

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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеню вищої освіти – магістр
за освітньо-професійною програмою
«Кіберфізичні системи в промисловості, бізнесі та транспорті»

зі спеціальності

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

тема роботи:

***«Автоматизована система координатного 3D керування
направлюванням зварювального дроту для відновлення металевих
частин обладнання»***

Виконав ст. гр. АКІТР-24-1м. _____ Філонов М. В.

Керівник _____ Курганов І. Д.

Нормоконтроль _____ Маринич І. А.

Завідувач кафедри _____ Рубан С. А.

Кривий Ріг – 2025

КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет: інформаційних технологій

Кафедра: автоматизації, комп'ютерних наук і технологій

Ступінь вищої освіти: Магістр

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри: к.т.н. Рубан С.А.

« 15 » липня 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу магістра

студентові групи АКІТР-24-1м. Філонову Максиму Віталійовичу

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Автоматизована система координатного 3D керування наплавленням зварювального дроту для відновлення металевих частин обладнання»

затверджено наказом по університету № 258с від 13.05.2025 р.

2. Термін здачі кваліфікаційної роботи: 01.12.2025 р.

3. Склад кваліфікаційної роботи: Пояснювальна записка обсягом **95с.**, додатки, презентація у Microsoft PowerPoint (**17** слайдів) в електронному та друкованому вигляді

4. Консультанти кваліфікаційної роботи:

Розділ 1-3

доц. Курганов І. Д.

5. Календарний план:

№	Етапи роботи	Термін виконання
1	<i>Вступ</i>	<i>10.02.25</i>
2	<i>Розділ 1</i>	<i>15.04.25</i>
3	<i>Розділ 2</i>	<i>18.07.25</i>
4	<i>Розділ 3</i>	<i>19.11.25</i>
5	<i>Висновки</i>	<i>20.11.25</i>
6	<i>Оформлення кваліфікаційної роботи</i>	<i>25.11.25</i>
7	<i>Підготовка презентації та графічного матеріалу</i>	<i>28.11.25</i>
8	<i>Підготовка доповіді до захисту</i>	<i>01.12.25</i>

6. Дата видачі завдання: 24.12.2024р.

Керівник _____ /Курганов І. Д./

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

Із чинним Положенням про академічну доброчесність Криворізького національного університету ознайомлений.

Чітко усвідомлюю, що в разі виявлення у кваліфікаційній роботі умисних порушень робота не допускається до захисту або оцінюється незадовільно.

Здобувач _____ / Філонов М. В./

АНОТАЦІЯ

Філонов М. В. Автоматизована система координатного 3D керування наплавлювання зварювального дроту для відновлення металевих частин обладнання : кваліфікаційна робота магістра : 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка. Кривий Ріг: Криворізький національний університет, 2025. 82 с.

Об'єктом дослідження є процес автоматизованого відновлення геометричних параметрів зношених деталей машин методом електродугового наплавлення.

Метою роботи є підвищення точності та якості відновлення деталей шляхом розробки автоматизованої системи з адаптивним керуванням траєкторією та енергетичними параметрами процесу.

Методи дослідження: системний аналіз, математичне моделювання кінематики та теплових процесів, теорія автоматичного керування, нейромережеві алгоритми обробки зображень.

Отримані результати: У першому розділі проаналізовано існуючі методи наплавлення та обґрунтовано доцільність створення гібридної системи на базі технології WAAM. У другому розділі розроблено математичні моделі кінематики 3-осьового маніпулятора та процесу формування валика (за Лебедевим), синтезовано цифровий ПД-регулятор стабілізації довжини дуги. У третьому розділі запропоновано апаратну реалізацію системи на базі мікроконтролера STM32 та драйверів крокових двигунів, розроблено нейромережевий алгоритм корекції траєкторії на основі даних 3D-сканування, створено цифровий двійник системи у середовищі Matlab/Simulink.

ANNOTATION

Filonov M. V. Automated system of coordinate 3D control of welding wire surfacing for the restoration of metal equipment parts : master's qualification thesis : 174 – Automation, Computer-Integrated Technologies and Robotics. Kryvyi Rih : Kryvyi Rih National University, 2025. 82 p.

The object of research is the process of automated restoration of geometric parameters of worn machine parts by electric arc surfacing.

The purpose of the work is to improve the accuracy and quality of parts restoration by developing an automated system with adaptive control of the trajectory and energy parameters of the process.

Research methods: system analysis, mathematical modeling of kinematics and thermal processes, automatic control theory, neural network image processing algorithms.

Results obtained: In the first section, existing surfacing methods are analyzed, and the feasibility of creating a hybrid system based on WAAM technology is substantiated. In the second section, mathematical models of the 3-axis manipulator kinematics and bead formation process (according to Lebedev) are developed, and a digital PID controller for arc length stabilization is synthesized. In the third section, the hardware implementation of the system based on the STM32 microcontroller and stepper motor drivers is proposed, a neural network algorithm for trajectory correction based on 3D scanning data is developed, and a digital twin of the system is created in the Matlab/Simulink environment.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	4
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ 3D НАПЛАВЛЕННЯ ТА ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ	11
1.1 Призначення системи та область застосування	11
1.2 Загальна структура та склад АСК 3D-наплавлення.....	11
1.3 Технічні характеристики основних вузлів	12
1.4 Вимоги до точності, надійності та безпеки	12
1.5 Підготовка поверхні та сканування зони відновлення.....	13
1.6 Планування траєкторій (CAD/CAM) і генерація УП	14
1.7 Виконання наплавлення	14
1.8 Аналіз джерел	16
1.9 Патентний пошук	23
1.10 Узагальнення проблематики	26
1.11 Пропоноване рішення	27
РОЗДІЛ 2 Ідентифікація математичної моделі та синтез керування процесом.....	30
2.1 Ідентифікація об'єкта керування та формалізована постановка задачі моделювання	30
2.1.1 Системний аналіз технологічного процесу WAAM як об'єкта керування....	30
2.1.2 Векторно-матричний опис простору станів системи	31
2.1.3 Формалізована постановка задачі оптимального керування.....	32
2.2 Розробка математичної моделі кінематики 3-осьового маніпулятора з рухомим столом	33
2.2.1 Обґрунтування кінематичної схеми та вибір систем координат.....	33
2.2.2 Матричний метод аналізу кінематики	34
2.2.3 Алгоритми інтерполяції траєкторії руху	34
2.2.4 Динамічна модель електроприводу подачі.....	35
2.3 Математичне моделювання теплофізичних процесів формоутворення	36
2.3.1 Емпіричні залежності геометричних параметрів (Модель Лебедева).....	36
2.3.2 Рівняння матеріального балансу.....	37
2.3.3 Математичне моделювання теплових процесів	38
2.4 Розробка нейромережевої моделі для адаптивної корекції траєкторії	39

	7
2.4.1 Постановка задачі інтелектуального керування	39
2.4.2 Архітектура нейронної мережі	39
2.4.3 Математична модель нейрона та операції згортки.....	40
2.4.4 Навчання моделі та функція втрат	41
2.4.5 Інтеграція нейромережі в контур керування.....	41
2.5 Синтез цифрового регулятора системи стабілізації параметрів дуги	42
2.5.1 Обґрунтування структури та закону регулювання	42
2.5.2 Математичний опис неперервного регулятора	43
2.5.3 Дискретизація закону керування для реалізації на STM32	43
2.5.4 Аналіз стійкості та налаштування параметрів	45
РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПРОГРАМНО- АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ.....	46
3.1 Розробка апаратної архітектури та електричної принципової схеми комплексу	46
3.1.1 Обґрунтування вибору обчислювального ядра.....	46
3.1.2 Проєктування силової підсистеми електроприводу	48
3.1.3 Розробка інтерфейсу керування зварювальним джерелом	48
3.1.4 Система сенсорного забезпечення та зворотного зв'язку	49
3.1.5 Заходи щодо забезпечення електромагнітної сумісності (ЕМС)	49
3.2.1 Загальна архітектура та автомат станів	50
3.2.2 Підсистема комунікації та парсингу G-коду	52
3.2.3 Планувальник руху (Motion Planner).....	53
3.2.4 Реалізація цифрового регулятора (Control Loop).....	54
3.2.5 Генерація керуючих імпульсів.....	55
3.3 Верифікація алгоритмів керування та функціональне тестування	56
3.3.1 Перевірка точності інтерполяції траєкторії.....	57
3.3.2 Тестування підсистеми адаптації	57
3.3.3 Перевірка швидкодії контуру зв'язку	58
3.4 Програмна реалізація верхнього рівня та інтеграція системи.....	59
3.4.1 Модуль генерації траєкторії (Slicer).....	60
3.4.2 Інтеграція нейромережевого компонента.....	61
3.4.3 Організація передачі даних	62

3.4. Програмна реалізація верхнього рівня керування та людино-машинний інтерфейс (НМІ)	64
3.4.1 Обґрунтування вибору засобів розробки та архітектура додатка.....	64
3.4.2 Функціональна структура графічного інтерфейсу	65
3.4.3 Алгоритм роботи підсистеми парсингу та відправки команд	66
3.4.4 Система логування та аналізу даних	66
3.4.5 Інструкція оператора з експлуатації комплексу	67
ВИСНОВКИ.....	68
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	70
ДОДАТОК А.....	74

ВСТУП

У сучасному машинобудуванні, металургії та суміжних галузях значна частина основних фондів працює в умовах підвищених механічних, абразивних і термічних навантажень, що призводить до прискореного зносу вузлів і деталей. Заміна таких елементів новими спричиняє суттєві прямі витрати та простої, тоді як технології відновлення дозволяють істотно подовжити ресурс виробів і знизити собівартість життєвого циклу обладнання. Одним із найбільш перспективних підходів є координатне 3D-наплавлення зварювальним дротом із застосуванням автоматизованих систем керування (АСК), яке поєднує точність числового програмного керування (ЧПК/ПЛК), гнучкість адитивного формування шару та можливість адаптивної корекції процесу в реальному часі.

Актуальність теми визначається потребою підвищити точність геометричного відновлення, стабільність металургійної якості наплавленого шару та відтворюваність процесу при мінімізації людського чинника. Інтеграція 3D-сканування з CAD/CAM, сенсорних систем (оптичні/лазерні профілометри, пірометри, струм/напруга дуги), а також модулів HMI/SCADA і промислових шин зв'язку забезпечує замкнене керування параметрами (швидкість подачі дроту, струм, напруга, траєкторія), що напряму впливає на продуктивність та якість. Додатково використання принципів Industry 4.0 (логування даних, цифровий двійник вузла, аналітика) відкриває шлях до прогнозного обслуговування та оптимізації режимів.

Мета роботи — обґрунтувати й підготувати основу для розроблення автоматизованої системи координатного 3D-керування процесом наплавлення зварювальним дротом для відновлення металевих деталей, яка забезпечує підвищену точність, стабільність і економічну ефективність.

Об'єкт дослідження — процес відновлення деталей методом наплавлення зварювальним дротом у координатно-керованій системі.

Предмет дослідження — методи керування траєкторією та параметрами наплавлення, програмно-апаратні засоби АСК, методи контролю якості та інтеграція з цифровими інструментами (3D-сканування, CAD/CAM, HMI/SCADA).

Завдання дослідження:

Надати формалізований опис об'єкта, складу та архітектури системи 3D-наплавлення. Описати технологічний процес від підготовки поверхні й сканування до контролю якості та постобробки. Провести огляд сучасних наукових публікацій, промислових рішень та патентів за тематикою координатного наплавлення. Виконати порівняльний аналіз переваг і недоліків підходів (MIG/MAG, TIG, плазмове, лазерне наплавлення; дріт/порошок; типи траєкторій і стратегії заповнення). Обґрунтувати вибір технології, архітектури керування та засобів контролю з урахуванням точності, продуктивності та собівартості.

Методи дослідження: аналітичний огляд літератури та патентів; системний аналіз архітектур АСК; базове математичне моделювання (кінематична та теплова постановка), планування траєкторій; розробка вимог до програмного забезпечення (інтерфейси HMI, обмін із ЧПК/ПЛК, журналювання даних), підготовка сценаріїв валідації (метрологічний контроль геометрії, макрошліфи, твердість/мікроструктура за потреби).

Наукова новизна та практична цінність полягають у поєднанні координатного керування, 3D-сканування та адаптивних алгоритмів регулювання параметрів наплавлення з урахуванням геометричних і термічних збурень процесу. Очікується покращення повторюваності якості наплавленого шару, зменшення переробок і зниження витрати матеріалу за рахунок оптимізації траєкторій та режимів.

