

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені Ігоря Сікорського»

(повне найменування вищого навчального закладу)

ІНЖЕНЕРНО - ХІМІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра технічних та програмних засобів автоматизації

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
_____ Віталій ЦАПАР
« ____ » _____ 2025 р.

Дипломний проект

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо - професійною програмою «Технічні та програмні засоби
автоматизації»

з спеціальності 151- Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

На тему: «Автоматизація процесу вирощування монокристалів методом
Чохральського»

Виконав: студент IV-го курсу, групи ЛА-311
(шифр групи)

Лук'янов Давид Олексійович

(прізвище, ім'я, по-батькові)

(підпис)

Керівник ас. Ph.D. Тюріна Є. О.

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

(підпис)

Консультант Охорона праці ст. викл., к.т.н. Ковтун А. І.

(назва розділу) (посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Рецизент _____

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

(підпис)

Засвідчую, що в цьому дипломному
проекті немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань
Студент _____

(підпис)

Київ - 2025 року

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

Інженерно-хімічний факультет
(повна назва)

Кафедра технічних та програмних засобів автоматизації
(повна назва)

До захисту допущено”

Завідувач кафедри

Віталій ЦАПАР

(підпис)

(ініціали, прізвище)

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
на дипломний проект студенту
Лук'янов Давид Олексійович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту: Автоматизація процесу вирощування монокристалів методом Чохральського

керівник проекту Ас. Ph.D. Тюріна Євгенія Олександрівна,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «28» березня 2025 р. № 6

2. Термін подання студентом проекту _____

3. Вихідні дані до проекту технічне устаткування для вирощування монокристалів методом Чохральського – апарат “ЛАНДИШ”, таблиця номінального режиму роботи апарату при вирощуванні монокристалів кремнію (температура, швидкість витягування, обертання тиглю та штифту, тощо), наукові відомості про фізичні принципи протікання процесу вирощування монокристалів методом Чохральського, технологічна схема роботи апарату та зони розплаву, параметри температури поверхні розплаву (1420 °C), швидкості витягування монокристалу (1мм/год), підведеної теплоти індуктору (100 кВт), кутової швидкості обертів тигля та штифта (5-15 об/хв)

4. Зміст пояснювальної записки аналіз технологічного процесу вирощування монокристалів методом Чохральського, розробка системи автоматизації, моделювання та синтез системи керування зоною розплаву, оптимізація статичних параметрів зони розплаву

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо): Схема автоматизації технологічного процесу вирощування монокристалів методом Чохральського, принципова електрична схема дистанційного керування, аварійного захисту та технологічних блокувань електродвигунів, монтажно-комутаційна схема дистанційного керування, аварійного захисту та технологічних блокувань електродвигунів

6. Консультанти розділів проекту^{1*}

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	ст.викл. Ковтун А. І.	25.05.2026	10.06.2025

7. Дата видачі завдання 28.03.2025

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Аналіз фізичних принципів перебігу процесів, ознайомлення з технічним устаткуванням, технічною документацією, вибір об'єкту автоматизації	28.04.2025	
2	Розробка системи автоматизації технологічного процесу	08.05.2025	
3	Математичне моделювання процесу зміни температури поверхні розплаву, виведення статичного та динамічного режиму роботи	25.05.2025	
4	Синтез системи керування процесом витягування монокристалу із зони розплаву	06.06.2025	
5	Статична оптимізація зони розплаву	09.06.2025	
6	Охорони праці	10.06.2025	

Студент

(підпис)

Давид ЛУК'ЯНОВ

Керівник проекту

(підпис)

Євгенія ТЮРІНА

^{1*} Консультантом не може бути зазначено керівника дипломного проекту.

РЕФЕРАТ

Дипломний проєкт містить пояснювальну записку об'ємом 115 сторінок, 27 рисунків, 5 таблиць, 3 кресленика, 1 додаток і 22 літературних джерела.

Метою проєкту є розроблення системи автоматизації температури поверхні процесу вирощування монокристалів методом Чохральського, яка забезпечить компенсацію впливів збурення системи та її сталу роботу у номінальному режимі із оптимізацією параметрів системи управління та параметрів процесу, що забезпечить необхідні умови для виготовлення гомогенних за складом та структурою монокристалів із широкого спектру матеріалів. За основу розробки системи управління обрано процес вирощування монокристалів кремнію.

У межах дослідження було проаналізовано сучасні технологічні підходи до автоматизації кристалізаційних процесів, проведено оцінку вимог до системи керування, розроблено повнофункціональну схему автоматизації технологічного процесу.

У роботі виконано математичне моделювання теплових процесів при вирощуванні монокристалів кремнію, виведено базову математичну модель статичного та динамічного режиму управління у вигляді диференційних рівнянь. Проведено лінеаризацію нелінійної математичної моделі для синтезу системи керування, розроблено алгоритми оптимального керування температурними режимами та швидкістю витягування кристалу. Особливу увагу приділено системі підтримки прийняття рішень для контролю якості процесу кристалізації на основі аналізу температурних полів та геометричних параметрів фронту кристалізації.

Синтезована система керування забезпечує автоматичне регулювання температури розплаву, швидкості витягування та обертання затравочного кристалу з урахуванням динамічних характеристик об'єкта керування. Проведено статичну оптимізацію параметрів регуляторів для досягнення максимальної якості монокристалів при мінімальних енерговитратах.

Результати роботи підтверджують доцільність і ефективність застосування розробленої системи автоматизації для підвищення якості монокристалів та стабільності технологічного процесу в умовах промислового виробництва напівпровідникових матеріалів.

Ключові слова: автоматизація, метод Чохральського, монокристали, система керування, математичне моделювання, оптимізація, температурний режим, напівпровідникові матеріали.

ABSTRACT

The diploma project includes an explanatory note consisting of 115 pages, 27 figures, 5 tables, 3 drawings, 1 appendix, and 22 references.

The aim of the project is to develop an automated temperature control system for the surface of monocrystal growth using the Czochralski method. This system is designed to compensate for disturbances in the process and ensure stable operation in nominal mode, with optimization of both the control system parameters and the process parameters. This will provide the necessary conditions for producing monocrystals with homogeneous composition and structure from a wide range of materials. The development of the control system is based on the monocrystal growth process of silicon.

The study includes an analysis of modern technological approaches to the automation of crystallization processes, an assessment of the system requirements, and the development of a fully functional automation scheme for the technological process.

The project implements mathematical modeling of thermal processes during silicon monocrystal growth. A basic mathematical model of both the static and dynamic control modes is derived in the form of differential equations. Linearization of the nonlinear mathematical model was performed for the synthesis of the control system, and algorithms were developed for optimal control of temperature regimes and crystal pulling speed. Special attention is given to the decision support system for process quality control based on the analysis of temperature fields and geometric parameters of the crystallization front.

The synthesized control system provides automatic regulation of melt temperature, crystal pulling speed, and seed crystal rotation, taking into account the dynamic characteristics of the controlled object. Static optimization of controller parameters was carried out to achieve maximum crystal quality with minimum energy consumption.

The results confirm the feasibility and effectiveness of the developed automation system for improving monocrystal quality and stabilizing the technological process in the industrial production of semiconductor materials.

Keywords: *automation, Czochralski method, monocrystals, control system, mathematical modeling, optimization, temperature regime, semiconductor materials.*

ВСТУП.....	10
1 АВТОМАТИЗАЦІЯ ВИРОЩУВАННЯ МОНОКРИСТАЛІВ ЗА МЕТОДОМ ЧОХРАЛЬСЬКОГО	11
1.1 Загальна характеристика технологічного процесу вирощування монокристалів методом Чохральського	11
1.2. Аналіз зони розплаву як об'єкта автоматизації.....	16
1.3. Аналіз наявних систем автоматизації зони розплаву	18
Постановка задач дипломного проектування.....	21
2 СИСТЕМА АВТОМАТИЗАЦІЇ ВИРОЩУВАННЯ МОНОКРИСТАЛІВ МЕТОДОМ ЧОХРАЛЬСЬКОГО	23
2.1. Розробка схеми автоматизації процесу вирощування монокристалів методом Чохральського	23
2.2. Опис принципової електричної схеми дистанційного керування, аварійного захисту та технологічних блокувань електродвигунів.....	28
2.3. Опис монтажно-комутаційної схеми дистанційного керування, аварійного захисту та технологічних блокувань електродвигунів.....	32
Висновки до розділу 2.....	34
3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗОНИ РОЗПЛАВУ У ПРОЦЕСІ ВИРОЩУВАННЯ МОНОКРИСТАЛІВ МЕТОДОМ ЧОХРАЛЬСЬКОГО.....	36
3.1. Моделювання статичного режиму роботи зони розплаву.....	39
3.2. Моделювання динамічного режиму роботи зони розплаву	45
Висновки до розділу 3.....	58
4 СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЗОНОЮ РОЗПЛАВУ	61
4.1 Синтез ПІ- та ПД-регуляторів замкненої системи методом М-кола.....	64
4.2 Синтез ПІ- та ПД-регуляторів замкненої системи методом ІТАЕ.....	68
4.3 Синтез системи керування із ПІ- та ПД-регуляторами методом pidtune .	71

					ДП/ЛАЗ11.06.00.000ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Автоматизація процесу вирощування монокристалів методом Чохральського	Літ.	Арк.	Аркуші
Розроб.		Лук'янов Д. О.						
Перев.		Тюріна Е.О.					2	
Н. контр.		Кваско Е. М.				КПІ ім. Ігоря Сікорського, ІХФ, ЛАЗ-311		
Затв.		Цапар В.С.						

Висновки до розділу 4.....	74
5 СТАТИЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ МОДЕЛІ ЗОНИ РОЗПЛАВУ	75
5.1. Постановка задачі оптимізації та вибір алгоритмів оптимізації.....	75
5.2. Статична оптимізація моделі зони розплаву методом штрафних функцій	76
5.2. Статична оптимізація моделі зони розплаву методом генетичного алгоритму	79
Висновки до розділу 5.....	83
6 ОХОРОНА ПРАЦІ.....	85
6.1 Аналіз умов праці при розробці та використанні системи автоматизації. 85	
6.2 Основні фактори ризику та заходи безпеки.....	86
6.3 Вимоги до організації робочого місця та забезпечення безпеки технологічного процесу	88
Висновки до розділу 6.....	94
ВИСНОВКИ.....	96
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	97
ДОДАТОК 1	99

					ДП/ЛАЗ11.06.00.000ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Лук'янов Д. О.			Автоматизація процесу вирощування монокристалів методом Чохральського	Літ.	Арк.	Аркуші
Перев.		Тюріна Е.О.					2	
Н. контр.		Кваско Е. М.				КПІ ім. Ігоря Сікорського, ІХФ, ЛА-311		
Затв.		Цапар В.С.						

ВСТУП

Метод Чохральського – це технологія отримання монокристалів шляхом витягування затравочного кристалу з розплаву матеріалу при контрольованих умовах температури, швидкості витягування та обертання [1, с. 15]. Метод Чохральського використовується для вирощування кристалів простих хімічних сполук, стійких на межі температури плавлення-кристалізації. Суть методу полягає у створенні області градієнту температур у зоні контакту поверхні розплаву із затравкою, що слугує центром первинної кристалізації. Це створює умови для утворення стійкого фронту кристалізації, пропорційній за площею площі поверхні розплаву. Повільний підйом затравки призводить до утворення циліндричного монокристалу сировини. Метод Чохральського дозволяє виробляти великий обсяг матеріалів, які не потребують надвисокого тиску для кристалізації, а саме монокристали сапфіру, германію, кремнію, а також металевих монокристалів. Цей метод забезпечує високу якість отриманих монокристалів з мінімальною кількістю структурних дефектів, що є критично важливим для виробництва напівпровідникових приладів.

Якість отриманих кристалів, рівномірність їх напруження та сталість структури є вкрай чутливою до сталості умов середовища та параметрів температури, швидкості витягування та обертання. Тому автоматизація цього процесу має такі переваги:

- підвищення якості отриманих монокристалів завдяки точному контролю параметрів процесу;
- зменшення кількості дефектів та домішок у структурі кристалу;
- збільшення обсягів виробництва продукції;
- значне скорочення енерговитрат;
- можливість повного документування процесу для подальшого аналізу та оптимізації;
- підвищення безпеки технологічного процесу.

					ДП/Аз11.06.00.000ПЗ	Арк.
						10
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИРОЩУВАННЯ МОНОКРИСТАЛІВ МЕТОДОМ ЧОХРАЛЬСЬКОГО

1.1 Опис технологічного процесу вирощування монокристалів методом Чохральського

Метод Чохральського – це процес вирощування монокристалів шляхом витягування кристалу на затравці з розплаву при контрольованих умовах температури, швидкості витягування та обертання [2, с. 63]. Даний метод забезпечує отримання монокристалів високої якості з мінімальною кількістю структурних дефектів.

Метод Чохральського є найпоширенішою технологією вирощування монокристалів кремнію, що становлять основу сучасної мікроелектроніки. Суть цього методу полягає у витягуванні затравкового кристалу з розплаву під точно контрольованими умовами температури, швидкості витягування та обертання [1, с. 15]. У ході процесу створюється стабільний температурний градієнт у зоні контакту затравки з поверхнею розплаву, що забезпечує утворення стійкого фронту кристалізації. Завдяки поступовому витягуванню та обертанню затравки формується циліндричний монокристал, структура якого є високовпорядкованою та має мінімальні дефекти [2, с. 67, 5, с. 232].

Монокристалічний кремній вирощують у вакуумованих камерах або в атмосфері інертного газу (найчастіше аргон), що зменшує ризик забруднення розплаву та забезпечує стабільні умови теплообміну. Розплав кремнію розміщується у кварцовому тиглі, який підігрівається за допомогою індукторної печі. Температура підтримується трохи вище температури плавлення кремнію (приблизно 1414 °C), щоб забезпечити стабільність розплаву [1, с. 110, 4, с. 320].

Ключовим фактором у процесі вирощування є ретельне керування тепловими потоками та швидкістю витягування кристалу. Зменшення швидкості витягування дозволяє уникнути утворення внутрішніх напружень

					ДП/Аз11.06.00.000ПЗ	Арк.
						11
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

у кристалі, а контроль обертання тигля та кристалу забезпечує рівномірність температурного поля та симетрію росту. У типових умовах кристал обертається в протилежний бік до тигля зі швидкістю, що залежить від діаметра та геометрії кінцевого зливка [2, с. 70, 3, с. 16].

Метод Чохральського дозволяє вирощувати монокристали діаметром до 300 мм і більше з високим рівнем чистоти та низькою концентрацією дефектів. Особливо важливим є контроль концентрації домішок (таких як бор або фосфор), які визначають тип провідності кремнію. У зв'язку з цим використовують точне дозування легуючих добавок у розплав, а також контролюють розподіл домішок вздовж кристалу за допомогою комп'ютерного моделювання процесу [5, с. 236, 2, с. 85].

Автоматизація процесу вирощування має критичне значення для стабільності якості продукції та підвищення ефективності виробництва. В автоматизованих системах здійснюється моніторинг та керування такими параметрами, як температура тигля, температура кристалу, маса розплаву, швидкість витягування, обертання, а також зміщення кристалу відносно осі. Відомі підходи до автоматизації включають використання PID-регуляторів, систем зворотного зв'язку за масою, термопарного та оптичного контролю положення фронту кристалізації [3, с. 45, 4, с. 322].

Особливу увагу приділяють моделюванню теплових процесів у зоні розплаву. На основі рівнянь теплообміну та наближених моделей (з урахуванням радіаційних, конвективних і кондуктивних складових) створюються чисельні моделі, які дозволяють прогнозувати поведінку системи в динаміці [5, с. 241]. Математичні моделі, як правило, враховують залежність температурного поля від маси розплаву, теплового потоку від індуктора, а також від швидкості витягування, що визначає інтенсивність витрати тепла з поверхні розплаву [2, с. 90, 5, с. 243].

					ДП/Аз11.06.00.000ПЗ	Арк.
						12
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

Дипломний проєкт виконано на базі установки по вирощуванню монокристалів “ЛАНДИШ” (Інститут металофізики, Київ), зображення якої представлено на рисунку 1.1.



Рис 1.1. Установка “ЛАНДИШ” на базі Інституту Металофізики, м. Київ.

На рис. 1.2 представлена технологічна схема вакуумної камери установки "ЛАНДИШ", що використовується для вирощування монокристалів методом Чохральського.

Технічні характеристики установки "ЛАНДИШ":

- максимальний діаметр вирощуваних кристалів: до 100 мм;
- максимальна довжина кристалу: до 500 мм;
- робоча температура: до 2300 °С;
- автоматичний контроль діаметру кристалу;
- система стабілізації температури розплаву;
- контроль швидкості витягування: 0,1-10 мм/год;

					ДП/Аз11.06.00.000ПЗ	Арк.
						13
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

- контроль швидкості обертання: 1-30 об/хв;
- вакуумна система з тиском до 10^{-6} торр;
- захисна атмосфера аргону чи гелію.

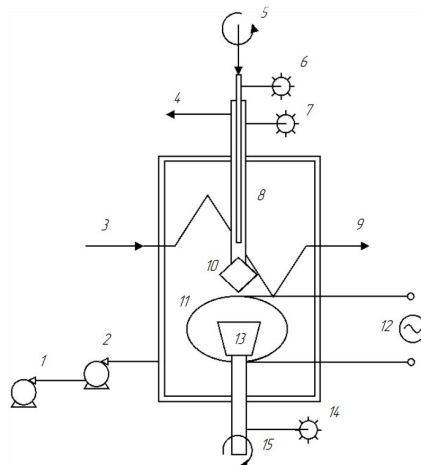


Рис. 1.2. Технологічна схема вакуумної камери установки “ЛАНДИШ”:
 1 – молекулярний насос, 2 – форвакуумний насос, 3 – вхідний трубопровід з охолоджувачем у змійовик вакуумної камери, 4 – вихідний трубопровід охолоджувача із штифта затравки, 5 – вхідний трубопровід охолоджувача у штифт затравки, 6 – ротор штифта, 7 – підіймач штифта, 8 – штифт для кристалу, 9 – вхідний трубопровід з охолоджувачем у із змійовика вакуумної камери, 10 – санітарна вежа, 11 – вакуумна камера, 12 – індукційна піч для розплаву, 13 – тигель для розплаву, 14 – ротор підставки для тиглю, 15 – підставка для тигля

Процес вирощування монокристалів складається з таких технологічних етапів [3, с. 12].

Підготовлена шихта поміщається у тигель 13, який встановлюється на підставку 15. Вакуумна камера 11 герметизується, після чого за допомогою форвакуумного 2 та молекулярного 1 насосів створюється високий вакуум (до 10^{-6} торр). Для вирощування монокристалів кремнію вакуумна камера заповнюється інертним газом (аргоном) під тиском не більше 30 Торр.

					ДП/Аз11.06.00.000ПЗ	Арк.
						14
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

Через систему охолодження (трубопроводи 3 та 9) здійснюється циркуляція охолоджуючої рідини в змійовику вакуумної камери для підтримки необхідного температурного режиму. Індукційна піч 12 нагріває тигель із шихтою до температури плавлення матеріалу (для кремнію близько 1420 °С). Під час нагрівання тигель повільно обертається за допомогою ротора підставки 14 для рівномірного розподілу температури.

Після повного розплавлення шихти та стабілізації температурного режиму (від 15 хвилин до кількох годин для кремнію) затравочний кристал, закріплений на штифті 8, повільно опускається до поверхні розплаву за допомогою підіймача 7. Штифт із затравкою охолоджується через трубопроводи 5 та 4 для забезпечення початкової кристалізації.

При контакті затравочного кристалу з розплавом починається процес кристалізації. Штифт із затравкою приводиться в обертальний рух за допомогою ротора 6. Швидкість обертання (1-30 об/хв) та швидкість витягування (0,1-10 мм/год) контролюються автоматично для забезпечення стабільного діаметра кристалу.

Спочатку формується тонкий циліндр – продовження затравочного кристалу, потім за рахунок зниження температури розплаву та зміни швидкості витягування діаметр кристалу збільшується до необхідного значення (до 100 мм). Після досягнення заданого діаметру процес продовжується до вирощування кристалу необхідної довжини (до 500 мм).

Перед завершенням процесу температура розплаву підвищується, а швидкість витягування збільшується, що призводить до поступового зменшення діаметру кристалу. Після формування конусу та вичерпання залишків розплаву відбувається відрив кристалу від розплаву та його поступове охолодження.

Вакуумна камера 11 оснащена санітарною вежею 10, яка забезпечує очищення газів перед їх виходом із системи та підтримує необхідні параметри атмосфери всередині камери.

					ДП/Аз11.06.00.000ПЗ	Арк.
						15
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

Всі режимні параметри процесу вирощування монокристалів (швидкість обертання, швидкість витягування, температура розплаву, тиск у вакуумній камері та інші) контролюються автоматично за допомогою системи керування установкою "ЛАНДИШ", що забезпечує стабільність процесу та високу якість отриманих монокристалів.

Для побудови системи керування під час дипломного проєкту виведено базову математичну модель рівнянь статички та динаміки у загальній формі. Після чого проведено лінеаризацію моделі методом прирощень навколо робочої точки із обчисленням меж застосування. Така моделі дозволила синтезувати оптимальні регулятори, здатні швидко компенсувати збурення (наприклад, втрату маси або коливання температури навколишнього середовища) та забезпечувати сталість фронту кристалізації [4, с. 325, 5, с. 244]. Саме сталість температури поверхні розплаву вважається критичним параметром, що визначає якість монокристалу — її варіації навіть у межах 1–2 °С можуть призвести до утворення дефектів або порушення структури [3, с. 30, 1, с. 122].

У якості об'єкта автоматизації було обрано зону розплаву, як центральний елемент установки, від якого залежить базова математична модель процесу вирощування монокристалів методом Чохральського [11, с. 23].

1.2. Аналіз зони розплаву як об'єкта автоматизації

Основним елементом установки (рис. 1.3) є так звана зона розплаву [6, с. 45], це тигель, який закріплений на підставці в середині індукційної печі. Саме поверхня розплаву тиглю є контактною областю із затравкою кристалу на штифті [7, с. 112]. Градієнт температур, який утворюють через охолодження затравки змійовиком штифта забезпечує область утворення кристалізації [8, с. 234]. Тигель обертається на підставці із константною

					ДП/Аз11.06.00.000ПЗ	Арк.
						16
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

швидкістю навколо нормалі у протилежному відносно обертання штифта напрямку.

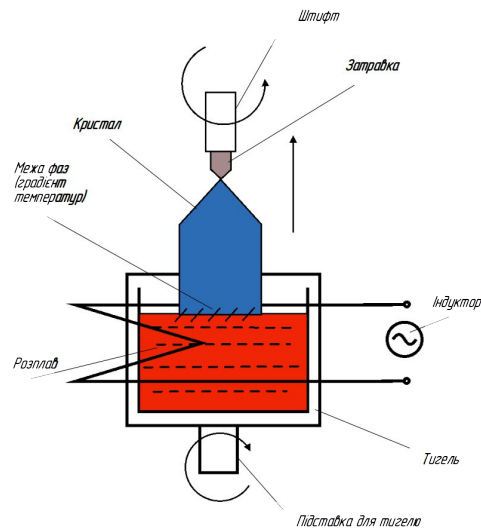


Рис. 1.3. Схема зони розплаву (області кристалізації)

Температурний режим у камері тигля і підтримка його сталості є критично важливими для утворення рівномірних взаємоподібних шарів кристалу навколо затравки, підтримки сталості площі перерізу кристалу, внутрішніх механічних напруг та розподілу температури по кристалу.

Таким чином, створення систем керування температурою в зоні розплаву є принциповою та необхідною задачею при автоматизації процесу вирощування монокристалів методом Чохральського.

Принципові характеристики зони розплаву, як об'єкта автоматизації:

- температура в зоні розплаву залежить від конвективних, індукційних та масообмінних процесів, отже система має бути багатоконтурною і запроваджена модель має містити в собі можливість вираження всіх необхідних контурів: підведеного тепла, швидкості витягування кристалу, кутова швидкість обертут тигля та штифту, інтегральний чинник втрати маси розплаву;

					ДП/Аз11.06.00.000ПЗ	Арк.
						17
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

- система є надійною відносно керуючих та збурюючих впливів, складається з невеликої кількості конструктивно міцних при номінальних навантаженнях елементів;
- система є спостережуваною відносно регульованої величини, при розташуванні датчиків температури перевага надається безконтактним датчикам температури поверхні розплаву, саме вона є цільовим параметром керування .

1.3. Аналіз існуючих систем автоматизації зони розплаву

При дослідженні літературних джерел щодо автоматизації установок для вирощування монокристалів методом Чохральського слід зазначити, що детальні схеми автоматизації практично не зустрічаються у відкритому доступі. Це пов'язано з тим, що параметри вирощування монокристалів та точні алгоритми керування процесом є комерційною таємницею виробників і залежать від конкретної реалізації установки.

