзуна при зміні зусилля пресування. Недоліком даної системи є те, що не використано комплексний підхід до вирішення задачі керування пресуванням, тобто система керує лише швидкістю пресування, ніяким чином не визначаючи керування температурними режимами пресу.

Автори [20] представили супервізорну систему керування процесом екструзії гарячого розплаву. Основна ідея розробленої системи полягає в тому, що керування здійснюється на основі збору та аналізу основних технологічних параметрів процесу. Саме ж керування здійснюється по показникам якості вихідної продукції і реалізовується за допомогою MSPC (multivariate statistical process control) методу. Дана система хоч і забезпечує високі показники якості продукції, але все ж не може бути використана в повній мірі як основа для створення системи керування формуванням вуглецевих виробів так як однією з вимог для застосування даної системи є неперервність процесу, тоді як формування – процес періодичний.

Автори [21] розробили систему прогностичного моніторингу та діагностики для процесу екструзії PMDS (Predictive monitoring and diagnostic system). Першочергово розроблена система виконує прогнозування імовірності збою в роботі частин пресу, що можуть призвести до виходу бракованої продукції, після чого блок планування технічного обслуговування оцінює оптимальне вирішення отриманої проблеми. Не дивлячись на те, що безпосередньо керування процесом система не здійснює, автори стверджують, що завдяки своїй модульній і розширюваній архітектурі PMDS може виконувати широкий спектр функцій, таких як: (1) оптимальне керування виробничими процесами та обладнанням, (2) моніторинг стану та діагностика

компонентів машин для виявлення несправностей на ранніх стадіях (3) прогнозування прогресу виявлених збоїв, (4) узгодження з виробничим планувальником відповідного часу ремонту, і (5) мінімізація впливу збоїв, що розвиваються на якість продукції. Таким чином основна ідея розробленої системи може бути використана в системі керування формуванням вуглецевих виробів для врахування можливих збоїв в роботі обладнання.

В праці [22] запропоновано систему неперервного керування з прогнозуючими моделями для процесу екструзії розроблену на основі ортонормованих базисних функцій. Ключовою методикою в алгоритмі, що використовується тут, є застосування набору ортонормальних базисних функцій (наприклад, функцій Лагерра) для опису майбутньої траєкторії керування при проектуванні прогностичного керування. За свідченнями авторів саме неперервність системи при керуванні екструзією дозволяє краще реагувати на збурення та виходити на заданий режим. Недоліком даної системи в контексті використання її як основи для створення системи керування формуванням

вуглецевих виробів є той факт, що система створюється на основі моделі з двома вхідними та двома вихідними сигналами, що позначають швидкість та питому механічну енергію. Таким чином розроблена система не керує температурою в пресі, хоча в праці й згадується, що SCADA система знімає покази температур з 9 контрольних точок. Враховуючи, що розподіл температур в масі є визначальним в процесі формування, така система не може бути використана.

Автор праць [23,24] розробляє нейронечітку систему керування температурою в процесі екструзії пластмас. Недоліком даної системи є те, що модель динаміки температури в пресі представляється у вигляді аперіодичної

ланки першого порядку з запізнюванням, а отже й розроблена система керування не враховує розподіленість властивостей матеріалу по об'єму та

можливі не лінійності об'єкту. Цей факт може мати значний негативний

ДП ЛА52.01.00.000 ПЗ

вплив на ефективність роботи розробленої системи при її використанні на реальному об'єкті.

3.2 Функціональна схема автоматизації

Для нормальної роботи пресу, мінімізації людських помилок, збільшення продуктивності, підвищення якості вуглецевої продукції, стабілізації та контролю технологічних параметрів розроблено функціональну схему автоматизації, яка дозволяє вирішувати всі ці завдання. Схема автоматизації включає низку контурів автоматичного контролю режимних параметрів технологічного процесу.

Схема автоматизації процесу формування вуглецевих виробів наведена на кресленні №1.

Розглянемо більш детально кожен контур.

Для контролю температури вуглецевої маси на початку формувальної зони пресу були розроблені контури 1 та 5, які включають: термоперетворювач опору типу ТСМУ з уніфікованим вихідним сигналом (1-1; 5-1); автоматичний показувальний і реєструвальний вторинний прилад (1-2; 5-2).

Контури 2 та 6 забезпечують контроль температури електродної маси на межі формувальна-калібрувальна зона пресу, які включають: термоперетворювач опору типу ТСМУ з уніфікованим вихідним сигналом (2-1; 6-1); мікропроцесорний регулятор (2-2; 6-2).

Для контролю температури «зелених» заготовок на виході з пресу застосовують контури 3 та 4, які включають: термометр опору (3-1); термоелектричний перетворювач сигналу (3-2); автоматичний показувальний і реєструвальний вторинний прилад (3-3); термоперетворювач опору типу ТСМУ з уніфікованим вихідним сигналом (4-1); мікропроцесорний регулятор (4-2).

Контур 7 здійснює контроль швидкості пресування вуглецевої маси,

роботи обертання гідравлічного приводу, який включає: тахометр (7-1);

ДП ЛА52.01.00.000 ПЗ

аналого-цифровий перетворювач сигналу (7-2); автоматичний показувальний і реєструвальний вторинний прилад (7-3).

Підтримання тиску в гідравлічному приводі забезпечує контур 8, який включає: манометр (8-1); мікропроцесорний регулятор (8-2).

3.3 Синтез систем керування

Для дослідження якості процесу формування буде використовуватись спрощена математична модель, отримана за рахунок ідентифікації (передатні функції II-го порядку). Для оцінки якості процесу будуть розглянуті дві системи керування: перша з налаштуванням ПІД-регулятора, а друга з використанням MPC (Model Predictive Control).

3.3.1 Розробка системи керування на основі ПІД-регуляторів

ПІД-регулятор – це пристрій, який застосовується в контурах керування зі зворотним зв'язком. Такі регулятори використовують для формування сигналу керування в автоматичних системах, де необхідно досягнути високої якості та точності в перехідних процесах.

Керуючий сигнал даного регулятора складається з трьох компонентів. Пропорційна складова виробляє сигнал, який протидіє відхиленню регульованої величини в даний момент часу. Інтегральна складова використовується для виключення статичної помилки, а диференціальна складова прогнозує відхилення від завдання та слідкує за швидкістю відхилення.

ПІД-регулятор є найзбалансованішим з усіх регуляторів, які побудовані на основі типових ланок, тому він широко застосовується в різних сферах. Саме тому було прийняте рішення розробити систему керування на основі цього закону.

Оскільки розглянутий об'єкт має декілька вхідних та вихідних

параметрів, то в системі буде використовуватись декілька регуляторів,

ДП ЛА52.01.00.000 ПЗ

кожен з яких буде здійснювати керування температурою в певних точках за допомогою вхідних сигналів об'єкта.

Швидкість формування вуглецевих виробів як керуюча дія в даній системі не враховується та є регламентованою, тому що ми реалізуємо класичну систему керування в якій головними параметрами є контроль температури за допомогою потужності нагрівачів

Розглянемо схему системи керування, реалізованої в програмному пакеті Simulink, яка представлена на рис. 3.1.

На вхід першого ПД-регулятора буде подаватись мінімум з двох температур $\min(T_{11}, T_{12})$, оскільки важливо забезпечити таку температуру на кінці калібрувальної частини мундштука, що забезпечить дотримання умов проковзування в цій зоні. Аналогічно на вхід другого регулятора буде подаватись мінімум з наступних двох температур $\min(T_{21}, T_{22})$, а на вхід третього - $\min(T_{31}, T_{32})$. На виході трьох регуляторів будуть формуватися значення сигналів u_1 , u_2 та u_3 відповідно.

Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата	ДП ЛА52.01.00.000 ПЗ	77

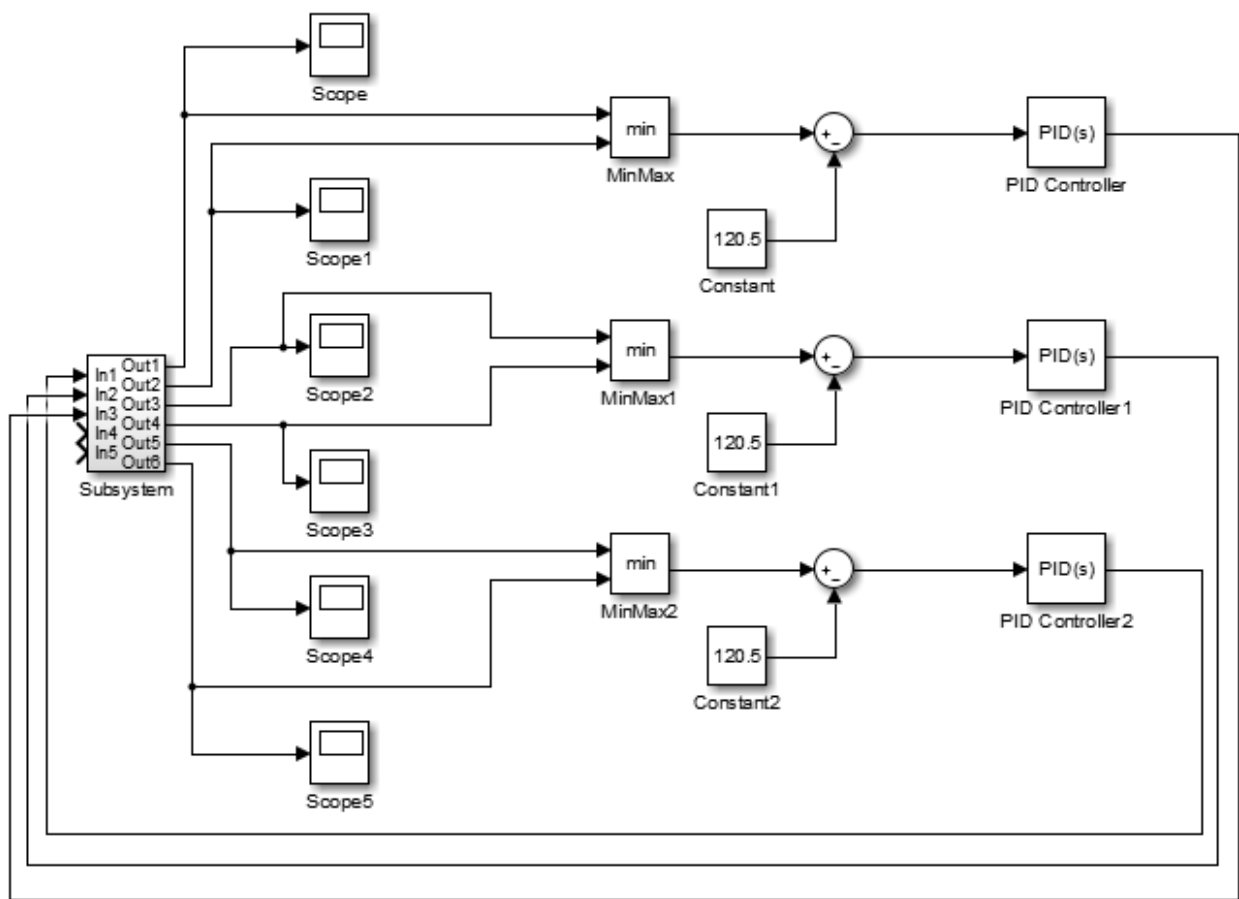


Рис. 3.1. Схема системи керування реалізована в програмному пакеті Simulink

Для налаштування ПІД-регуляторів в програмному пакеті Simulink було використане автоматичне налаштування, а саме PID Tuner. Параметри регулятора наведені на рис. 3.2.

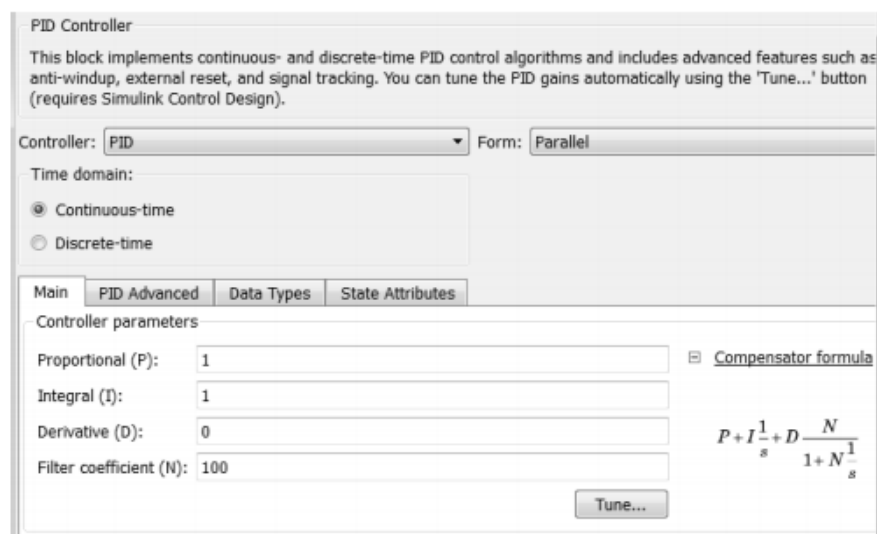


Рис. 3.2. Параметри налаштування ПІД-регулятора

якості налаштування використовується критерій максимальної швидкості наростання при відсутності перерегулювання або при наявності не більше 20%-го перерегулювання. Такий критерій дозволяє отримати більший запас стійкості, ніж в методі Ціглера-Нікольса.

Формули для розрахунку коефіцієнтів ПІД-регулятора наведені в табл. 3.1. Метод CHR використовує апроксимацію об'єкта ланкою першого порядку із запізнюванням.

Таблиця 3.1. Формули для розрахунків коефіцієнтів регулятора методом CHR

Регулятор	Без перерегулювання			Із 20%-им перерегулюванням		
	K_p	T_i	T_d	K_p	T_i	T_d
ПІД	$\frac{0.95 \cdot T_{об}}{K_{об} \cdot \tau_{об}}$	$2.4 \cdot \tau_{об}$	$0.42 \cdot \tau_{об}$	$\frac{1.2 \cdot T_{об}}{K_{об} \cdot \tau_{об}}$	$2.0 \cdot \tau_{об}$	$0.42 \cdot \tau_{об}$

Результати налаштування ПІД-регулятора методом CHR наведені на рис.3.4-3.6.

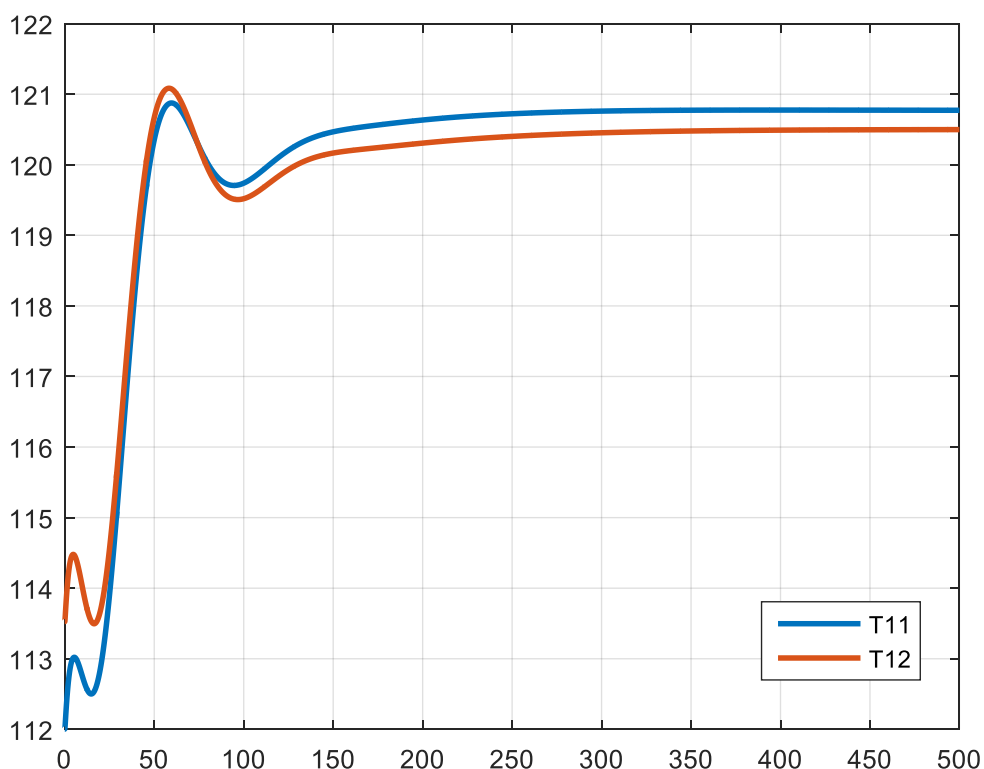


Рис. 3.4. Значення контрольних точок T_{11} та T_{12} в системі з ПІД-регулятором

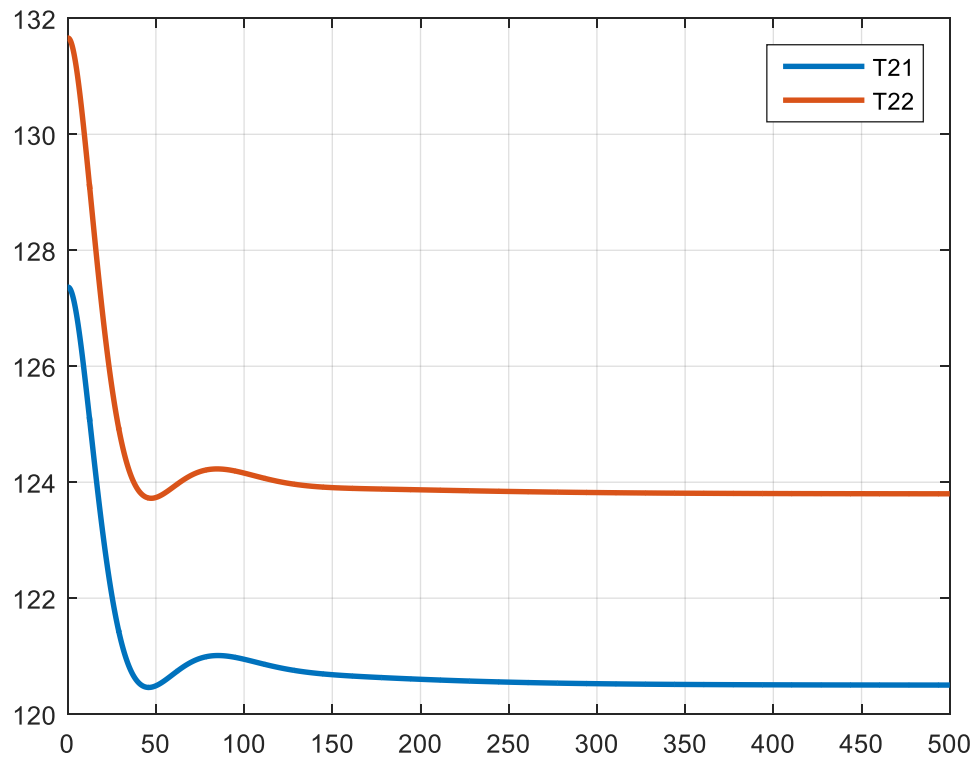


Рис. 3.5. Значення контрольних точок T_{21} та T_{22} в системі з ПІД-регулятором