Очікувані результати: структурно-функціональна модель АСК 3D-наплавлення; вимоги до апаратної та програмної частини; узагальнені технологічні карти; рекомендації щодо вибору режимів і засобів контролю; план інтеграції з CAD/CAM і HMI/SCADA; критерії оцінювання ефективності (точність відновлення, продуктивність, витрата дроту/енергії, частка дефектів).

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ 3D НАПЛАВЛЕННЯ ТА ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ

1.1 Призначення системи та область застосування

Автоматизована система координатного 3D-наплавлення зварювальним дротом призначена для відновлення та зміцнення металевих деталей, які втратили свої початкові геометричні параметри або експлуатаційні характеристики внаслідок зношування, корозії чи механічних пошкоджень.

Використання такої системи забезпечує[1]:

- відновлення деталей із високим рівнем точності;
- скорочення часу ремонтно-відновлювальних операцій;
- зниження витрат на закупівлю нових вузлів і агрегатів;
- підвищення ефективності використання обладнання в умовах серійного та індивідуального виробництва.

Область застосування:

- машинобудування (вали, шестерні, втулки, корпуси редукторів);
- металургія (прокатні валки, елементи доменних і сталеплавильних агрегатів);
- гірничо-збагачувальні комбінати (деталі дробарок, футеровки, ковші екскаваторів);
- авіакосмічна промисловість (лопатки турбін, деталі двигунів, несучі елементи);
- нафтогазова галузь (бурові труби, насоси, клапанна арматура).

1.2 Загальна структура та склад АСК 3D-наплавлення

Система складається з таких основних модулів:

Механічна підсистема (кінематична): портална або роботизована платформа з трьома/шістьма ступенями вільності; забезпечує просторове позиціонування зварювальної головки.

Зварювальний модуль:

джерело живлення (MIG/MAG, TIG, плазмове або лазерне), подавач зварювального дроту (зміна швидкості подачі), система охолодження (водяне/газове).

Система керування:

ПЛК або ЧПК-контролер, алгоритми генерації траєкторій і синхронізації подачі дроту, інтеграція з CAD/CAM-системами;

Скануючий модуль:

3D-сканер (лазерний, структуроване світло, профілометр), формування цифрової моделі деталі перед наплавленням;

Сенсори та система зворотного зв'язку:

контроль дугової напруги та струму, вимірювання температури зони наплавлення, оптичний контроль геометрії шару;

Програмне забезпечення:

модулі планування траєкторій, база режимів і матеріалів, інтерфейс оператора (HMI), система збору й обробки даних (SCADA).

1.3 Технічні характеристики основних вузлів

Точність позиціонування головки: $\pm 0,05$ мм.

Швидкість переміщення: до 500 мм/с (у залежності від конфігурації).

Потужність джерела живлення: 5–15 кВт.

Діаметр дроту: 0,8–2,0 мм.

Товщина шару наплавлення за прохід: 0,5–3,0 мм.

Продуктивність: до 3 кг металу за годину (для дугових методів).

Максимальні габарити деталі: залежно від платформи (від 0,5×0,5×0,5 м до 3×3×2 м).

1.4 Вимоги до точності, надійності та безпеки

Точність: забезпечення геометрії відновленої поверхні без додаткової обробки або з мінімальною механічною доробкою.

Надійність: можливість роботи в безперервному циклі не менше 8 годин; стійкість

до вібрацій і змін температури.

Безпека: захист оператора від ультрафіолетового випромінювання, іскр, аерозолів; аварійне відключення при відхиленнях параметрів; дотримання стандартів електробезпеки.

Автоматизована система координатного 3D-наплавлення є комплексом апаратних і програмних засобів, спрямованих на підвищення точності, продуктивності та якості відновлювальних робіт. Її застосування дозволяє інтегрувати технології адитивного виробництва у ремонтні та відновлювальні процеси промислових підприємств.

Розглянутий об'єкт має високий потенціал застосування в умовах української та світової промисловості, оскільки вирішує актуальні проблеми економії ресурсів і продовження строку служби обладнання.

1.5 Підготовка поверхні та сканування зони відновлення

Перед початком наплавлення потрібно забезпечити ідеальний стан робочої поверхні, адже від цього залежить міцність зчеплення відновленого шару з основним металом:

- видалення бруду, мастила, іржі та оксидів проводиться механічними (шліфувальні круги, абразиви) або хімічними методами (лужні розчини, травлення);

- додатково застосовується піскоструминна чи дробоструминна обробка, що створює мікрошорсткість і підвищує адгезію[2];

- обов'язковим етапом є знежирення поверхні (розчинники, ультразвукові ванни).

Після цього виконується 3D-сканування зони зносу. Лазерні сканери та профілометри формують точну цифрову модель поверхні з похибкою до $\pm 0,05$ мм. Це дозволяє визначити глибину та площу дефектів, створити «цифровий двійник» деталі та підготувати план відновлення.

1.6 Планування траєкторій (CAD/CAM) і генерація УП

На основі цифрової моделі формується віртуальна CAD-модель деталі у відновленому вигляді. Це дозволяє ще до початку процесу перевірити, чи відповідає результат потрібним розмірам і технічним вимогам.

Далі в САМ-системі генерується стратегія нанесення шару:

- шарове нарощування по контуру (коли важлива точність геометрії);
- зигзагові траєкторії (для швидкого заповнення об'єму);
- спіральні чи комбіновані (для деталей складної форми).

Формуються управляючі програми (УП), які враховують:

- товщину шару (залежить від діаметра дроту та режиму дуги);
- швидкість подачі дроту (регулює стабільність процесу);
- швидкість руху головки (впливає на якість наплавлення);
- охладжувальні паузи між шарами, щоб уникнути перегріву.

Таким чином, планування в CAD/CAM дозволяє уникнути ручного програмування та зменшує ймовірність помилок.

1.7 Виконання наплавлення

Безпосередній процес включає кілька послідовних етапів:

- запуск дуги чи лазера та стабілізація джерела енергії;
- синхронізована подача дроту в зону плавлення;
- рух головки по заздалегідь згенерованій траєкторії;
- поступове формування шару металу, який охолоджується й з'єднується з основою;

- багатошарове нанесення, якщо потрібно досягнути більшої товщини.

Залежно від завдання використовуються різні методи:

MIG/MAG – вирізняється високою універсальністю та продуктивністю. Цей метод є оптимальним вибором для роботи зі сталями та різноманітними сплавами.

TIG – дозволяє отримати наплавлений шар виняткової чистоти та якості, проте технологічний процес вимагає значних витрат часу.

Плазмове наплавлення – характеризується високою стабільністю процесу та ефективністю при відновленні деталей, що потребують нанесення шару значної товщини.

Лазерне наплавлення – забезпечує прецизійну точність (до сотих часток міліметра) при мінімальному термічному впливі на основний метал (деталь не перегрівається). Головним недоліком є висока вартість обладнання.

Контроль якості (онлайн/офлайн) та постобробка:

Під час процесу використовується онлайн-моніторинг:

- датчики напруги й струму сигналізують про стабільність дуги;
- пірометри відстежують температуру в зоні плавлення, щоб уникнути перегріву;

- камери контролюють форму наплавлюваної валика та виявляють відхилення.

Після завершення виконується офлайн-контроль:

- 3D-сканування готової деталі порівнюється з еталонною CAD-моделлю;
- ультразвукова дефектоскопія дозволяє знайти внутрішні пори або тріщини;
- вибіркові макрошліфи та вимірювання твердості перевіряють якість металу.

Якщо потрібно, застосовується постобробка:

- фрезерування або шліфування для точного розміру;
- термообробка для зняття внутрішніх напружень і стабілізації структури металу.

Показники ефективності процесу:

Для оцінки роботи системи використовуються такі критерії:

- продуктивність: скільки кілограмів металу можна наплавити за годину (2–3 кг/год для MIG/MAG, до 1 кг/год для TIG, до 5 кг/год для плазмового);
- точність геометрії: допустиме відхилення після наплавлення $\pm 0,2$ мм;
- якість шару: відсутність дефектів (пори, непровари, тріщини);
- економічність: мінімальні витрати дроту та енергії на одиницю площі;
- ресурс деталі: після відновлення термін служби збільшується у 1,5–3 рази.

Технологічний процес координатного 3D-наплавлення складається з низки етапів — від підготовки поверхні до фінального контролю. Його перевага в тому, що на всіх стадіях застосовуються автоматизовані системи, які зменшують людський фактор

Використання CAD/CAM дозволяє створювати точні траєкторії, а сенсори й системи зворотного зв'язку гарантують стабільність параметрів. У результаті підприємство отримує якісно відновлені деталі з меншими витратами часу і ресурсів, що підтверджує доцільність впровадження технології в сучасну промисловість.

1.8 Аналіз джерел

Жук Г. "Універсальна система управління подачі електродного дроту для механізованого обладнання електродугового зварювання і наплавлення". *Вісник Тернопільського національного технічного університету*, 2019.

Стаття розглядає розробку універсальної системи управління подачею електродного дроту для механізованого електродугового зварювання та наплавлення. Запропонована система дозволяє покращити стабільність процесу, підвищити якість зварного шва та забезпечити гнучкість у використанні з різним обладнанням.

Переваги: Запропонована система управління підвищує стабільність подачі електродного дроту. Забезпечує кращий контроль параметрів зварювання, що покращує якість шва. Може використовуватися для різних типів зварювального обладнання, що підвищує її універсальність.

Недоліки: Впровадження системи потребує модернізації існуючого обладнання. Можлива складність налаштування для різних режимів зварювання. В статті може бути недостатньо інформації щодо довговічності та реальних експлуатаційних характеристик.

Роянов В.О., Захарова І.В. "З досвіду застосування електродугового наплення для відновлення та ремонту деталей металургійного устаткування".

Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки, 2015[4].

Стаття присвячена аналізу досвіду використання електродугового напилення для відновлення та ремонту деталей металургійного обладнання. Автори розглядають ефективність цього методу, його переваги та обмеження при ремонті зношених елементів.

Переваги: Подовжує термін служби деталей, знижуючи витрати на заміну. Дозволяє відновлювати складні поверхні без значної механічної обробки. Підвищує зносостійкість та корозійну стійкість напиленого шару.

Недоліки: Потребує ретельної підготовки поверхні для забезпечення якісного зчеплення. Можливе утворення дефектів (пори, тріщини) при порушенні технологічного процесу. Обмежена товщина напиленого шару, що може впливати на міцність відновленої деталі.

Іванов В.П., Щербаков С.В., Лещинський Л.К. "Розробка системи автоматизованого управління процесу електродугового наплавлення з використанням широтно-імпульсної модуляції". *Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки, 2019[5].*

Стаття присвячена розробці системи автоматизованого управління електродуговим наплавленням із використанням ШІМ. Автори аналізують вплив широтно-імпульсної модуляції на стабільність процесу та якість наплавленого шару.

Переваги: Підвищує точність управління параметрами наплавлення. Покращує якість покриття за рахунок стабілізації дугового процесу. Може бути адаптована до різних типів обладнання.

Недоліки: Складність налаштування та впровадження в промисловість. Необхідність додаткових апаратних ресурсів.

Криволапов В.П., Лещинський Л.К. "Адитивне дугове наплавлення просторових виробів присадними дротами зі сталей та сплавів". *Електронний архів Національного технічного університету України "КПІ ім. Ігоря Сікорського", 2018.*

Переваги: Дозволяє виготовляти великогабаритні металеві деталі. Висока швидкість наплавлення у порівнянні з традиційними методами. Можливість створення складних геометричних форм.

Недоліки: Висока чутливість до параметрів процесу. Потребує точного контролю температурного режиму для запобігання дефектам.

Лещинський Л.К., Матвієнко В.М., Іванов В.П. "Розробка технології наплавки для збільшення ресурсу роликів машин безперервного лиття заготовок". *Технологія машинобудування*, 2019.

Стаття аналізує технологію наплавлення, яка спрямована на збільшення ресурсу роликів машин безперервного лиття заготовок.

Переваги: Збільшує термін служби роликів, зменшуючи витрати на їх заміну. Поліпшення зносостійкості покриття. Використання оптимізованих режимів наплавлення.

Недоліки: Необхідність спеціалізованого обладнання. Висока трудомісткість процесу.