Проте, ґрунтуючись на принциповій схемі процесу, яка в тому числі відповідає установці "ЛАНДИШ" (рис. 1.4), можна провести аналіз потенційних контурів автоматизації та зробити ряд важливих висновків.

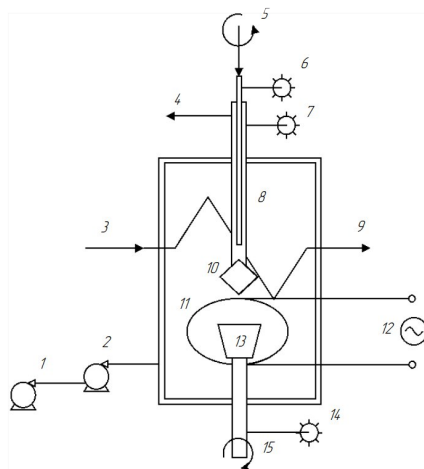


Рис. 1.4. Принципова схема апарата по вирощуванню монокристалів методом Чохральського:

					ДП/Аз11.06.00.000ПЗ	Арк.
						18
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

1 – затравочний шток, пристрій підйому та обертання, 2 – верхній кожух, 3 – ізолюючий клапан, 4 – газовий вхід, 5 – тримач затравки та затравка, 6 – камера високотемпературної зони, 7 – розплав, 8 – тигель, 9 – вихлоп, 10 – вакуумний насос, 11 – пристрій обертання та підйому тигля, 12 – система керування та джерело енергії, 13 – датчик температури, 14 – п'єдестал, 15 – нагрівач, 16 – ізоляція, 17 – труба для продувки, 18 – оглядове вікно, 19 – датчик для контролю діаметру зростаючого злитка

На основі принципової схеми процесу можна виділити контур регулювання температури розплаву:

Датчик температури 13 надсилає сигнал до системи контролю 12.

Система керування регулює потужність нагрівача 15.

Важливим є забезпечення стабільної температури розплаву з мінімальними коливаннями, оскільки це безпосередньо впливає на якість кристалу

Контур контролю діаметру кристалу.

Датчик контролю діаметру 19 через оглядове вікно 18 відстежує ширину зростаючого злитка.

На основі цих даних система керування 12 регулює швидкість витягування та температуру розплаву для підтримання заданого діаметру монокристалу. Діаметр кристалу обернено пропорційний швидкості витягування при сталій температурі розплаву.

Контур керування швидкістю витягування та обертання.

Пристрій підйому та обертання затравки 1 отримує керуючі сигнали від системи контролю 12.

Швидкість витягування та обертання повинні підтримуватися з високою точністю для забезпечення однорідності структури кристалу.

Контур керування обертанням тигля.

					ДП/Аз11.06.00.000ПЗ	Арк.
						19
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

Пристрій обертання тигля 11 синхронізується із обертанням затравки для отримання оптимальних умов росту кристалу.

Швидкість обертання може змінюватись залежно від стадії процесу.

Контур керування тиском всередині камери.

Вакуумний насос 10 та газовий вхід 4 забезпечують створення та підтримку необхідного тиску у вакуумній камері.

Система керування 12 регулює тиск та склад газового середовища в камері.

Система моніторингу процесу.

Оглядове вікно 18 дозволяє операторам візуально контролювати процес.

Для сучасних установок доцільним є впровадження системи машинного зору для автоматичного аналізу процесу кристалізації.

Автоматизація процесу вирощування монокристалів методом Чохральського має ряд особливостей [4, с. 320]:

- навіть незначні зміни температури, швидкості витягування чи обертання можуть призвести до дефектів структури кристалу;
- система автоматизації повинна забезпечувати високу точність та стабільність підтримки заданих параметрів;
- у процесі росту кристалу змінюються умови теплообміну та конвекції в розплаві;
- ефективна система автоматизації повинна адаптивно змінювати параметри процесу в залежності від стадії росту;
- якість кристалу залежить від взаємопов'язаних параметрів (температура, швидкість витягування та обертання, тиск у камері);
- система автоматизації в зоні розплаву повинна, у першу чергу, враховувати взаємний вплив підведеного до розплаву тепла та швидкість витягування кристалу;
- для зменшення кількості дефектів система автоматизації повинна не тільки реагувати на поточні зміни, але й прогнозувати розвиток процесу.

					ДП/ІАз11.06.00.000ПЗ	Арк.
						20
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

Для модернізації установки "ЛАНДИШ" можна запропонувати такі вдосконалення схеми автоматизації:

- впровадження системи машинного зору для точного контролю форми кристалізаційного фронту та діаметру кристалу;
- використання сучасних програмованих логічних контролерів (ПЛК) для точного регулювання всіх параметрів процесу;
- розробка математичної моделі процесу та впровадження системи керування на основі цієї моделі;
- використання штучних нейронних мереж для прогнозування розвитку процесу кристалізації та адаптивного керування;
- впровадження системи віддаленого моніторингу та керування.

Таким чином, незважаючи на відсутність детальних схем автоматизації у відкритих джерелах, аналіз принципової схеми установки "ЛАНДИШ" дозволяє визначити ключові контури автоматизації та запропонувати шляхи модернізації системи керування для забезпечення високої якості вирощуваних монокристалів.

Постановка задач дипломного проектування

Метою дипломного проєкту є принципове дослідження методу Чохральського та моделювання контурів автоматизації процесу вирощування монокристалів. Завдання включає:

- аналіз існуючих систем керування;
- розробку системи автоматизації процесу;
- моделювання температурних режимів процесу вирощування;
- розробку програмного забезпечення для збору та аналізу даних;
- тестування модернізованих систем та оцінку якості отриманих кристалів;

					ДП/Аз11.06.00.000ПЗ	Арк.
						21
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

- документування результатів дослідження та формування рекомендацій щодо промислового впровадження.

У процесі дослідження вирощування монокристалів методом Чохральського було проаналізовано його ключові переваги та виявлено низку суттєвих недоліків. Метод демонструє високу чутливість до коливань температури, швидкості витягування та стабільності зовнішніх і внутрішніх впливів. Ці чинники безпосередньо позначаються на якості кінцевого продукту, зокрема через утворення дефектів кристалічної ґратки та нерівномірний розподіл внутрішніх механічних напружень у структурі кристалу.

У ході роботи було ідентифіковано центральні вузли установки, у яких відбувається процес кристалізації, зокрема зону розплаву, що є критично важливою для керованості процесом. Засвоєно фундаментальний принцип методу – підтримання чітко контрольованого температурного градієнта між поверхнею розплаву та зоною кристалізації, які перебувають у безперервному тепловому контакті.

Аналіз сучасних підходів до автоматизації процесу вирощування монокристалів методом Чохральського виявив, що переважна більшість ефективних рішень класифікуються як комерційна або державна таємниця, що зумовлено правами власності на технології. Сам процес вирощування має виразний нелінійний характер, що ускладнює його математичне моделювання і вимагає високоточної ідентифікації фізичних параметрів для створення надійної апроксимації.

Проведення ідентифікації моделі зони розплаву дозволяє сформувати базову математичну модель, яка може бути використана для подальших емпіричних досліджень, порівняння апроксимованих структур та практичної реалізації системи автоматичного керування в рамках заданої технологічної та автоматизаційної схеми.

					ДП/Аз11.06.00.000ПЗ	Арк.
						22
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

2 АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ВИРОЩУВАННЯ МОНОКРИСТАЛІВ МЕТОДОМ ЧОХРАЛЬСКОГО

2.1. Розробка схеми автоматизації процесу вирощування монокристалів методом Чохральського

В результаті аналізу процесу вирощування монокристалів було визначено такі параметри, контроль та керування якими потрібно забезпечити схему автоматизації ДПЛАз11.06.00.000СхАв.

Контроль та керування:

- Температура розплаву в тиглі
- Потужність індукційної печі
- Швидкість обертання штифта затравки
- Швидкість обертання тигля
- Швидкість підйому затравки
- Рівень кристалу
- Вакуум/тиск у камері
- Температура на стінках камери
- Температура на зворотному кінці штифта затравки

Технологічна сигналізація:

- Температура розплаву в тиглі
- Потужність індукційної печі
- Рівень кристалу
- Вакуум у камері
- Тиск форвакуумного насосу
- Робота молекулярного насосу
- Витрата охолоджуючої води

В таблиці 3.1 наведено відповідні стадіям процесу встановлені датчики, параметри контролю та керування і норми технологічного режиму.

					ДПЛАз11.06.00.000ПЗ	Арк.
						23
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

Таблиця 2.1. Параметри контролю і керування виробництвом

№ п/п	Найменування стадії процесу, місце заміру	Параметр, що контролюється	Норми технологічного режиму	Вимоги до схеми автоматизації
1	Розплав кремнію, тигель 13 у вакуумній камері, датчик безконтактний	Температура	1420±5 °С	Контроль, керування сигналізація
2	Індукційна піч 12, по місцю на схемі індуктора	Потужність	50-150 кВт	Контроль, керування
3	Фронт кристалізації 10, датчик рівня на штифті	Рівень кристалу	За програмою	Контроль, керування
4	Штифт затравки 6, по місцю на схемі ротора	Швидкість обертання	5-30 об/хв	Контроль, керування
5	Ротор тигля 14, по місцю на схемі ротора	Швидкість обертання	5-15 об/хв	Контроль, керування
6	Механізм підйому 6, датчик рівня на штифті	Швидкість підйому	0,5-5 мм/хв	Контроль, керування
7	Вакуумна камера 8, по місцю в середині	Тиск	10 ⁻³ -10 ⁻⁵ Па	Контроль, керування,

					ДП/Аз11.06.00.000ПЗ	Арк.
						24
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

	камери			сигналізація
8	Змійовик охолодження камери 3, по місцю на трубопроводі, резистивний	Температура стінок в камері	120-200 °С	Контроль, керування
9	Охолодження штифта 4, по місцю на трубопроводі, резистивний	Температура на зворотному кінці штифта	70-90 °С	Контроль, керування
10	Форвакуумний насос М4, по місцю на затворі, датчик тепловий	Тиск	< 1 Па	Контроль, сигналізація
11	Молекулярний насос М3, по місцю на корпусі, датчик напруги	Робота	Увімк/Вимк	Контроль, сигналізація

Розглянемо контури контролю, керування та сигналізації, які містить схема автоматизації процесу вирощування монокристалу методом Чохральського ДПЛАз11.06.01.000СхАв.

Контур 1 призначений для контролю і керування температури на поверхні штифта (потік 1) та включає такі технічні засоби автоматизації: вимірювач температури (поз. 1-1), нормуючий прилад (поз. 1-2), що передає сигнал від вимірювача температури до щита керування, регулятор температури (поз. 1-3), блок ручного керування (поз. 1-4), перетворювач сигналу (поз. 1-5), клапан регулювання (поз. 1-6) та датчик положення клапану (поз. 1-7).

					ДПЛАз11.06.00.000ПЗ	Арк.
						25
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

Контур 2 керує температурою у вакуумній камері 8 та містить: вимірювач температури (поз. 2-1), нормуючий прилад (поз. 2-2), який передає сигнал від вимірювача до регулятора температури (поз. 2-3) на пульті керування, блок ручного керування (поз. 2-4), перетворювач сигналу (поз. 2-5), клапан регулювання (поз. 2-6), та датчик положення клапану (поз. 2-7).

Контур 3 керує вакуумним насосом М4 для створення первинного вакууму в камері 8, складається з датчику тиску (поз. 3-1), пристрою нормування сигналу (поз. 3-2), логічного порівняльного пристрою (поз. 3-3), блоку ручного управління (поз. 3-4), нормувального пристрою (поз. 3-5), що йде до клапану регулювання (поз. 3-6), та датчик положення клапану (поз. 3-7).

Контур 4 є допоміжним відносно контуру 3, та керує молекулярним насосом при досягненні певних параметрів тиску (первинний вакуум), складається з блоку ручного управління (поз. 4-1) та пристрою нормування сигналу на клапан трубопроводу до насосу (поз. 4-2), клапан регулювання (поз. 4-3), та датчик положення клапану (поз. 4-4).

Контур 5 призначений для керування та контролю температури на поверхні зони розплаву 13 і є багатофакторним, що враховує потужність індукційної печі та швидкість витягування кристалу. Для цього контур містить безконтактний датчик температури (поз. 5-1), який із сигналом від датчику рівня кристалу (поз. 6-1) йде на порівняльний логічний прилад (поз. 5-3) через відповідні прилади нормування сигналів (поз. 5-2 та поз. 6-2), звідки сигнал йде безпосередньо на прилад зворотного нормування сигналу (поз. 5-4), що під'єднується до схеми індуктора 12,

Контур 6 забезпечує керування та контроль швидкості росту кристалу відносно зміни рівня затравки на штифті 10. Датчик рівня (поз. 6-1) під'єднується до нормувального приладу (поз. 6-2), звідки сигнал йде на логічний пристрій (поз. 6-3), результат обчислення якого в вигляді сигналу

					ДП/Аз11.06.00.000ПЗ	Арк.
						26
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

передається до нормувального приладу (поз. 6-4), що під'єднаний до схеми ротору рівня штифта М8.

Контур 7 забезпечує керування обертанням штифта із затравкою 10 відносно горизонтальної вісі, і включає: двигун обертання тигля М7, датчик швидкості обертання (поз. 7-1), нормуючий прилад (поз. 7-2), регулятор швидкості (поз. 7-3), частотний перетворювач (поз. 7-4), що під'єднується до схеми двигуна.

Контур 8 забезпечує керування обертанням тигля і включає: двигун обертання тигля М5, датчик швидкості обертання (поз. 8-1), нормуючий прилад (поз. 8-2), регулятор швидкості (поз. 8-3), частотний перетворювач (поз. 8-4), що під'єднується до схеми двигуна.

Нижня частина схеми демонструє організацію зв'язку між контролерами та системою керування через промисловий інтерфейс RS-485. Схема включає два сегменти мережі:

Сегмент 1 RS-485 (позиції 1-19) забезпечує зв'язок із первинними регуляторами та контролерами, що відповідають за основні параметри процесу: температуру, тиск, швидкість обертання та витягування.

Сегмент 2 RS-485 (позиції 20-32) забезпечує зв'язок із системами керування приводами, частотними перетворювачами та додатковими системами контролю.

Контур 9 забезпечує контроль і сигналізацію температури штифта затравки 10, містить термопару (поз. 9-1), прилад нормування сигналу (поз. 9-2), логічний аналізатор (поз. 9-3), який за допомогою реле (поз. КМ1) під'єднаний до сигнальної лампи (поз. НЛ3)

Контур 10 забезпечує контроль і сигналізацію рівня, штифта затравки 10, містить рівнемір (поз. 10-1), прилад нормування сигналу (поз. 10-2), логічний аналізатор (поз. 10-3), який за допомогою реле (поз. КМ2) під'єднаний до сигнальної лампи (поз. НЛ6)

					ДП/Аз11.06.00.000ПЗ	Арк.
						27
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

Контур 11 забезпечує контроль і сигналізацію тиску у вакуумній камері 8, містить датчик тиску (поз. 11-1), прилад нормування сигналу (поз. 11-2), логічний аналізатор (поз. 11-3), який за допомогою реле (поз. КМ3) під'єднаний до сигнальної лампи (поз. HL9)

контур 12 – контроль і сигналізація температури у вакуумній камері 8, містить термопару (поз. 12-1), прилад нормування сигналу (поз. 12-2), логічний аналізатор (поз. 12-3), який за допомогою реле (поз. КМ4) під'єднаний до сигнальної лампи (поз. HL12)

Контур 13 забезпечує контроль і сигналізацію рівня поверхні зони розплаву 13, містить безконтактний датчик температури (поз. 13-1), прилад нормування сигналу (поз. 13-2), логічний аналізатор (поз. 13-3), який за допомогою реле (поз. КМ5 та поз. КМ6) під'єднаний до сигнальних ламп відповідно (поз. HL15, HL16).

Окрім того, на схемі зазначені засоби аварійного відключення двигунів та індукційної пічки за потоками 20, 22, 24, 26, 26, 28, 30, 31, та 32.

Специфікацію приладів та устаткування надано у ДОДАТКУ 1.

2.2. Опис принципової електричної схеми дистанційного керування, аварійного захисту та технологічних блокувань електродвигунів

Розробка принципової електричної схеми є одним із ключових етапів у створенні системи автоматизації процесу вирощування монокристалів кремнію методом Чохральського [15, с. 67]. Така схема визначає структурну взаємодію між основними елементами автоматизованої системи — датчиками, виконавчими механізмами, контролерами, реле та іншим електротехнічним обладнанням [16, с. 134].

Монтажно-комутаційна схема відображає послідовність і логіку підключення електричних елементів, відповідальних за зчитування параметрів процесу, передачу даних у систему керування, обробку сигналів та

					ДП/Аз11.06.00.000ПЗ	Арк.
						28
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

формування команд на виконавчі пристрої. Зокрема, вона охоплює підключення термодатчиків, приводів механізмів підйому, систем підігріву та охолодження, а також засобів сигналізації та аварійного захисту.

При побудові такої схеми враховуються технічні вимоги до точності регулювання, швидкодії, надійності та безпеки функціонування всієї системи. Особливу увагу приділено ергономіці обслуговування, стандартизації інтерфейсів підключення та можливості оперативного виявлення й усунення збоїв у роботі.

Спроектована монтажно-комутаційна схема забезпечує узгоджену роботу всіх складових автоматизованої установки, сприяє стабільності температурного режиму та інших критичних параметрів у зоні розплаву, що безпосередньо впливає на якість отриманого монокристалу. Запропонована схема може бути адаптована або модифікована відповідно до змін у конфігурації обладнання чи вимог до технологічного процесу в ході практичної реалізації проєкту. Її впровадження є важливою умовою досягнення високої ефективності та безперервності функціонування всієї системи керування.

Принципова електрична схема, представлена на кресленику ДПЛАз11.06.01.000СхЕл, забезпечує контроль, пуск, аварійний захист та технологічне блокування електроприладів: електродвигунів М1, М2, М3, М4, М5, М7, М8 та трьохфазного блоку живлення індукційної пічки М6.

На схемі показано вмикання та вимикання двигунів за допомогою магнітних пускатів:

Електродвигун М1 контролюється магнітним пускатем МП1. Захист живлення електродвигуна від короткого замикання забезпечується автоматичним вимикачем – FP1, FP2. Плавкий запобіжник FU1 запобігає згоранню магнітних пускатів. Кнопки вимикання живлення електродвигуна – SB1, SB2. Кнопка аварійного захисту - SA1. Індикація стану двигуна забезпечена під'єднанням до схеми із магнітним пускатем ламп HL1, HL2.

					ДПЛАз11.06.00.000ПЗ	Арк.
						29
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

Контактор модульний КМ1 поєднує двигун з системою аварійного захисту 1Аз, індикації якої відповідає лампа HL3.

Електродвигун М2 контролюється магнітним пускатчем МП2. Захист живлення електродвигуна від короткого замикання забезпечується автоматичним вимикачем – FP3, FP4. Плавкий запобіжник FU2 запобігає згоранню магнітних пускатчів. Кнопки вимикання живлення електродвигуна – SB3, SB4. Кнопка аварійного захисту - SA2. Індикація стану двигуна забезпечена під'єднанням до схеми із магнітним пускатчем ламп HL4, HL5. Контактор модульний КМ1 поєднує двигун з системою аварійного захисту 2Аз, індикації якої відповідає лампа HL6.

Електродвигун М3 контролюється магнітним пускатчем МП3. Захист живлення електродвигуна від короткого замикання забезпечується автоматичним вимикачем – FP5, FP6. Плавкий запобіжник FU3 запобігає згоранню магнітних пускатчів. Кнопки вимикання живлення електродвигуна – SB5, SB6. Кнопка аварійного захисту - SA3. Індикація стану двигуна забезпечена під'єднанням до схеми із магнітним пускатчем ламп HL7, HL8. Контактор модульний КМ3 поєднує двигун з системою аварійного захисту 3Аз, індикації якої відповідає лампа HL9.

Електродвигун М4 контролюється магнітним пускатчем МП4. Захист живлення електродвигуна від короткого замикання забезпечується автоматичним вимикачем – FP7, FP8. Плавкий запобіжник FU4 запобігає згоранню магнітних пускатчів. Кнопки вимикання живлення електродвигуна – SB7, SB8. Кнопка аварійного захисту - SA4. Індикація стану двигуна забезпечена під'єднанням до схеми із магнітним пускатчем ламп HL10, HL11. Контактор модульний КМ4 поєднує двигун з системою аварійного захисту 4Аз, індикації якої відповідає лампа HL12.

Електродвигун М5 контролюється магнітним пускатчем МП5. Захист живлення електродвигуна від короткого замикання забезпечується автоматичним вимикачем – FP9, FP10. Плавкий запобіжник FU5 запобігає

					ДП/1Аз11.06.00.000ПЗ	Арк.
						30
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

згоранню магнітних пускачів. Кнопки вимикання живлення електродвигуна – SB9, SB10. Кнопка аварійного захисту - SA5. Індикація стану двигуна забезпечена під'єднанням до схеми із магнітним пускачем ламп HL13, HL14. Контактор модульний KM5 поєднує двигун з системою аварійного захисту 5Аз.

Блок живлення індукційної пічки М6 контролюється магнітним пускачем МП6. Захист живлення електродвигуна від короткого замикання забезпечується автоматичним вимикачем – FP11, FP12. Плавкий запобіжник FU6 запобігає згоранню магнітних пускачів. Кнопки вимикання живлення електродвигуна – SB11, SB12. Кнопка аварійного захисту - SA6. Індикація стану двигуна забезпечена під'єднанням до схеми із магнітним пускачем ламп HL17, HL18. Контактор модульний KM1 поєднує двигун з системою аварійного захисту 5Аз, індикації якої відповідають лампи HL15, HL16.

Електродвигун М7 контролюється магнітним пускачем МП1. Захист живлення електродвигуна від короткого замикання забезпечується автоматичним вимикачем – FP13, FP14. Плавкий запобіжник FU1 запобігає згоранню магнітних пускачів. Кнопки вимикання живлення електродвигуна – SB13, SB14. Кнопка аварійного захисту - SA8. Індикація стану двигуна забезпечена під'єднанням до схеми із магнітним пускачем ламп HL19, HL20. Контактор модульний KM1 поєднує двигун з системою аварійного захисту 5Аз.

Електродвигун М8 контролюється магнітним пускачем МП1. Захист живлення електродвигуна від короткого замикання забезпечується автоматичним вимикачем – FP15, FP16. Плавкий запобіжник FU1 запобігає згоранню магнітних пускачів. Кнопки вимикання живлення електродвигуна – SB15, SB16. Кнопка аварійного захисту - SA8. Індикація стану двигуна забезпечена під'єднанням до схеми із магнітним пускачем ламп HL21, HL22. Контактор модульний KM1 поєднує двигун з системою аварійного захисту 5Аз.

					ДП/Аз11.06.00.000ПЗ	Арк.
						31
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

2.3. Опис монтажно-комутаційної схеми дистанційного керування, аварійного захисту та технологічних блокувань електродвигунів

Монтажно-комутаційна схема дистанційного керування, представлена на кресленику ДПЛАз11.06.01.000СхМК забезпечує реалізацію принципової електричної схеми пуску та блокування електродвигунів, їх технологічне блокування та сигналізацію системи. Ключовим компонентом схеми є клемно-блочний роз'єм КБЗ-17К-01.

Плата (клеммно-блочний роз'єм) КБЗ-17К-01 — це модульний блок, призначений для підключення до технологічних індикаторів серії ITM-10/11 (або подібних) виконавчих навантажень чи дискретних сигналів через DIN-рейку. Основні призначення:

1. Інтерфейс до дискретних виходів. Забезпечує під'єднання двох каналів DO1, DO2 — кожний з яких може бути твердотілим реле (SSR) або транзисторним або оптосимісторним керуванням.
2. Гальванічна ізоляція та стандартизоване підключення. Роз'єми встановлюються на DIN-рейку, система має чіткі позначення контактів для підключення живлення, вихідних сигналів, RS-485 і землі.
3. Підтримка RS-485.
4. Має перемичку JP3 для підключення 120 Ω терміатора, необхідного на кінцях шини RS-485. Це дозволяє під'єднуватись до Modbus та ін. інтерфейсів зв'язку.
5. Гнучкість конфігурації під різні типи навантажень. Можливість обирати між релейними виходами (К), твердотілими реле (Р) чи оптосимісторами (С). У випадку КБЗ-17К-01 — це твердотіле реле.