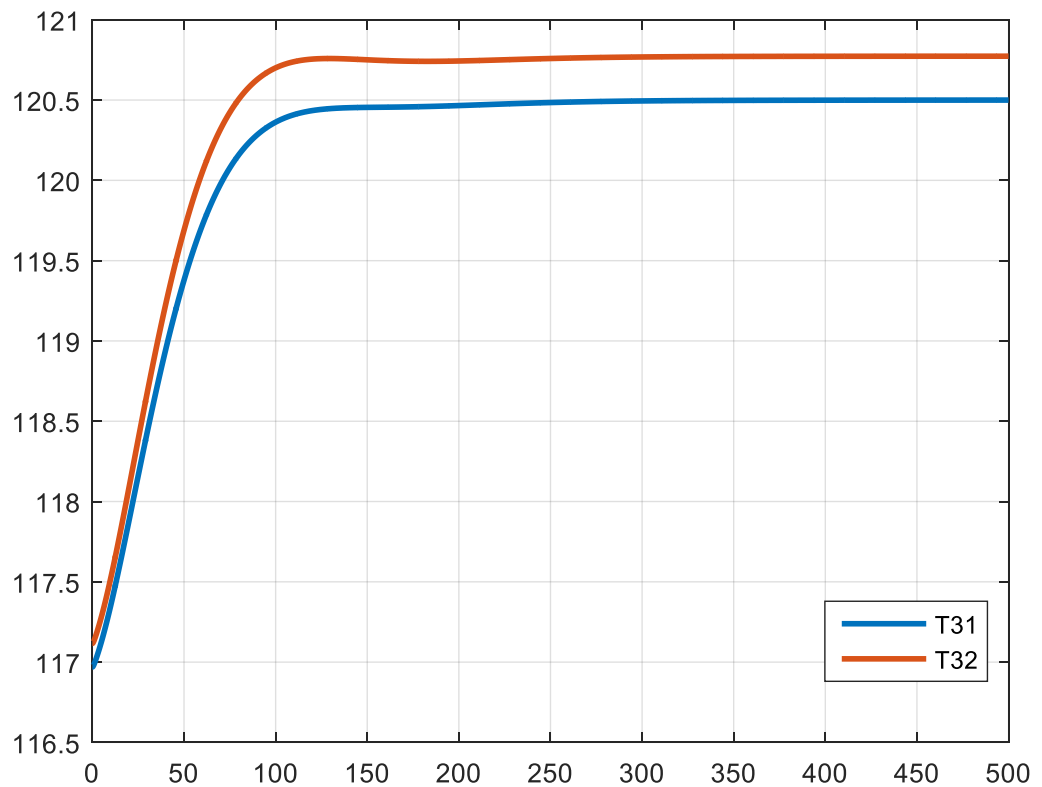


Рис. 3.6. Значення контрольних точок T_{31} та T_{32} в системі з ПІД-регулятором

3.3.2 Розробка системи керування на основі MPC (Model Predictive Control)

Регулятор з прогнозуючими моделями (Model Predictive Control), як вдосконалений метод керування широко використовується у різноманітному спектрі застосувань в процесі керування. Основною перевагою MPC-підходу є відносна простота базової схеми формування зворотного зв'язку та в свою чергу високі адаптивні властивості, а саме швидкість реакції, стійкість до перешкод та параметрична невизначеність [26].

MPC використовує явну модель процесу для прогнозування майбутньої реакції та вирішує задачу оптимального керування з кінцевим горизонтом у кожний момент вибірки. Внутрішня модель об'єкта використовується для прогнозування майбутніх виробничих результатів на основі минулих й поточних значень вхідних і вихідних змінних та на запропонованих майбутніх оптимальних керуючих впливах.

Перевагою MPC серед інших регуляторів є те, що це багатофункціональний контролер, який одночасно керує всіма виходами шляхом прийняття до уваги всіх взаємодій між системними змінними. Ще одна перевага MPC полягає в тому, що він може опрацьовувати обмеження, які є важливими, а їх порушення може призвести до небажаних наслідків.

Розглянемо етапи керування динамічними об'єктами по принципу зворотного зв'язку за допомогою MPC-регулятора:

1. Розглядається деяка математична модель об'єкта, початковими умовами для якої є поточний стан. При заданому програмному керуванні виконується інтегрування рівнянь цієї моделі, що дає прогноз руху об'єкта на деякому кінцевому відрізку часу (горизонті прогнозу).

2. Здійснюється оптимізація програмного керування, метою якого служить наближення регульованих змінних прогнозуючої моделі до відповідних заданих сигналів на горизонті прогнозу. Оптимізація

	здійснюється з					
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата	ДП ЛА52.01.00.000 ПЗ	82

урахуванням всіх обмежень, які накладаються на керуючі та регульовані змінні.

3. На кроці обчислень, що становить фіксовану малу частину горизонту прогнозу, реалізується знайдене оптимальне керування й здійснюється вимірювання фактичного стану об'єкта в кінці кроку.

4. Горизонт прогнозу зсувається на крок вперед, а пункти 1-3 повторюються знову [26].

Загальна структурна схема керування з прогнозуючою моделлю наведена на рис. 3.7.

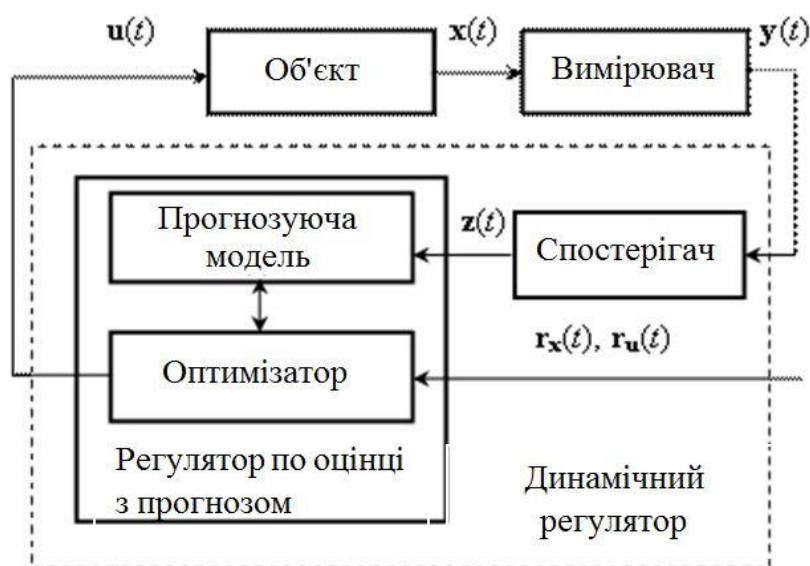


Рис. 3.7. Блок-схема керування з прогнозуючою моделлю

Основну ідею керування з прогнозуючою моделлю можна представити наступним чином: є вхід об'єкта по керуванню $u(t)$, вихідна контрольована змінна $x(t)$ та бажана величина (залежність) $r(t)$ зміни контрольованого параметра. Розглянемо систему в дискретному часі, тобто тільки в моменти часу $t = k \cdot \Delta T$, де ΔT – період квантування, а k – деяке ціле число [27].

Особливістю керування за допомогою МРС-регулятора є наявність математичної моделі об'єкта керування, яка достатньо точно описує його поведінку. Наявність адекватної математичної моделі об'єкта керування

$x(t)$ та бажаною траєкторією $r(t)$. При виборі оптимальних значень керуючої змінної $u(t)$, регулятор прагне мінімізувати функціонал, представлений наступним виразом:

$$J = Q \cdot \sum_{i=1}^p (x(k+i) - r(k+i))^2 + R \cdot \sum_{i=0}^{m-1} u^2(k+i), \quad (3.1)$$

де Q та R – вагові коефіцієнти, p – число тактів, на яких будується прогноз поведінки контрольованої змінної $x(t)$ (горизонт прогнозу), m – довжина послідовності майбутніх значень керуючого впливу $u(t)$ (горизонт керування).

Після подачі на об'єкт управління першого елемента вирахованої оптимальної послідовності керуючого впливу $u(t)$, на наступному такті вся процедура повторюється заново, з врахуванням оновленої інформації. Таким чином функціонує MPC регулятор [27].