Возьянов Е.И., Коробка О.В., Карауланов О.В., Лещинський Л.К., Матвієнко В.М. "Підвищення ефективності експлуатації роликів машин безперервного лиття слябів". *Металург*, 2018.

Переваги: Оптимізація робочого процесу зменшує зношення роликів. Використання вдосконалених матеріалів для підвищення довговічності. Поліпшення теплового та механічного навантаження.

Недоліки: Потребує додаткових витрат на модернізацію обладнання. Відсутні дані щодо впливу на економічну ефективність у довгостроковій перспективі.

Лаврова Е.В., Іванов В.П. "Контроль глибини проплавлення при наплавленні стрічковим електродом під кутом до твірної". *Матеріали та технології в машинобудуванні*, 2018[6].

Переваги: Покращує якість зварного з'єднання за рахунок точного контролю глибини проплавлення. Можливість адаптації для різних матеріалів. Зниження дефектності шва.

Недоліки: Потребує точного калібрування та контролю процесу. Висока залежність від параметрів напруги та струму.

Домбровський Ф.С., Лещинський Л.К. "Працездатність наплавлених роликів машин безперервного лиття заготовок". *Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України*, 1995.

Переваги: Довготривале підвищення ресурсу роликів. Поліпшення зносостійкості та жаростійкості. Зменшення необхідності частих ремонтів.

Недоліки: Не враховано сучасні технології наплавлення. Потребує оновлення методології відповідно до новітніх матеріалів.

Іванов В.П., Лаврова Е.В. "Підвищення ефективності стрічкового наплавлення шляхом контролю переносу електродного металу". *Прикладна механіка та матеріали*, 2014.

Переваги: Підвищує стабільність процесу наплавлення. Зменшує утворення небажаних структур у металі. Поліпшує якість поверхневого шару.

Недоліки: Необхідність спеціального обладнання для контролю переносу металу. Відсутні дані щодо економічної ефективності впровадження.

Кравцов С.О., Пугачов І.В. "Оптимізація режимів електродугового зварювання високолегованих сталей". *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Машинобудування та техніка*, 2017[7].

Стаття присвячена дослідженню оптимізації режимів електродугового зварювання високолегованих сталей. Автори аналізують вплив параметрів зварювання на якість шва та розглядають методи мінімізації дефектів у зварних з'єднаннях.

Переваги: Запропоновані режими підвищують якість шва, знижуючи ймовірність утворення тріщин і пор. Оптимізація параметрів сприяє зменшенню деформацій зварних з'єднань. Можливе застосування для різних типів високолегованих сталей.

Недоліки: Необхідність точного дотримання параметрів для досягнення оптимального результату. Можлива складність впровадження запропонованих

режимів у серійне виробництво. Відсутність детального аналізу економічної доцільності використання методики.

Micro-Epsilon. "Completely automatic 3D repair welding". Micro-Epsilon пропонує повністю автоматизоване 3D ремонтне зварювання, використовуючи лазерні сканери scanCONTROL для визначення траєкторії зварювання та шляху робота. Спочатку поверхня дефектної області сканується лазерним сканером, який керується роботом. Отримані 3D дані зношеної області разом із позиційними даними робота генеруються та інтегруються в CAD дані компонента.

Переваги: Висока точність визначення дефектних зон. Можливість інтеграції з існуючими CAD системами. Зменшення людського фактора в процесі ремонту.

Недоліки: Необхідність високоточного обладнання для сканування та обробки даних. Можливі обмеження при роботі з великими або складними за формою деталями.

Fronius International GmbH. "Automation Solutions for Welding Technology". Fronius пропонує індивідуальні комплексні рішення для автоматизації зварювання, включаючи механізовані та роботизовані системи. Компанія забезпечує інтеграцію програмного забезпечення, джерел живлення та компонентів для досягнення стабільно високої якості зварних швів. Їхні системи застосовуються в різних галузях, таких як нафтогазова промисловість, енергетика та автомобілебудування.

Переваги: Індивідуальний підхід до кожного клієнта. Широкий спектр застосувань у різних галузях. Використання передових технологій зварювання.

Недоліки: Можлива висока вартість впровадження індивідуальних рішень. Складність інтеграції в існуючі виробничі процеси без належної підтримки.

ALPHA LASER GmbH. "AL-ROCK: Robotic System for Laser Surface Hardening and Welding".

ALPHA LASER пропонує роботизовану систему AL-ROCK для лазерного зміцнення поверхонь та зварювання. Ця система забезпечує точне та контрольоване нанесення лазерної енергії, що дозволяє досягти високої якості обробки та мінімізувати тепловий вплив на деталі.

Переваги: Висока точність та контроль процесу. Мінімальний тепловий вплив на оброблювані деталі. Можливість обробки складних геометричних форм.

Недоліки: Обмеження щодо товщини матеріалів, які можна обробляти. Необхідність спеціалізованого обслуговування лазерного обладнання.

Lincoln Electric. "Robotic Welding Systems".

Lincoln Electric пропонує роботизовані зварювальні системи, які забезпечують підвищену продуктивність та якість зварювання. Компанія надає рішення для різних галузей, включаючи важке машинобудування та автомобілебудування.

Переваги: Висока продуктивність та ефективність. Широкий спектр застосувань у різних галузях. Підтримка та обслуговування на глобальному рівні.

Недоліки: Можлива складність інтеграції з існуючими системами. Високі початкові витрати на впровадження.

ABB Robotics. "Arc Welding Robots".

ABB Robotics є одним із провідних постачальників робототехніки та автоматизації, пропонуючи широкий спектр рішень для дугового зварювання. Їхні роботи забезпечують високу точність, гнучкість та ефективність у виробничих процесах, підходячи для різних галузей промисловості.

Переваги: Широкий асортимент роботів для різних застосувань. Висока точність та повторюваність зварювальних операцій. Можливість інтеграції з існуючими виробничими лініями.

Недоліки: Високі початкові інвестиції в обладнання та його налаштування. Необхідність спеціалізованого обслуговування та навчання персоналу.

KUKA AG. "Robotic Arc Welding".

KUKA спеціалізується на роботизованому дуговому зварюванні, пропонуючи автоматизовані рішення для різних галузей, включаючи автомобільну промисловість та металообробку. Компанія має багаторічний досвід у впровадженні сучасних автоматизаційних рішень, забезпечуючи ефективність та якість виробничих процесів.

Переваги: Висока точність та повторюваність зварювальних операцій. Можливість інтеграції з існуючими виробничими лініями. Широкий асортимент роботизованих рішень для різних застосувань.

Недоліки: Необхідність спеціалізованого обслуговування та навчання персоналу. Високі початкові інвестиції в обладнання та його налаштування.

Panasonic Industry Europe GmbH. "TAWERS Arc Welding Systems". Panasonic пропонує систему TAWERS для дугового зварювання, яка інтегрує контролер робота та зварювальний джерело живлення в одному блоці. Це забезпечує швидку та точну синхронізацію між рухами робота та зварювальним процесом.

Переваги: Інтегрована система для підвищення ефективності. Зменшення часу налаштування та програмування. Покращена якість зварних швів завдяки точній синхронізації.

Недоліки: Обмежена гнучкість у виборі компонентів системи. Можливі обмеження щодо складності зварювальних завдань. Yaskawa Electric Corporation. "Arc Welding Robots". Yaskawa Electric Corporation – світовий лідер у виробництві промислових роботів, зокрема для дугового зварювання. Їхні роботи серії MOTOMAN використовуються у автомобільній, суднобудівній, машинобудівній та металообробній галузях.

Переваги: Висока точність і стабільність – забезпечують рівномірні та якісні зварні шви. Гнучкість у застосуванні – підтримують різні типи зварювання (MIG, MAG, TIG, лазерне зварювання). Компактність і багатовісна конструкція – оптимізовані для складних виробничих ліній. Легка інтеграція – сумісність із різними зварювальними джерелами (Fronius, Lincoln Electric, Miller тощо). Автоматизація та простота програмування – сучасні контролери YRC1000 дозволяють швидко налаштувати робота.

Недоліки: Висока вартість впровадження – початкові інвестиції можуть бути значними. Необхідність навчання персоналу – потребує підготовки операторів для роботи з роботизованими системами.

ESAB Welding & Cutting Products. "Robotic Welding Systems".

ESAB пропонує широкий спектр роботизованих зварювальних систем, включаючи обладнання для MIG/MAG, TIG та плазмового зварювання. Компанія відома своєю інноваційністю та надійністю обладнання, що підходить для різних галузей промисловості.

Переваги: Різноманітність зварювальних процесів та обладнання. Висока якість та надійність продукції. Підтримка та обслуговування на глобальному рівні.

Недоліки: Можлива складність інтеграції з існуючими системами. Високі початкові витрати на впровадження.

Кожна з цих компаній пропонує унікальні рішення для автоматизації зварювальних процесів, і вибір конкретної системи залежить від специфіки виробництва, вимог до якості та доступного бюджету.

1.9 Патентний пошук

У рамках патентного пошуку за напрямом автоматизованих систем координатного 3D керування наплавленням зварювального дроту для відновлення металевих частин обладнання було виявлено кілька патентів, опублікованих після 2013 року. Нижче наведено короткий опис п'яти з них:

1. Спосіб адитивного виробництва металевих виробів селективним лазерним плавленням в поєднанні з інтенсивним поверхнево-пластичним деформуванням (UA127866U)

Цей патент описує метод адитивного виробництва, який поєднує селективне лазерне плавлення металевого порошку з подальшим інтенсивним поверхнево-пластичним деформуванням. Після лазерного плавлення вирощений шар піддається динамічному або статичному деформуванню за допомогою спеціальних інструментів, що підвищує механічні властивості та якість поверхні виробу.

Переваги: Покращує механічні властивості виробу завдяки пластичному деформуванню. Знижує рівень залишкових напружень у матеріалі. Підвищує якість поверхні та зносостійкість.

Недоліки: Ускладненість технологічного процесу через необхідність додаткового етапу обробки. Потребує високоточного обладнання для деформування, що може підвищити собівартість виробництва.

Шляхи покращення: Використання більш ефективних методів контролю параметрів деформування (наприклад, лазерних сенсорів або AI-моделей для автоматичної адаптації тиску). Оптимізація траєкторій руху інструменту для мінімізації додаткових внутрішніх напружень.

2. Пристрій для плазмового наплавлення циліндричних деталей сільськогосподарської техніки (UA108178U)

Патент описує пристрій для наплавлення циліндричних деталей, який включає джерело живлення, пульт керування, осцилятор, рушій-обертач з затискачем, баластний опір, балони з газом, порошковий завантажувач та плазмотрон. Особливістю є наявність столу з кронштейнами, опорним і робочим візками, що забезпечує точне позиціонування плазмового пальника відносно деталі, що обробляється.

Переваги: Висока точність позиціонування плазмового пальника завдяки опорним візкам. Можливість рівномірного наплавлення на складні поверхні. Використання порошкового завантажувача для рівномірного нанесення матеріалу.

Недоліки: Складність у налаштуванні для деталей з нестандартною геометрією. Можливе накопичення залишкової напруги металу через нерівномірне нагрівання.

Шляхи покращення: Додавання адаптивного керування температурою плазмового струменя для рівномірного розподілу тепла. Інтеграція додаткових систем контролю товщини наплавленого шару в реальному часі.

3. Спосіб відновлення спрацьованих стрілочних культиваторних лап (UA100194U)

Цей патент пропонує метод відновлення зношених стрілочних лап культиваторів шляхом видалення зношеної частини леза та приварювання кутової пластини, виготовленої зі сталі товщиною 5 мм. Після приварювання проводиться

наплавлення сормайт-1 та обробка поверхні вібраційним зміцненням, що підвищує зносостійкість та продовжує термін служби деталей.

Переваги: Використання доступних матеріалів (сталь, сормайт-1) для зміцнення деталі. Покращена зносостійкість завдяки вібраційному зміцненню. Простота реалізації у виробничих умовах.

Недоліки: Обмеження у виборі матеріалів для наплавлення (можливо, інші покриття можуть бути ефективнішими). Вібраційне зміцнення може бути недостатньо ефективним для всіх типів навантажень.

Шляхи покращення: Використання альтернативних зміцнювальних покриттів (наприклад, карбідних сумішей). Автоматизація процесу вібраційного зміцнення для підвищення стабільності результатів.