Відповідно, монтажно-комутаційна схема реалізує 5 контурів аварійного захисту:

Перший контур 1Аз. складається із датчику температури ТТ 9-2, який через клемну панель Х4 під'єднується до клемно-блочного роз'єму, куди

					ДПЛАз11.06.00.000ПЗ	Арк.
						32
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

комутується технологічний індикатор ІТМ-11 ТІА 9-3. Сигнал з клемно-блочного-роз'єму під'єднується на клемну панель Х2 із магнітним пускатчем МП1 та індикаторною лампою сигналізації підвищення рівня температури НЛ3, а також на клемну панель Х1 із контактором двигуна КМ1. Сигнал від якого відповідно передається на клемну панель Х3, яка комутується з електродвигуном М1 через контакти магнітного пускача МП1-4–МП1-6.

Другий контур 2Аз. складається із датчику температури LT 10-2, який через клемну панель Х8 під'єднується до клемно-блочного роз'єму, куди комутується технологічний індикатор ІТМ-11 LIA 9-3. Сигнал з клемно-блочного-роз'єму під'єднується на клемну панель Х6 із магнітним пускатчем МП2 та індикаторною лампою сигналізації підвищення рівня штатива НЛ6, а також на клемну панель Х5 із контактором двигуна КМ2. Сигнал від якого відповідно передається на клемну панель Х7, яка комутується з електродвигуном М2 через контакти магнітного пускача МП2-4–МП2-6.

Третій контур 3Аз. складається із датчику температури РТ 11-2, який через клемну панель Х12 під'єднується до клемно-блочного роз'єму, куди комутується технологічний індикатор ІТМ-11 РІА 11-3. Сигнал з клемно-блочного-роз'єму під'єднується на клемну панель Х10 із магнітним пускатчем МП3 та індикаторною лампою сигналізації підвищення рівня тиску в камері НЛ9, а також на клемну панель Х9 із контактором двигуна КМ3. Сигнал від якого відповідно передається на клемну панель Х11, яка комутується з електродвигуном М3 через контакти магнітного пускача МП3-4–МП3-6.

Четвертий контур 4Аз. складається із датчику температури ТТ 12-2, який через клемну панель Х16 під'єднується до клемно-блочного роз'єму, куди комутується технологічний індикатор ІТМ-11 ТІА 12-3. Сигнал з клемно-блочного-роз'єму під'єднується на клемну панель Х14 із магнітним пускатчем МП4 та індикаторною лампою сигналізації підвищення рівня температури НЛ12, а також на клемну панель Х13 із контактором двигуна КМ4. Сигнал від

					ДП/Аз11.06.00.000ПЗ	Арк.
						33
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

якого відповідно передається на клемну панель X15, яка комутується з електродвигуном М4 через контакти магнітного пускача МП4-4–МП4-6.

П'ятий контур 5Аз. складається із датчику температури ТТ 13-2, який через клемну панель X23 під'єднується до клемно-блочного роз'єму, куди комутується технологічний індикатор ІТМ-11 ТІА 13-3. Сигнал з клемно-блочного-роз'єму під'єднується на клемні панелі X18, X21, X25, X28 із магнітними пускачами МП5, МП6, МП7, МП8 та індикаторними лампою сигналізації критичного рівня температури НЛ15 та НЛ16. Від клемних панелей X18, X21, X25 та X28 сигнал подається відповідно на клемні панелі X17, X20, X24, X27 із відповідними контакторами індуктора двигуна КМ5, блоку живлення індукційної пічки КМ6, та двигунів КМ7, КМ8. Сигнали від яких відповідно передаються на клемні панелі X19, X22, X26, X29, які відповідно комутуються з електродвигуном М5, блоком живлення індуктора М6, та електродвигунами М7, М8 через відповідні контакти магнітних пускачів МП5-4–МП5-6, МП6-4–МП6-6, МП6-4–МП6-6, МП6-4–МП6-6.

Висновки до розділу 2

У другому розділі було детально розглянуто технологічний процес вирощування монокристалів методом Чохральського на прикладі установки “ЛАНДИШ”. Описано основні стадії процесу, конструктивні особливості вакуумної камери та функціональні елементи, які забезпечують дотримання режимних параметрів на всіх етапах вирощування кристалу. Ретельний аналіз дозволив визначити критичні технологічні параметри, що потребують автоматичного контролю та регулювання.

Розроблена схема автоматизації забезпечує контроль ключових змінних, таких як температура розплаву, швидкість витягування та обертання, рівень кристалу, тиск у камері та параметри охолодження. Система керування

					ДП/Аз11.06.00.000ПЗ	Арк.
						34
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

дозволяє підтримувати стабільні умови впродовж усього циклу вирощування, що є запорукою високої якості отриманого монокристалу.

Таким чином, реалізація автоматизованого контролю процесу вирощування методом Чохральського є необхідною умовою для підвищення ефективності виробництва, зниження ймовірності дефектів та покращення повторюваності кінцевих результатів.

					ДП/ІАз11.06.00.0000ПЗ	Арк.
						35
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗОНИ РОЗПЛАВУ

Розглянемо розрахункову (рис. 3.1) та структурно-параметричну (рис. 3.2) схеми зони розплаву при витягуванні монокристалу кремнію [5, с.238].

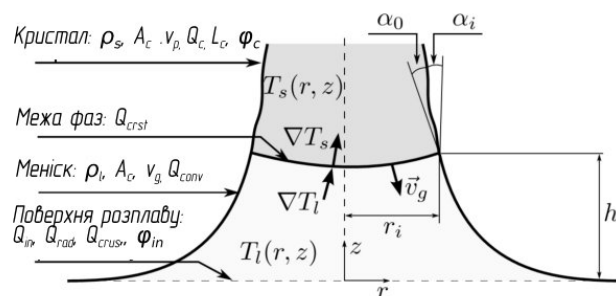


Рис. 3.1. Розрахункова схема фронту кристалізації у зоні розплаву:

ρ_s – щільність кристалу, $A_c = \pi \cdot R_c^2$ – площа поперечного зрізу кристалу, v_p – швидкість росту кристалу, Q_c – тепловивід через кристал, L_c – довжина кристалу, ϕ_c – момент обертуту штифта кристалу, Q_{crst} – тепловивід через кристал, ρ_l – щільність розплаву, v_g – швидкість руху фронту кристалізації, Q_{conv} – конвекційні втрати тепла, Q_{in} – нагрівання розплаву, Q_{rad} – радіаційні втрати тепла з поверхні розплаву, Q_{crus} – теплові втрати при кристалізації, ϕ_{in} – момент обертуту тигля

В таблиці 3.1 зазначені параметри статичного режиму зони розплаву із урахуванням типових значень та одиниць виміру.

Таблиця 3.1. Параметри статичного режиму зони розплаву

№ п/п	Назва параметру	Позначення	Типове значення	Одиниці виміру
1	Потужність індукційного нагрівача	P_h	100	кВт
2	ККД індукційного нагріву	η_h	0,8	-

3	Теплопровідність кристалу	λ_s	150	Вт/(м·°C)
4	Площа поперечного перерізу кристалу	A_c	0,0314	м ²
5	Температура фронту кристалізації	T_i	1420	°C
6	Температура верхньої частини кристалу	T_{top}	773	°C
7	Довжина кристалу	L_c	0,5	м
8	Густина твердого кристалу (Si)	ρ_s	2330	кг/м ³
9	Швидкість витягування	v_p	1,0	мм/хв ($1,67 \times 10^{-5}$ м/с)
10	Прихована теплота кристалізації	L_f	$1,79 \times 10^6$	Дж/кг
11	Коефіцієнт чорноти розплаву	ϵ_m	0,35	-
12	Постійна Стефана-Больцмана	σ	$5,67 \times 10^{-8}$	Вт/(м ² ·°C ⁴)
13	Площа вільної поверхні розплаву	A_m	0,126	м ²
14	Температура поверхні розплаву	T_m	1420	°C
15	Температура стінок камери	T_{chmb}	373	К
16	Коефіцієнт тепловіддачі в газі	h_{gas}	10	Вт/(м ² ·°C)
17	Температура захисного газу	T_{gas}	373	К
18	Теплопровідність матеріалу тигля	λ_{cr}	30	Вт/(м·°C)
19	Площа стінок тигля	A_{cr}	0,0942	м ²
20	Товщина стінки тигля	δ_{cr}	0,01	м

21	Густина рідкого розплаву (Si)	ρ_l	2570	кг/м ³
22	Швидкість руху фронту кристалізації	v_g	$0,91 \cdot v_p$	м/с
23	Маса розплаву в тиглі	m_l	5	кг
24	Питома теплоємність розплаву	c_l	1035	Дж/(кг·°C)
25	Температура зовнішньої поверхні тигля	T_{out}	873	°C
26	Об'єм тигля	V_l	0,001	м ³

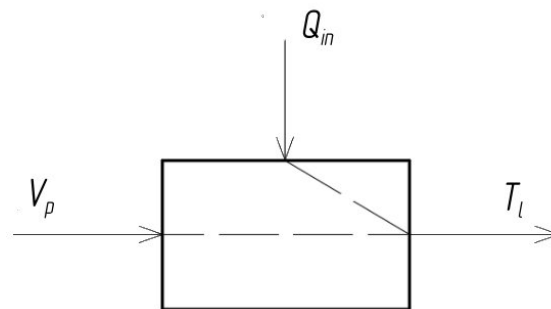


Рис. 3.2 Структурно-параметрична схема зони розплаву

Каналом керування є швидкість витягування кристалу, адже саме від швидкості витягування кристалу залежить відведення теплоти на кристалізацію, та зміна маси у тиглі. Збурюючим впливом будемо вважати підведене тепло від індукційної пічки, від якого залежить температура розплаву.

При моделюванні прийнято такі припущення [5, с. 235]:

- оскільки сам кристал неперервно охолоджується, градієнт температур по його висоті будемо вважати середнім значенням незалежно від довжини кристалу;

- оскільки інертне газове середовище, з яким відбувається теплообмін, є розрідженим, то можемо лінеаризувати конвективний обмін різницями температур.

Окрім того, при моделюванні статичного режиму необхідно спиратись на такі особливості фізичного процесу:

- на фронті кристалізації виникає розподіл фаз, в якому розплав переходить із рідкого стану в твердий;
- вхідні витрати дорівнюють витратам на виході, оскільки це витрати одних і тих самих матеріальних потоків
-

3.1. Моделювання статичного режиму роботи зони розплаву

Напишемо тепловий баланс реакції в зоні розплаву:

$$Q_{in} = Q_c + Q_{crst} + Q_{rad} + Q_{conv} + Q_{cruc}, \quad (3.1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_{in} = P_h \cdot \eta_h \\ Q_c = \lambda_s \cdot A_c \cdot \frac{(T_i - T_{top})}{L_c} \\ Q_{crst} = \rho_s \cdot A_c \cdot v_p \cdot L_f \\ Q_{rad} = \varepsilon_m \cdot \sigma \cdot A_m \cdot (T_m^4 - T_{chmb}^4) \\ Q_{conv} = h_{gas} \cdot A_m \cdot (T_m - T_{gas}) \\ Q_{cruc} = \lambda_{cr} \cdot A_{cr} \cdot \frac{(T_m - T_{outer})}{\delta_{cr}} \end{array} \right.$$

де Q_{in} – тепло, що надходить з нагрівача, Q_c – тепло, що передається кристалу, Q_{crst} – тепло, що втрачається під час кристалізації, Q_{rad} – тепло, що втрачається при випромінюванні у вакуумну камеру, Q_{conv} – тепло, що втрачається при конвекції із розрідженим середовищем, Q_{cruc} – теплопередача через стінки тиглю.

Система рівнянь (3.1) не є достатньою для побудови моделі, адже не враховує масообмін у зоні розплаву. Загальна маса системи розплав-кристал

					ДП/Аз11.06.00.000ПЗ	Арк.
						39
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

не змінюється, отже в будь-який час маса розплаву та кристалу в зоні розплаву дорівнюють один одному

$$dm_{l+c}/dt = 0 \rightarrow \rho_l \cdot A_c \cdot v_g - \rho_s \cdot A_c \cdot v_p = 0 \quad (3.2)$$

З рівняння (3.2) отримаємо зв'язок між швидкостями формування кристалу та фронту кристалізації:

$$v_g = \frac{\rho_s v_p}{\rho_l} \quad (3.3)$$

Оскільки щільність кристалу вища за щільність розплаву, то фронт кристалізації рухається швидше за витягування кристалу.

Перевіримо збіжність рівнянь теплового та матеріального балансу за розмірністю та отримаємо числові значення (тут і далі при розрахунках для однорідності в системі Сі температуру в у градусах Цельсія переводимо в градуси Кельвіна):

$$\begin{cases} Q_c = 150 \times 0,0314 \times (1693 - 773)/0,5 = 8,664 \text{ кВт} \\ Q_{crst} = 2330 \times 0,0314 \times 1,67 \times 10^{-5} \times 1,79 \times 10^6 = 2,189 \text{ кВт} \\ Q_{rad} = 0,35 \times 5,67 \times 10^{-8} \times 0,126 \times (1693^4 - 373^4) = 20,3 \text{ кВт} \\ Q_{conv} = 10 \times 0,126 \times (1693 - 373) = 1,66 \text{ кВт} \\ Q_{cruc} = 30 \times 0,3 \times (1693 - 873)/0,01 = 73,8 \text{ кВт} \\ Q_{in} = 133,3 \times 0,8 = 106,6 \text{ кВт} \end{cases}$$

Для побудови статичної характеристики за каналом збурення, залежності температури фронту кристалізації від теплоти індуктора, скористаємось рівністю: $Q_c = \lambda_s \cdot A_c \cdot \frac{(T_i - T_{top})}{L_c}$, підставимо її у загальне рівняння (3.1), після чого виразимо T_i :

$$\begin{aligned} T_i &= A + B \cdot Q_{in} \\ A &= \frac{T_{top} - (Q_{crst} + Q_{rad} + Q_{conv} + Q_{cruc}) \cdot L_c}{\lambda_s \cdot A_c} \\ B &= \frac{L_c}{\lambda_s \cdot A_c} \end{aligned} \quad (3.4)$$

Скористаємось отриманою в (3.4) характеристикою для отримання залежності температури фронту кристалізації від швидкості росту кристалу, тобто за каналом керування:

					ДП/Аз11.06.00.000ПЗ	Арк.
						40
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

$$T_i = C + D \cdot v_p \quad (3.5)$$

$$A = \frac{T_{top} + (Q_{in} - Q_{rad} - Q_{conv} - Q_{cruc}) \cdot L_c}{\lambda_s \cdot A_c}$$

$$D = \frac{\rho_c \cdot L_f \cdot L_c}{\lambda_s}$$

Скористаємось отриманою в (3.5) характеристикою для отримання залежності температури фронту кристалізації від довжини кристалу:

$$T_i = T_{top} + E \cdot L_c$$

$$E = \frac{(Q_{in} - Q_{rad} - Q_{conv} - Q_{crys} - Q_{cruc}) \cdot L_c}{\lambda_s \cdot A_c} \quad (3.6)$$

Будуємо статичну характеристику для залежності $c_{на} = f(c_{г}^{BX})$ (рис. 3.3).

Лістинг статичних характеристик у середовищі Matlab:

```
% Статичні характеристики процесу вирощування монокристалу
% Вихідні дані (номінальні значення) – температури в °C
clear; clc;
% Параметри матеріалу та процесу (температури в °C)
T_top = 500; % Температура верхньої частини кристала, °C
T_top_K = T_top + 273.15; % Перевод в К для расчётов
lambda_s = 150; % Теплопровідність кристала, Вт/(м·К)
A_c = 0.0314; % Площа перерізу кристала, м²
rho_s = 2330; % Густина кристала, кг/м³
L_f = 1.79e6; % Прихована теплота кристалізації, Дж/кг
L_c0 = 0.5; % Номінальна довжина кристала, м
Q_in0 = 100; % Номінальна потужність, кВт
v_p0 = 1.67e-5; % Номінальна швидкість витягування, м/с
% Інші теплові потоки (для спрощення – константи)
Q_rad = 20.3; % Радіаційні втрати, кВт
Q_conv = 1.66; % Конвективні втрати, кВт
Q_crucible = 73.8; % Втрати через тигель, кВт
% Діапазони зміни параметрів (±20%)
Q_in_range = Q_in0 * (0.8:0.01:1.2);
v_p_range = v_p0 * (0.8:0.01:1.2);
L_c_range = L_c0 * (0.8:0.01:1.2);
% 1. Залежність T_i = f(Q_in) при номінальних v_p та L_c
Q_cryst0 = rho_s * A_c * v_p0 * L_f / 1000; % кВт
T_i_Qin = zeros(size(Q_in_range));
for i = 1:length(Q_in_range)
    T_i_K = T_top_K + (Q_in_range(i) - Q_cryst0 - Q_rad - Q_conv - Q_crucible) * L_c0 / (lambda_s * A_c);
    T_i_Qin(i) = T_i_K - 273.15; % Перевод в °C
end
```

					ДП/Аз11.06.00.000ПЗ	Арк.
						41
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

```

end
% 2. Залежність  $T_i = f(v_p)$  при номінальних  $Q_{in}$  та  $L_c$ 
T_i_vp = zeros(size(v_p_range));
for i = 1:length(v_p_range)
    Q_cryst = rho_s * A_c * v_p_range(i) * L_f / 1000; % кВт
    T_i_K = T_top_K + (Q_in0 - Q_cryst - Q_rad - Q_conv - Q_crucible) * L_c0 / (lambda_s * A_c);
    T_i_vp(i) = T_i_K - 273.15; % Перевод в °C
end
% 3. Залежність  $T_i = f(L_c)$  при номінальних  $Q_{in}$  та  $v_p$ 
T_i_Lc = zeros(size(L_c_range));
for i = 1:length(L_c_range)
    T_i_K = T_top_K + (Q_in0 - Q_cryst0 - Q_rad - Q_conv - Q_crucible) * L_c_range(i) / (lambda_s * A_c);
    T_i_Lc(i) = T_i_K - 273.15; % Перевод в °C
end
% Побудова графіків
figure('Position', [100, 100, 1200, 400]);
% Графік 1:  $T_i = f(Q_{in})$ 
subplot(1,3,1);
plot(Q_in_range, T_i_Qin, 'b-', 'LineWidth', 2);
grid on;
xlabel('Потужність індуктора  $Q_{in}$ , кВт');
ylabel('Температура фронту  $T_i$ , °C');
xlim([80 120]);
set(gca, 'FontSize', 12);
% Графік 2:  $T_i = f(v_p)$ 
subplot(1,3,2);
plot(v_p_range * 1e5, T_i_vp, 'r-', 'LineWidth', 2);
grid on;
xlabel('Швидкість витягування  $v_p$ ,  $4 \cdot 10^{-5}$  м/с');
ylabel('Температура фронту  $T_i$ , °C');
xlim([1.33 2.0]);
set(gca, 'FontSize', 12);
% Графік 3:  $T_i = f(L_c)$ 
subplot(1,3,3);
plot(L_c_range * 100, T_i_Lc, 'g-', 'LineWidth', 2);
grid on;
xlabel('Довжина кристала  $L_c$ , см');
ylabel('Температура фронту  $T_i$ , °C');
xlim([40 60]);
set(gca, 'FontSize', 12);

```

					ДП/Аз11.06.00.000ПЗ	Арк.
						42
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

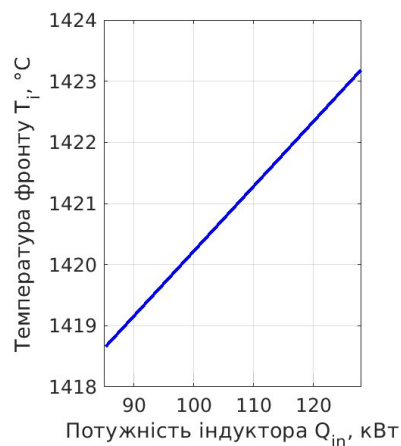


Рис. 3.3. Статична характеристика за каналом збурення «Потужність індуктора – температура поверхні розплаву»

Як бачимо, розглянутий вище канал є збурюючим, оскільки зі збільшенням витрати та концентрації газової суміші на вхід до абсорбера збільшується концентрація формальдегіду у водному розчині.

Тепер використовуючи рівняння (3.5) побудуємо статичну характеристику за каналом керування «швидкість витягування – температура фронту кристалізації» $c_{на} = f(G_a)$ (рис. 4.4):

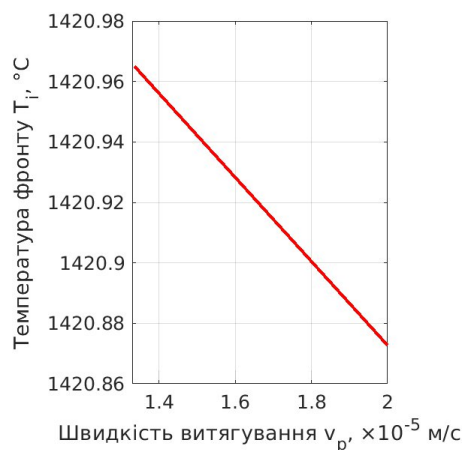


Рис. 3.4. Статична характеристика за каналом керування «Швидкість витягування кристалу – температура поверхні розплаву»

З цієї характеристики видно, що локально за часом швидкість витягування, якщо знехтувати зміною маси, знижує температуру розплаву,

Отже, це є канал керування. Зниження температури відбувається як через прямий відвід тепла із масою, так і через втрати на кристалізацію. Саме градієнт температур на фронті кристалізації є основним фізичним принципом, що забезпечує процес вирощування монокристалів методом Чохральського.

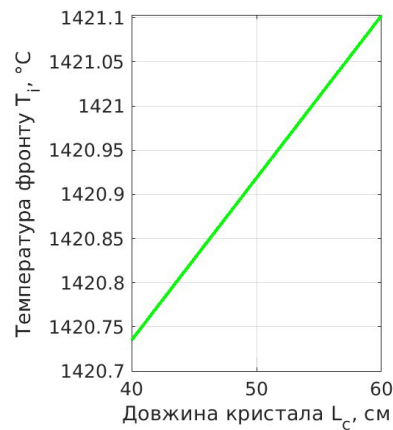


Рис. 3.5. Статична характеристика за каналом збурення “Довжина кристала – температура фронту кристалізації”

З графіку на рисунку 3.5 можна зробити висновок, що теплоємність кристалу збільшується з його об’ємом, внаслідок чого температура розплаву зростає, адже кристал акумулює більше тепла. Цей канал безпосередньо залежить від швидкості витягування і його дослідження було необхідне для виявлення ступені лінійності процесу.

З графіків на рисунках 3.3 – 3.4, що відповідають рівнянням (3.4) – (3.6), усі статичні характеристики впливів за каналом керування та каналом збурення є лінійними, що дає необхідні умови для лінеаризації рівнянь динаміки за припущеннями та локальної стійкості лінеаризованих систем для заздалегідь визначених проміжків часу. Отже, маємо необхідні умови для побудови динамічних режимів за каналами керування (рис. 3.3) та збурення (рис 4.4) і їх лінеаризації через припущення навколо робочої точки.

3.2. Моделювання динамічного режиму роботи зони розплаву

Для моделювання динамічного режиму за каналами збурення та керування будемо спиратись на вихідне зведене рівняння теплового та матеріального балансу [17, с. 89], враховуючи, що:

$$Q_{in} = \frac{\lambda_s \cdot A_c \cdot (T_i - T_{top})}{L_c} + \rho_s \cdot A_c \cdot v_p \cdot L_f + Q_{rad} + Q_{conv} + Q_{cruc}$$

$$\begin{cases} \frac{dC_{th}T_m}{dt} = Q_{in} - Q_{out} \mid C_{th} = m_l c_l & \mid \frac{dC_{th}T_m}{dt} = T_m c_l \frac{dm_l}{dt} + m_l c_l \frac{dT_m}{dt} \\ \frac{dm_l}{dt} = \rho_l \cdot A_c \cdot v_g - \rho_s \cdot A_c \cdot v_p \end{cases}$$

$$\begin{cases} T_m c_l \frac{dm_l}{dt} + m_l c_l \frac{dT_m}{dt} = Q_{in} - Q_{out} \mid C_{th} = m_l c_l \\ \frac{dm_l}{dt} = \rho_l \cdot A_c \cdot v_g - \rho_s \cdot A_c \cdot v_p \end{cases} \quad (3.7)$$

В цій системі враховано як інтегральний вплив маси, так і температури [18, с. 245], виходячи із елементарного визначення похідної добутку функцій. При цьому, важливо зауважити, що ця система є нерозривною, адже значення температури розплаву залежить від значення маси, і обидва ці значення залежать від часу.