MPC регулятор може керувати МІМО моделями, чим ми й скористуємось. Наша система керування повинна в залежності від контрольних точок вираховувати потужності нагрівачів та швидкість формування. Також система має враховувати вплив вимірюваного збурення у вигляді температури завантажувального матеріалу, а також вплив невимірюваного збурення у вигляді складу матеріалу.

Структурна схема системи керування процесом з MPC регулятором реалізована в програмному пакеті Simulink наведена на рис.3.9.

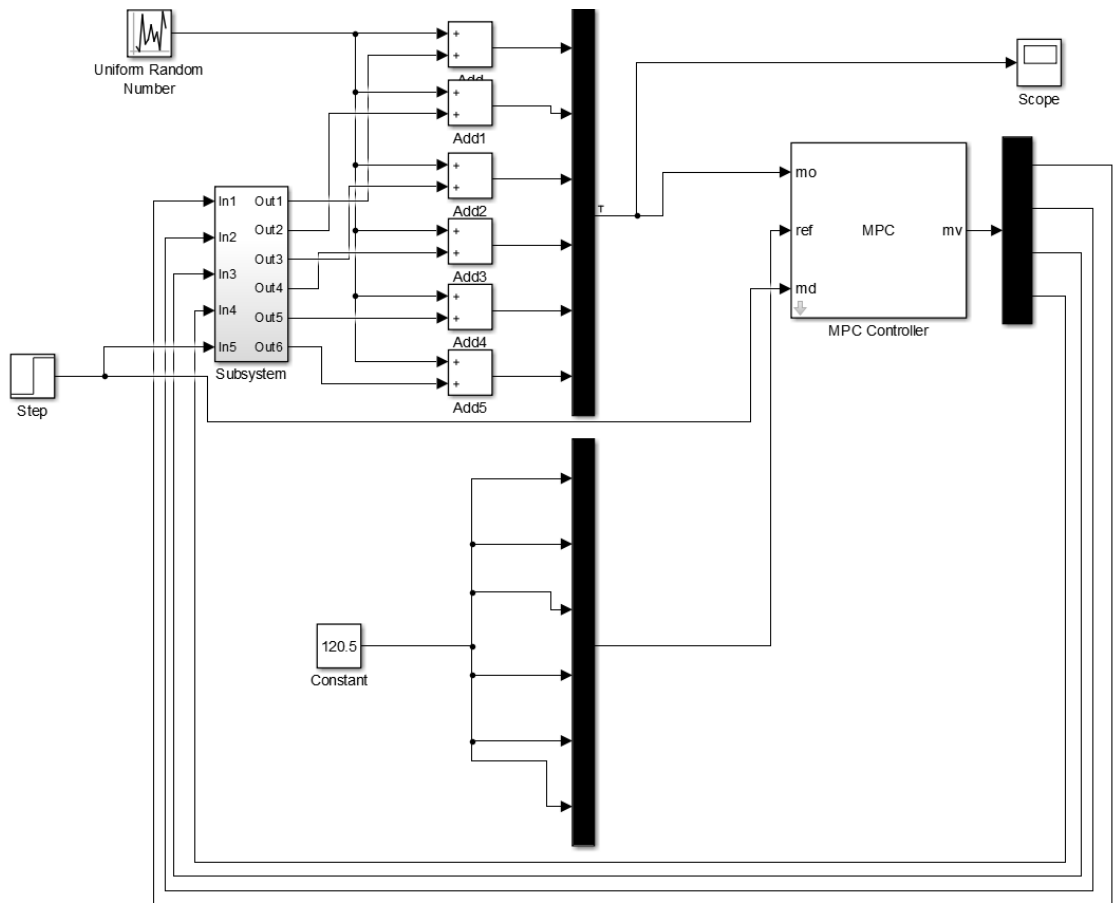


Рис. 3.9. Структурна схема системи керування процесом з MPC регулятором
 За допомогою перебору у робочому вікні MPC були підбрані налаштування регулятора. Результати налаштування наведені на рис. 3.10.

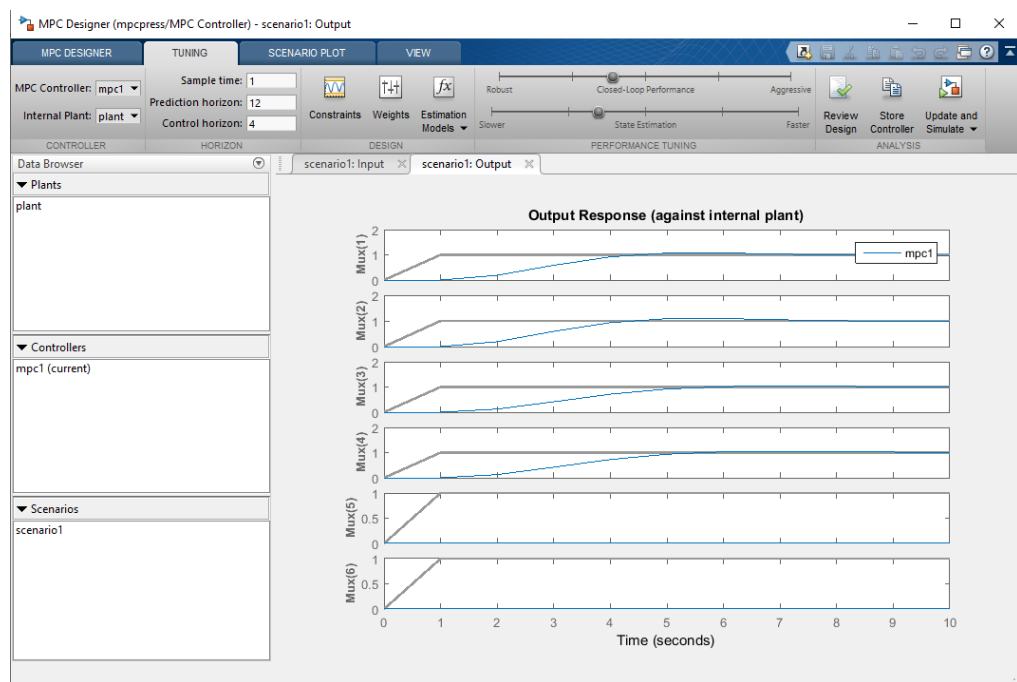


Рис. 3.10. Робоче вікно MPC регулятора з налаштованими Prediction horizon та Control horizon

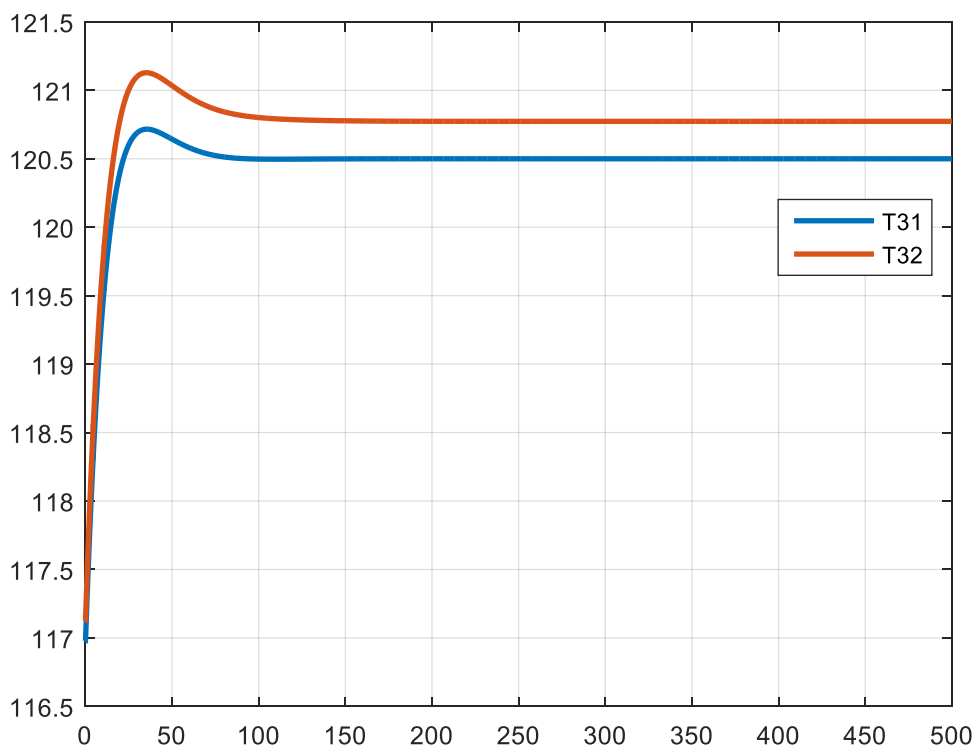


Рис. 3.13. Динаміка температури в контрольних точках T_{31} та T_{32} з МРС регулятором

Порівнявши дві системи керування процесом (з ПІД-регулятором та з МРС регулятором) можна зробити висновок, що система керування з МРС працює набагато краще, адже температури швидше виходять на усталений режим, а перерегулювання є значно меншим.

3.4 Дослідження систем керування

В попередньому пункті були розглянуті дві системи керування процесом: I – з ПІД-регулятором; II – з МРС-регулятором. Проведемо порівнюючий аналіз цих систем. Для цього, крім динамічних характеристик, будуть досліджені реакції систем на збурення.