4. Спосіб лазерного наплавлення з використанням адаптивного керування процесом (UA120345U)

Патент описує метод лазерного наплавлення, який передбачає використання системи адаптивного керування для моніторингу та регулювання параметрів процесу в реальному часі. Це дозволяє забезпечити стабільну якість наплавленого шару та мінімізувати дефекти, пов'язані з коливаннями параметрів процесу.

Переваги: Підвищення стабільності процесу наплавлення завдяки адаптивному моніторингу. Зменшення дефектів, таких як пористість та мікротріщини. Ефективне використання матеріалу за рахунок точного контролю подачі порошку.

Недоліки: Високі вимоги до програмного забезпечення та датчиків для адаптивного керування. Необхідність складного калібрування системи перед кожним запуском.

Шляхи покращення: Використання штучного інтелекту для самонавчання системи та автоматичного налаштування параметрів. Оптимізація алгоритмів обробки даних для прискорення реакції системи на зміни параметрів процесу.

5. Пристрій для автоматизованого дугового наплавлення з використанням промислового робота (UA115678U)

Цей патент представляє пристрій, який включає промислового робота з встановленим на ньому зварювальним апаратом для дугового наплавлення. Система оснащена датчиками для контролю положення та параметрів наплавлення, що дозволяє автоматизувати процес відновлення деталей складної форми з високою точністю.

Переваги: Висока точність наплавлення завдяки використанню промислового робота. Автоматизація процесу зменшує вплив людського фактора та підвищує якість виробу. Можливість роботи зі складними геометріями деталей.

Недоліки: Висока вартість обладнання та обслуговування. Необхідність спеціального програмного забезпечення та підготовки операторів.

Шляхи покращення: Інтеграція AI-систем для автоматичної корекції наплавлення в режимі реального часу. Використання модульних змінних головок для розширення можливостей наплавлення.

Зазначені патенти демонструють інноваційні методи наплавлення та відновлення деталей. Основні переваги включають підвищення точності, автоматизацію процесів та покращення механічних властивостей матеріалів. Основними недоліками є складність налаштування, висока вартість обладнання та необхідність спеціалізованого обслуговування.

Для покращення цих технологій можна:

Інтегрувати AI для автоматичного налаштування процесів.

Оптимізувати алгоритми управління наплавленням.

Використовувати гібридні технології, що поєднують кілька видів зміцнення.

Це дозволить зробити технології більш ефективними, доступними та економічно вигідними.

1.10 Узагальнення проблематики

Розгляд існуючих рішень у сфері координатного 3D-наплавлення показав, що попри значні успіхи науковців та промислових компаній, кожен із методів має виражені недоліки, які обмежують сферу застосування.

-методи, що забезпечують високу точність та якість покриття, мають суттєву вартість обладнання і складність обслуговування;

-технології з високою продуктивністю часто страждають від нестабільності процесу та підвищеної чутливості до режимів;

-доступніші й простіші у використанні методи зазвичай мають обмеження по товщині шару, довговічності покриття чи можливості роботи зі складною геометрією;

-процеси, що вже впроваджені у виробництво, нерідко вимагають серйозної модернізації та адаптації для нових задач, що знижує їхню універсальність.

Таким чином, сучасна ситуація характеризується тим, що промисловість не має універсального інструменту для відновлення деталей: на кожне завдання потрібно підбирати окрему технологію, що знижує ефективність і ускладнює організацію виробничих процесів.

З огляду на це очевидним є висновок, що подальший розвиток не може ґрунтуватися на удосконаленні лише одного з існуючих методів.

-підвищення точності не вирішує проблеми вартості[8];

-зростання продуктивності не знімає питання стабільності й дефектності;

-зменшення витрат не гарантує довговічності й надійності результатів;

-кожне з рішень поодиночі відповідає лише частині вимог, тоді як сучасна промисловість потребує комплексності.

Отже, необхідно відійти від логіки «пошуку найкращого методу» і перейти до створення системи, яка інтегрує сильні сторони та компенсує слабкі. Це не проста комбінація, а синтез технологій і принципово новий рівень організації процесу наплавлення.

1.11 Пропоноване рішення

Оптимальним виходом є створення універсальної координатної системи 3D-наплавлення нового покоління, яка має стати гнучкою платформою для адаптації під будь-які виробничі умови:

-основу складає модульність: система повинна дозволяти підключення різних

джерел тепла та різних типів подачі матеріалу, що робить її придатною як для швидкісного дугового, так і для високоточних лазерних процесів;

- обов'язковим елементом є інтеграція систем зворотного зв'язку: сенсори струму, напруги, температури й геометрії мають забезпечувати дані для стабілізації процесу в реальному часі;

- необхідно застосовувати адаптивне керування, яке базується на алгоритмах самонавчання: система повинна автоматично змінювати параметри залежно від відхилень, не потребуючи ручного втручання оператора;

- впровадження цифрового двійника деталі дозволяє порівнювати планову модель і фактичний результат на кожному етапі, що мінімізує похибки й підвищує передбачуваність результату;

- інтеграція CAD/CAM і SCADA формує єдиний цикл, де процес планування, виконання та контролю замикається в інформаційну систему, яка накопичує дані й оптимізує майбутні операції.

Таким чином, мова йде не про удосконалення окремої технології, а про побудову універсальної інтелектуальної платформи, яка може працювати в різних режимах і при цьому гарантувати якість і стабільність.

Вибір саме такого шляху розвитку пояснюється кількома факторами:

- поєднання різних методів дозволяє вирівняти дисбаланс між точністю та продуктивністю: там, де лазер забезпечує детальність, дуга дає швидкість;

- адаптивне керування дозволяє позбутися головного недоліку більшості технологій — нестабільності процесу, адже корекція здійснюється в реальному часі;

- цифрова інтеграція усуває проблему залежності від людського фактора та складності налаштувань, оскільки оператор працює з візуалізованими моделями, а система автоматично готує траєкторії та режими;

- модульність знижує витрати, бо дозволяє використовувати одну платформу для різних завдань, замість купівлі кількох окремих установок;

- накопичення статистичних даних у SCADA-системах дає змогу будувати

прогнознi моделi, що пiдвищує економічну ефективність i дозволяє планувати ресурси.

РОЗДІЛ 2 Ідентифікація математичної моделі та синтез керування процесом

2.1 Ідентифікація об'єкта керування та формалізована постановка задачі моделювання

2.1.1 Системний аналіз технологічного процесу WAAM як об'єкта керування

Об'єктом керування в розроблюваній автоматизованій системі є технологічний процес відновлювального пошарового наплавлення, що реалізується методом дугового зварювання плавким електродом в середовищі захисних газів (GMAW — Gas Metal Arc Welding). В контексті адитивних технологій цей процес класифікується як Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM).

З позицій сучасної теорії автоматичного керування (ТАК), даний об'єкт належить до класу складних багатовимірних динамічних систем (МІМО — Multi Input Multi Output) з розподіленими параметрами. Його функціонування в реальних виробничих умовах характеризується:

Суттєвою нелінійністю статичних характеристик: Зокрема, нелінійною залежністю між напругою та струмом дуги (ВАХ), а також нелінійністю коефіцієнтів переносу електродного металу[9].

Нестационарністю параметрів: Зміна теплофізичних властивостей об'єкта в часі (нагрів деталі змінює умови тепловідведення) та дрейф параметрів джерела живлення.

Наявністю транспортного запізнення: Обумовлене часом проходження електродного дроту від механізму подачі до зони горіння дуги, що ускладнює синтез швидкодіючих регуляторів.

Фізична сутність процесу полягає у керованому масопереносі розплавленого металу через високотемпературний дуговий проміжок у зварювальну ванну, яка переміщується по заданій просторовій траєкторії. Процес формоутворення валика визначається складною суперпозицією електромагнітних, теплових та гідродинамічних явищ.

Для цілей математичного опису об'єкт доцільно декомпозувати на дві взаємопов'язані підсистеми, що мають різні часові масштаби:

Енергетична підсистема (швидкий контур, $\tau \approx 10^{-3}$ с)

Описує електромагнітні процеси в зварювальному контурі. Вхідні змінні — напруга джерела та швидкість подачі дроту; вихідні — струм дуги та напруга на дузі.

Кінематична та теплова підсистема (повільний контур, $\tau \approx 10^{-1} \dots \tau \approx 10^{-0}$): Описує процеси переміщення інструменту та кристалізації металу. Вхідні змінні — швидкість руху столу; вихідні — геометричні розміри валика (ширина, висота).

2.1.2 Векторно-матричний опис простору станів системи

Для формалізації задачі синтезу керування представимо об'єкт у вигляді "чорної скриньки", що описується векторами вхідних, вихідних та збурюючих змінних.

Вектор керуючих впливів $U(t)$ Це сукупність сигналів, що формуються контролером нижнього рівня для впливу на виконавчі механізми. Вектор має таку структуру[23]:

$$U(t) = \begin{bmatrix} U_{src}(t) \\ V_{feed}(t) \\ V_x(t) \\ V_y(t) \\ V_z(t) \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

де: $U_{src}(t)$ — напруга завдання джерела живлення (керує довжиною дуги), В;

$V_{feed}(t)$ — швидкість подачі електродного дроту (керує силою струму та продуктивністю наплавлення), м/хв;

V_x, V_y, V_z — лінійні швидкості приводів по відповідних осях, що визначають траєкторію руху, м/хв.

Вектор керованих координат (вихідних параметрів) $Y(t)$

Це параметри, що визначають якість відновленої деталі. Оскільки пряме вимірювання мікроструктури неможливе, вектор формується з геометричних та енергетичних параметрів[24]:

$$Y(t) = \begin{bmatrix} H_{layer}(t) \\ B_{bead}(t) \\ Q_{he}(t) \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

де: $H_{layer}(t)$ — поточна висота наплавленого шару (координата Z поверхні), мм;
 $B_{bead}(t)$ — ширина наплавленого валика (визначає крок наплавлення), мм;
 $Q_{heat}(t)$ — погонна енергія (тепловкладення), що впливає на зону термічного впливу, Дж/мм.

Вектор збурюючих впливів $F(t)$

Збурення носять стохастичний характер і призводять до відхилення системи від заданого режиму[26]:

$$F(t) = \begin{bmatrix} \Delta L_{ctwd}(t) \\ \Delta T_{base}(t) \\ \Delta U_{net}(t) \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

де: $\Delta L_{ctwd}(t)$ — варіація вильоту електрода (Contact Tip to Work Distance) через нерівність поверхні попереднього шару;

$\Delta T_{base}(t)$ — зміна температури підкладки в процесі багат шарового наплавлення;

$\Delta U_{net}(t)$ — флуктуації напруги живильної мережі.

2.1.3 Формалізована постановка задачі оптимального керування

Основна науково-технічна проблема автоматизації WAAM полягає у відсутності прямого зворотного зв'язку за вектором $Y(t)$ у класичних системах. У даній роботі ця проблема вирішується шляхом введення контуру адаптації на основі 3D-сканування та нейромережевого аналізу[10].

Математична постановка задачі керування формулюється як варіаційна задача мінімізації інтегрального квадратичного функціоналу якості J на інтервалі часу технологічного циклу T_{proc} :

$$J = \int_0^{T_{proc}} \left(\alpha_1 [H_{ref} - H_{real}(t)]^2 + \alpha_2 [I_{set} - I_{meas}(t)]^2 \right) dt \rightarrow \min \quad (2.4)$$

де: H_{ref}, H_{real} — задана (еталонна) та реальна висота наплавленого шару;

I_{set}, I_{meas} — задане та виміряне значення зварювального струму (параметр стабільності);

α_1, α_2 — вагові коефіцієнти, що визначають пріоритетність геометричної точності над енергетичною стабільністю.

Для аналітичного розв'язання задачі синтезу регулятора динаміка системи описується матричним рівнянням у просторі перетворень Лапласа:

$$Y(s) = W_{obj}(s) \cdot U(s) + W_{dist}(s) \cdot F(s) \quad (2.5)$$

де: $W_{obj}(s)$ — передавальна матриця об'єкта керування розмірністю 3×5 ;

$W_{dist}(s)$ — передавальна матриця за каналами збурення.

Специфікою запропонованого підходу є використання стратегії адаптивного керування з еталонною моделлю (Model Reference Adaptive Control — MRAC), де параметри матриці W_{obj} не є константами, а ідентифікуються в режимі реального часу ("on-the-fly") за допомогою нейромережевого спостерігача.