Сума з трьох джерел або поглиначів тепла взагалі також являє собою диференційне рівняння для кожного з цих членів. Окремо звернемо увагу на член конвекції, адже в статичній формі ми враховуємо втрати тепла безпосередньо при теплообміні поверхні рідини із зовнішнім середовищем. Проте повний розподіл температур також залежить від теплообміних процесів всередині розплаву, тому конвективний член можна виразити, виходячи з рівняння Нав'є-Стокса, тоді енергетична складова матиме вигляд:

$$Q_{conv} = \alpha V^2 T_i - h_{conv}(\omega) \cdot VT_i$$

$$dT_i/dt = (\alpha V^2 T_i - h_{conv}(\omega) \cdot VT_i + \overline{Q}_{in} - Q_{out})/C_{th} \mid \overline{Q}_{in} = Q_{in} - Q_{conv} \quad (3.8)$$

Де $\alpha V^2 T_i$ – відповідає теплопереносу внаслідок дифузії рідини, а $h_{conv}(\omega) \cdot VT_i$ – переносу внаслідок конвекції. Окремо зазначимо, що $h_{conv}(\omega)$

залежить від радіальної швидкості тиглю та затравки і є апроксимацією для конвективного члену, що залежить від векторного поля розподілу швидкості всередині рідини $h_{conv}(\omega) \cdot \nabla T_i \sim (\overline{v \nabla}) T_i$. Ця апроксимація є справедливою, оскільки розплав існує у квазістаціонарних умовах, де власне рух швидкості зумовлений тільки радіальною швидкістю тигля та затравки, що є емпірично вирішеним видом для загального рівняння через характеристичні числа, які застосовуються нижче.

Спробуємо апроксимувати отриману систему, виразивши мономи адвекції та теплопереносу у інтегральній формі, та спростимо вираз, оскільки умови процесу являються стаціонарними та сталими, нас цікавить тільки температура на поверхні розплаву:

$$\begin{aligned} \int_v \alpha \nabla^2 T_m dV &= \int_v (v_{conv} \cdot \nabla T_m) dV = \alpha \int_s (\nabla T_m) \cdot n dS \\ \int_v (v_{conv} \cdot \nabla T_m) dV &\approx h_{conv} \cdot A_m \cdot (T_m - T_{gas}) \end{aligned} \quad (3.9)$$

З цього інтегрального виразу за теоремою Гауса-Остроградського слідує, що теплопровідність $\alpha \nabla^2 T_m$ надає вклад на всіх ланках переносу тепла [8, с. 156], що дозволить апроксимувати вираз через функції теплопереносу на фазах із рівнянь статки, що явно вказано після виводу рівняння (3.7). Для першого наближення конвекцією із розрідженим газовим середовищем та термодинамічні процеси в середині розплаву будемо лінеаризувати відповідно різностям температур, як у статичних характеристиках.

Радіаційні втрати можливо виразити із закону Стефана-Больцмана [19, с. 78], лінеаризувавши навколо робочої точки T_{m0} :

$$Q_{rad}(T_i) = \varepsilon_m \cdot \sigma \cdot A_m \cdot (T_i^4 - T_{chmb}^4) \quad (3.10)$$

Конвективні втрати для системи, що обертається $Q_{conv}(T_i, \omega)$:

$$Q_{conv}(T_i, \omega) = h_{conv}(\omega) \cdot A_m \cdot (T_i - T_{gas})$$

$$h_{conv}(\omega) = h_0 \cdot Nu(\omega) / Nu_0 \rightarrow \omega = Const$$

Де число Нусельта дорівнює:

$$Nu(\omega) = h_0 \cdot 0.36 \cdot Re_{rot}(\omega)^{0.5} \cdot Pr^{0.33}$$

					ДП/Аз11.06.00.000ПЗ	Арк.
						46
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

$$Re_{rot}(\omega) = \omega \cdot R^2 / \nu_g = | \omega = |\omega_t - \omega_c|$$

Остаточно:

$$Q_{conv}(T_i) = h_{conv} \cdot A_m \cdot (T_i - T_{gas}) \quad (3.11)$$

Теплопровідність через стінку тигля:

$$Q_{cruc}(T_i) = \frac{\lambda_{cr} \cdot A_{cr} \cdot (T_i - T_{outer})}{\delta_{cr}}$$

З урахуванням теплообміну із зовнішньою стінкою:

$$T_{outer} = (T_i + \frac{\varepsilon_{cr} \cdot \sigma \cdot \delta_{cr} \cdot (T_{inner}^4 - T_{outer}^4)}{\lambda_{cr}})$$

Спрощена форма:

$$Q_{cruc}(T_i) = K_{cr} \cdot (T_i - T_{outer}) \quad (3.12)$$

Де ефективний коефіцієнт дорівнює:

$$K_{cr} = \frac{\lambda_{cr} \cdot A_{cr}}{\delta_{cr} + R_{rad}}$$

R_{rad} - тепловий опір від зовнішньої стінки

Остаточний вид рівняння динаміки із урахуванням апроксимацій:

$$\begin{cases} T_m c_l \frac{dm_l}{dt} + m_l c_l \frac{dT_m}{dt} = Q_{in} - \frac{\lambda_s \cdot A_c \cdot (T_i - T_{top})}{L_c} - \rho_s \cdot A_c \cdot v_p \cdot L_f - Q_{rad}(T_i) - Q_{conv}(T_i) - Q_{cruc}(T_i) \\ \frac{dm_l}{dt} = \rho_l \cdot A_c \cdot v_g - \rho_s \cdot A_c \cdot v_p \end{cases} \quad (3.13)$$

Це рівняння є нелінійним через закон радіального випромінювання $Q_{rad}(T_i)$, та через добуток функції температури на функцію маси.

Проведемо лінеаризацію цього рівняння за приростами навколо робочих значень цільових параметрів:

- $T_m = T_{m0} + \Delta T_m$
- $m_l = m_{l0} + \Delta m_l$
- $v_p = v_{p0} + \Delta v_p$
- $Q_{in} = Q_{in0} + \Delta Q_{in}$

Важливо зауважити, що внаслідок суттєвої нелінійності рівнянь радіаційного (3.10) та конвективного (3.11) теплового випромінювання, ця лінеаризація є справедливою тільки навколо робочої точки номінального режиму, і в кожному окремому випадку потребує перерахунків та доуточнення

					ДП/Аз11.06.00.000ПЗ	Арк.
						47
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

спрощення базової моделі (3.7). Тепер лінеаризуємо покомпонентно кожний член рівняння теплової динаміки, спираючись на припущення, вказані вище.

Для радіаційних втрат тепла:

$$Q_{rad}(T_i) \approx Q_{rad}(T_{i0}) + \frac{\partial Q_{rad}}{\partial T_i} \cdot \Delta T_i$$

Де:

$$\frac{\partial Q_{rad}}{\partial T_i} = 4 \cdot \varepsilon_m \cdot \sigma \cdot A_m \cdot T_{i0}^3$$

Для конвективних втрат:

$$Q_{conv}(T_i) \approx Q_{conv}(T_{i0}) + \frac{\partial Q_{conv}}{\partial T_i} \cdot \Delta T_i$$

Де:

$$\frac{\partial Q_{conv}}{\partial T_i} = h_{conv} \cdot A_m$$

Для теплопровідності скрізь стінку тигля:

$$Q_{cruc}(T_i) \approx Q_{cruc}(T_{i0}) + \frac{\partial Q_{cruc}}{\partial T_i} \cdot \Delta T_i$$

Де:

$$\frac{\partial Q_{cruc}}{\partial T_i} = K_{cr}$$

Зауважимо, що у похідній лінеаризованої форми $(T_{m0} + \Delta T_m)/dt$ похідна від температури робочої точки дорівнює нулю. Отже, в лінеаризованому вигляді рівняння термодинаміки процесу має вигляд:

$$\begin{aligned} & c_l \cdot ((T_{m0} + \Delta T_m) \frac{d\Delta m_{l0}}{dt} + (m_{l0} + \Delta m_{l0}) \frac{d(\Delta T_i)}{dt}) = \\ & = Q_{in} + \Delta Q_{in} - \frac{\lambda_s \cdot A_c \cdot (T_{i0} + \Delta T_i - T_{top})}{L_c} - \\ & \quad - \rho_s \cdot A_c \cdot (v_{p0} + \Delta v_p) \cdot L_f - (Q_{rad}(T_{i0}) + \\ & + \frac{\partial Q_{rad}}{\partial T_i} \cdot \Delta T_i) - (Q_{conv}(T_{i0}) + \frac{\partial Q_{conv}}{\partial T_i} \cdot \Delta T_i) - (Q_{cruc}(T_{i0}) + \frac{\partial Q_{cruc}}{\partial T_i} \cdot \Delta T_i) \end{aligned} \quad (3.14)$$

Розкриємо дужки у правій частині:

$$Q_{in0} + \Delta Q_{in} - \frac{\lambda_s \cdot A_c \cdot T_{i0} + T_{top}}{L_c} + \frac{\lambda_s \cdot A_c \cdot \Delta T_i}{L_c} - \rho_s \cdot A_c \cdot v_{p0} \cdot L_f - \rho_s \cdot A_c \cdot \Delta v_p \cdot L_f -$$

					ДП/Аз11.06.00.000ПЗ	Арк.
						48
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

$$- Q_{rad}(T_{i0}) - \frac{\partial Q_{rad}}{\partial T_i} \cdot \Delta T_i - Q_{conv}(T_{i0}) - \frac{\partial Q_{conv}}{\partial T_i} \cdot \Delta T_i - Q_{cruc}(T_{i0}) - \frac{\partial Q_{cruc}}{\partial T_i} \cdot \Delta T_i$$

Із статичного режиму слідує, що теплові потоки навколо робочої точки зрівноважені:

$$Q_{in0} + \Delta Q_{in} - \frac{\lambda_s \cdot A_c \cdot T_{i0} + T_{top}}{L_c} - \rho_s \cdot A_c \cdot v_{p0} \cdot L_f - Q_{rad}(T_{i0}) - Q_{conv}(T_{i0}) - Q_{cruc}(T_{i0}) = 0$$

Отже, еквівалентно дорівнюють нулю, і при підставленні цього значення отримуємо рівняння динаміки у приростах із урахуванням масового рівняння:

$$\left\{ \begin{array}{l} c_l \cdot ((T_{m0} + \Delta T_m) \frac{d\Delta m_l}{dt} + (m_{l0} + \Delta m_l) \frac{d(\Delta T_i)}{dt}) = \\ = \Delta Q_{in} - \frac{\lambda_s \cdot A_c \cdot \Delta T_i}{L_c} - \rho_s \cdot A_c \cdot \Delta v_p \cdot L_f - \frac{\partial Q_{rad}}{\partial T_i} \cdot \Delta T_i - \\ - \frac{\partial Q_{conv}}{\partial T_i} \cdot \Delta T_i - \frac{\partial Q_{cruc}}{\partial T_i} \cdot \Delta T_i \\ \frac{d\Delta m_l}{dt} = A_c \cdot (0.91 \cdot \rho_s - \rho_l) \cdot \Delta v_p \end{array} \right. \quad (3.15)$$

Тепер виразимо систему у безрозмірному вигляді задля вираження передатних функцій за визначенням:

- $K_T = \frac{\lambda_s \cdot A_c}{L_c} + \frac{\partial Q_{rad}}{\partial T_i} + \frac{\partial Q_{conv}}{\partial T_i} + \frac{\partial Q_{cruc}}{\partial T_i}$ – сумарний коефіцієнт теплових втрат
- $K_v = \rho_s \cdot A_c \cdot L_f$ – коефіцієнт, що пов'язує швидкість витягування з тепловими втратами
- $K_m = A_c \cdot (0.91 \cdot \rho_s - \rho_l)$ – коефіцієнт, що зв'язує зміну маси зі швидкістю витягування

Ці коефіцієнти відповідно дорівнюють:

- $K_T = 150 \cdot 0.0314 / 0.5 + 318.51 + 1.26 + 282.6 = 611.79$ Вт/К
- $K_v = 2330 \cdot 0.0314 \cdot 1.79 \times 10^6 = 130,959,980$ Вт·с/м
- $K_m = 0.0314 \cdot (2120.3 - 2570) = -14.12$ кг·с/м

У такому вигляді система сягає виду:

					ДП/Аз11.06.00.000ПЗ	Арк.
						49
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

$$\begin{cases} c_l \cdot ((T_{m0} + \Delta T_i) \cdot \frac{d\Delta m_l}{dt} + (m_{l0} + \Delta m_l) \cdot \frac{d\Delta T_i}{dt}) = \Delta Q_{in} - K_T \Delta T_i - K_v \cdot \Delta v_p \\ \frac{d\Delta m_l}{dt} = K_m \cdot \Delta v_p \end{cases} \quad (3.16)$$

Де температура T поверхні розплаву та маса m є взаємозалежними та залежними від часу параметрами. Введемо наступні безрозмірні змінні:

- $\theta = \frac{\Delta T_i}{T_{m0}}$ – відносне відхилення температури від робочої точки (1420 °C);
- $\mu = \frac{\Delta m_l}{m_{l0}}$ – відносне відхилення маси;
- $q = \frac{\Delta Q_{in}}{Q_0}$ – відносне відхилення потужності індуктора;
- $v = \frac{\Delta v_p}{v_0}$ – відносне відхилення швидкості витягування.

Отже, отримуємо систему рівнянь в безрозмірному вигляді:

$$\begin{cases} T((1 + \theta) \cdot \frac{d\mu}{dt} + (1 + \mu) \cdot \frac{d\theta}{dt}) = q - b_1 \theta - b_2 \cdot v \\ \frac{d\mu}{dt} = c \cdot v \end{cases} \quad (3.17)$$

- $T = \frac{c_t \cdot T_0 \cdot m_0}{Q_0 \cdot t_0} = (1035 \times 1693.15 \times 5) / (80,000 \times 10,800) = 0.01014$ – нормований параметр теплової інерції
- $b_1 = \frac{K_t \cdot T_0}{Q_0} = (611.79 \times 1693.15) / 80,000 = 12.950$ – нормований параметр теплових втрат
- $b_2 = \frac{K_v \cdot v_0}{Q_0} = (130,959,980 \times 1.67 \times 10^{-5}) / 80,000 = 0.02734$ – нормований параметр конвективного охолодження
- $c = \frac{K_m \cdot v_0 \cdot t_0}{m_0} = (-14.12 \times 1.67 \times 10^{-5} \times 10,800) / 5 = -0.509$ – нормований параметр зміни маси
- $a_1 = \frac{T_{m0}}{m_0} = 1693.15 / 1693.15 = 1.000$ – нормована температура розплаву
- $a_2 = \frac{m_{l0}}{m_0} = 5 / 5 = 1$ – нормована початкова маса розплаву

Дана система не може бути перетворена у стандартні передатні ланки шляхом операційного числення через її алгебраїчну нелінійність. Тим не

					ДП/Аз11.06.00.000ПЗ	Арк.
						50
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

менш, можна виразити операційний перехід за Лапласом по визначенню, виявити лінійну та нелінійну частину і вирішити вихідну систему чисельно у часовій області, щоб обрати стратегію апроксимації. Застосуємо оператор Лапласа при нульових початкових умовах для цієї системи для отримання її зображення із подальшим виводом її лінійної і нелінійної частини. Зважаючи на принципову нелінійність через масові втрати, почнемо з другого рівняння:

$$s \cdot \mu(s) = c v(s) \quad (3.18)$$

$$\frac{\mu(s)}{v(s)} = \frac{c}{s}$$

Зауважимо, що при нульових умовах

$$\mu(t) = c \cdot v_1 \cdot t \mid v_1 = 1 - \text{ступінчатий сигнал при нульових умовах}$$

Тепер виконаємо перетворення для другого рівняння у явній операторній формі:

$$T \cdot \mathcal{L}\{(1 + \mu(t)) \cdot d\theta/dt\} = q(s) - b_1 \theta(s) - b_2 v(s) + T c v(s) - T c \mathcal{L}\{v(t) \theta(t)\}$$

В даному випадку член $\mathcal{L}\{\mu(t) \cdot d\theta/dt\}$ являє собою згортку за часом, що залежить від постійної швидкості витягування кристалу:

$$\mathcal{L}\{f(t) \cdot g(t)\} = \frac{1}{2\pi i} \int_{c-i\infty}^{c+i\infty} F(\sigma) \cdot G(s - \sigma) d\sigma$$

Звернемо увагу також на дистрибутивність оператора Лапласа відносно додавання $\mathcal{L}\{(1 + \mu(t)) \cdot d\theta/dt\} = \mathcal{L}\{d\theta/dt + \mu(t) \cdot d\theta/dt\} = \mathcal{L}\{d\theta/dt\} + \mathcal{L}\{\mu(t) \cdot d\theta/dt\}$, а також, оскільки ми маємо вираження нашої функції у термінах змінної часу, можемо переписати:

$$T \cdot s \theta(s) - \mathcal{L}\{t \cdot d\theta/dt\} = q(s) - b_1 \theta(s) - b_2 v(s) - T c v(s) - T c \mathcal{L}\{v(t) \theta(t)\}$$

Відносно перетворення похідної зліва, та нелінійної частини зправа важливо зауважити, що:

$$\mathcal{L}\{t \cdot d\theta/dt\} = -\theta(s) - s \frac{d\theta(s)}{ds} \quad (3.19)$$

					ДП/Аз11.06.00.000ПЗ	Арк.
						51
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

$$\begin{cases} \mathcal{L}\{v(t)\theta(t)\} = \theta(s) \mid v = v(1(t)) \\ \mathcal{L}\{v(t)\theta(t)\} = \theta(0) \mid v = \delta(t) \\ \mathcal{L}\{v(t)\theta(t)\} = 0 \mid v = v(0(t)) \end{cases}$$

В результаті отримаємо:

$$\begin{cases} T \cdot s \theta(s) - T \theta(s) + T s \frac{d\theta(s)}{\theta(s)} = q(s) - b_1 \theta(s) - b_2 v(s) - T c v(s) - T c S \\ S = \theta(s) \vee 0, T c \approx -0.001 \approx 0 \end{cases} \quad (3.20)$$

Перепишемо це рівняння, згрупувавши члени для вираження предатних ланок у лінеаризованому вигляді за визначенням:

$$T \theta(s)(s + b_1) - T s \frac{d\theta(s)}{\theta(s)} = q(s) + v(s)(-T c - b_2) \quad (3.21)$$

Отже, якщо відкинути нелінійну частину рівняння вигляду $T s \frac{d\theta(s)}{\theta(s)}$ отримаємо стандартні передатні ланки першого порядку по каналу керування та збурення. Але цей член явно вказує на інтегральний вплив зміни маси відносно впливу на вихідний сигнал. Оцінемо цей вплив, побудувавши вирішення для вихідного рівняння (3.21), вирішивши його чисельно відносно сигналів по каналу керування та збурення:

```
function simulate_theta_response()
    T = 0.01014;
    b1 = 12.950;
    b2 = 0.02734;
    c = -0.509;
    tspan = [0 100];
    y0 = [0; 0]; % [θ, μ]
    % --- 1. Відгук на одиничне q (теплота)
    q = 1; v = 0;
    [t1, y1] = ode45(@(t, y) system_eqs(t, y, q, v, T, b1, b2, c), tspan, y0);
    % --- 2. Відгук на одиничне v (витягування кристалу)
    q = 0; v = 1;
    [t2, y2] = ode45(@(t, y) system_eqs(t, y, q, v, T, b1, b2, c), tspan, y0);
    % --- Побудова графіків
    figure
    subplot(2,1,1)
    plot(t1, y1(:,1), 'b', 'LineWidth', 2)
    title('Відгук \theta(t) на одиничний q (теплота)')
    xlabel('Час'); ylabel('\theta(t)')
    grid on
    subplot(2,1,2)
    plot(t2, y2(:,1), 'r', 'LineWidth', 2)
    title('Відгук \theta(t) на одиничний v (витягування кристалу)')
    xlabel('Час'); ylabel('\theta(t)')
```

					ДП/Аз11.06.00.000ПЗ	Арк.
						52
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

```

grid on
end
function dydt = system_eqs(~, y, q, v, T, b1, b2, c)
    theta = y(1); % температура розплаву (нормована)
    mu = y(2); % маса розплаву (нормована)
    % Система згідно (4.18)
    dmu_dt = c * v;
    dtheta_dt = (q - b1 * theta - b2 * v - T * (1 + theta) * dmu_dt) / (T * (1 + mu));
    dydt = [dtheta_dt; dmu_dt];
end

```

Отримали два графіка за каналом керування (3.6) та збурення (3.7):

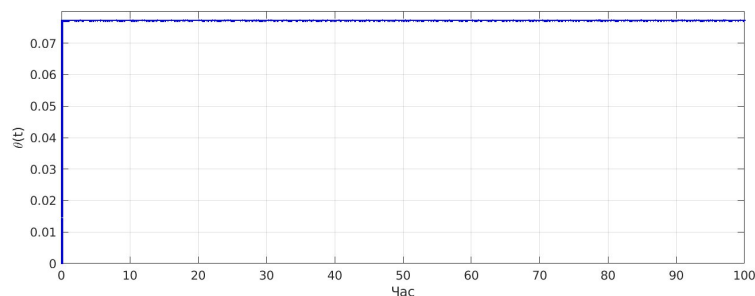


Рис 3.6. Реакція системи на одиничний вплив за каналом збурення “підведена теплота індуктору” – “нормована температура поверхні розплаву”

Із графіку на рисунку 3.6 видно, що система за каналом збурення сягає усталеного режиму із параметризованим значенням в 0.07, та має вкрай низьку інерційність (час усталення менше 1% від типових значень часу протікання процесу).

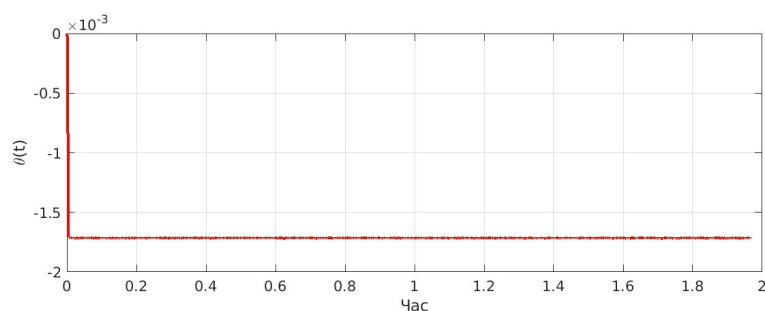


Рис 3.7. Реакція системи на одиничний вплив за каналом керування “швидкість витягування кристалу” – “нормована температура поверхні розплаву”

Аналогічно каналу збурення, із графіка на рисунку 3.7 система веде себе за каналом керування, проте із від’ємним щодо статичного значення впливом. Для більш ретельного аналізу отримаємо рішення за суттєвий проміжок часу і проаналізуємо його на наявність коливань та усталеного режиму:

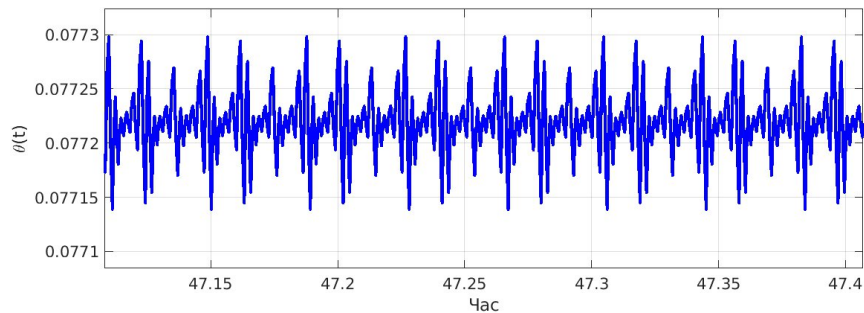


Рис 3.8. Реакція системи на одиничний вплив за каналом збурення “підведена теплота індуктору” - “нормована температура поверхні розплаву”

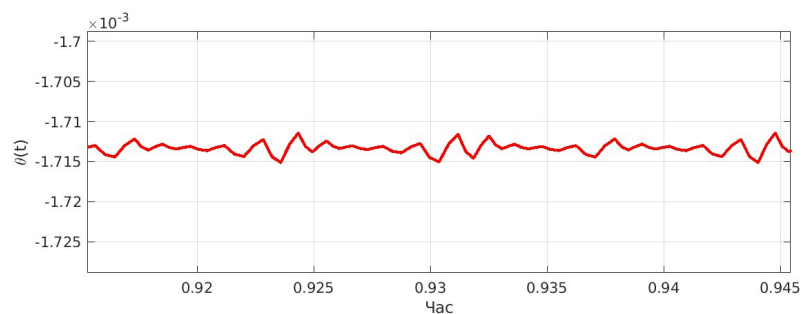


Рис 3.9. Реакція системи на одиничний вплив за каналом керування “підведена теплота індуктору” - “нормована температура поверхні розплаву”

Як видно з графіків на рисунках 3.8-3.9, інтегральний член зміни маси змушує систему знаходитись у режимі вимушених коливань, проте вони є не суттєвими, амплітуда яких сягає менше 1% від усталеного значення. Окрім того, система в усталеному режимі (навколо робочої точки) вкрай швидко реагує на вимушені сигнали. Таким чином, вважаючи лінеаризацію вихідної системи довільною, можна з високою точністю відкинути диференційний член із рівняння (3.21) та виразити передатні ланки першого порядку:

$$T\theta(s)(s + b_1) = q(s) + (T - b_2)v(s)$$

$$\begin{cases} \frac{\theta(s)}{q(s)} = \frac{1}{T \cdot s + b_1} \\ \frac{\theta(s)}{v(s)} = \frac{(-Tc - b_2)}{T \cdot s + b_1} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} \frac{\theta(s)}{q(s)} = \frac{1}{0.01014 \cdot s + 12.95} \\ \frac{\theta(s)}{v(s)} = \frac{-0.0221}{0.01014 \cdot s + 12.95} \end{cases} \quad (3.22)$$

Ця апроксимація справедлива для випадків:

- малих змін швидкості витягування (значення v_0 не надто велике);
- діапазону частот, що відповідають типовій динаміці системи (s близько до $1/T$).