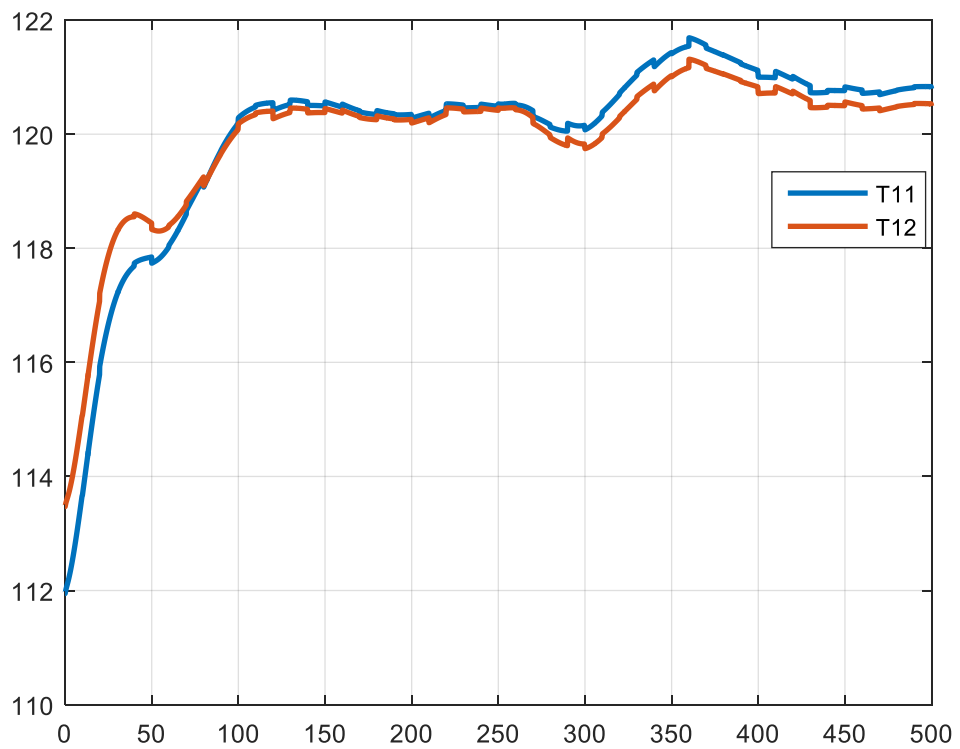


Рис. 3.14. Динаміка температури для контрольних точок T_{11} та T_{12} з ПД-регулятором та врахуванням впливу збурень

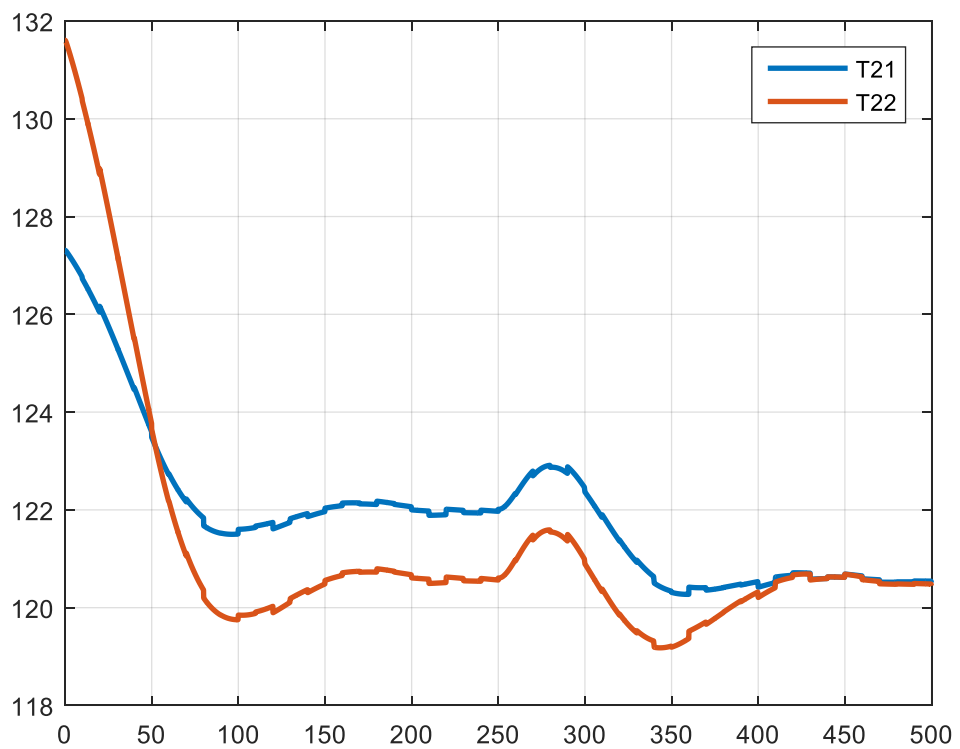


Рис. 3.15. Динаміка температури для контрольних точок T_{21} та T_{22} з ПД-регулятором та врахуванням впливу збурень

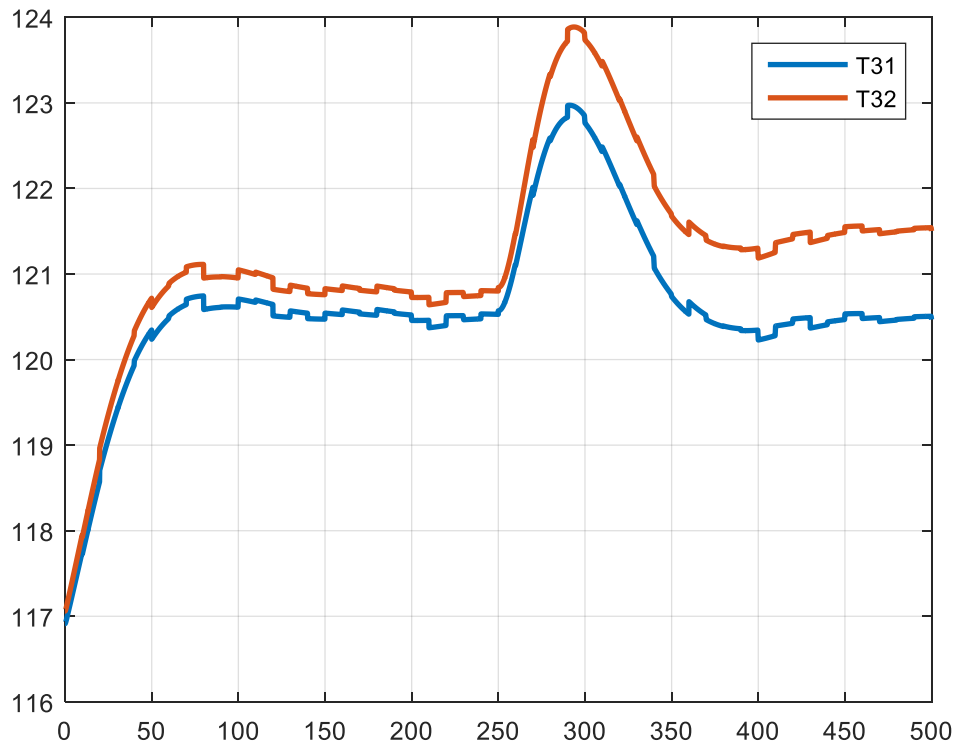


Рис. 3.16. Динаміка температури для контрольних точок T_{21} та T_{22} з ПД-регулятором та врахуванням впливу збурень

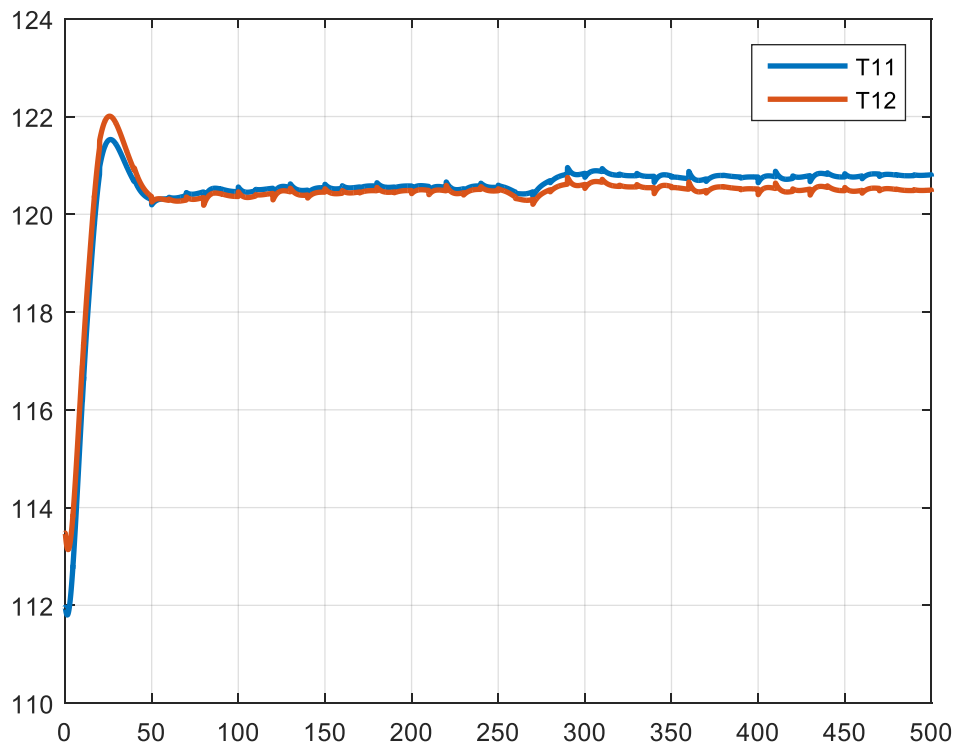


Рис. 3.17. Динаміка температури для контрольних точок T_{11} та T_{12} з МРС-регулятором та врахуванням впливу збурень