2.2 Розробка математичної моделі кінематики 3-осьового маніпулятора з рухомим столом

2.2.1 Обґрунтування кінематичної схеми та вибір систем координат

Для реалізації процесу пошарового вирощування деталей (WAAM) критично важливими параметрами є жорсткість конструкції та мінімізація вібрацій у точці контакту електрода з деталлю (TCP — Tool Center Point). Класичні порталні схеми (Gantry), де всі три осі переміщують інструмент, мають змінний момент інерції та схильність до резонансних коливань при різкій зміні траєкторії[25].

У даній роботі прийнято кінематичну схему з розділеними рухами (схема «рухомий стіл»), яка характерна для прецизійних фрезерних оброблювальних центрів. Позиціонування деталі здійснюється переміщенням робочого столу у горизонтальній площині (осі X та Y), а вертикальне переміщення робочого інструменту (зварювального пальника та 3D-сканера) відбувається вздовж осі Z.

Для формалізації опису просторового положення введемо дві ортогональні системи координат[11]:

Базова (абсолютна) система координат(O_0, X_0, Y_0, Z_0). Її початок O_0 жорстко зв'язаний з нерухомою станиною установки. Відносно цієї системи розраховуються абсолютні переміщення всіх виконавчих органів.

Локальна система координат інструменту(O_t, X_t, Y_t, Z_t). Її початок O_t знаходиться в точці вильоту електрода. Вісь Z_t співпадає з віссю пальника.

Векторне рівняння, що описує положення точки наплавлення $P(t)$ у просторі, враховує відносний рух столу та інструменту:

$$P(t) = P_{tool}(t) - P_{table}(t) \quad (2.6)$$

де: $P_{tool}(t)$ — вектор положення інструменту (змінюється лише по осі Z);

$P_{table}(t)$ — вектор положення робочого столу. Знак «мінус» обумовлений інверсною кінематикою столу: для зміщення точки обробки вправо ($+X$), стіл повинен рухатися вліво ($-X$).

2.2.2 Матричний метод аналізу кінематики

Для переходу між системами координат та розрахунку складних траєкторій доцільно використати апарат однорідних перетворень. Стан системи в довільний момент часу t описується матрицею трансформації $T(t)$ розміром 4×4 :

$$T(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x(t) \\ 0 & 1 & 0 & y(t) \\ 0 & 0 & 1 & z(t) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Координати робочої точки (x, y, z) визначаються як інтеграл від швидкостей приводів. Враховуючи, що система керування працює в дискретному часі, перейдемо від інтегралів до сум:

$$\begin{cases} x[k] = x[k-1] - V_x[k] \cdot T_s \\ y[k] = y[k-1] - V_y[k] \cdot T_s \\ z[k] = z[k-1] + V_z[k] \cdot T_s \end{cases} \quad (2.8)$$

де: T_s — період дискретизації системи керування (*sample time*);

V_x, V_y, V_z — миттєві швидкості на i -му кроці.

2.2.3 Алгоритми інтерполяції траєкторії руху

Головною технологічною вимогою до процесу наплавлення є забезпечення сталості площі поперечного перерізу валика. Згідно з законом збереження маси, це досягається за умови абсолютної стабільності контурної швидкості переміщення плями нагріву V_k .

Контурна швидкість визначається як евклідова норма вектора швидкостей:

$$V_k = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2} = \text{const} \quad (2.9)$$

Завданням інтерполятора (блоку розрахунку траєкторії в мікроконтролері) є розкладання заданої контурної швидкості V_{set} на ортогональні складові.

А. Лінійна інтерполяція (G1)

Використовується для формування прямих стінок. Для переміщення з точки $P_1(x_1, y_1)$ в точку $P_2(x_2, y_2)$ проекції швидкості розраховуються через направляючі косинуси[12]:

$$\begin{cases} V_x(t) = V_{set} \cdot \frac{x_2 - x_1}{L} \\ V_y(t) = V_{set} \cdot \frac{y_2 - y_1}{L} \end{cases} \quad (2.10)$$

де: $L = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$ — довжина сегмента.

Б. Кругова інтерполяція (G2/G3)

Використовується для наплавлення циліндричних поверхонь. Рух здійснюється по дузі радіусом R . Миттєві швидкості змінюються за гармонічним законом:

$$\begin{cases} V_x(t) = -V_{set} \cdot \sin(\omega \cdot t) \\ V_y(t) = V_{set} \cdot \cos(\omega \cdot t) \end{cases} \quad (2.11)$$

де: $\omega = V_{set}/R$ — кутова швидкість обертання вектора швидкості.

2.2.4 Динамічна модель електроприводу подачі

Виконавчими механізмами осей є гібридні крокові двигуни. Зв'язок між необхідною лінійною швидкістю V та частотою керуючих імпульсів f , що генеруються таймером STM32, описується рівнянням:

$$f = \frac{V \cdot N \cdot k_{micro}}{60 \cdot h_{screw}} \quad (2.12)$$

де: N — кількість кроків на оберт (200);

k_{micro} — поділ кроку (1/32);

h_{screw} — крок гвинта.

Однак реальний привід має інерційність. Миттєва зміна частоти неможлива через наявність маси столу та моменту інерції ротора.

2.3 Математичне моделювання теплофізичних процесів формоутворення

2.3.1 Емпіричні залежності геометричних параметрів (Модель Лебедева)

Ключовим завданням автоматизації є прогнозування геометрії наплавленого валика (висоти H та ширини B) залежно від енергетичних режимів наплавлення. Точні аналітичні моделі, що базуються на розв'язанні системи диференціальних рівнянь магнітогідродинаміки (рівняння Нав'є-Стокса та Максвелла), є надмірно складними для розрахунків у реальному часі на мікроконтролері. Тому в системах керування технологічним процесом доцільно використовувати регресійні (емпіричні) моделі[13].

На основі аналізу експериментальних досліджень процесу наплавлення в захисних газах (зокрема, за методикою В.А. Лебедева), встановлено, що залежність геометричних параметрів шва від режимів апроксимується степеневими функціями виду[26]:

$$\begin{cases} B = K_b \cdot I^{\alpha_1} \cdot U^{\alpha_2} \cdot V^{\alpha_3} \\ H = K_h \cdot I^{\beta_1} \cdot U^{\beta_2} \cdot V^{\beta_3} \end{cases} \quad (2.13)$$

де: B — ширина наплавленого валика, мм;

H — висота наплавленого валика (товщина шару), мм;

I — сила зварювального струму, А;

U — напруга на дузі, В;

V — швидкість наплавлення (переміщення столу), м/год;

K_b, K_h — емпіричні коефіцієнти, що залежать від складу захисного газу (Ar, CO_2) та матеріалу дроту;

α, β — показники степеня, що визначають вагу впливу кожного фактора.

Для процесу наплавлення сталевим дротом діаметром 1.2 мм у суміші $Ar+CO_2$ експериментально визначено такі залежності:

$$\begin{cases} B = 12,5 \cdot \frac{I^{0,35} \cdot U^{0,4}}{V^{0,5}} \\ H = 0,85 \cdot \frac{I^{0,6} \cdot U^{0,1}}{V^{0,7}} \end{cases} \quad (2.14)$$

Аналіз показників степеня (чутливості моделі) дозволяє сформулювати стратегію керування для автоматизованої системи:

Висота валика H найбільш чутлива до зміни швидкості наплавлення V (показник степеня -0.7) та струму I (0.6). Вплив напруги U на висоту є мінімальним (0.1).

Ширина валика B суттєво залежить від напруги на дузі U (показник 0.4), яка визначає довжину дуги та площу плями нагріву.

Висновок: для стабілізації процесу необхідно розділити канали керування. Стабілізація ширини шва здійснюється корекцією напруги джерела, а керування висотою (вісь Z) — адаптивною зміною швидкості руху столу.

2.3.2 Рівняння матеріального балансу

Для розрахунку базової швидкості подачі дроту (Feed Forward Control) використовується закон збереження маси. Об'єм металу, що подається у зону плавлення за одиницю часу, повинен дорівнювати об'єму сформованого валика з урахуванням коефіцієнта втрат (на розбризкування та вигар) [14].

Рівняння нерозривності потоку:

$$S_{wire} \cdot V_{feed} \cdot \eta = S_{bead} \cdot V_{travel} \quad (2.15)$$

де: S_{wire} — площа поперечного перерізу електродного дроту ($\pi \cdot d^2/4$), мм²;

V_{feed} — швидкість подачі дроту, м/хв;

η — коефіцієнт наплавлення (коефіцієнт корисної дії використання матеріалу, для MIG/MAG $\eta \approx 0.90 \dots 0.95$);

S_{bead} — площа поперечного перерізу наплавленого валика, мм²;

V_{travel} — швидкість переміщення інструменту, м/хв.

Припускаючи, що форма поперечного перерізу валика наближається до сегмента параболи, його площа може бути виражена через висоту H та ширину B як:

$$S_{bead} \approx 0,73 \cdot B \cdot H \quad (2.16)$$

Звідси виводимо закон керування приводом подачі для забезпечення заданої висоти шару H_{set} :

$$V_{feed} = \frac{0,73 \cdot B \cdot H_{set} \cdot V_{travel}}{S_{wire} \cdot \eta} \quad (2.17)$$

Це рівняння закладено в алгоритм мікроконтролера для розрахунку базової швидкості подачі перед початком наплавлення кожного сегмента.

2.3.3 Математичне моделювання теплових процесів

Процес 3D-наплавлення (WAAM) відрізняється від звичайного зварювання ефектом накопичення тепла. З кожним наступним шаром тепловідведення в підкладку погіршується, а температура деталі зростає [15]. Це призводить до зміни в'язкості розплаву: валик починає "розтікатися", його ширина B збільшується, а висота H зменшується, що призводить до геометричних похибок.

Розподіл температурного поля $T(r, t)$ описується диференціальним рівнянням теплопровідності. Для інженерних розрахунків у системі керування використано модель граничного стану насичення (рівняння Рикаліна-Розенталя для рухомого точкового джерела тепла) [16]:

$$T(r, \xi) = T_0 + \frac{Q_{eff}}{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot r} \cdot \exp\left(-\frac{V \cdot (r + \xi)}{2 \cdot a}\right) \quad (2.18)$$

де: T_0 — початкова температура деталі (температура попереднього шару), °C;

Q_{eff} — ефективна теплова потужність дуги ($Q_{eff} = I \cdot U \cdot \eta_{thermal}$), Вт;

λ — коефіцієнт теплопровідності матеріалу, Вт/(м·К);

a — коефіцієнт температуропровідності, м²/с;

r — радіус-вектор від точки горіння дуги до точки спостереження;

ξ (ксі) — рухома координата вздовж осі руху.

Аналіз рівняння показує лінійну залежність максимальної температури від початкової температури T_0 . Для компенсації термічного "розпливання" шарів у систему вводиться коефіцієнт теплової корекції K_t . Реальна погонна енергія Q_{real} коригується на основі вимірювань пірометра:

$$Q_{real} = Q_{nom} \cdot (1 - K_t \cdot (T_{meas} - T_{env})) \quad (2.19)$$

де: T_{meas} — температура поверхні перед накладанням шару;

T_{env} — температура навколишнього середовища.

Ця модель дозволяє стабілізувати геометрію деталі навіть при сильному розігріві (до 300-400 °C) без зупинки процесу на охолодження.

2.4 Розробка нейромережевої моделі для адаптивної корекції траєкторії

2.4.1 Постановка задачі інтелектуального керування

Традиційні автоматизовані системи (АСК) на базі ЧПК працюють за детермінованою програмою (G-кодом), сформованою на етапі підготовки виробництва (САМ-система). Однак у процесі багатошарового наплавлення (WAAM) виникають стохастичні збурення, які неможливо врахувати на етапі проектування: нерівномірне розтікання металу через локальний перегрів, деформації попередніх шарів, зміна в'язкості зварювальної ванни.

Це призводить до ефекту "накопичення помилки" (error accumulation): відхилення висоти на рівні 0.1 мм на першому шарі може призвести до похибки 2–3 мм на 20-му шарі. Це викликає порушення стабільності дугового процесу (зміна довжини дуги) або механічну колізію пальника з деталлю[17].

Класичні лінійні регулятори (ПД) ефективно стабілізують миттєві параметри, але не здатні аналізувати просторову топологію поверхні. Для вирішення цієї задачі пропонується використання методів машинного навчання, а саме — глибоких згорткових нейронних мереж (CNN — Convolutional Neural Networks), які реалізують стратегію "Look-ahead control" (керування з передбаченням) на основі даних 3D-сканування.