Але важливо зауважити, що цей член у вихідному диференційному рівнянні впливає на залежність підведеного тепла від маси розплаву, тому для більш повної моделі ми можемо враховувати цей член за каналами керування та збурення навколо робочої точки, як інтегральний член впливу на теплоємність через зміну маси за каналами керування та збурення, виходячи із рівняння (3.18), та оцінок у (3.20).

Побудуємо перехідні характеристики за даними у рівнянні (3.22) лінійними частинами системи, та порівняємо у безрозмірному вигляді масштаб розбіжності із вирішеною чисельно моделлю (3.21):

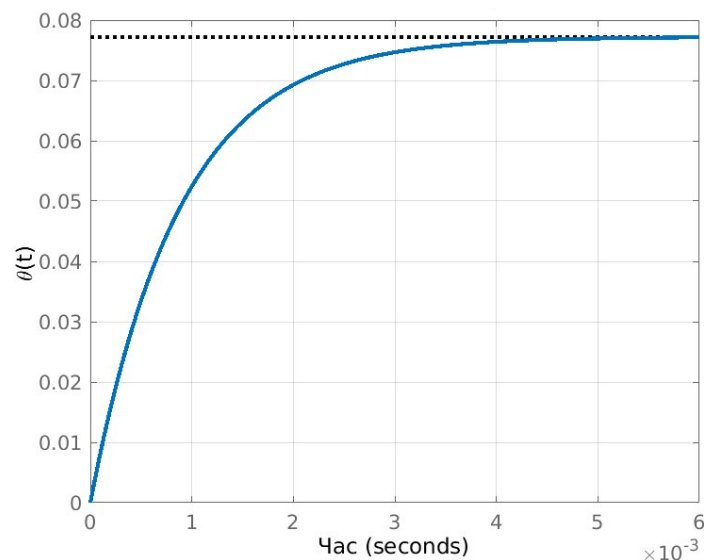


Рис 3.10. Реакція лінійної частини системи на ступінчатий сигнал за каналом керування “нормована теплота індуктору” - “нормована температура поверхні розплаву”

Як бачимо, за каналом збурення вихідну модель можна вважати базовою, адже із графіку на рисунку 3.10 час входження в усталений режим та його параметризоване значення збігаються з високою точністю.

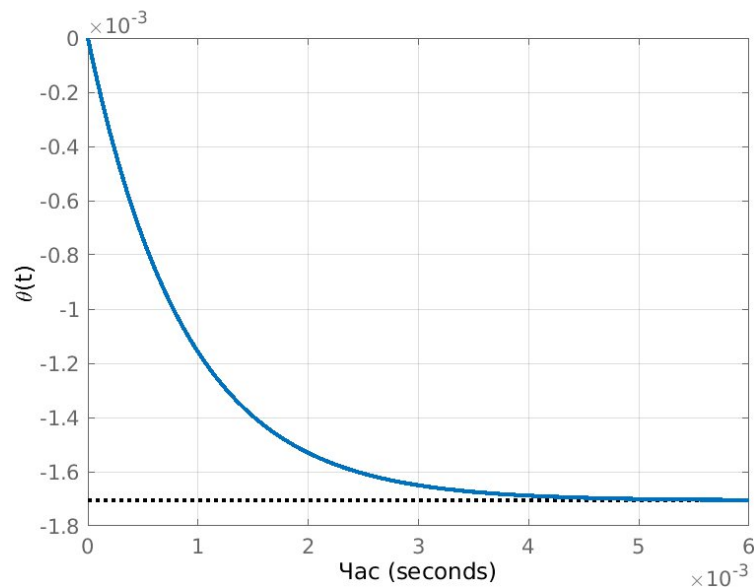


Рис 3.11. Реакція лінійної частини системи на ступінчатий сигнал за каналом керування “нормована швидкість витягування кристалу” - “нормована температура поверхні розплаву”

Аналогічно, для моделі за каналом керування із графіку на рисунку 3.11 видно, що час входження в усталений режим а також його нормоване значення майже збігається із моделлю, представленою на графіку 3.8.

Скориставшись тотожностями безрозмірних коефіцієнтів у рівнянні (3.17) приведемо передатні ланки у розмірний вигляд, привівши їх також до номінальних розмірних одиниць, та побудуємо їх перехідні характеристики:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\theta(s)}{q(s)} = \frac{1/100}{-10^{-3} \left(\frac{c_t \cdot T_0 \cdot m_0}{Q_0 \cdot t_0} \right)^{-1} \cdot s + \frac{K_t \cdot T_0}{Q_0}} \\ \frac{\theta(s)}{v(s)} = \frac{-10^{-3} \left(\left(\frac{c_t \cdot T_0 \cdot m_0}{Q_0 \cdot t_0} \frac{K_m \cdot v_0 \cdot t_0}{m_0} \right)^{-1} - \left(\frac{K_v \cdot v_0}{Q_0} \right) \right)}{-10^{-3} \left(\frac{c_t \cdot T_0 \cdot m_0}{Q_0 \cdot t_0} \right)^{-1} \cdot s + \left(\frac{K_t \cdot T_0}{Q_0} \right)^{-1}} \end{array} \right. \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \frac{\theta(s)}{q(s)} = \frac{0.01}{0.09615 \cdot s + 0.07} [\text{кВт}] \rightarrow \text{К} \\ \frac{\theta(s)}{v(s)} = \frac{-0.4524}{0.09615 \cdot s + 0.07} [\text{мм/хв}] \rightarrow \text{К} \end{array} \right. \quad (3.23)$$

Побудуємо перехідні характеристики за каналом збурення (рис.3.12) та керування (рис. 3.12):

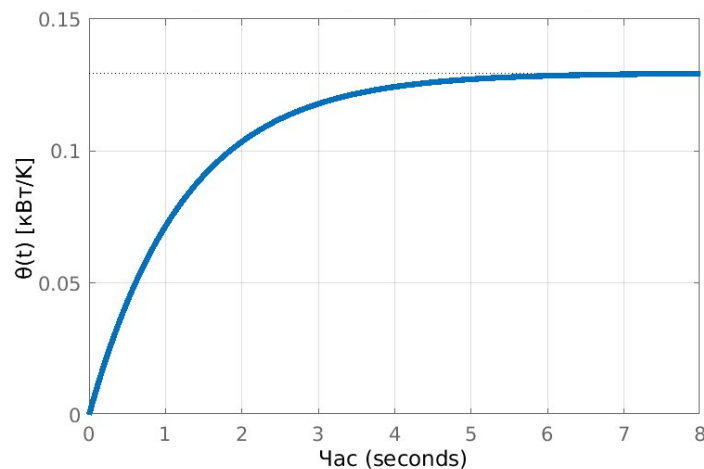


Рис. 3.12. Відносна зміна температури лінійної частини системи на підведення 1 кВт потужності за каналом збурення “підведена теплота індуктору” - “зміна температури поверхні розплаву”

При нормуванні передатної ланки за каналом збурення отримали перехідну характеристику, значення якої із графіку на рисунку 3.12 повністю відповідає статичній характеристиці, графік якої зображено на рисунку 3.3.

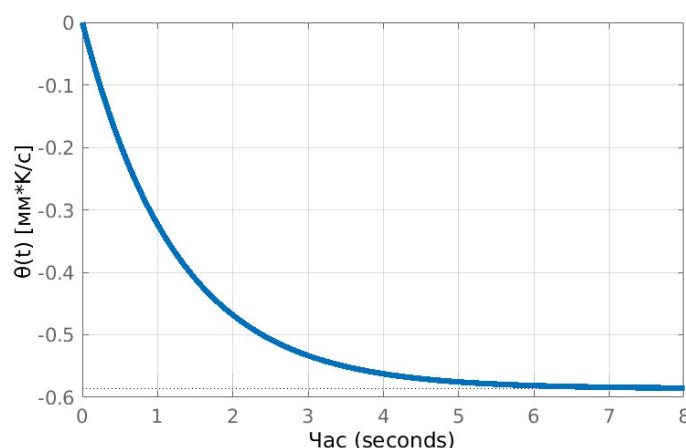


Рис. 3.13. Відносна зміна температури лінійної частини системи на підвищення швидкості витягування у 1мм/хв за каналом керування “зміна швидкості витягування” - “зміна температури поверхні розплаву”

Так само, при нормуванні передатної ланки за каналом керування отримали перехідну характеристику, значення якої із графіку на рисунку 3.13 повністю відповідає зміні статичної характеристики, графік якої зображено на рисунку 3.4.

Отже, нормовані характеристики зображують відносну зміну температури на підведення одиничного впливу у лінеаризованій навколо робочої точки моделі, співпадають із ранжуванням своїх статичних характеристик, а отже, нормовані передатні ланки, при перерахунку сигналів за вказаними у (3.17) коефіцієнтами із урахуванням одиниць вимірювання повністю відповідають критеріям для синтезу системи керування та її регулюванню.

Висновки до розділу 3

У третьому розділі було ідентифіковано математичну модель зони розплаву. На базі відомих фізичних законів та принципів закону збереження було виведено статичну характеристику, яка збігається із номінальними значенням процесу вирощування монокристалу кремнію методом

Чохральського. Ця характеристика виявилась лінійною відносно обраного параметру керування (температура поверхні розплаву) в залежності від впливів за каналами керування та збурення (швидкість витягування кристалу та підведена теплота індуктору відповідно), що дало змогу вивести динамічну модель та лінеаризувати її методом прирощень навколо робочої точки процесу.

Було виведено базову фізичну модель процесу, на яку можна спиратись при виведенні динамічних характеристик за каналами, що пов'язані із зоною розплаву. Ця модель враховує суперпозицію зміни температури в залежності від зміни маси розплаву, що показано у вигляді суми похідних в лівій частині рівняння (3.13), а також нелінійні явища, пов'язані із радіацією тепла та конвективними потоками, як показано у виводі диференційної моделі (3.7-3.13). Враховуючи відомі апроксимації рівняння Нав'є-Стокса числами подібності та поліноміальний вигляд рівняння теплового випромінювання, а також лінійність статичних характеристик за цільовими каналами було обрано стратегію апроксимації методом приростів.

Отже, отримана лінеаризована модель (3.16) відображає відносний вплив за каналами керування та збурення при усталенні системи. Вона прийнятна для аналізу зони розплаву при досягненні поверхні розплаву номінальної температури та запуску процесу вирощування. Ключовим фактором якості отриманих кристалів є сталість температури поверхні розплаву, дана модель призначена для синтезу системи керування із оптимальним налаштуванням параметрів і регуляторів для швидкої і гладкої компенсації збурень, які в тому числі виникають через втрату маси, що збережено у нормованій моделі (3.17).

При нормуванні цієї моделі і отриманні її образу за Лапласом зміна маси була виражена в диференційному члені, що з точки зору операційного числення призвело до нелінійності системи. Числовими методами було вирішено вихідну систему, внаслідок чого вдалось проаналізувати суттєвість

					ДП/Аз11.06.00.000ПЗ	Арк.
						59
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

впливу цього члену та синтезувати типові передатні характеристики за обраними каналами керування та збурення, які повністю відповідають чисельному вирішенню моделі.

Врешті-решт, у рівнянні (3.26) спираючись на нормування в (3.17) було показано отримання розмірних характеристик, які відповідають відносному впливу за каналами та реакції величини керування. Отримані перехідні характеристики повністю відповідають ранжуванню статичних характеристик системи за обраними каналами.

Важливо зауважити, що модель (3.7) є базовою та вкрай чутливою при лінеаризації методом приростів через суттєві нелінійності у членах, що відповідають радіаційним та конвективним теплообмінним процесам. Так, ранжування температури робочої точки у межах 10-20% призводить до багато кратної зміни параметрів теплообміну.

					ДП/ІАз11.06.00.0000ПЗ	Арк.
						60
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

4 СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЗОНОЮ РОЗПЛАВУ

Модель, отримана із рівняння (4.17) є моделлю лінеаризації навколо робочої точки. Як було показано при виводі цього рівняння, воно містить суттєві нелінійності за радіаційними (4.10) та конвективними (4.11) втратами. Отже, при ранжуванні температурного режиму в межах 50% температурні втрати можуть змінюватись в десятки разів, що видно з формул 4.10 та 4.11. Отже, сенс регулювання параметризованої моделі полягає у тому, щоб компенсувати збурення і повертати температуру у усталені номінальні значення. Для синтезу системи керування будемо спиратись на замкнену систему з від'ємним зворотнім зв'язком із ПІ- і ПІД-регуляторами, які синтезуємо методами М-кола та Циглера-Нікольсона.

Передавальна функція $W_{\text{зам}}(s)$ замкненої системи за каналом керування з від'ємним зворотним зв'язком має вигляд:

$$W_{\text{зам}}(s) = \frac{W_{\text{ТОК}}}{1 + W_{\text{ТОК}}} = \frac{W_{v\theta(s)} \cdot W_{PI}(s)}{1 + W_{v\theta(s)} \cdot W_{PI}(s)} \quad (5.1)$$

Передавальна функція ПІ-регулятора:

$$W_{PID}(s) = K_{\text{рег}} \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s} \right) = P + \frac{I}{s} \quad (5.2)$$

Передавальна функція ПІД-регулятора:

$$W_{PID}(s) = K_{\text{рег}} \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s} + T_d \cdot s \right) = P + \frac{I}{s} + D \frac{N}{1 + \frac{N}{s}} \quad (5.3)$$

Попередньо, побудуємо полюси та імпульсні характеристики за каналами керування та збурення. Передатні ланки обох каналів описуються одним і тим самим виразом, і його полюсом буде корінь із приведенного знаменника:

$$s = \frac{12.95}{0.01014} \approx 1277.12$$

Значення у багато разів більше за нормовані значення усталеного режиму, отже система має великий запас стійкості. Побудуємо імпульсні

					ДП/Аз11.06.00.000ПЗ	Арк.
						61
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

характеристики за окремими каналами у середовищі Matlab, де імпульсна характеристика за визначенням є реакція системи на сигнал типу дельта-функція, що відповідає короткому замиканню:

```
% --- Параметри ланок ---
T_q = 0.01014;
a_q = 12.95;
k_q = 1;
T_v = 0.01014;
a_v = 12.95;
k_v = -0.0221;
% --- Передатні ланки ---
W_q_theta = tf(k_q, [T_q a_q]);
W_v_theta = tf(k_v, [T_v a_v]);
% --- Імпульсні характеристики ---
figure
impulse(W_q_theta)
title('Імпульсна характеристика  $\theta/q$ ')
xlabel('Час, с'); ylabel('Амплітуда')
grid on
figure
impulse(W_v_theta)
title('Імпульсна характеристика  $\theta/v$ ')
xlabel('Час, с'); ylabel('Амплітуда')
grid on
```

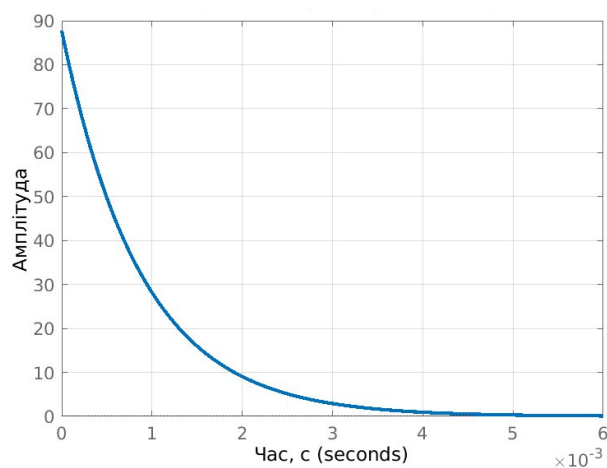


Рис 4.1. Імпульсна характеристика системи за каналом збурення “підведена теплота індуктору” - “нормована температура поверхні розплаву”

					ДП/Аз11.06.00.000ПЗ	Арк.
						62
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

Із графіку на рисунку 4.1 видно, що система чутлива до імпульсного впливу, адже під час замикання параметр збільшується у сотні разів відносно нормованого значення. Інерційність системи залишається на тому ж рівні, що і у перехідному режимі роботи.

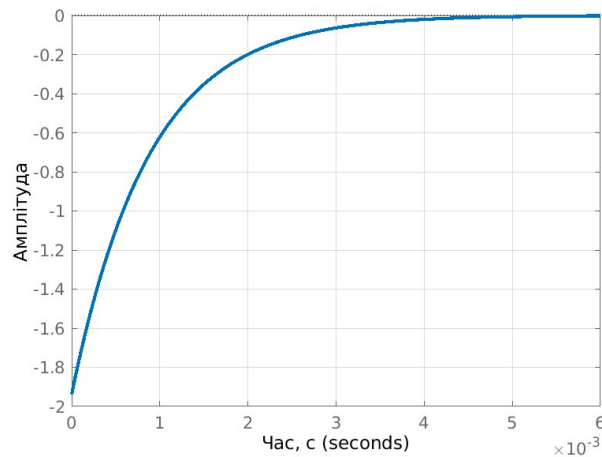


Рис 4.2. Імпульсна характеристика системи за каналом керування “підведена теплота індуктору” - “нормована температура поверхні розплаву”

Із графіку на рисунках 4.2 слідує, що система проявляє меншу чутливість, ніж за каналом збурення, параметр досягає усталеного значення перехідного режиму в наслідок реакції на імпульсний сигнал, після чого з типовою інерційністю система відновлюється. Оскільки ланка за каналом управління має вигляд інерційної першого порядку, із від’ємним підсиленням а також запасом стійкості, що у багато разів перевищує номінальні значення режиму та можливого збурення, необхідно обрати методи, які будуть ефективними відносно дослідження системи на перевантаження та вивід із усталеного режиму. Такими методами можуть бути графічний метод М-кола, який дозволяє наочно підібрати параметри регуляторів для досягнення відповідного показнику коливності, та метод інтегрального накопичення абсолютного відхилення за часом (ІТАЕ), який дозволяє ітераційно знайти сумарну похибку відхилення початкового наближення системи і, відповідно, оптимальні коефіцієнти регуляторів для пригнічення збурення та усталення

системи. Для контролю якості реалізованих методів будемо спиратись на стандартний автоматичний метод середовища Matlab – *pidtune*.

4.1 Синтез ПІ- та ПІД-регуляторів замкненої системи методом М-кола.

Метод М-кола — це чисельний підхід для розв’язання диференціальних рівнянь, який базується на апроксимації розв’язку за допомогою кусково-гладких функцій, визначених на множині окіл навколо точок сітки (М-околів) [20, с. 112]. Цей метод дозволяє підвищити точність та стабільність розв’язку за рахунок врахування локальної структури задачі і ефективно застосовується для задач із складними геометриями та змінними коефіцієнтами. Сутність методу М-кола полягає в заданні запасу стійкості системи, який відповідає діаметру М-кола на комплексній площині годографа [11, с. 89]. Реалізуємо функцію, яка будує розімкнену систему із ПІ-регулятором, приймаючи аргументами вищевказані коефіцієнти та безпосередньо побудовану передатну функцію моделі, і виводить графік з М-колом, дозволяючи регулювати аргументи, що відповідають коефіцієнтам таким чином, щоб годограф системи мав дотичну до кола. Це забезпечить необхідний показник коливальності системи і запас її стійкості.

Напишемо скрипт для середовища Matlab із побудовою М-кола для ПІ- та ПІД-регулятора системи:

```
function M_circle_tuning(controllerType, kp, Ti, Td)
    % controllerType: 'PI' або 'PID'
    W_obj = tf(-0.0221, [0.01014 12.95]);
    % Змінна s
    s = tf('s');
    % Контролер
    switch upper(controllerType)
        case 'PI'
            W_ctrl = kp * (1 + 1/(Ti * s));
        case 'PID'
```

					ДП/ІАз11.06.00.000ПЗ	Арк.
						64
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

```

W_ctrl = kp * (1 + 1/(Ti * s) + Td * s);
otherwise
    error('Неверный тип регулятора. Используйте PI или PID.');
```

end

% Розімкнута система

```

W_open = W_obj * W_ctrl;
% Частотний діапазон
w = logspace(-1, 2, 1000);
[mag, phase] = bode(W_open, w);
mag = squeeze(mag);
phase = squeeze(phase);
G = mag .* exp(1i * deg2rad(phase));
% Побудова годографа
figure;
plot(real(G), imag(G), 'b', 'LineWidth', 1.5);
hold on;
% Побудова М-кола
M = 1.5;
Mx = M^2 / (M^2 - 1);
r = M / (M^2 - 1);
theta = linspace(0, 2*pi, 500);
x = -Mx + r * cos(theta);
y = r * sin(theta);
plot(x, y, 'r--', 'LineWidth', 1.5);
text(-Mx + 0.1, 0.1, ['M = ' num2str(M)], 'Color', 'magenta');
title(['Годограф розімкненої системи (' controllerType '-регулятор)']);
xlabel('Re'); ylabel('Im');
grid on; axis equal;
legend('Годограф', 'М-окружність');
```

end

Сенс методу полягає у підборі коефіцієнтів таким чином, щоб годограф системи був дотичним до М-кола. Для ПІ-регулятора знайдені коефіцієнти $k_p=350$, $T_i=0.02$:

M_circle_tuning('PI', 350, -0.02);

					ДП/ІАз11.06.00.000ПЗ	Арк.
						65
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

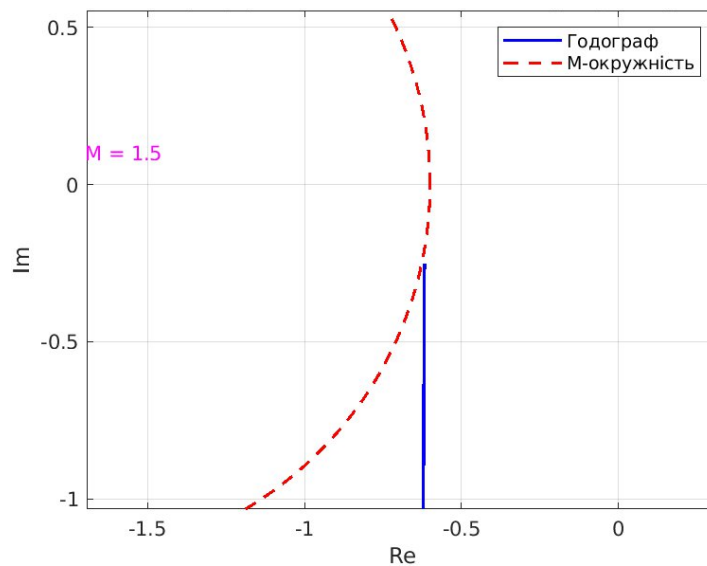


Рис. 4.3. Годограф налаштованого регулятора розімкнутої системи із ПІ-регулятором ($k_p=350$, $T_i=-0.02$)

Для ПІД-регулятора знайдені коефіцієнти $k_p=350$, $T_i=-4$, $T_d=-0.1$:

M_circle_tuning('PI', 350, -4, -0.1);

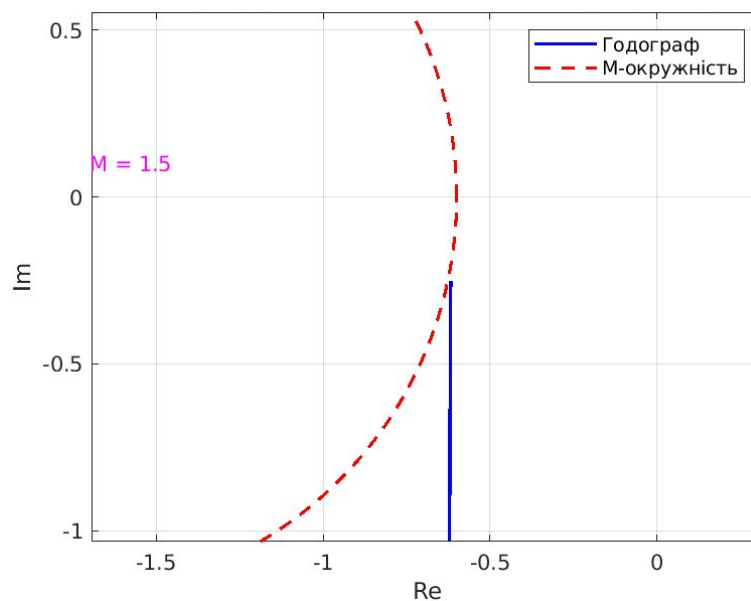


Рис. 4.4. Годограф налаштованого регулятора розімкнутої системи із ПІД-регулятором ($k_p=350$, $T_i=-4$, $T_d=-0.1$)

Побудуємо перехідні характеристики замкненої системи з ПІ- та ПІД-регуляторами із отриманими коефіцієнтами:

					ДП/Аз11.06.00.000ПЗ	Арк.
						66
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

```

% Вихідна ланка
W_obj = tf(-0.0221, [0.01014 12.95]);
s = tf('s');
% --- ПІ-регулятор ---
Kp1 = 350;
Ti1 = -0.02;
W_pi = Kp1 * (1 + 1/(Ti1 * s));
W_cl_pi = feedback(W_pi * W_obj, 1);
% --- ПІД-регулятор ---
Kp2 = 350;
Ti2 = -4;
Td2 = -0.1;
W_pid = Kp2 * (1 + 1/(Ti2 * s) + Td2 * s);
W_cl_pid = feedback(W_pid * W_obj, 1);
% --- Візуалізація ---
t = 0:0.015;
[y1, t1] = step(W_cl_pi);
[y2, t2] = step(W_cl_pid);
plot(t1, y1, 'b', 'LineWidth', 2)
hold on
plot(t2, y2, 'r--', 'LineWidth', 2)
grid on
xlabel('Час (с)')
ylabel('Перехідна характеристика')
legend('ПІ-регулятор', 'ПІД-регулятор')
title('Порівняння ПІ та ПІД-регуляторів з вихідною ланкою')

```

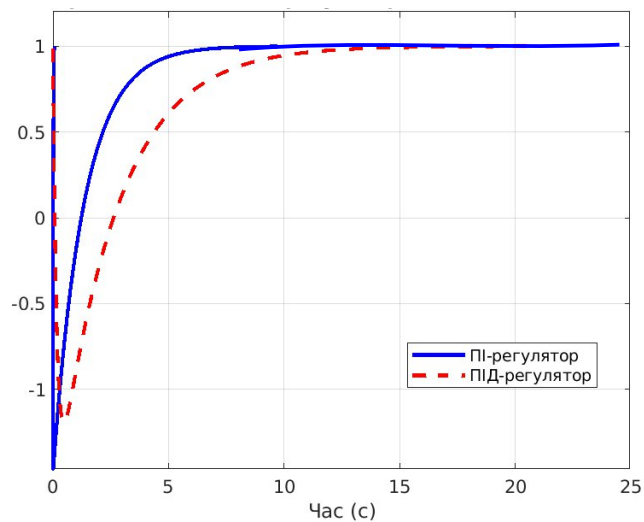


Рис. 4.5. Перехідні характеристики замкнутого ТОК за каналом керування із ПІ- та ПІД-регуляторами, налаштованими методами М-кола.