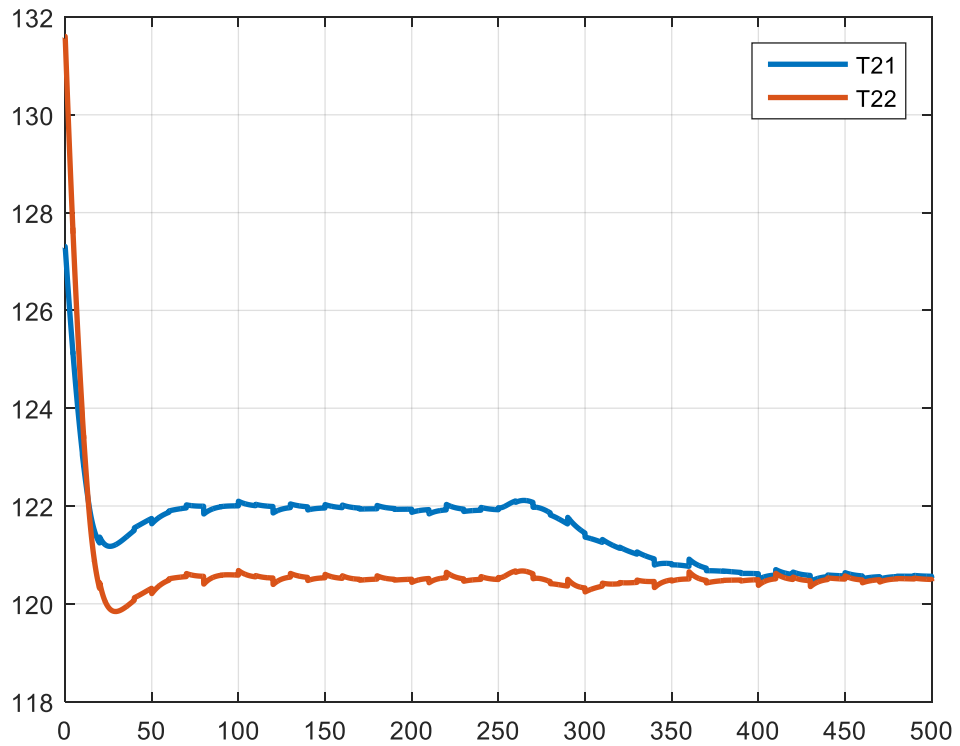


Рис. 3.18. Динаміка температури для контрольних точок T_{21} та T_{22} з МРС-регулятором та врахуванням впливу збурень

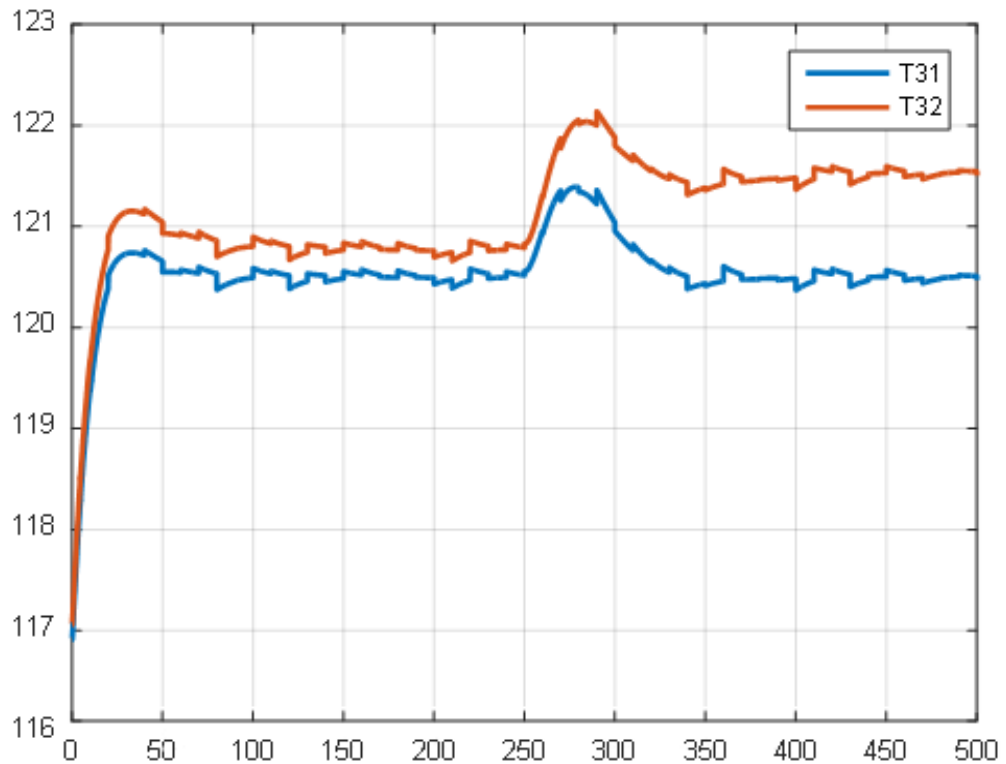


Рис. 3.19. Динаміка температури для контрольних точок T_{31} та T_{32} з МРС-регулятором та врахуванням впливу збурень

Перед початком роботи необхідно перевірити:

- робоче місце, яке утримується в чистоті та порядку;
- справність обладнання та його механізмів;
- наявність та справність огорожень;
- справність електрообладнання, відсутність пошкоджених зовнішніх проводів;
- наявність та справність заземлення обладнання;
- справність витяжної вентиляції, підключеної до установки;
- справну роботу аварійної кнопки, “СТОП” та блокувальних пристроїв.

4.1 Електробезпека

1. Приміщення операторської з точки зору небезпеки враження людини електричним струмом у відповідності з ПУЕ-76 відноситься до класу 1 (без підвищеної небезпеки). Умови, що визначають клас даного приміщення – це наявність струмопровідних підлог, перекриттів, наявність електродвигунів.

2. На пульті управління оператора напруга $U = 220/380$ В, частота $f = 50$ Гц. Напруги, що використовуються в мережі: для пристроїв автоматизації та сигналізації; струм – перемінний;

Режим нейтралі – глухо-заземлений.

Тип електромереж - трьохфазна чотирьохпровідникова мережа із глухо-заземленою нейтраллю.

3. Можливі причини ураження людей електричним струмом:

- коротке замикання;
- відсутність або старіння ізоляції;
- неузгодженні включення/відключення обладнання;
- порушення наряду-допуску до ремонту електромереж.

4. Для забезпечення електробезпечності передбачені організаційні і технічні заходи:

Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата	ДП ЛА52.01.00.000 ПЗ				94

- інструктаж і навчання безпечним методам праці;
- встановлення блокування безпеки та огорожі;
- встановлення плакатів і знаків безпеки;
- недоступність елементів кстановки, що знаходяться під напругою (кабелі вкоадаємо в повілінілхлоридові труби, піддати захисту: недоступність кабелів на висоті $h_{\min} = 2,7 - 3$ м, застосування огороджувальних пристроїв);
- ізоляція струмопровідних частин пульта керування ($R \geq 0,5$ МОм). Електрична ізоляція – це шар діелектрика або конструкція, виконана з діелектрика, яким покриваються струмопровідні елементи або відділяються від інших конструктивних частин;
- рубильники включення замкнені в спеціальних шафах, різні кольори пускового та робочого обладнання. Кольори показані в таблиці 4.1:

Таблиця 4.1. Кольори маркування та розміщення шин у електроустановках

Шина	Колір маркування шин	Розміщення шин		
		При розміщенні ошиновки		У відгалуженнях
		Вертикальному	Горизонтальному, під кутом, в трикутник	
Фаза <i>A</i>	Жовтий	Верхня	Найбільш віддалена	Ліва
Фаза <i>B</i>	Зелений	Середня	Середня	Середня
Фаза <i>C</i>	Червоний	Нижня	Ближня	Права
Нульова робоча	Блакитний	-	-	-
Нульова захисна	Продольні жовті та зелені полоси	-	-	-

— при роботі з електроінструментом ($u \leq 42\text{В}$), застосовуються індивідуальні засоби захисту, такі як діелектричні рукавички і калоші, гумові килимки, ізольовані підставки.

До обслуговування електрообладнання допускаються особи, що склали кваліфікаційній комісії іспит з ПУЕ електроустановок будь-якого типу, а також пройшли відповідний інструктаж на робочому місці.

Під час роботи лінії забороняється виконувати ремонт, наладку та змащування частин, що рухаються, доторкатись до гарячих та рухомих частин, працювати при відкритих щитках та огороженнях.

В випадку якої-небудь небезпеки або поміченої несправності необхідно негайно зупинити установку натисканням аварійної кнопки “СТОП” та повідомити про це майстра.

В аварійному режимі використовується пристрій занулення і захисне автоматичне відключення, відповідно до ГОСТ 12.1.030-81/91.