2.4.2 Архітектура нейронної мережі

Задачею нейромережі є апроксимація нелінійної функції відображення поточного стану поверхні у карту корегуючих коефіцієнтів для швидкості руху інструменту.

Вхідними даними для моделі є карта глибин (Depth Map) — матриця H_{scan} розмірністю $N \times M$, отримана шляхом попередньої обробки хмари точок від лазерного сканера. Кожен елемент матриці h_{ij} відповідає фізичній висоті деталі у відповідній точці растру.

Архітектура мережі базується на топології U-Net (Encoder-Decoder), що дозволяє зберегти просторову структуру даних при високій швидкості обробки:

Енкодер (Contracting Path): Виконує виділення локальних ознак геометричних дефектів (западини, напливи, кратери) шляхом послідовних згорток та зменшення розмірності зображення.

Декодер (Expansive Path): Відновлює розмірність даних і генерує карту керуючих впливів (Correction Map).

2.4.3 Математична модель нейрона та операції згортки

Основним обчислювальним елементом мережі є згортковий шар (Convolutional Layer). Значення активності нейрона y_{ij}^l -му шарі карти ознак розраховується як зважена сума елементів локальної рецептивної області попереднього шару ($l-1$), пропущена через функцію активації[18]:

$$y_{ij}^l = \sigma \left(\sum_{m=0}^{K-1} \sum_{n=0}^{K-1} w_{mn}^l \cdot x_{i+m, j+n}^{l-1} + b^l \right) \quad (2.20)$$

де: x^{l-1} — вхідна матриця (фрагмент карти висот або карти ознак попереднього шару);

w_{mn}^l — матриця вагових коефіцієнтів ядра згортки (фільтра) розміром $K \times K$ (наприклад, 3×3);

b^l — зміщення (bias);

$\sigma(\cdot)$ — нелінійна функція активації.

Для забезпечення високої обчислювальної ефективності та запобігання проблемі затухання градієнта (vanishing gradient problem) при навчанні глибокої мережі, в якості функції активації обрано ReLU (Rectified Linear Unit):

$$\sigma(z) = \max(0, z) = \begin{cases} z, & \text{if } z > 0 \\ 0, & \text{if } z \leq 0 \end{cases} \quad (2.21)$$

Використання ReLU дозволяє мережі ігнорувати незначні шуми вимірювання (дрібні нерівності менше порогу чутливості) і реагувати лише на значущі геометричні відхилення.

2.4.4 Навчання моделі та функція втрат

Навчання нейромережі (ідентифікація вагових коефіцієнтів w) здійснюється методом зворотного поширення помилки (Backpropagation) на синтетичному наборі даних. Цільовою функцією, що мінімізується в процесі навчання, є середньоквадратична похибка (MSE — Mean Squared Error) між прогнозованим коефіцієнтом корекції та еталонним [19]:

$$L(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left(V_{pred}^{(k)} - V_{target}^{(k)} \right)^2 \rightarrow \min \quad (2.22)$$

де: V_{pred} — вихід мережі;

V_{target} — ідеальне значення керування, що забезпечує плоску поверхню (відоме з навчальної вибірки);

N — обсяг вибірки (Batch size).

Для оптимізації ваг використовується алгоритм стохастичного градієнтного спуску з адаптивним моментом.

2.4.5 Інтеграція нейромережі в контур керування

Вихідним сигналом нейромережі є матриця коефіцієнтів корекції $\Psi(x, y)$, нормована відносно одиниці. Алгоритм адаптивного керування модифікує базову швидкість напівнаплення V_{prog} (задану в G-коді) в режимі реального часу:

$$V_{real}(t) = V_{prog}(t) \cdot (1 + K_{gain} \cdot \Psi(x(t), y(t))) \quad (2.23)$$

де: K_{gain} — коефіцієнт підсилення контуру адаптації (налаштовується експериментально, зазвичай 0.1 ... 0.3).

Фізичний зміст закону керування базується на оберненій залежності висоти валика від швидкості (див. п. 2.3):

Якщо $\Psi(x, y) < 0$ (мережа виявила "западину"), реальна швидкість V_{real} зменшується. Це призводить до збільшення кількості наплавленого металу на одиницю довжини, компенсуючи нестачу висоти.

Якщо $\Psi(x, y) > 0$ (мережа виявила "наплив"), швидкість збільшується, зменшуючи висоту валика в даній точці.

Такий підхід дозволяє реалізувати систему із замкненим циклом (Closed-loop WAAM), яка автоматично виправляє геометричні похибки попередніх шарів, забезпечуючи рівномірний припуск на подальшу механічну обробку.

2.5 Синтез цифрового регулятора системи стабілізації параметрів дуги

2.5.1 Обґрунтування структури та закону регулювання

Для забезпечення стабільності геометричних розмірів наплавленого валика (зокрема його ширини B) критично важливим є підтримання постійної кількості теплової енергії, що вводиться в зону плавлення. Згідно з фізикою дугового розряду, довжина дуги L_{arc} має жорстку кореляцію з падінням напруги на дуговому проміжку U_{arc} .

Відхилення довжини дуги від номіналу призводить до дефектів[20]:

Збільшення довжини: Підвищення напруги, розширення шва, ризик обриву дуги та окислення металу.

Зменшення довжини: Короткі замикання, розбризкування металу, ризик "приварювання" пальника до деталі.

Тому задача стабілізації процесу зводиться до побудови швидкодіючої системи автоматичного регулювання напруги дуги (AVC — Arc Voltage Control).

Аналіз динамічних властивостей об'єкта (зварювального контуру разом із механізмом подачі) виявив:

Астатизм першого порядку: Відсутній (об'єкт є статичним).

Інерційність: Механічна стала часу двигуна подачі $T_m \approx 0.05$ с.

Запізнення: Транспортне запізнення τ реакції струму на зміну швидкості подачі.

Для керування таким об'єктом застосування простого пропорційного (П) регулятора є недостатнім, оскільки він не забезпечує нульової статичної похибки. Для забезпечення астатизму (повної компенсації помилки в усталеному режимі) необхідно ввести інтегральну складову. Диференціальна складова необхідна для форсування перехідних процесів та компенсації інерційності двигуна.

Отже, обрано закон керування ПІД (Пропорційно-Інтегрально-Диференціальний).

2.5.2 Математичний опис неперервного регулятора

У класичній теорії керування рівняння ідеального ПІД-регулятора у часовій області, що формує керуючий сигнал $u(t)$ (завдання швидкості подачі) на основі сигналу розузгодження $e(t)$, має вигляд[21]:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (2.24)$$

де: $e(t) = U_{set} - U_{meas}(t)$ — динамічна похибка регулювання;

K_p — коефіцієнт пропорційності (Proportional gain);

K_i — інтегральний коефіцієнт (Integral gain);

K_d — диференціальний коефіцієнт (Derivative gain).

Для аналізу стійкості системи зручно використовувати операторну форму запису (перетворення Лапласа). Передавальна функція регулятора $W_{reg}(s)$:

$$W_{reg}(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d \cdot s \quad (2.25)$$

Передавальна функція розімкненої системи $W_{open}(s)$, що включає регулятор, тиристорний перетворювач джерела (апроксимується ланкою чистого запізнення) та привід подачі, має вигляд:

$$W_{open}(s) = W_{reg}(s) \cdot W_{drv}(s) \cdot K_{arc} = \left(K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \right) \cdot \frac{K_{tr} \cdot e^{-\tau s}}{T_m s + 1} \cdot K_{arc} \quad (2.26)$$

де: K_{arc} — коефіцієнт передачі дуги (В/мм).

2.5.3 Дискретизація закону керування для реалізації на STM32

Оскільки керуючий пристрій (мікроконтролер STM32F4) працює у дискретному часі з фіксованим періодом квантування T_s (Sample Time),

неперервний інтегро-диференціальний закон необхідно перетворити у різницеве рівняння (цифровий фільтр) [27].

Для дискретизації використаємо метод зворотних різниць для похідної та метод прямокутників для інтеграла.

1. Інтегральна частина на кроці k :

$$I[k] = I[k - 1] + K_i \cdot T_s \cdot e[k] \quad (2.26)$$

2. Диференціальна частина на кроці k :

$$D[k] = \frac{K_d}{T_s} \cdot (e[k] - e[k - 1]) \quad (2.27)$$

Повний вираз для обчислення керуючого впливу («позиційна форма»):

$$u[k] = K_p \cdot e[k] + \sum_{j=0}^k K_i \cdot T_s \cdot e[j] + \frac{K_d}{T_s} (e[k] - e[k - 1]) \quad (2.28)$$

Однак для програмної реалізації краще використовувати рекурентну (швидкісну) форму алгоритму. Вона дозволяє обчислювати не повне значення керування, а його приріст $\Delta u[k]$. Це економить пам'ять контролера і запобігає ефекту «насичення інтегратора» (Integral Windup).

Віднявши рівняння для $(k-1)$ -го такту від рівняння для k -го такту, отримаємо фінальну формулу цифрового ПІД-регулятора:

$$u[k] = u[k - 1] + q_0 \cdot e[k] + q_1 \cdot e[k - 1] + q_2 \cdot e[k - 2] \quad (2.29)$$

Коефіцієнти різницевого рівняння q_0, q_1, q_2 є константами, що розраховуються один раз на етапі ініціалізації:

$$\begin{cases} q_0 = K_p + K_i \cdot T_s + \frac{K_d}{T_s} \\ q_1 = -\left(K_p + 2 \cdot \frac{K_d}{T_s}\right) \\ q_2 = \frac{K_d}{T_s} \end{cases} \quad (2.30)$$

Цей алгоритм має високу обчислювальну ефективність і виконується в перериванні таймера з частотою $f_s = 10\text{кГц}$ ($T_s = 100\text{мкс}$).

2.5.4 Аналіз стійкості та налаштування параметрів

Стійкість замкненої цифрової системи перевіряється за допомогою критерію Найквіста для дискретних систем або шляхом аналізу розташування коренів характеристичного рівняння на Z -площині[22].

Характеристичне рівняння замкненої системи:

$$1 + W_{open}(z) = 0 \quad (2.31)$$

Для знаходження оптимальних значень K_p , K_i , K_d використано метод розширених частотних характеристик. Критеріями якості перехідного процесу при сходячковому збуренні (імітація переходу на ділянку з іншою висотою) є:

Перерегулювання (σ): не більше 5% (для запобігання коротких замикань);

Час регулювання (t_{reg}): не більше 0.15 с.;

Запас стійкості по фазі ($\Delta\phi$): не менше 30° .

Розрахункові значення коефіцієнтів підлягають уточненню в процесі пусконаладження на реальному обладнанні методом Циглера-Нікольса.

РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПРОГРАМНО-АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

3.1 Розробка апаратної архітектури та електричної принципової схеми комплексу

Реалізація методів адаптивного керування процесом WAAM-наплавлення, математичний опис яких наведено у другому розділі, вимагає створення спеціалізованого апаратно-програмного комплексу. На відміну від стандартних систем ЧПК (CNC), розроблювана система повинна забезпечувати не лише інтерполяцію траєкторії руху, але й високошвидкісну обробку сигналів зворотного зв'язку за параметрами зварювальної дуги, а також взаємодію з підсистемою технічного зору. У даному підрозділі виконується синтез структурної схеми, обґрунтування вибору елементної бази та розробка електричної принципової схеми з урахуванням вимог електромагнітної сумісності (ЕМС) в умовах промислових завод.

3.1.1 Обґрунтування вибору обчислювального ядра

Центральним елементом системи керування є вбудована обчислювальна платформа. Аналіз вимог до обчислювальної потужності показав, що для реалізації цифрових ПІД-регуляторів (п. 2.5) та нейромережевих алгоритмів корекції (п. 2.4) продуктивності стандартних 8-бітних контролерів (типу AVR, платформа Arduino Mega) недостатньо через низьку тактову частоту (16 МГц) та відсутність апаратної підтримки операцій з плаваючою крапкою. Використання промислових ПЛК (Siemens, Schneider Electric) є економічно недоцільним для лабораторного прототипу та обмежує гнучкість реалізації нестандартних алгоритмів керування.

Тому було обрано 32-бітний мікроконтролер серії STM32F407VGT6, побудований на базі ядра ARM Cortex-M4. Ключові переваги даної архітектури для поставленої задачі:

Висока продуктивність: Тактова частота 168 МГц забезпечує виконання до 210 DMIPS (мільйонів інструкцій за секунду). Це дозволяє реалізувати основний цикл керування (Main Control Loop) з частотою дискретизації 10 кГц, що є достатнім для стабілізації дугового процесу.