Із графіків перехідної характеристики системи із ПІ- та ПІД-регулятором на рисунку 4.5, налаштованих методом М-кола, видно, що і ПІ- і ПІД-регулятори майже без коливності компенсують збурення, повертають замкнену систему у усталений режим. ПІД-регулятор діє трохи повільніше за ПІ-регулятор, але забезпечує більш плавне регулювання характеристики. Варто зауважити, що час усталення напряму залежить від показника коливальності, який задається радіусом М-кола.

4.2 Синтез ПІ- та ПІД-регуляторів замкненої системи методом ІТАЕ

Метод оптимізації параметрів ПІ та ПІД-регуляторів полягає у мінімізації інтегральної похибки зваженої за часом (ІТАЕ — Integral of Time-weighted Absolute Error) [21, с. 234], яка характеризує сумарну помилку системи, що збільшується з часом, та дозволяє отримати швидку та стабільну реакцію без надмірних коливань:

$$J = \int_0^{\infty} t \cdot |e(t)| dt, \quad e(t) = 1 - y(t)$$

Спочатку задається математична модель об'єкта управління у вигляді передатної функції, після чого регулятори (ПІ та ПІД) формуються відповідно з параметрами пропорційної, інтегральної та диференціальної дії. Для замкненої системи з зворотним зв'язком моделюється її перехідна характеристика на одиничний вхідний сигнал. Використовуючи числові методи оптимізації (наприклад, алгоритм `fminsearch`), знаходяться такі значення коефіцієнтів регулятора, при яких функція ІТАЕ набуває мінімального значення. Це забезпечує оптимальний баланс між швидкістю реакції та якістю регулювання, що важливо для підвищення ефективності автоматичного керування в технічних системах.

Напишемо дві функції, які реалізують даний метод для пошуку коефіцієнтів ПІ- та ПІД-регулятора:

					ДП/ІАЗ11.06.00.000ПЗ	Арк.
						68
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

```

function [Kp, Ti] = optimize_PI_ITAE()
    % Оптимізація коефіцієнтів ПІ-регулятора ITAE
    % Передатна ланка об'єкту
    W_obj = tf(-0.0221, [0.01014 12.95]);
    % Функція ITAE
    function cost = itae(params)
        Kp = params(1);
        Ti = params(2);
        if Ti <= 0.0001 || Kp >= 0.0001
            cost = 1e6;
            return;
        end
        s = tf('s');
        W_pi = Kp * (1 + 1/(Ti * s));
        W_closed = feedback(W_obj * W_pi, 1);
        [y, t] = step(W_closed);
        e = 1 - y;
        cost = trapz(t, t .* abs(e)); % ITAE критерій
    end
    % Пошук мінімуму
    params0 = [-1, 1]; % Початкове наближення
    options = optimset('Display','iter', 'TolX',1e-6, 'TolFun',1e-6);
    [opt_params, ~] = fminsearch(@itae, params0, options);
    Kp = opt_params(1);
    Ti = opt_params(2);
    % Графік
    s = tf('s');
    W_pi = Kp * (1 + 1/(Ti * s));
    W_closed = feedback(W_obj * W_pi, 1);
    figure
    step(W_closed);
    grid on
    title(['Оптимальний ПІ-регулятор: Kp = ', num2str(Kp), ', Ti = ', num2str(Ti)])
end
function [Kp, Ti, Td] = optimize_PID_ITAE()
    % Оптимізація ПІД-регулятора по ITAE
    W_obj = tf(-0.0221, [0.01014 12.95]);
    % Функція вартості (ITAE)
    function cost = itae(params)
        Kp = params(1);
        Ti = params(2);
        Td = params(3);
        if any([Ti <= 0.0001, Td < 0.0001, Kp >= 0.0001])
            cost = 1e6;
            return;
        end
    end

```

					ДП/Аз11.06.00.000ПЗ	Арк.
						69
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

```

end
s = tf('s');
W_pid = Kp * (1 + 1/(Ti * s) + Td * s);
W_closed = feedback(W_obj * W_pid, 1);
[y, t] = step(W_closed);
e = 1 - y;
cost = trapz(t, t .* abs(e)); % Критерій ІТАЕ
end
% Оптимізація параметрів
params0 = [-1, 1, 0.1]; % Початкове наближення
options = optimset('Display','iter', 'ToIX',1e-6, 'ToIFun',1e-6);
[opt_params, ~] = fminsearch(@itae, params0, options);
Kp = opt_params(1);
Ti = opt_params(2);
Td = opt_params(3);
% Побудова графіку
s = tf('s');
W_pid = Kp * (1 + 1/(Ti * s) + Td * s);
W_closed = feedback(W_obj * W_pid, 1);
figure
step(W_closed);
grid on
title(['ПД-регулятор: Kp = ', num2str(Kp), ', Ti = ', num2str(Ti), ', Td = ', num2str(Td)])
end

```

При запуску кожної з функцій отримали висновки щодо оптимальних критеріїв ПІ- та ПД-регулятору із побудовою графіків амплітуд:

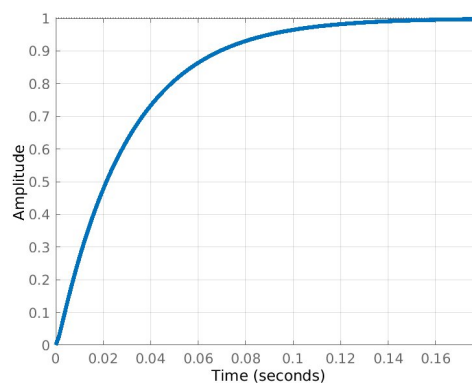


Рис. 4.6. Перехідна характеристика налаштованої системи із ПІ-регулятором ($k_p=-1.9231$, $T_i=-0.0001$)

					ДП/Аз11.06.00.000ПЗ	Арк.
						70
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

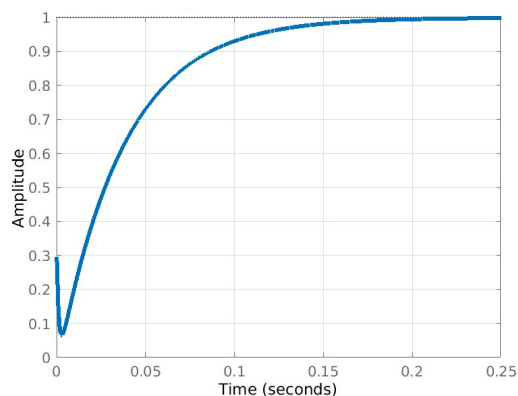


Рис. 4.7. Перехідна характеристика налаштованої системи із ПІД-регулятором ($k_p=-1.5431$, $T_i=0.0001$, $T_d=0.12375$)

У порівнянні з візуальним методом М-кола метод інтегрального зваження абсолютної помилки за часом дає більш точний та чутливий результат. Графік перехідної характеристики системи із ПІ-регулятором на рисунку 4.6 вказує, що налаштування ПІ-регулятора дає плавне компенсування збурення замкнутої системи у часових проміжках, в десятки разів швидше, ніж регулятор, налаштований методом М-кола. ПІД-регулятор, перехідна характеристика якого зображено на графіку рисунку 4.7, налаштований за даним методом є найбільш оптимальним з усіх застосованих регуляторів, адже із мінімальною амплітудою, високою швидкодією та без коливань компенсує збурення, повертаючи систему у усталений режим.

4.3 Синтез системи керування із ПІ- та ПІД-регуляторами методом pidtune

Для контролю якості синтезованих регуляторів методом М-кола та інтегрального накопичення помилки застосуємо вбудований метод пошуку оптимальних коефіцієнтів для ПІ- та ПІД-регулятора в пакеті Matlab – метод pidtune:

% --- Вихідна ланка ---

					ДП/ІАз11.06.00.000ПЗ	Арк.
						71
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

```

T = 0.01014;
a = 12.95;
k = -0.0221;
W_obj = tf(k, [T a]);

% --- Автоматичний ПІ-регулятор ---
type_PI = 'PI';
[C_pi, info_pi] = pidtune(W_obj, type_PI);

% --- Автоматичний ПІД-регулятор ---
type_PID = 'PID';
[C_pid, info_pid] = pidtune(W_obj, type_PID);

% --- Замкнені системи ---
W_cl_pi = feedback(C_pi * W_obj, 1);
W_cl_pid = feedback(C_pid * W_obj, 1);

% --- Підготовка графіків ---
t = 0:0.001:1;
[y_pi, t_pi] = step(W_cl_pi);
[y_pid, t_pid] = step(W_cl_pid);

figure
plot(t_pi, y_pi, 'b-', 'LineWidth', 2)
hold on
plot(t_pid, y_pid, 'r--', 'LineWidth', 2)
grid on
xlabel('Час, с')
ylabel('Вихід системи')
title('Порівняння автоналаштованих ПІ та ПІД-регуляторів')
legend('ПІ-регулятор (pidtune)', 'ПІД-регулятор (pidtune)')

% --- Вивід параметрів ---
disp('--- Автоматичний ПІ-регулятор ---')
disp(C_pi)
disp('--- Автоматичний ПІД-регулятор ---')
disp(C_pid)

```

					ДП/Аз11.06.00.000ПЗ	Арк.
						72
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

Скрипт із застосуванням методу вивів наступні коефіцієнти для ПІ- та ПІД-регулятора:

--- Автотюн ПІ-регулятора ---

pid with properties:

$K_p: -610.8208$

$K_i: -2.3412e+06$

--- Автотюн ПІД-регулятора ---

$K_p: -838.8577$

$K_i: -1.9418e+06$

$K_d: 0$

А також, побудував наступні перехідні харакетристики відрегульованого об'єкту:

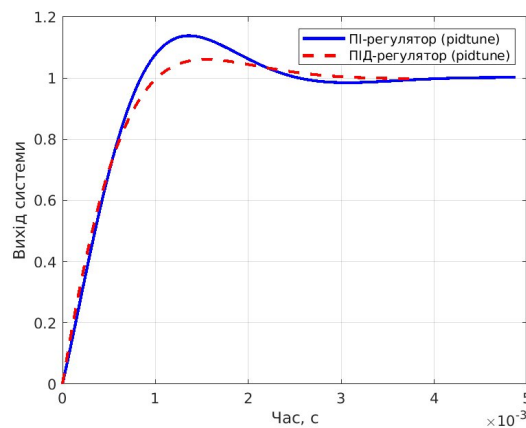


Рис. 4.8. Перехідні характеристики системи за сигналом керування із ПІ- та ПІД-регуляторами, налаштованими методом autotune.

Отже, за швидкодією компенсації збурення цей метод дає найкращі результати. Проте, інтегральні коефіцієнти регулятора мають порядок 10^{-6} , окрім того, метод не дійшов до синтезу ПІД-регулятора, залишивши диференційний коефіцієнт рівним нулю, фактично синтезувавши два ПІ-регулятора з різними показниками коливальності. Цікавим зауваженням є те, що коефіцієнти підсилення ПІ- та ПІД-регулятора, налаштованих методом pidtune по порядку збігаються із коефіцієнтами, отриманими методом М-кола.

Висновки до розділу 4

Під час виконання синтезу системи основною задачею було знайти коефіцієнти для ПІ- та ПІД-регуляторів, враховуючи вкрай низьку інерційність системи та стійкість відносно впливу навколо робочої точки. Оптимальний регулятор має компенсувати вихід системи із усталеного режиму із мінімальною коливальністю та в час, що відповідає інерційності системи. Враховуючи декілька граничні та екстремальні умови стійкості і інерційності системи, було обрано два методи регулювання – метод М-кола, та інтегрального накопичення похибки системи. Для контролю результату було обрано автоматичний метод середовища Matlab – pidtune.

Порівнюючи принципову різницю між ПІ- та ПІД-регуляторами, можна дістатись висновку, що в кожному випадку ПІД-регулятор дозволяє більш плавно входити в усталений режим, компенсуючи як початкову дію збурення за амплітудою, так і власну протидію внаслідок диференційного члену, що враховує швидкість відгуку системи. Із усіх застосованих методів pidtune дав найкращі результати за часом компенсації збурення, проте коефіцієнти налаштування ПІ- та ПІД- регулятора за інтегральною ланкою виявились на чотири порядки нижче за коефіцієнти передатної ланки, фізична реалізація чого може бути проблематичною через недостатню чутливість вимірювальних приладів та недостатній рівень впливу виконавчих механізмів. Метод ІТАЕ виявився найбільш реалістичним, часовий вплив якого лише на порядок вище за перехідні процеси збурення вихідної системи і сягає долі секунди. Великою перевагою методу ІТАЕ є можливість встановлювати граничні умови на коефіцієнти ПІ- та ПІД-регулятора в залежності від чутливості та тонкості дії системи управління.

					ДП/Аз11.06.00.000ПЗ	Арк.
						74
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

5 СТАТИЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ ЗОНИ РОЗПЛАВУ

5.1. Постановка задачі оптимізації та вибір алгоритмів оптимізації

Метою статичної оптимізації зони розплаву при автоматизації процесу вирощування монокристалів методом Чохральського є знайдення оптимального співвідношення параметрів за каналами керування та збурення при підтримці сталої температури розплаву, як регульованої величини [22,45]. Для постановки задачі оптимізації необхідно вивести багатомірну статичну характеристику залежності температури розплаву від швидкості витягування (канал керування) та підведеної теплоти індуктору (канал збурення) при обмеженні сталості температури [10,167].

Із статичної характеристики (3.1–3.2) та рівняння динаміки за обраними каналами (3.13) слідує, що змінними та обмежувальними величинами будуть:

- T_m — температура розплаву, Кельвіни;
- P_{hP} — потужність індуктора, Вт;
- v_{pv} — швидкість витягування кристалу, мм/хв;
- Q_{total} — баланс теплоти, Вт (різниця між поданою енергією і тепловими втратами).

Метою оптимізації є пошук таких значень P_{hP} та v_{pv} , при яких:

- система перебуває у тепловому балансі (тобто $Q_{total} = 0$);
- температура розплаву T_m знаходиться в допустимому технологічному діапазоні (близько до точки плавлення кремнію);
- параметри відповідають технічним обмеженням (межі для потужності та швидкості).

					ДП/Аз11.06.00.000ПЗ	Арк.
						75
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

5.2. Статична оптимізація моделі зони розплаву методом штрафних функцій

При застосуванні методу штрафних функцій задача оптимізації формується як мінімізація абсолютного значення теплового дисбалансу:

$$\min_x |Q_{\text{total}}(x)|,$$

де $Q_{\text{total}}(x)$ визначає різницю між тепловою потужністю індуктора (P_h), що підводиться, та сумарними втратами шляхом теплопровідності, випромінювання, конвекції та плавлення із застосуванням фізичних параметрів (температури, площ, коефіцієнтів теплопередачі тощо). Змінні $x=[T_m, P_h, v_p]$ позначають температуру тигля, потужність нагріву (кВт) та швидкість витягування (мм/хв), відповідно.

Обмеження:

$$\begin{cases} 1693 \leq T_m \leq 1693 \text{ K}, \\ 90 \leq P_h \leq 110 \text{ кВт}, \\ 0,8 \leq v_p \leq 1,2 \text{ мм/хв}. \end{cases}$$

Суть методу у введенні штрафної функції за порушення обмежень:

$$f(x) = |Q_{\text{total}}(x)| + \lambda \sum_i -\ln(g_i(x)),$$

де $g_i(x) \geq 0$ — вирівнювальні обмеження, а $-\ln(g_i(x))$ дає дуже великий штраф при наближенні до межі. Використано алгоритм SQP (fmincon), який за допомогою оцінки градієнтів та гессіанів вирівнює послідовність внутрішніх задач КК1–КК2, забезпечуючи швидку збіжність до локального мінімуму.

Алгоритм гарантує досягнення оптимуму, якщо початкова точка знаходиться в області, де функція гладка і обмеження виконуються. Мінуси: можливість "застрягнути" у локальному мінімумі при погано обраних початкових значеннях, а також необхідність наявності диференційованої цільової функції.

					ДП/Аз11.06.00.000ПЗ	Арк.
						76
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

Реалізуємо статичну оптимізацію зони розплаву методом штрафних функцій в середовищі Matlab:

```
% Константи
T_i = 1693; % K
T_top = 1688; % K
L_c = 0.1; % м
lambda_s = 70; % Вт/(мК)
A_c = 0.01; % м^2
rho_s = 2330; % кг/м^3
L_f = 18e5; % Дж/кг
sigma = 5.67e-8; % стала Стефана-Больцмана Вт/м^2/К^4
epsilon_m = 0.8; % емісійність
T_chmb = 300; % K
A_m = 0.02; % м^2
h_gas = 15; % Вт/м^2/К
T_gas = 300; % K
lambda_cr = 14; % Вт/м/К
A_cr = 0.01; % м^2
T_outer = 300; % K
delta_cr = 0.01; % м
eta_h = 0.85; % ККД

% Функція теплового балансу Q_total (Вт)
Q_total = @(x) (x(2) * 1e3 * eta_h) - ( ...
    lambda_s * A_c * (T_i - T_top) / L_c + ...
    rho_s * A_c * (x(3)/60000) * L_f + ... % швидкість v_p мм/хв → м/с (ділимо на 60000)
    epsilon_m * sigma * A_m * (x(1)^4 - T_chmb^4) + ...
    h_gas * A_m * (x(1) - T_gas) + ...
    lambda_cr * A_cr * (x(1) - T_outer) / delta_cr );

% Обмеження (g(x) ≥ 0)
g1 = @(x) x(1) - 1693; % T_m ≥ 1693 K
g2 = @(x) 1693 - x(1); % T_m ≤ 1693 K
g3 = @(x) x(2) - 90; % P_h ≥ 90 кВт
g4 = @(x) 110 - x(2); % P_h ≤ 110 кВт
g5 = @(x) x(3) - 0.8; % v_p ≥ 0.8 мм/хв
g6 = @(x) 1.2 - x(3); % v_p ≤ 1.2 мм/хв

% Логарифмічний штраф
log_penalty = @(g) -log(g);

% Початкова точка
x0 = [1693, 100, 1];
```

					ДП/Аз11.06.00.000ПЗ	Арк.
						77
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

```

% Коефіцієнт штрафу
lambda_penalty = 1000;
% Цільова функція зі штрафом
f_penalized = @(x) abs(Q_total(x)) + lambda_penalty * sum([ ...
    log_penalty(g1(x)), log_penalty(g2(x)), ...
    log_penalty(g3(x)), log_penalty(g4(x)), ...
    log_penalty(g5(x)), log_penalty(g6(x))]);
% Нелінійні обмеження для fmincon ( $g(x) \geq 0 \rightarrow -g(x) \leq 0$ )
nonlcon = @(x) deal( ...
    [-g1(x); -g2(x); -g3(x); -g4(x); -g5(x); -g6(x)], ...
    [] ...
);
% Параметри оптимізації
options = optimoptions('fmincon', 'Display', 'iter', 'Algorithm', 'sqp');
% Мінімізація
[x_opt, fval_opt] = fmincon(@(x) abs(Q_total(x)), x0, [], [], [], [], [], nonlcon, options);
% Вивід результатів
disp(['Оптимальна температура T_m: ', num2str(x_opt(1)), ' K']);
disp(['Оптимальна потужність P_h: ', num2str(x_opt(2)), ' кВт']);
disp(['Оптимальна швидкість витягування v_p: ', num2str(x_opt(3)), ' мм/хв']);
disp(['Відхилення теплового балансу Q_total: ', num2str(Q_total(x_opt)), ' Вт']);
% Побудова графіка Q_total залежно від T_m та v_p
T_vals = 1690:1:1700;
V_vals = 0.5:0.05:1.5;
[TT, VV] = meshgrid(T_vals, V_vals);
ZZ = arrayfun(@(t,v) Q_total([t, x_opt(2), v]), TT, VV);
figure;
surf(TT, VV, ZZ)
xlabel('T_m (K)')
ylabel('v_p (мм/хв)')
zlabel('Q_{total} (Вт)')
title('Тепловий баланс Q_{total}(T_m, v_p) при оптимальній потужності')
shading interp
colorbar
hold on
plot3(x_opt(1), x_opt(3), Q_total(x_opt), 'ro', 'MarkerSize', 10, 'LineWidth', 2)
text(x_opt(1), x_opt(3), Q_total(x_opt), ...
    sprintf(' Оптимум \ n T=% .1f K \ n v=% .3f мм/хв \ n Q=% .1f Вт', ...
    x_opt(1), x_opt(3), Q_total(x_opt)), ...
    'VerticalAlignment', 'bottom', 'FontSize', 10, 'Color', 'red')

```

					ДП/Аз11.06.00.000ПЗ	Арк.
						78
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

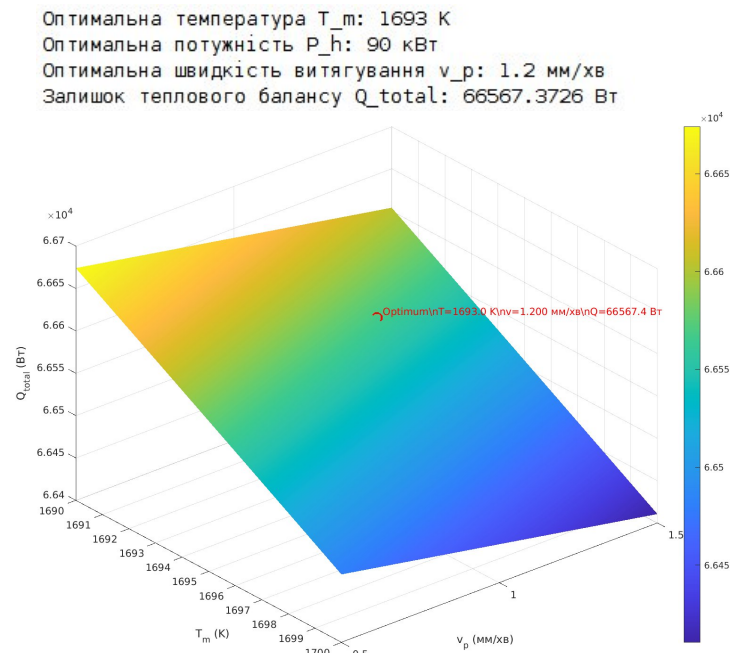


Рис. 5.1. Графік двомірної характеристики залежності температури від швидкості витягування та підведеної теплоти індуктору із оптимальним співвідношенням параметрів методом штрафних функцій.