Розрахунок занулення приводиться для визначення сили струму та напруги, значення яких повинні бути безпечними для життя людини.

Вихідні дані: $U_{\phi}=220\text{В}$ – напруга фази, $R_0=0.1\text{ Ом}$. – опір заземлення нейтралі, $Z_0=0.2\text{ Ом}$. – опір заземлення корпусу.

Розрахунок:

Струм короткого замикання забезпечує спрацювання захисту:

$$I_3 = U_{\phi} / (R_0 + Z_0) = 220 / 0.3 = 733\text{ А};$$

Напруга на корпусі:

$$U_k = I_3 \cdot Z_0 = 733 \cdot 0.2 = 146\text{ В};$$

Так як напруга значна, то необхідно застосовувати нульовий захисний провідник.

Заземлення нейтралі знижує напругу до безпечного значення, у випадку замикання фази на землю:

$$U_k = I_3 \cdot R_0 = 220 \cdot / (0.1 + 100) = 2.2\text{ В}.$$

					ДП ЛА52.01.00.000 ПЗ	
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		96

Застосувавши опір повторного захисного провідника знижуємо у випадку обриву нульового провідника напругу на корпусі по місцю обриву:

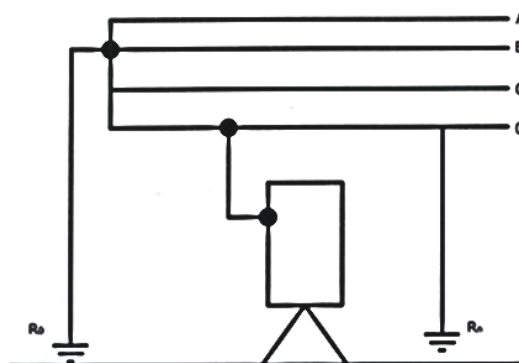


Рисунок 4.1 – Схема занулення електроустановки в трьохфазній мережі

4.2 Виробниче освітлення

Виробництво, що розглядається потребує зорової уваги. В операторній використовуються лампи денного світла. В приладах використовується підсвічування шкали.

В цеху використовується змішаний тип освітлення (природне освітлення доповнюється штучним). Проектом передбачене робоче, евакуаційне, аварійне і ремонтне освітлення. Тип джерела світла для системи загального освітлення – лампа LED (виробник – AXIOMA energy), потужність $W = 10$ Вт, потік $\Phi = 1000$ лм, термін служби – 25000 годин, кількістю 40 шт, так як висота цеху більше 10 метрів і доцільно використовувати цей тип лампи. Передбачається штучне освітлення у всіх приміщеннях і на всіх площадках установки, нормована освітленість повинна становити: комбінованого освітлення – $E_{\text{нор1}} = 200$ лк, загального освітлення – $E_{\text{нор2}} = 150$ лк, фактична становить $E_{\text{фак}} = 240$ лк, що відповідає вимогам ДБН В 2.5.28 – 2006.

4.3 Виробничий шум та вібрація

Джерелами шуму та вібрації в даному виробництві виступають електродвигуни. Шум класифікується як постійний. Рівень шуму – $L=100$

дБ, що					ДП ЛА52.01.00.000 ПЗ	97
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

та повинні бути укомплектовані совковою лопатою. Протипожежні покриття, виготовлені з негорючого теплоізоляційного полотна, грубо бавовняної тканини повинні мати не менш як 2х1м та 2х2 м. Передбачена система виявлення пожежі та її гасіння. Система виявлення пожежі забезпечує відключення системи живлення та кондиціонування повітря.

Системи звукової та візуальної сигналізації забезпечують негайне оповіщення основного персоналу. По попередженню вибухів передбачене герметичне устаткування, автоматичні локальні засоби пожежогасіння.

Це приміщення захищене від атмосферної електрики по категорії-1 згідно з СН-305-77.

<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підп.</i>	<i>Дата</i>	<i>ДП ЛА52.01.00.000 ПЗ</i>	<i>102</i>

ВИСНОВКИ

В даному бакалаврському дипломному проекті було досліджено та проаналізовано процес формування вуглецевих виробів, розглянутий опис технологічного процесу та конструктивні особливості пресу.

Було створено математичну модель процесу, що враховує всі температури в апараті, швидкість формування заготовок, склад матеріалу та потужність нагрівачів. Була проведена ідентифікація динаміки температур у контрольних точках, де були отримані передавальні функції, які використовувались в подальшому при дослідженні систем керування процесом.

У дипломному проекті було проведено дослідження температурних полів в режимах підготовки та пресування.

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

У бакалаврському дипломі розроблено систему керування з ПД-регулятором та систему керування на основі регулятора з прогнозуючими моделями (без та з врахуванням збурень). Порівнявши дві системи та обчисливши інтегральний квадратичний критерій, прийшли до висновку, що для керування процесом формування вуглецевих виробів доцільно використовувати систему керування з МРС-регулятором. Дана система керування набагато швидше виходить на задане значення, а перерегулювання є мінімальним.

У дипломному проекті описані можливі загрози, що можуть виникати під час роботи на виробництві, та розроблено алгоритм запобігання даним чинникам.

					ДП ЛА52.01.00.000 ПЗ	103
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

10. Chalk C. A numerical comparison of a frictional and viscoplastic debris flow model / C. Chalk, D. Borman, A. Sleigh, W. Murphy, J. Peakall, Raul Fuentes // 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2017.
11. Сівецький В.І. Дослідження процесу екструзійного формування полімерів з урахуванням ефекту пристінного ковзання / В. І. Сівецький, О. Л. Сокольський, Ю. В. Бурла // Вісник НТУУ «КПІ», Хімічна інженерія, укологія та ресурсозбереження, 2009 - №1 (3) – С. 17-21.
12. Островский Г.М. Новый справочник химика и технолога: Процессы и аппараты химических технологий Ч.1 [Текст] / Г.М. Островский – АНО НПО "Мир и Семья", 2004. – 848 с.
13. Соседов В.П. Графитация углеродистых материалов / В.П. Соседов, Е.Ф. Чалых – М. : Металлургия, 1987. – 176 с.
14. 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 «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016 - №25 (1197). - С. 99-106.
15. Андриенко П. Д. Повышение энергоэффективности при автоматизированном управлении индукторами прессы / П. Д. Андриенко, Д. С. Ярымбаш // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету (технічні науки). Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика». – Дніпродзержинськ, 2007. – С. 212-213.
16. Мартынова Д. В. Применение математического моделирования в системы управления процессом экструзии с целью энерго- и ресурсосбережения и обеспечения производства высококачественных

ДП ЛА52.01.00.000 ПЗ

Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата
-----	------	----------	-------	------

экструдированных пищевых и кормовых продуктов / Д. В. Мартынова,

В. П. Попов, В. В. Ваншин // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2017. – № 6. – С.78-81.

17. Килимник И. М. Повышение эффективности обработки информации при регистрации контролируемых параметров в системах автоматического управления / И. М. Килимник, Д. С. Ярымбаш // Радіоелектроніка. Інформатика. Управління – 2007 - №1 – С. 68-73.

18. Ярымбаш Д. С. Повышение эффективности управления режимами электрического обогрева при прессовании заготовок подовых блоков / Д. С. Ярымбаш, А. В. Тютюнник, О. Л. Загрунный // Електротехніка та електроенергетика – 2006 – №2 – С.57-60.

19. Симанин Н.А. Адаптивное управление гидравлическим прессом для разделения толстолистового и профильного проката в холодном состоянии / Н. А. Симанин, В. В. Коновалов, Ю. В. Родионов // Вестник ТГТУ. Том 22 – 2016 - №2 – С. 315-322.

20. Markl D. Supervisory Control System for Monitoring a Pharmaceutical Hot Melt Extrusion Process / D. Markl, Patrick R. Wahl, José C. Menezes, Daniel M. Koller, Barbara Kavsek, Kjell Francois, Eva Roblegg, Johannes G. Khinast // American Association of Pharmaceutical Scientists – 2013. С. 1034-1044.

21. Spiewak S. A. Predictive Monitoring and Control of the Cold Extrusion Process / S. A. Spiewak, R. Duggirala, K. Barnett // Annals of the CIRP Vol. 49/1 – 2000 – С. 383-386.

22. Wang L. Continuous-time model predictive control of food extruder / Liuping Wang, Stephen Smith, Charlie Chessari Control Engineering Practice 16 1173–1183 – 2008 – С.1173-1183.

23. Ravi S. Modelling and control of an anfis temperature controller for plastic extrusion process / S. Ravi, P. A. Balakrishnan // International conference

ДП ЛА52.01.00.000 ПЗ

Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата

on communication control and computing technologies – 2010 – С.314-320.

24. Ravi S. Design of Intelligent Self-Tuning GA ANFIS Temperature Controller for Plastic Extrusion System / S.Ravi, M.Sudha, P.A.Balakrishnan // Modelling and Simulation in Engineering – 2011 – №8 – С. 1-8.
25. Лазарев Т.В. Математическая модель процесса экструзии вязкопластичной углеродной массы / Т. В. Лазарев, А. Я. Карвацкий, С. В. Лелека, А. Ю. Педченко // Вісник НТУ «ХП», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях – Харків: НТУ «ХП». – 2016 - №12 (1184). - С. 31-37.
26. Веремей Е. И. Введение в задачи управления на основе предсказаний / Е. И. Веремей, В. В. Еремеев // Всероссийская научная конференция «Проектирование научных и инженерных приложений в среде MATLAB». – М., 2004. – С. 98-115.
27. Надеждин И. С. Системы управления нестационарными объектами на основе МРС регулятора и ПИД регулятора с нечеткой логикой / И. С. Надеждин, А. Г. Горюнов, Ф. Маненти // Управление большими системами – М., 2009 – №75 – С.50-75.