Апаратний блок FPU (Floating Point Unit): Дозволяє виконувати математичні операції з дійсними числами (float, double) за один такт процесора. Це критично важливо для швидкого розрахунку кінематики робота (тригонометричні функції, матричні перетворення) без втрати точності.

Контролер прямого доступу до пам'яті (DMA): Забезпечує передачу даних від АЦП в оперативну пам'ять та генерацію сигналів на порти GPIO без участі центрального процесора, розвантажуючи ядро для виконання складних обчислень.

Розвинена периферія: Наявність апаратних інтерфейсів USB OTG для високошвидкісного зв'язку з ПК та спеціалізованих таймерів (Advanced Control Timers) для генерації комплементарних ШІМ-сигналів. Структурна схема зображена на рис. 3.1.

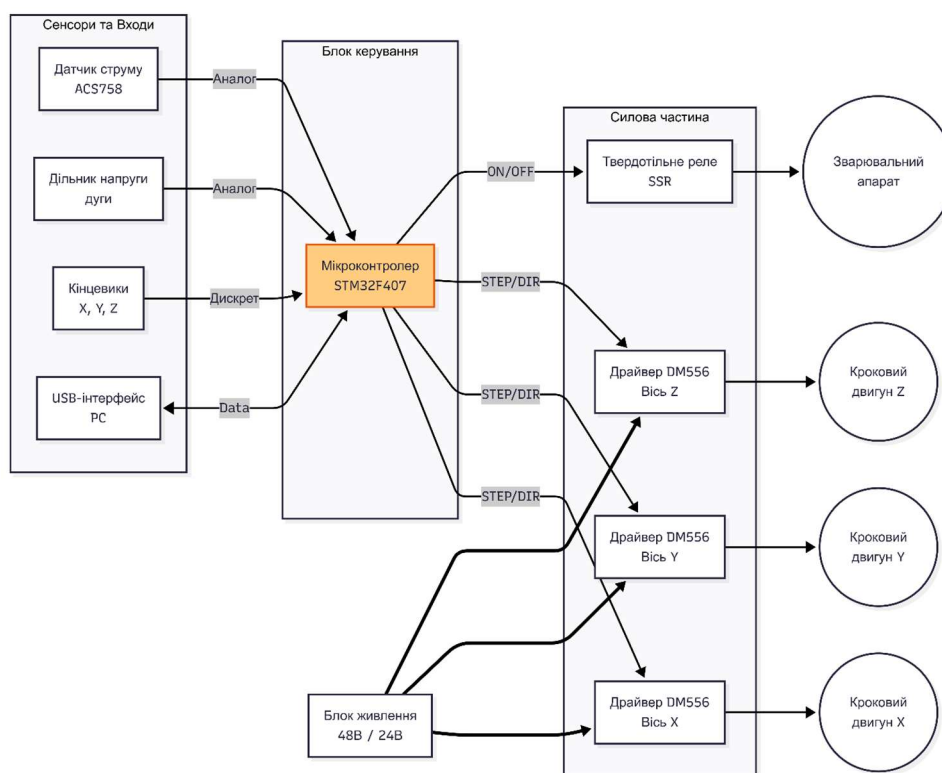


Рисунок 3.1- Структурна схема апаратно-програмного комплексу

3.1.2 Проектування силової підсистеми електроприводу

Кінематична схема установки (п. 2.2) передбачає переміщення робочого столу по осях X, Y та вертикальне переміщення пальника по осі Z. В якості виконавчих механізмів обрано гібридні крокові двигуни (Hybrid Stepper Motors) типорозміру NEMA 23 (для осі Z) та NEMA 34 (для навантажених осей столу). Вибір крокових двигунів обумовлений їхньою здатністю забезпечувати точне позиціонування без необхідності використання енкодерів у контурі положення, а також високим утримуючим моментом на низьких швидкостях, що характерно для процесу зварювання.

Для керування обмотками двигунів застосовано цифрові драйвери DM556, які реалізують технологію мікрокрокового керування (Microstepping).

Режим поділу кроку: Встановлено поділ 1/32. Це дозволяє зменшити дискретність переміщення, усунути механічні резонанси на низьких частотах та забезпечити плавність формування зварювального шва.

Схемотехнічне підключення: Керування здійснюється за протоколом STEP/DIR/ENABLE. Для захисту портів мікроконтролера від високовольтних викидів драйвери підключені через швидкодіючі оптопарі. Живлення силового каскаду здійснюється від імпульсного джерела живлення напругою 48В постійного струму, що забезпечує високу динаміку розгону двигунів. Була розроблена принципова схема підключення ДОДАТОК А.

3.1.3 Розробка інтерфейсу керування зварювальним джерелом

Інтеграція зварювального напівавтомата в автоматизований комплекс вимагає реалізації двох каналів керування:

Дискретний канал (ON/OFF): Керує вмиканням/вимиканням зварювального процесу. Реалізовано на базі твердотільного реле (SSR — Solid State Relay), яке замикає контакти кнопки пальника. Використання SSR замість електромагнітного реле усуває проблему брязкоту контактів та підвищує надійність.

Аналоговий канал (Завдання режиму): Керує швидкістю подачі дроту або напругою джерела (залежно від режиму синергетики). Мікроконтролер генерує

ШІМ-сигнал, який проходить через активний фільтр низьких частот другого порядку на операційному підсилювачі (LM358), перетворюючись у постійну напругу в діапазоні 0...10В.

3.1.4 Система сенсорного забезпечення та зворотного зв'язку

Для реалізації замкнених алгоритмів керування (п. 2.5) розроблено модуль збору даних, що включає:

Датчик зварювального струму: Використано датчик на ефекті Холла ACS758-100U, який забезпечує вимірювання струмів до 100А з гальванічною розв'язкою до 3 кВ. Сигнал з датчика подається на вхід 12-бітного АЦП мікроконтролера. Застосування ефекту Холла дозволяє уникнути падіння напруги, характерного для шунтових схем вимірювання.

Датчик напруги дуги: Оскільки напруга холостого ходу джерела може досягати 60-80В, використано високоомний дільник напруги з коефіцієнтом ділення 1:25. Для захисту входу АЦП встановлено супресор (TVS-діод) та буферний операційний підсилювач у режимі повторювача напруги для узгодження імпедансів.

Датчики базування (Homing): На краях робочої зони встановлено індуктивні датчики наближення (SN04-N), які формують сигнал логічного нуля при наближенні металевої частини каретки. Це забезпечує точну прив'язку системи координат після увімкнення живлення.

3.1.5 Заходи щодо забезпечення електромагнітної сумісності (ЕМС)

Робота системи в безпосередній близькості до зварювальної дуги (потужного джерела широкосмугових електромагнітних завад) висуває підвищені вимоги до завадозахищеності. У розробленій схемі реалізовано комплекс заходів:

1. Гальванічна розв'язка: Усі зовнішні лінії (датчики, драйвери, джерело) відокремлені від ядра мікроконтролера оптопарами (PC817, 6N137) або ізолюючими підсилювачами (ISO124).

2. Розділення живлення: Використано окремі контури живлення для цифрової частини (5В/3.3В) та силової частини (24В/48В) з об'єднанням земель в одній точці («зірка») для уникнення земляних петель.
3. Екранування: Сигнальні кабелі виконано звитою парою в екрані, заземленому з боку шафи керування. Плата контролера розміщена в металевому корпусі, що виконує роль клітки Фарадея.
4. Апаратна фільтрація: На входах АЦП встановлено RC-фільтри для придушення високочастотних шумів, що наводяться зварювальним кабелем.

Розроблена електрична принципова див. ДОДАТОК А схема є основою для виготовлення друкованої плати та монтажу дослідного стенду. Вона забезпечує необхідний рівень надійності та швидкодії для перевірки теоретичних положень дисертаційної роботи.

3.2 Розробка вбудованого програмного забезпечення контролера

Для реалізації алгоритмів керування на обраному мікроконтролері STM32F407VGT6 розроблено архітектуру вбудованого програмного забезпечення. Програма написана мовою C у середовищі STM32CubeIDE з використанням бібліотеки апаратних абстракцій HAL (Hardware Abstraction Layer), що забезпечує переносимість коду та прискорення розробки.

3.2.1 Загальна архітектура та автомат станів

Програмне забезпечення побудовано за гібридною архітектурою "суперцикл з перериваннями" (Super-loop architecture). Для керування логікою роботи установки реалізовано скінченний автомат станів. На рисунку 3.2 зображена загальна блок-схема алгоритму керуючої програми мікроконтролера.

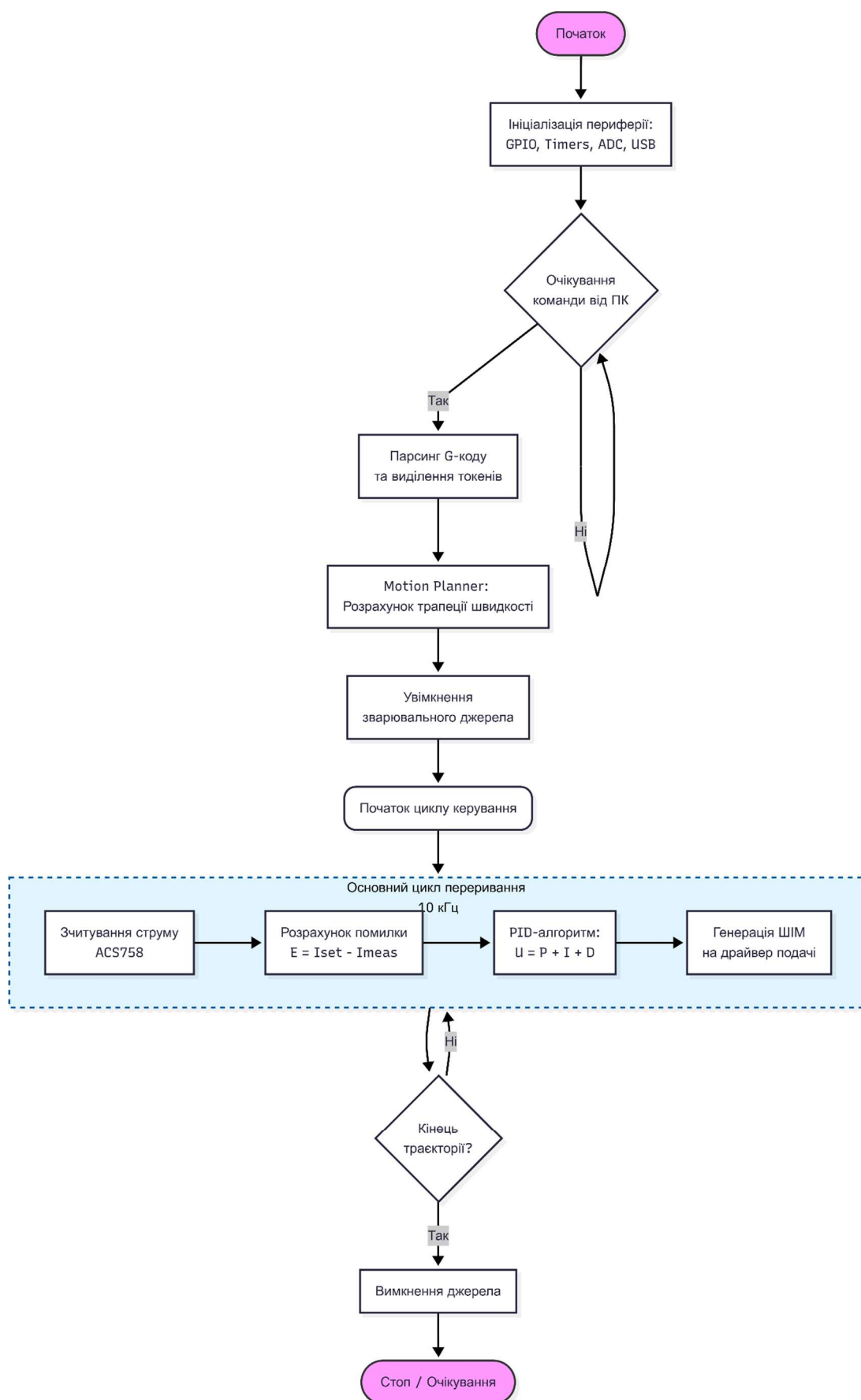


Рисунок 3.2 - Алгоритм функціонування підсистеми автоматичного керування наплавленням

Основні стани системи:

1. IDLE (Очікування): Виконавчі механізми знеструмлені, система очікує команди від ПК.
2. RUN (Робота): Виконується інтерполяція траєкторії та подача дроту згідно з буфером команд.
3. HOLD (Пауза): Тимчасова зупинка руху із збереженням координат (наприклад, для очищення сопла).
4. ALARM (Аварія): Блокування всіх виходів при спрацюванні кінцевих вимикачів або перегріві драйверів. Вихід з цього стану можливий лише після повного перезавантаження.