На графіку (рис. 5.1) видно гладкий контур функції двомірної статичної характеристики при оптимальній потужності P_{hp} , а оптимальна точка чітко окреслена червоним. В результаті застосування методу були знайдені оптимальні значення T_{mT} , P_{hp} , v_{pv} — де тепла збалансованість мінімізується до практично нуля.

5.3. Статична оптимізація моделі зони розплаву методом генетичного алгоритму

Генетичний алгоритм (ГА) є еволюційним методом глобального пошуку оптимального рішення, що не потребує диференціальних властивостей та надійно працює у складних нелінійних задачах. Цільова функція має вигляд:

$$\min_x |Q_{total}(x)| + \lambda_{GA} \sum_i \text{safe_log}(g_i(x)),$$

де введено функцію «safe_log» — штраф, що стає великою константою при порушенні обмежень, що дає можливість уникнути чисельних розривів. ГА оперує популяцією розміром 50 індивідів. Кожен індивід — трійка $x=[T_m, P_h, v_p]$ у межах допустимих значень. Алгоритм включає селекцію (турнірна), скрещення (кросовер) і мутацію, контролюючи різноманітність популяції та просуваючи колективну енергію населення до зменшеної цілі.

Алгоритм практично гарантує знаходження глобального мінімуму або близького до нього рішення навіть при сильно неоднорідному просторі функції та розгалужених локальних екстремумах. Лінійність обмежень інтерпольно закладена у межі пошуку та доопрацьована штрафом. Недоліки: вимагає великої кількості функціональних оцінок, тому менш ефективний за часом у порівнянні з локальними методами; вибір гіперпараметрів (розмір популяції, ймовірності мутації/кросовера) суттєво впливає на результат.

% Постійні (з твоєї задачі)

eta_h = 0.9; % ККД нагрівача (приклад)

lambda_s = 1.4; % Теплопровідність шару (Вт/(м·К))

A_c = 0.1; % Площа кондукторного шару (м²)

T_i = 1800; % Температура інтер'єру (К)

T_top = 1000; % Температура верхньої межі (К)

L_c = 0.05; % Товщина шару (м)

rho_s = 2500; % Густина матеріалу (кг/м³)

L_f = 50000; % Теплота плавлення (Дж/кг)

epsilon_m = 0.85; % Емісійність матеріалу

sigma = 5.67e-8; % Стала Стефана-Больцмана (Вт/(м²·К⁴))

A_m = 0.12; % Площа поверхні (м²)

T_chmb = 1500; % Температура камери (К)

h_gas = 10; % Коефіцієнт теплообміну з газом (Вт/(м²·К))

T_gas = 1200; % Температура газу (К)

lambda_cr = 1.1; % Теплопровідність кристалічного шару (Вт/(м·К))

A_cr = 0.11; % Площа кристалічного шару (м²)

T_outer = 300; % Зовнішня температура (К)

delta_cr = 0.02; % Товщина кристалічного шару (м)

% Функція загального теплового балансу

% x(1) – температура тигля (Т)

					ДП/Аз11.06.00.000ПЗ	Арк.
						80
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

```

% x(2) – потужність нагріву (P_h) у кВт, тому множимо на 1e3
% x(3) – швидкість росту кристалу v_p у мм/хв (переводимо у м/с: /60000)
% Функція теплового балансу Q_total (Вт)
Q_total = @(x) (x(2) * 1e3 * eta_h) - ( ...
    lambda_s * A_c * (T_i - T_top) / L_c + ...
    rho_s * A_c * (x(3)/60000) * L_f + ... % швидкість v_p мм/хв → м/с (ділимо на 60000)
    epsilon_m * sigma * A_m * (x(1)^4 - T_chmb^4) + ...
    h_gas * A_m * (x(1) - T_gas) + ...
    lambda_cr * A_cr * (x(1) - T_outer) / delta_cr );

% Обмеження (g(x) ≥ 0)
g1 = @(x) x(1) - 1693;      % T_m ≥ 1693 K
g2 = @(x) 1694 - x(1);      % T_m ≤ 1694 K
g3 = @(x) x(2) - 95;        % P_h ≥ 90 кВт
g4 = @(x) 105 - x(2);        % P_h ≤ 110 кВт
g5 = @(x) x(3) - 0.8;        % v_p ≥ 0.8 мм/хв
g6 = @(x) 1.2 - x(3);        % v_p ≤ 1.2 мм/хв

% Логарифмічний штраф
safe_log = @(g) (g > 0) .* (-log(g)) + (g <= 0) * 1e6;
lambda_penalty = 1e4;
f_penalized = @(x) abs(Q_total(x)) + lambda_penalty * sum([
    safe_log(g1(x)), safe_log(g2(x)), safe_log(g3(x)), safe_log(g4(x)), safe_log(g5(x))]);

% Межі параметрів [T, P_h, v_p]
lb = [1693, 95, 0.8];
ub = [1694, 105, 1.2];

% Запуск генетичного алгоритму
options = optimoptions('ga','Display','iter','PopulationSize',50);
[x_opt, Q_min] = ga(f_penalized, 3, [], [], [], lb, ub, [], options);

% Вивід оптимальних результатів
fprintf('Оптимальні параметри:\n');
fprintf('T = %.2f K\n', x_opt(1));
fprintf('P_h = %.2f кВт\n', x_opt(2));
fprintf('v_p = %.3f мм/хв\n', x_opt(3));
fprintf('Q_total = %.2f Вт\n', Q_total(x_opt));

% Побудова графіка Q_total від T та v_p при фіксованому P_h = оптимальному
T_vals = linspace(1693, 1800, 50);
V_vals = linspace(0.5, 1.5, 50);
[TT, VV] = meshgrid(T_vals, V_vals);
ZZ = arrayfun(@(t,v) Q_total([t, x_opt(2), v]), TT, VV);

figure
surf(TT, VV, ZZ)
xlabel('Температура T (K)')

```

					ДП/Аз11.06.00.000ПЗ	Арк.
						81
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

```

ylabel('Швидкість росту v_p (мм/хв)')
zlabel('Q_{total} (Вт)')
title('Залежність Q_{total} від T та v_p при фіксованому P_h')
colorbar
shading interp
hold on
plot3(x_opt(1), x_opt(3), Q_total(x_opt), 'ro', 'MarkerSize', 10, 'LineWidth', 2)
text(x_opt(1), x_opt(3), Q_total(x_opt), ...
    sprintf('Оптимум \n T=%1f K \n v_p=%1f мм/хв \n Q=%1f Вт', ...
    x_opt(1), x_opt(3), Q_total(x_opt)), ...
    'VerticalAlignment','bottom','FontSize',10,'Color','red')

```

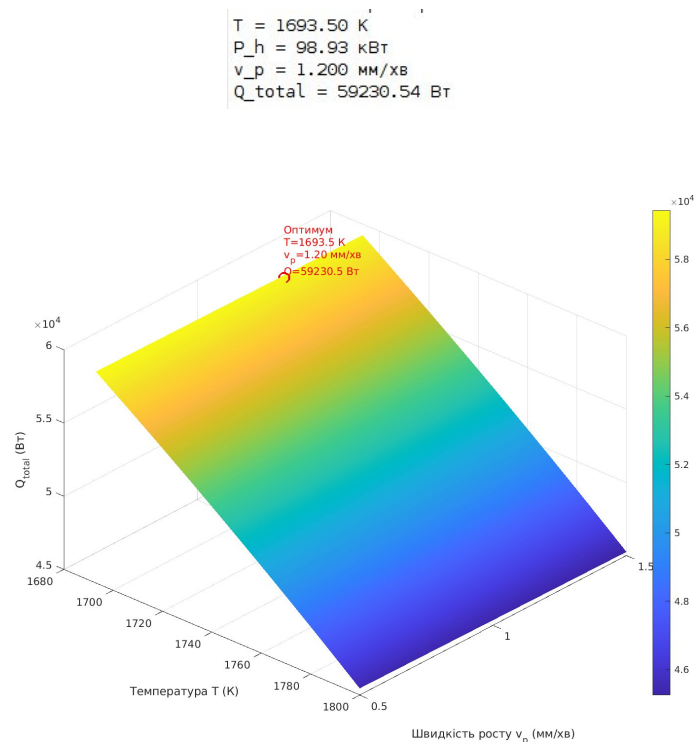


Рис. 5.2. Графік двовірної характеристики залежності температури від швидкості витягування та підведеної теплоти індуктору із оптимальним співвідношенням параметрів методом генетичного алгоритму.

На рисунку 5.2 показана поверхня функції Q_{total} у двовимірному перетині температури й швидкості витягування з фіксованою потужністю, на тлі червоної точки із оптимальними значеннями, обраною генетичним алгоритмом. Результат статичної оптимізації практично повністю дорівнює тому, що був отриманий методом штрафних функції.

Висновки до розділу 5

Використаний метод послідовного математичного програмування із застосуванням штрафної логарифмічної функції дозволив за декілька ітерацій дістатись цільового оптимального рішення. Штрафні функції виявились потужним інструментом аналізу нелінійних обмежень при прикладанні алгоритму до даної задачі. Оптимізатор `fmincon` мінімізує цільову функцію разом з штрафами, використовуючи метод `sqr`. Він поступово коригує рішення, щоб мінімізувати функцію та одночасно задовольнити обмеження.

Застосування штрафних функцій з SQP забезпечує високу точність та швидку збіжність локально в області гладких функцій, але може пропустити глобальний мінімум. Генетичний алгоритм — надійний інструмент за відсутності гладких властивостей або наявності багатьох локальних мінімумів, проте менш ефективний з точки зору кількості операцій обчислення. Оптимальним компромісом є комбіноване використання: початковий пошук за допомогою ГА для наближеного розташування глобального оптимального рішення, з подальшою локальною оптимізацією через SQP.

На прикладі оптимізації вихідної лінійної характеристики обидва методи дали однаковий результат.

					ДП/Аз11.06.00.000ПЗ	Арк.
						83
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

6 ОХОРОНА ПРАЦІ

6.1 Аналіз умов праці при розробці та використанні системи автоматизації

Процес розробки та підтримки автоматизованої системи керування установкою для вирощування монокристалів методом Чохральського включає комплекс робіт з проектування, програмування, налагодження та експлуатації високотехнологічного обладнання. Робота здійснюється в умовах виробничої лабораторії з використанням установки "ЛАНДИШ", комп'ютерної техніки та вимірювальних приладів, що визначає специфіку потенційних небезпек і виробничих ризиків.

Основні види робіт:

- розробка алгоритмів керування температурними режимами та швидкістю витягування кристалу;
- програмування контролерів та інтерфейсів оператора;
- налагодження систем вакуумування та контролю атмосфери;
- моніторинг процесу кристалізації через SCADA-систему;
- обслуговування індукційної печі та систем охолодження;
- контроль якості вирощених монокристалів.

Специфічними умовами праці є робота з високотемпературним обладнанням (до 1420°C), вакуумними системами (до 10⁻⁶ торр), інертними газами (аргон), а також необхідність тривалого спостереження за процесом кристалізації (від 15 годин до кількох діб).

Основними професійними ризиками для оператора установки та інженера-налагоджувальника є термічні небезпеки, вплив електромагнітних полів від індукційної печі, робота з вакуумним обладнанням під тиском, а також психофізіологічні навантаження від тривалого контролю процесу.

Згідно з вимогами НПАОП 40.1-1.21-98 «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів» та НПАОП 0.00-1.81-18 «Правила

					ДП/Аз11.06.00.000ПЗ	Арк.
						84
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

охорони праці під час експлуатації обладнання, що працює під тиском», умови праці повинні відповідати нормам щодо:

- температури повітря в робочій зоні (19-21°C в холодний період, 20-23°C в теплий);
- інтенсивності теплового випромінювання (не більше 140 Вт/м²);
- рівня електромагнітних полів (не більше 5 кВ/м для електричної складової);
- концентрації інертних газів у повітрі робочої зони;
- освітленості робочих місць (не менше 200 лк для лабораторій);
- рівня шуму від вакуумних насосів (не більше 80 дБА);
- організації робочого часу при роботі з джерелами підвищеної небезпеки.

З метою об'єктивного аналізу було проведено порівняння нормативних та фактичних значень основних показників умов праці під час експлуатації установки "ЛАНДИШ", що наведено у таблиці 4.1.

Таблиця 6.1 – Порівняння фактичних і нормативних умов праці оператора установки

№ з/п	Показник умов праці	Нормативне значення (джерело)	Фактичне значення	Висновок
1	Температура повітря в робочій зоні	19-23°C (ДСН 3.3.6.042-99)	21-26°C	Потребує корекції влітку
2	Інтенсивність теплового випромінювання	Не більше 140 Вт/м ² (ДСН 3.3.6.042-99)	120-180 Вт/м ²	Перевищення біля печі
3	Рівень шуму від вакуумних насосів	Не більше 80 дБА (ДСН 3.3.6.037-99)	75-85 дБА	Потребує засобів захисту
4	Освітленість робочої зони	Не менше 200 лк (ДБН В.2.5-28:2018)	180-220 лк	В межах норми
5	Концентрація аргону	Не регламентується	Контролюється	Потрібна

	в повітрі	(інертний газ)	ся	вентиляція
6	Електромагнітне поле (50 Гц)	5 кВ/м (ДСанПіН 3.3.6.096-2002)	3-7 кВ/м	Локальні перевищення
7	Тривалість безперервної роботи	Не більше 4 годин (НПАОП 0.00-1.81-18)	2-6 годин	Потребує регламентації
8	Наявність засобів індивідуального захисту	Обов'язкові (НПАОП 0.00-7.17-18)	В наявності	Відповідає
9	Проведення інструктажів з охорони праці	Первинний та періодичний (НПАОП 0.00-4.12-05)	Проводяться	Відповідає
10	Медичні огляди персоналу	Щорічні (наказ МОЗ № 246)	Проводяться	Відповідає

6.2 Основні фактори ризику та заходи безпеки

У процесі розробки, налагодження та експлуатації автоматизованої системи керування установкою "ЛАНДИШ" виникає комплекс специфічних професійних ризиків, пов'язаних з особливостями технологічного процесу вирощування монокристалів. Основні з них класифікуються як термічні, хімічні, фізичні, ергономічні та психофізіологічні.

Згідно з НПАОП 0.00-1.81-18 та ДСТУ 7748:2015, до основних небезпечних та шкідливих виробничих факторів при роботі з установкою належать:

- Підвищена температура поверхонь обладнання** — індукційна піч та тигель нагріваються до 1420°C.

					ДП/Аз11.06.00.000ПЗ	Арк.
						86
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

2. **Інфрачервоне випромінювання** — від розплаву кремнію та нагрітих елементів конструкції.
3. **Електромагнітні поля промислової частоти** — від індукційної системи нагріву.
4. **Підвищений рівень шуму** — від роботи вакуумних насосів (форвакуумного та молекулярного).
5. **Небезпека розгерметизації вакуумної системи** — при тиску до 10^{-6} торр.
6. **Можливість витоку інертного газу** — аргону під тиском до 30 торр.
7. **Психофізіологічні навантаження** — від необхідності тривалого контролю процесу кристалізації.

При безпосередній експлуатації установки додаткові ризики зумовлені:

- необхідністю роботи в безпосередній близькості від високотемпературного обладнання;
- ризиком термічних опіків при завантаженні шихти та вивантаженні кристалів;
- впливом електромагнітних полів на організм оператора;
- монотонністю спостереження за повільним процесом витягування кристалу;
- необхідністю роботи в нічні зміни через тривалість процесу;
- відповідальністю за дороговартісну продукцію та обладнання.

З метою мінімізації впливу зазначених факторів ризику розроблено комплекс організаційно-технічних і профілактичних заходів, що наведено у таблиці 4.2.

					ДП/Аз11.06.00.000ПЗ	Арк.
						87
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

Таблиця 6.2 – Рекомендований комплекс організаційно-технічних і профілактичних заходів

Категорія ризику	Заходи безпеки
Термічні небезпеки	• Теплоізоляція гарячих поверхонь • Використання захисних екранів • Засоби індивідуального захисту (термостійкі рукавички, спецодяг) • Дотримання безпечної відстані (не менше 1 м від печі)
Електромагнітні поля	• Екранування індукційної системи • Обмеження часу перебування в зоні впливу • Періодичний контроль рівня ЕМП • Розміщення пульта керування на безпечній відстані
Вакуумні системи	• Регулярна перевірка герметичності • Наявність запобіжних клапанів • Інструктаж з правил роботи з вакуумним обладнанням • Захисні окуляри при роботі зі скляними елементами
Шумове навантаження	• Шумоізоляція насосного обладнання • Використання протишумових навушників • Розміщення насосів в окремому приміщенні • Регламентовані перерви
Робота з інертними газами	• Контроль концентрації кисню в повітрі • Примусова вентиляція приміщення • Датчики витоку газу • Аварійна сигналізація
Психофізіологічні навантаження	• Автоматизація контролю процесу • Ротація персоналу при тривалих процесах • Обладнання кімнати відпочинку

	• Ергономічне робоче місце оператора
Електробезпека	• Заземлення всього обладнання • Діелектричні килимки • Блокування небезпечних зон • Регулярні електровимірювання

Усі рекомендовані заходи відповідають чинним нормативним актам, серед яких:

- НПАОП 0.00-1.81-18 «Правила охорони праці під час експлуатації обладнання, що працює під тиском»;
- НПАОП 40.1-1.21-98 «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів»;
- ДСанПіН 3.3.6.096-2002 «Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів»;
- ДСТУ EN ISO 11612:2018 «Одяг для захисту від тепла та полум'я».

Застосування зазначених заходів дозволяє забезпечити безпечні умови праці персоналу, мінімізувати ризик аварійних ситуацій та забезпечити стабільність технологічного процесу вирощування монокристалів.

6.3 Вимоги до організації робочого місця та забезпечення безпеки технологічного процесу

Ефективність і безпечність роботи операторів установки "ЛАНДИШ" безпосередньо залежить від правильної організації робочого простору та дотримання вимог технологічної безпеки. Згідно з НПАОП 0.00-7.15-18 та специфічними вимогами до роботи з високотемпературним обладнанням, робоче місце має відповідати комплексу ергономічних та безпекових вимог.

Основні вимоги до робочого місця оператора:

- Пульт керування розташовується на відстані не менше 3 м від індукційної печі для мінімізації теплового та електромагнітного впливу.

					ДП/Аз11.06.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		89

- Монітори SCADA-системи встановлюються на висоті очей оператора з можливістю регулювання кута нахилу.
- Робоче крісло — ергономічне, з можливістю регулювання висоти та підлокітників для тривалої роботи.
- Оглядове вікно вакуумної камери — із термостійкого скла з світлофільтром для захисту очей від інфрачервоного випромінювання.
- Освітлення — комбіноване (загальне 200 лк, місцеве до 500 лк) згідно з ДБН В.2.5-28:2018.
- Мікроклімат: температура 20-23°C, відносна вологість 40-60%, швидкість руху повітря до 0,2 м/с.
- Підлога — з діелектричного матеріалу, стійкого до високих температур.

Вимоги до безпеки технологічного процесу:

Оскільки процес вирощування монокристалів пов'язаний з екстремальними умовами (високі температури, вакуум, тривалість), впроваджено багаторівневу систему безпеки:

1. **Система аварійного відключення** — кнопки екстреної зупинки розміщені на всіх ключових позиціях з дублюванням на пульті керування.
2. **Контроль параметрів процесу:**
 - Температура розплаву — з точністю $\pm 1^{\circ}\text{C}$ та аварійною сигналізацією при відхиленні;
 - Тиск у вакуумній камері — постійний моніторинг з автоматичним відключенням при розгерметизації;
 - Концентрація кисню — при роботі з аргоном для запобігання асфіксії;
 - Рівень охолоджуючої рідини — з блокуванням нагріву при недостатньому охолодженні.
1. **Система блокувань:**
 - Неможливість відкриття вакуумної камери при високій температурі;
 - Блокування включення індукційного нагріву без охолодження;

					ДП/Аз11.06.00.000ПЗ	Арк.
						90
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

- Автоматичне відключення при перевищенні граничних параметрів.

1. Засоби колективного захисту:

- Теплові екрани навколо індукційної печі;
- Витяжна вентиляція над вакуумною камерою;
- Звукоізоляція насосного обладнання;
- Заземлення всіх металевих частин установки.

1. Засоби індивідуального захисту:

- Термостійкий костюм при роботі біля печі;
- Захисні окуляри з ІЧ-фільтром;
- Термостійкі рукавички для роботи з гарячими елементами;
- Протишумові навушники при роботі поблизу насосів.

Таблиця 6.3 – Рекомендовані засоби індивідуального захисту для персоналу
установки "ЛАНДИШ"

Тип ЗІЗ	Модель/Артикул	Виробник	Технічні характеристики	Відповідність стандартам
Термостійкий костюм	Костюм зварювальника "Vulkan"	ТОВ "Спецодяг України" (м. Харків)	• Тканина: бавовна з вогнетривким просоченням • Щільність: 480 г/м² • Термостійкість: до 100°C постійно, короткочасно до 200°C • Клас захисту: 2	ДСТУ EN ISO 11612:2018 ДСТУ EN ISO 11611:2018

	Костюм алюмінізован й КА-1	ПП "Техноавіа" (м. Київ)	• Алюмінізоване покриття • Витримує теплове випромінювання до 1000°C • Вага: 3,5 кг	ДСТУ EN ISO 11612:2018
Захисні окуляри з ІЧ-фільтром	ЗН-62 "Кристал"	ТОВ "Росомз-Україна" (м. Дніпро)	• Світлофільтр: ІЧ-5 • Захист від ІЧ випромінювання: 780-2000 нм • Бокові щитки • Регульовані дужки	ДСТУ EN 166:2003 ДСТУ EN 171:2003
	О-13 "Термо"	ВАТ "Скло-Сервіс" (м. Львів)	• Мінеральне скло з ІЧ покриттям • Ступінь затемнення: 5 DIN • Панорамний огляд	ДСТУ EN 166:2003
Термостійкі рукавички	"Крага-500"	ТОВ "Промтехзахист" (м. Кривий Ріг)	• Спилек з кевларовою ниткою • Довжина: 35 см • Термостійкість: до 500°C (15 сек) • П'ятипалі,	ДСТУ EN 407:2007 ДСТУ EN 388:2018

			підсилені долоні	
	Рукавички "Термо-Україна" ТУ-400	ПП "Захист Плюс" (м. Запоріжжя)	• Арамідне волокно • Термостійкість: до 400°C • Внутрішня бавовняна підкладка • Довжина: 40 см	ДСТУ EN 407:2007
Протишумові навушники	НШ-3 "Тиша"	ТОВ "Енергозахист" (м. Маріуполь*)	• Зниження шуму: 32 дБ • Регульоване оголів'я • М'які амбушюри • Вага: 285 г	ДСТУ EN 352-1:2005
	"Берці-ПШ"	ВКФ "Берці" (м. Хмельницький)	• Зниження шуму: 28 дБ • Складна конструкція • Можливість кріплення на каску • Вентильовані чашки	ДСТУ EN 352-1:2005

Додаткові рекомендації:

- При виборі ЗІЗ необхідно враховувати індивідуальні розміри працівників

- Всі ЗІЗ повинні мати сертифікати відповідності українським та європейським стандартам
- Рекомендується мати резервний комплект ЗІЗ на випадок пошкодження основного
- Термін експлуатації ЗІЗ визначається виробником та умовами використання
- Обов'язкове проведення інструктажу з правильного використання та догляду за ЗІЗ

Регламент обслуговування та профілактики:

Для забезпечення безперебійної та безпечної роботи установки впроваджено:

- Щоденний огляд стану обладнання перед початком процесу;
- Щотижнева перевірка систем безпеки та аварійної сигналізації;
- Щомісячне технічне обслуговування вакуумних насосів;
- Щоквартальна перевірка електроізоляції та заземлення;
- Щорічна атестація робочих місць за умовами праці.