ДОДАТКИ

Специфікація устаткування, виробів та матеріалів

Додаток 1

Позиція на схемі	Назва параметра	Середовище, місце відбору інформації	Граничне значення параметра	Місце монтажу	Назва, технічна характеристика	Тип, марка моделі	Завод-виробник	Кількість, од.
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Устаткування та прилади								
1-1 5-1	Температура	Вуглецева маса, формувальна зона пресу	100°C	Формувальна зона пресу	Термоперетворювач опору мідний з уніфікованим вихідним сигналом, НСХ 50М, діапазон вимірювання (-50)...150 °С, $P_{\max} = 0,63$ МПа, довжина монтажною частини 120...2000 мм, захисна арматура – сталь 10Х1713М2Т; інерційність 20 с, клас допуску В; $I_{\text{вих}} = 4...20$ мА	ТСМУ-1187	НВО «Електротермія», Приладобудівний завод, м. Луцьк	4 од.
2-1 6-1	Температура	Вуглецева маса, на межі формувальна-калібрувальна зона пресу	90°C	Межа формувальна-калібрувальна зона пресу				
4-1	Температура	Вуглецева маса, на виході з пресу	77°C	Вихід калібрувальної зони	Термоперетворювач опору мідний з уніфікованим вихідним сигналом, НСХ 50М, діапазон вимірювання (-50)...150 °С, $P_{\max} = 0,63$ МПа, довжина монтажною частини 120...2000 мм, захисна арматура – сталь 10Х1713М2Т; інерційність 20 с, клас допуску В; $I_{\text{вих}} = 4...20$ мА	ТСМУ-1187	НВО «Електротермія», Приладобудівний завод, м. Луцьк	1 од.

Зм	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дата

ДП ЛА52.01.00.000

3-1	Температура	Вуглецева маса, на виході з пресу	77°C	Вихід калібрувальної зони	Термометр опору мідний, діапазон вимірювання -200...200 °С, НСХ 50М, клас допуску В; клас точності 0,2, довжина монтажної частини 60...1000 мм, захисна арматура – сталь 12Х18Н10Е, інерційність 18...25 с, $P_{\max} = 0,63$ МПа	TСМ-50М	м. Чернігів, ЧАО «ТЭРА»	1 од.
1-2 2-2 4-2 5-2 6-2	— " —	— " —	— " —	Щит керування	Мікропроцесорний регулятор; типи вхідних сигналів: 0-5 мА, 0-20 мА, 4-20 мА, 0-10 В; сигнали від термоперетворювачів опору: 50П, 100П, Pt50, Pt100, гр.21, 50М, 100М, гр.23, сигнали від термопар: ТХК(Л), ТХА(К), ТПП(С), ТПР(В), ТВР (А), ТЖК(І), ТХКн(Е); клас точності 0,2	МІК-21	м. ІваноФранківськ, вул. Автолітмашевська, 5, ООО «МІКРОЛ»	5 од.
3-2	— " —	— " —	— " —	Місцевий	Аналого-цифровий перетворювач сигналу; 16-ти контактний, діапазон температур: -40-125 °С; напруга мережі живлення 3,3 В, 5 В; клас точності 0,5;	AD7417ARZ	м. Київ, «РАДИОМАГ»	1 од.

Зм	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дата

ДП ЛА52.01.00.000

3-3	___ " ___	___ " ___	___ " ___	Щит керування	Автоматичний показувальний і реєструвальний вторинний прилад з пристроєм сигналізації; вхідні сигнали: 0...50 мВ, 0...100 мВ, 0...5 В, 0...10 В, 0...5 мА, 4...20 мА; НСХ перетворювачів: термоелектричних – В, К, L, S, опору – 50П, 100П, 50М, 100М, клас точності 0.5	ДИСК-250ДД	ЗАТ «Промышленная группа „Метран”», м. Челябинськ	1 од.
7-1	Швидкість	Вуглецева маса, обертання мотору гідравлічного приводу	—	Місцевий	Тахометр годинникового типу; межі виміру: 50-1000 об/хв, 1000-10000 об/хв.; температура навколишнього середовища -10-50°C; клас точності 0,2	ТЧ10-Р	Стандарт-М, ООО, НПФ, м. Запоріжжя	1 од.
7-2	___ " ___	___ " ___	___ " ___	Місцевий	Аналого-цифровий перетворювач сигналу; 16-ти контактний, діапазон температур: -40-125 °С; напруга мережі живлення 3,3 В, 5 В; клас точності 0,5;	AD7417ARZ	м. Київ, «РАДИОМАГ»	1 од.
7-3	___ " ___	___ " ___	___ " ___	Щит керування	Мікропроцесорний регулятор; типи вхідних сигналів: 0-5 мА, 0-20 мА, 4-20 мА, 0-10 В; сигнали від термоперетворювачів	МІК-21	м. ІваноФранківськ, вул. Автолітмашевська, 5, ООО «МІКРОЛ»	1 од.

Зм	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дата

ДП ЛА52.01.00.000

					опору: 50П, 100П, Pt50, Pt100, гр.21, 50М, 100М, гр.23, сигнали від термопар: ТХК(Л), ТХА(К), ТПП(С), ТПР(В), ТВР (А), ТЖК(І), ТХКн(Е); клас точності 0,2			
8-1	Тиск	Гідравлічний привод	32 МПа	Місцевий	Вимірювальний тензоперетворювач перепаду тиску з блоком добування квадратного кореня, $\Delta P_{\max} = 0,4$ МПа, температура 5...50 °С, матеріал мембрани – сплав 36НХТЮ, граничнодопустима основна похибка 0,25 %; $I_{\text{вих}} = 0...5$ мА; 4...20 мА, клас точності 0,1	Сапфір 22ДД 2450	ВАТ «Промприлад», м. Івано-Франківськ	1 од.
8-2	___ " ___	___ " ___	___ " ___	Щит керування	Мікропроцесорний регулятор; типи вхідних сигналів: 0-5 мА, 0-20 мА, 4-20 мА, 0-10 В; сигнали від термоперетворювачів опору: 50П, 100П, Pt50, Pt100, гр.21, 50М, 100М, гр.23, сигнали від термопар: ТХК(Л), ТХА(К), ТПП(С), ТПР(В), ТВР (А), ТЖК(І), ТХКн(Е); клас точності 0,2	МІК-21	м. ІваноФранківськ, вул. Автолітмашевська, 5, ООО «МІКРОЛ»	1 од.

Електроапарати

Зм	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дата

ДП ЛА52.01.00.000

SB1 SB2	—	—	—	Щит керування	Пост управління кнопочний, кількість елементів управління – 2; номінальна напруга ізоляції (за змінного струму частотою 50/60 Гц) 660 В, номінальний тепловий струм 10 А; температура довкілля від (-40) °С до 40 °С, відносна вологість повітря 98 %, комутаційна зносостійкість 1 000 000 циклів	ПКУ 15-21-131 УЗ	ЗАТ «Променерго-автоматика», м. Київ	2
МП1	—	—	—	Місцевий	Пускач магнітний безконтактний неререверсивний з тепловим реле РТТ-326 136-160А, кнопками «ПУСК» і «СТОП» для керування трифазними асинхронними електродвигунами з короткозамкнутим ротором; номінальний робочий струм 160 А; додаткові контакти: 2 н. р. і 2 н. з.; номінальна робоча напруга 220, 380, 660 В, номінальна потужність 45 кВт; можуть застосовуватись у схемах з мікропроцесорною технікою	ПМ12-160210 У2 В	ВАТ «Кашинский завод электроаппаратуры», м. Москва	1

Зм	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дата

ДП ЛА52.01.00.000

SA1	—	—	—	Місцевий	Кнопка запобіжного вимикання; номінальна робоча напруга: змінна (частота 50/60 Гц) 660 В, постійна – 440 В, номінальний тепловий струм – 10 А	КМЕ-5111 УЗ	ТОВ «Кам'янець-Подільський електро-механічний завод»	3
HL1	—	—	—	Щит керування	Лампа сигнальна світлодіодна із зеленим індикатором («ПУСК»), $U_{жив} = 220$ В, 50/60 Гц, $d = 27$ мм, сила світла 20 мКд	СКЛ-11-3-2-220	ВАТ «Кашинский завод электроаппаратуры», м. Москва	1
HL2	—	—	—	Щит керування	Лампа сигнальна світлодіодна із червоним індикатором («СТОП»), $U_{жив} = 220$ В, 50/60 Гц, $d = 27$ мм, сила світла 20 мКд	СКЛ-11-К-2-220	ВАТ «Кашинский завод электроаппаратуры», м. Москва	1

Зм	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дата

ДП ЛА52.01.00.000

Зм	Арк.	№ доквм.	Підпис	Дата

ДП ЛА52.01.00.000