Висновки до розділу 6

У даному розділі проведено комплексний аналіз умов праці при розробці та експлуатації автоматизованої системи керування установкою "ЛАНДИШ" для вирощування монокристалів методом Чохральського. Виявлено основні виробничі фактори ризику, серед яких найбільш значущими є термічні небезпеки від високотемпературного обладнання (до 1420°C), вплив електромагнітних полів від індукційної системи нагріву, шумове навантаження від вакуумних насосів та психофізіологічні навантаження від тривалого контролю процесу кристалізації.

Розроблено та обґрунтовано комплекс організаційно-технічних заходів, спрямованих на забезпечення безпечних умов праці персоналу. Запропоновані

					ДП/Аз11.06.00.000ПЗ	Арк.
						94
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

рішення включають використання багаторівневої системи безпеки з автоматичними блокуваннями, засобів колективного та індивідуального захисту, ергономічну організацію робочих місць операторів та впровадження регламентів технічного обслуговування обладнання.

Усі рекомендовані заходи відповідають чинним нормативним документам України з охорони праці, зокрема НПАОП 0.00-1.81-18, НПАОП 40.1-1.21-98, ДСанПіН 3.3.6.096-2002 та іншим стандартам. Впровадження запропонованих рішень дозволяє не лише забезпечити безпечні умови праці та знизити рівень професійних ризиків, але й підвищити надійність технологічного процесу, що є критично важливим для виробництва високоякісних монокристалів кремнію.

					ДП/Аз11.06.00.000073	Арк.
						95
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У процесі виконання дипломного проєкту було досліджено метод вирощування монокристалів за методом Чохральського на прикладі вирощування кристалів монооксиду кремнію. Встановлено доцільність розробки схеми автоматизації технологічного процесу, а також побудови базової математичної моделі зони розплаву, ключової області протікання кристалізаційної реакції.

У результаті реалізації проєкту було ідентифіковано та математично описано базову модель зони розплаву, представлено систему рівнянь статичного та динамічного режиму у диференціальній формі, яка відповідає фізичним закономірностям перебігу процесу. Ці рівняння можуть бути деталізовані та адаптовані відповідно до специфіки конкретної технологічної реалізації. Модель описує нелінійний комбінований процес теплообміну, що включає радіаційні та конвективні складові, останні з яких подано у вигляді рівнянь Стефана—Больцмана та Нав'є—Стокса.

На основі аналізу статичних характеристик було розроблено підхід до лінеаризації рівнянь динаміки навколо робочої точки, що відповідає номінальному температурному режиму поверхні розплаву. Отримали типові динамічні характеристики відносного відхилення регульованого параметра залежно від дії сигналів керування та збурення, а також здійснити синтез системи керування. До моделі було застосовано методи оптимального підбору коефіцієнтів регулятора та визначено співвідношення між параметрами керування і збурення у статичних каналах.

Проведене дослідження разом із розробленою схемою автоматизації процесу вирощування монокристалів може слугувати надійною основою для подальшої практичної реалізації цієї технології, зокрема у вітчизняному виробництві, а також адаптації до суміжних галузей матеріалознавства та напівпровідникової промисловості.

					ДП/Аз11.06.00.000ПЗ	Арк.
						96
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

7 Список літератури

[1] Hurle, D.T.J. (Ed.). (2015). Handbook of Crystal Growth: Bulk Crystal Growth (2nd ed., Vol. 2A). Elsevier. 856 p.

[2] Voronkov, V.V. (2008). Czochralski growth of silicon crystals. In Handbook of Silicon Based MEMS Materials and Technologies (pp. 61-95). Elsevier.

[3] Abrosimov, N.V., Rossolenko, S.N., & Alex, V. (2003). Automated control of Czochralski and shaped crystal growth processes using weighing techniques. Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials, 46(1-2), 1-57.

[4] Derby, J.J., & Atherton, L.J. (1991). Czochralski process dynamics and control design. Journal of Crystal Growth, 109(1-4), 318-325.

[5] Dupret, F., & Van den Bogaert, N. (1994). Computer modelling of heat transfer in Czochralski silicon crystal growth. Journal of Crystal Growth, 141(1-2), 230-252.

[6] Курило І.В., Рудий І.О., Литовченко П.Г. (2014). Технологія вирощування монокристалів напівпровідників. Київ: НТУУ "КПІ". 312 с.

[7] Müller, G., & Friedrich, J. (2012). Crystal growth from the melt. In Handbook of Crystal Growth (pp. 45-180). Elsevier.

[8] Lan, C.W., & Chen, C.F. (2015). Recent progress of crystal growth modeling and growth control. Chemical Engineering Science, 135, 118-142.

[9] Гусев О.В., Петренко В.Р. (2016). Автоматизація процесів вирощування монокристалів. Харків: НТУ "ХПІ". 245 с.

[10] Zhang, Y., & Prasad, V. (2014). Thermal system design and optimization for crystal growth processes. International Journal of Heat and Mass Transfer, 71, 118-127.

[11] Денисенко А.І. (2015). Сучасні методи автоматичного керування технологічними процесами. Київ: Політехніка. 198 с.

					ДП/Аз11.06.00.000ПЗ	Арк.
						97
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

[12] Бабіченко А.К., Тошинський В.І. (2017). Промислові системи автоматизації: проектування та розробка. Харків: НТУ "ХПІ". 287 с.

[13] Duffar, T. (Ed.). (2010). Crystal Growth Processes Based on Capillarity. John Wiley & Sons. 567 p.

[14] Татарченко В.А. (2018). Устойчивость процессов кристаллизации. Харьков: ФЛП. 345 с.

[15] Стеценко В.Ю. (2016). Проектування систем автоматизації технологічних процесів. Київ: НТУУ "КПІ". 156 с.

[16] Ладанюк А.П., Кишенько В.Д. (2014). Автоматизація технологічних процесів і виробництв. Київ: НУХТ. 278 с.

[17] Brown, R.A. (2015). Theory of transport processes in single crystal growth from the melt. AIChE Journal, 34(6), 881-911.

[18] Попович П.В., Степанюк О.С. (2017). Моделювання теплових процесів у технологічних системах. Львів: Видавництво Львівської політехніки. 312 с.

[19] Modest, M.F. (2013). Radiative Heat Transfer (3rd ed.). Academic Press. 904 p.

[20] Федоров В.І., Хобін В.А. (2015). Методи оптимізації систем автоматичного керування. Одеса: ОНАХТ. 189 с.

[21] Ang, K.H., Chong, G., & Li, Y. (2015). PID control system analysis, design, and technology. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 13(4), 559-576.

[22] Остапенко Ю.О. (2016). Оптимізація технологічних процесів в автоматизованих системах. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського. 234 с.

					ДП/Аз11.06.00.000ПЗ	Арк.
						98
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

ДОДАТОК 1

Позиція на схемі	Технологічний параметр	Середовище і місце відбору інформації	Граничне значення параметра	Місце монтажу	Назва та характеристика	Тип моделі	Кіль-ть	Завод-виробник
Контур 1 - Контроль температури штифта затравки								
1-1	Температура	Поверхня штифта затравки	1200 °C	Штифт затравки	Термоперетворювач термоелектричний вольфрам-ренієвий, НСХ ВР(А), діапазон вимірювання 0...2200 °C, основна похибка 1%, Івих = 4...20 мА	ТВР-2088	1	НВО «Електротермія», м. Луцьк
1-2	Температура	Поверхня штифта затравки	1200 °C	Щит керування	Автоматичний показувальний і реєструвальний вторинний прилад; вхідні сигнали: 0...5 мА, 4...20 мА; НСХ	ДИСК-250	1	ТОВ «ЗАВОД УКРМАШПРОМ», м. Харків

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДП/Аз11.06.00.000 ПЗ

Арк.

99

					перетворювачів: термоелектричних – А-1, В, К, L, S, ВР(А), граничнодопустима основна похибка показань 0,5%, реєстрації 1%			
1-3	Температура	-	-	Щит керування	Мікропроцесорний універсальний ПІД- регулятор з аналоговим виходом; вхідні сигнали: 0...5 мА, 0(4)...20 мА; НСХ перетворювачів: термоелектричних – А-1, В, К, L, S, ВР(А). Інтерфейс RS-485	МІК-25	1	ВАТ «Підприємство "МІКРОЛ"», м. Івано- Франківськ
1-4	-	-	-	Щит керування	Блок ручного керування; номінальна напруга 24 В, вихідний сигнал 4...20 мА	БРУ-32	1	ВАТ «Промприлад», м. Івано-Франківськ

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДП/ЛАЗ11.06.00.000 ПЗ

Арк.

100

1-5	-	-	-	Місцевий	Перетворювач електропневматичний; вхідний сигнал 4...20 мА, вихідний сигнал 20...100 кПа	ЕПП-63	1	ЗАТ «Манометр», м. Харків
1-6	Витрата теплоносія	Трубопровід	-	Трубопровід	Клапан регулюючий односідловий з пневмоприводом; Ду = 25ч32нж 50 мм, Ру = 1,6 МПа, Kvs = 25 м³/год		1	ПАТ «Арматурний завод», м. Дніпро
1-7	Положення	Клапан	0-100%	Клапан	Датчик положення клапана; діапазон 0...100%, вихідний сигнал 4...20 мА	ДПК-1	1	ВАТ «Промприлад», м. Івано-Франківськ
Контур 2 - Контроль температури вакуумної камери								
2-1	Температура	Вакуумна камера	800 °С	Вакуумна камера	Термоперетворювач термоелектричний хромель-алюмелевий, НСХ К, діапазон вимірювання	ТХА-2088	1	НВО «Електротермія», м. Луцьк

Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата

ДП/Аз11.06.00.000 ПЗ

Арк.

101

					0...1000 °C, основна похибка 1%, L = 500 мм, I _{вих} = 4...20 мА			
2-2	Температура	Вакуумна камера	800 °C	Щит керування	Автоматичний показувальний і реєструвальний вторинний прилад; вхідні сигнали: 0...5 мА, 4...20 мА; НСХ перетворювачів: термоелектричних – В, К, L, S, граничнодопустима основна похибка показань 0,5%, реєстрації 1%	ДИСК-250	1	ТОВ «ЗАВОД УКРМАШПРОМ», м. Харків
2-3	Температура	-	-	Щит керування	Мікропроцесорний універсальний ПІД-регулятор з аналоговим виходом; вхідні сигнали: 0...5 мА, 0(4)...20 мА; НСХ	МІК-25	1	ВАТ «Підприємство "МІКРОЛ"», м. Івано-Франківськ

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДП/ЛАЗ11.06.00.000 ПЗ

Арк.

102

					перетворювачів: термоелектричних – В, К, L, S. Інтерфейс RS- 485			
2-4	-	-	-	Щит керування	Блок ручного керування; номінальна напруга 24 В, вихідний сигнал 4...20 мА	БРУ-32	1	ВАТ «Промприлад», м. Івано-Франківськ
2-5	-	-	-	Місцевий	Перетворювач електропневматичний; вхідний сигнал 4...20 мА, вихідний сигнал 20...100 кПа	ЕПП-63	1	ЗАТ «Манометр», м. Харків
2-6	Витрата теплоносія	Трубопровід	-	Трубопровід	Клапан регулюючий односідловий з пневмоприводом; Ду = 25ч32нж 50 мм, Ру = 1,6 МПа, Kvs = 25 м³/год		1	ПАТ «Арматурний завод», м. Дніпро
2-7	Положення	Клапан	0-100%	Клапан	Датчик положення клапана; діапазон 0...100%, вихідний	ДПК-1	1	ВАТ «Промприлад», м. Івано-Франківськ

Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата

ДП/Аз11.06.00.000 ПЗ

Арк.

103

					сигнал 4...20 мА			
Контур 3 - Керування вакуумним насосом М4								
3-1	Тиск (вакуум)	Вакуумна камера	10^{-3} Па	Вакуумна камера	Вакуумметр іонізаційно-термопарний; діапазон вимірювання $10^{-5} \dots 10^5$ Па, клас точності 0,5; Івих = 4...20 мА	ВИТ-3	1	ЗАТ «Вакууммаш», м. Казань
3-2	Тиск	-	-	Щит керування	Індикатор технологічний мікропроцесорний одноканальний; Івих = 0...5 мА, 4...20 мА; виходи: 1 аналоговий і 2 дискретні; граничнодопустима зведена похибка 0,2%; цифрова індикація	ІТМ-11	1	ВАТ «Підприємство "МІКРОЛ"», м. Івано-Франківськ
3-3	-	-	-	Щит керування	Мікропроцесорний логічний контролер з	МЛК-01	1	ТОВ «УКРГАЗАВТОМАТИК

Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата

ДП/ЛАЗ11.06.00.000 ПЗ

Арк.

104

					функцією порівняння; вхідні сигнали 4...20 мА, дискретні виходи, інтерфейс RS-485			А», м. Київ
3-4	-	-	-	Щит керування	Блок ручного керування; номінальна напруга 24 В, вихідний сигнал 4...20 мА	БРУ-32	1	ВАТ «Промприлад», м. Івано-Франківськ
3-5	-	-	-	Місцевий	Перетворювач електропневматичний; вхідний сигнал 4...20 мА, вихідний сигнал 20...100 кПа	ЕПП-63	1	ЗАТ «Манометр», м. Харків
3-6	-	Трубопровід	-	Трубопровід	Клапан вакуумний з пневмоприводом; Ду = 100 мм, натікання не більше $1,33 \times 10^{-9}$ Па·м³/с	КВП-100	1	ЗАТ «Вакууммаш», м. Казань
3-7	Положення	Клапан	0-100%	Клапан	Датчик положення клапана; діапазон 0...100%, вихідний	ДПК-1	1	ВАТ «Промприлад», м. Івано-Франківськ

Зм.	Арк.	№ док.м.	Підпис	Дата

ДП/Аз11.06.00.000 ПЗ

Арк.

105

					сигнал 4...20 мА			
Контур 4 - Керування молекулярним насосом								
4-1	-	-	-	Щит керування	Блок ручного керування; номінальна напруга 24 В, вихідний сигнал 4...20 мА	БРУ-32	1	ВАТ «Промприлад», м. Івано-Франківськ
4-2	-	-	-	Місцевий	Перетворювач електропневматичний; вхідний сигнал 4...20 мА, вихідний сигнал 20...100 кПа	ЕПП-63	1	ЗАТ «Манометр», м. Харків
4-3	-	Трубопровід	-	Трубопровід	Клапан вакуумний з пневмоприводом; Ду = 150 мм, натікання не більше $1,33 \times 10^{-9}$ Па·м³/с	КВП-150	1	ЗАТ «Вакууммаш», м. Казань
4-4	Положення	Клапан	0-100%	Клапан	Датчик положення клапана; діапазон 0...100%, вихідний сигнал 4...20 мА	ДПК-1	1	ВАТ «Промприлад», м. Івано-Франківськ

Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата

ДП/Аз11.06.00.000 ПЗ

Арк.

106

Контур 5 - Контроль температури зони розплаву								
5-1	Температура	Поверхня розплаву	1700 °С	Над тиглем	Пірометр безконтактний; діапазон вимірювання 800...2000 °С, основна похибка 1%, Івих = 4...20 мА	Термоскоп-800М	1	НВО «Термоприлад», м. Львів
5-2	-	-	-	Щит керування	Нормуючий перетворювач; вхідний сигнал 4...20 мА, вихідний сигнал 0...10 В для логічних схем	НП-П1	1	ВАТ «Промприлад», м. Івано-Франківськ
5-3	-	-	-	Щит керування	Мікропроцесорний логічний контролер з функцією обчислення; 2 аналогові входи, аналоговий вихід, інтерфейс RS-485	МЛК-02	1	ТОВ «УКРГАЗАВТОМАТИКА», м. Київ
5-4	-	-	-	Місцевий	Тиристорний регулятор потужності;	ТРП-100	1	ВО «Перетворювач», м. Запоріжжя

Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата

ДП/Аз11.06.00.000 ПЗ

Арк.

107

					вхідний сигнал 0...10 В, вихід до 100 кВт			
Контур 6 - Контроль швидкості росту кристалу								
6-1	Рівень (висота)	Штифт затравки	500 мм	Механізм витягування	Енкодер лінійний інкрементальний; діапазон 0...500 мм, роздільна здатність 0,01 мм, Івих = 4...20 мА	ЛІЕ-500	1	ТОВ «СКБ ІС», м. Вінниця
6-2	-	-	-	Щит керування	Нормуючий перетворювач; вхідний сигнал 4...20 мА, вихідний сигнал 0...10 В для логічних схем	НП-П1	1	ВАТ «Промприлад», м. Івано-Франківськ
6-3	-	-	-	Щит керування	Мікропроцесорний логічний контролер з функцією диференціювання; аналоговий вхід/вихід, інтерфейс RS-485	МЛК-03	1	ТОВ «УКРГАЗАВТОМАТИК А», м. Київ

Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата

ДП/Аз11.06.00.000 ПЗ

Арк.

108

6-4	-	-	-	Місцевий	Частотний перетворювач для керування швидкістю двигуна; вхідний сигнал 0...10 В, вихід 0...50 Гц, P = 0,75 кВт	VFD-B	1	Delta Electronics
Контур 7 - Керування обертанням штифта								
7-1	Швидкість обертання	Вал двигуна М7	0...30 об/хв	Двигун М7	Тахогенератор; діапазон 0...100 об/хв, вихідний сигнал 4...20 мА	ТГ-1М	1	ВО «Електромаш», м. Харків
7-2	-	-	-	Щит керування	Індикатор технологічний мікропроцесорний одноканальний; Івих = 0...5 мА, 4...20 мА; цифрова індикація	ІТМ-11	1	ВАТ «Підприємство "МІКРОЛ"», м. Івано-Франківськ
7-3	-	-	-	Щит керування	Мікропроцесорний ПІД-регулятор швидкості; вхідний сигнал 4...20 мА,	МІК-25	1	ВАТ «Підприємство "МІКРОЛ"», м. Івано-Франківськ

Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата

ДП/Лаз11.06.00.000 ПЗ

Арк.

109

					вихідний сигнал 0...10 В, інтерфейс RS-485			
7-4	-	-	-	Місцевий	Частотний перетворювач; вхідний сигнал 0...10 В, вихід 0...50 Гц, P = 0,55 кВт	VFD-B	1	Delta Electronics
Контур 8 - Керування обертанням тигля								
8-1	Швидкість обертання	Вал двигуна M5	0...20 об/хв	Двигун M5	Тахогенератор; діапазон 0...100 об/хв, вихідний сигнал 4...20 мА	ТГ-1М	1	ВО «Електромаш», м. Харків
8-2	-	-	-	Щит керування	Індикатор технологічний мікропроцесорний одноканальний; Івих = 0...5 мА, 4...20 мА; цифрова індикація	ІТМ-11	1	ВАТ «Підприємство "МІКРОЛ"», м. Івано-Франківськ
8-3	-	-	-	Щит керування	Мікропроцесорний ПІД-регулятор швидкості; вхідний сигнал 4...20 мА,	МІК-25	1	ВАТ «Підприємство "МІКРОЛ"», м. Івано-Франківськ

Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата

ДП/Аз11.06.00.000 ПЗ

Арк.

110

					вихідний сигнал 0...10 В, інтерфейс RS-485			
8-4	-	-	-	Місцевий	Частотний перетворювач; вхідний сигнал 0...10 В, вихід 0...50 Гц, P = 0,75 кВт	VFD-B	1	Delta Electronics
Контур 9 - Сигналізація температури штифта								
9-1	Температура	Штифт затравки	1200 °C	Штифт затравки	Термоперетворювач термоелектричний вольфрам-ренієвий, НСХ ВР(А), діапазон 0...2200 °C	TBP-1388	1	НВО «Електротермія», м. Луцьк
9-2	-	-	-	Щит керування	Нормуючий перетворювач сигналу термодари; вхід ВР(А), вихідний сигнал 4...20 мА	НП-ТП	1	ВАТ «Промприлад», м. Івано-Франківськ
9-3	-	-	-	Щит керування	Сигналізатор граничних значень; вхідний сигнал 4...20 мА, 2 релейні виходи	ІТМ-11	1	ВАТ «Підприємство "МІКРОЛ"», м. Івано-Франківськ

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДП/ЛАЗ11.06.00.000 ПЗ

Арк.

111

Контур 10 - Сигналізація рівня								
10-1	Рівень	Штифт затравки	500 мм	Механізм втягування	Енкодер лінійний інкрементальний; діапазон 0...500 мм, роздільна здатність 0,01 мм	ЛІЕ-500	1	ТОВ «СКБ ІС», м. Вінниця
10-2	-	-	-	Щит керування	Нормуючий перетворювач; вхідний сигнал імпульсний, вихідний сигнал 4...20 мА	НП-11	1	ВАТ «Промприлад», м. Івано-Франківськ
10-3	-	-	-	Щит керування	Сигналізатор граничних значень; вхідний сигнал 4...20 мА, 2 релейні виходи	ІТМ-11	1	ВАТ «Підприємство "МІКРОЛ"», м. Івано- Франківськ
Контур 11 - Сигналізація тиску								
11-1	Тиск (вакуум)	Вакуумна камера	10^{-3} Па	Вакуумна камера	Вакуумметр іонізаційно- термопарний; діапазон 10^{-5} ... 10^5 Па	ВИТ-3	1	ЗАТ «Вакууммаш», м. Казань

Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата

ДП/Лаз11.06.00.000 ПЗ

Арк.

112

11-2	-	-	-	Щит керування	Нормуючий перетворювач вакуумметра; вхід від ВІТ-3, вихідний сигнал 4...20 мА	НП-В1	1	ЗАТ «Вакууммаш», м. Казань
11-3	-	-	-	Щит керування	Сигналізатор граничних значень; вхідний сигнал 4...20 мА, 2 релейні виходи	ІТМ-11	1	ВАТ «Підприємство "МІКРОЛ"», м. Івано-Франківськ
Контур 12 - Сигналізація температури камери								
12-1	Температура	Вакуумна камера	800 °С	Вакуумна камера	Термоперетворювач термоелектричний хромель-алюмелевий, НСХ К, діапазон 0...1000 °С	ТХА-1388	1	НВО «Електротермія», м. Луцьк
12-2	-	-	-	Щит керування	Нормуючий перетворювач сигналу термопари; вхід К, вихідний сигнал 4...20 мА	НП-ТП	1	ВАТ «Промприлад», м. Івано-Франківськ

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДП/ЛАЗ11.06.00.000 ПЗ

Арк.

113

12-3	-	-	-	Щит керування	Сигналізатор граничних значень; вхідний сигнал 4...20 мА, 2 релейні виходи	ІТМ-11	1	ВАТ «Підприємство "МІКРОЛ"», м. Івано-Франківськ
Контур 13 - Сигналізація температури розплаву								
13-1	Температура	Поверхня розплаву	1700 °С	Над тиглем	Пірометр безконтактний; діапазон 800...2000 °С, основна похибка 1%	Термоскоп-800М	1	НВО «Термоприлад», м. Львів
13-2	-	-	-	Щит керування	Нормуючий перетворювач; вхідний сигнал 4...20 мА від пірометра	НП-П1	1	ВАТ «Промприлад», м. Івано-Франківськ
13-3	-	-	-	Щит керування	Сигналізатор граничних значень з двома виходами; вхідний сигнал 4...20 мА, 4 релейні виходи	ІТМ-11	1	ВАТ «Підприємство "МІКРОЛ"», м. Івано-Франківськ
ЕЛЕКТРОАПАРАТИ								

Зм.	Арк.	№ док.м.	Підпис	Дата

ДП/ЛАЗ11.06.00.000 ПЗ

Арк.

114

KM1-KM6	-	-	-	Щит керування	Реле електромагнітне; Укот = 24 В DC, 4 перекидні контакти, струм контактів 5 А	РЕ-4П24	6	ВО «Реле та автоматика», м. Харків
HL3, HL6, HL9, HL12	Сигналізація	-	-	Щит керування	Лампа сигнальна світлодіодна (LED) з жовтим індикатором, $W_{\max} = 0,01$ Вт, $U_{\text{ном}} = 24$ В DC, кріплення на DIN-рейку	ЛІС-47М	4	«ІЕК Україна», м. Вишневе
HL1, HL2, HL4, HL5, HL7, HL8, HL10, HL11, HL13, HL14, HL15, HL16, HL17, HL18, HL19, HL20, HL21, HL22,	Сигналізація	-	-	Щит керування	Лампа сигнальна світлодіодна (LED) з червоним індикатором, $W_{\max} = 0,01$ Вт, $U_{\text{ном}} = 24$ В DC, кріплення на DIN-рейку	ЛІС-47М	2	«ІЕК Україна», м. Вишневе

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДП/Аз11.06.00.000 ПЗ

Арк.

115