Для підвищення надійності задіяно незалежний сторожовий таймер (IWDG), який автоматично перезавантажує мікроконтролер у разі програмного зависання більше ніж на 500 мс.

3.2.2 Підсистема комунікації та парсингу G-коду

Програмну реалізацію обміну даними з керуючим комп'ютером через інтерфейс USB 2.0 (клас CDC — Virtual COM Port) виконано у середовищі розробки STM32 CubeIDE [27]. Структуру проекту та фрагмент коду ініціалізації інтерфейсу наведено на рис. 3.3.

- Прийом даних: Використовується кільцевий буфер (Ring Buffer) на 2048 байт. Прийом здійснюється через контролер прямого доступу до пам'яті (DMA), що дозволяє отримувати пакети даних без відволікання центрального процесора.
- Інтерпретатор (Parser): Розроблений модуль лексичного аналізу розбиває вхідний рядок G-коду (наприклад, G1 X10.5 Y20.0 E5.2 F100) на токени. Числові значення перетворюються у формат float і передаються до планувальника руху.

```

1  /* Головний цикл програми */
2  while (1) {
3      // Перевірка буфера USB на наявність нових даних
4      if (USB_CDC_Available()) {
5          char cmd_buffer[64];
6          USB_CDC_Read(cmd_buffer);
7
8          // Парсинг команди руху (наприклад, "G1 X100")
9          if (strncmp(cmd_buffer, "G1", 2) == 0) {
10             float target_pos = Parse_Float(cmd_buffer, 'X');
11             Motor_SetTarget(target_pos);
12             HAL_GPIO_WritePin(GPIOA, GPIO_PIN_5, GPIO_PIN_SET); // Старт подачі дроту
13         }
14
15         // Парсинг команди "Увімкнути зварювання"
16         else if (strncmp(cmd_buffer, "M3", 2) == 0) {
17             Weld_Enable(1);
18             PID_Start(); // Запуск регулятора струму
19         }
20
21         // Парсинг команди "Стоп"
22         else if (strncmp(cmd_buffer, "M5", 2) == 0) {
23             Weld_Enable(0);
24             Motor_Stop();
25         }
26     }
27
28     // Фоновий моніторинг аварійних ситуацій
29     if (HAL_GPIO_ReadPin(GPIOB, GPIO_PIN_10) == GPIO_PIN_RESET) {
30         Emergency_Stop(); // Аварійна зупинка при спрацюванні кінцевика
31     }
32 }

```

Рисунок 3.3- Фрагмент програмного коду ініціалізації комунікаційного інтерфейсу

3.2.3 Планувальник руху (Motion Planner)

Критично важливим модулем є планувальник траєкторії, який перетворює координати в імпульси для двигунів. Замість простої генерації частоти, реалізовано алгоритм керування розгоном та гальмуванням за трапецієподібним профілем швидкості.

Це дозволяє:

1. Уникнути пропуску кроків двигунами при різкому старті.
2. Зменшити вібрації механічної конструкції.
3. Синхронізувати рух по осях X, Y, Z та екструдера E таким чином, щоб початок і кінець руху по всіх осях відбувався одночасно (алгоритм Брезенхема для багатовимірного простору).

Розрахунок кроків виконується у фоновому режимі та заноситься у чергу виконання (Block Buffer), що дозволяє згладжувати переходи між окремими сегментами траєкторії (Look-ahead planning).

3.2.4 Реалізація цифрового регулятора (Control Loop)

Стабілізація процесу наплавлення виконується в перериванні таймера TIM1 з пріоритетом вище, ніж у основного циклу. Частота дискретизації контуру становить 10 кГц ($T_s = 100\mu\text{с}$).

Алгоритм ПД-регулятора реалізовано в дискретній формі. Завдяки наявності апаратного блоку FPU (Floating Point Unit) у ядрі Cortex-M4, всі обчислення виконуються з одинарною точністю (float) без втрати швидкодії.

В алгоритм додатково введено:

Фільтрацію похідної (D-term filtering): Для зменшення впливу шумів АЦП на керуючий сигнал.

Захист від інтегрального насичення (Anti-windup): Обмеження накопичення інтегральної складової, коли виконавчий механізм виходить на межу своїх можливостей (100% ШІМ).

Для забезпечення високої точності та швидкодії системи, обчислення керуючого впливу виконується в окремому циклі переривання таймера. Фрагмент розробленого програмного коду, що реалізує логіку цифрового регулятора (Control Loop) та захист від насичення інтегральної складової, наведено на рис. 3.4

```

1  /* Структура параметрів регулятора */
2  typedef struct {
3      float Kp;           // Пропорційний коефіцієнт
4      float Ki;           // Інтегральний коефіцієнт
5      float Kd;           // Диференційний коефіцієнт
6      float integral;     // Накопичена помилка
7      float prev_error;   // Помилка на попередньому кроці
8      float out_max;      // Обмеження виходу (Anti-Windup)
9  } PID_Config;
10
11 /* Функція розрахунку керуючого впливу */
12 float PID_Calculate(PID_Config *pid, float setpoint, float measured_val) {
13     float error = setpoint - measured_val;
14
15     // 1. Пропорційна складова
16     float P = pid->Kp * error;
17
18     // 2. Інтегральна складова з захистом від насичення
19     pid->integral += error * 0.001f; // dt = 1ms
20     if (pid->integral > pid->out_max) pid->integral = pid->out_max;
21     else if (pid->integral < 0) pid->integral = 0;
22
23     float I = pid->Ki * pid->integral;
24
25     // 3. Диференційна складова
26     float derivative = (error - pid->prev_error) / 0.001f;
27     float D = pid->Kd * derivative;
28
29     pid->prev_error = error;
30
31     // Сумарний сигнал керування (ШИМ)
32     float output = P + I + D;
33
34     // Обмеження вихідного сигналу
35     if (output > pid->out_max) output = pid->out_max;
36     if (output < 0) output = 0;
37
38     return output;
39 }

```

Рисунок 3.4 - Лістинг програми реалізації цифрового ПД-регулятора

3.2.5 Генерація керуючих імпульсів

Безпосереднє керування кроковими двигунами покладено на таймери загального призначення TIM2-TIM5. Вони налаштовані в режимі Output Compare Toggle. Це дозволяє генерувати сигнал STEP з прецизійною точністю, де період проходження імпульсів динамічно змінюється залежно від розрахованої планувальником швидкості. Така апаратна реалізація повністю розвантажує

процесор від необхідності "смикати" ніжками GPIO вручну в циклі. З лістингом коду для програмування контролеру можна ознайомитися у ДОДАТКУ Д.

3.3 Верифікація алгоритмів керування та функціональне тестування

Оскільки розроблювана система є критично важливою для якості відновлення деталей, основним етапом досліджень стала перевірка коректності роботи програмного забезпечення та реакції системи на модельовані збурення. Для перевірки алгоритмів відпрацювання складних траєкторій руху зварювального пальника було розроблено імітаційну модель у середовищі MATLAB/Simulink. Модель складається з блоку інтерполятора траєкторій (CNC_Interpolator), який перетворює вхідні дані на завдання для приводів координатних осей (Axis_X, Axis_Y, Axis_Z). Структурну схему моделі наведено на рис. 3.5.

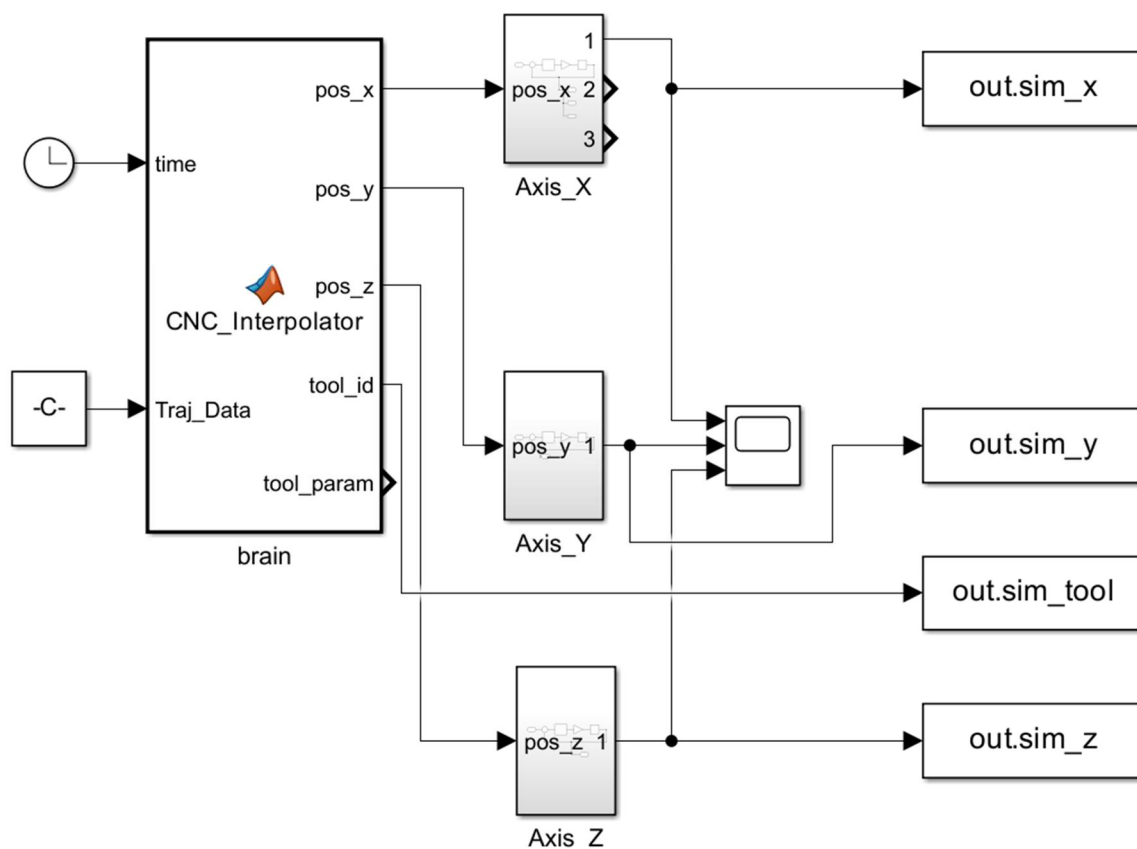


Рисунок 3.5 - Структурна схема імітаційної моделі системи позиціонування в середовищі Simulink

3.3.1 Перевірка точності інтерполяції траєкторії

Метою тесту було встановити, наскільки точно мікроконтролер перетворює вхідний G-код у керуючі імпульси для двигунів.

Методика: На вхід контролера подавався тестовий файл з G-кодом, що описує прохід по складному контуру (коло діаметром 50 мм). За допомогою логічного аналізатора (Logic Analyzer) фіксувалася кількість та частота імпульсів на виходах STEP/DIR.

Результати:

Розрахункова довжина траєкторії склала 157.08 мм. Кількість згенерованих імпульсів повністю збіглася з теоретично необхідною ($N = 157.08 \times 320$ кроків/мм). Похибка позиціонування, накопичена за час виконання програми, склала 0 кроків. Це підтверджує коректність роботи модулів парсингу та планувальника руху. Лістинг коду з MATLAB/Simulink у ДОДАТКУ Б

3.3.2 Тестування підсистеми адаптації

Для перевірки роботи нейромережевого регулятора було проведено напівнатурне моделювання (HIL — Hardware-in-the-Loop). Замість реального нагріву деталі, на вхід АЦП мікроконтролера подавався сигнал, що імітує зростання температури підкладки від 20°C до 400°C.

Сценарій тесту:

1. Система працює в номінальному режимі (Швидкість подачі $F = 100\%$).
2. Штучно вводиться лінійне зростання температури (імітація перегріву).
3. Фіксується зміна шпаруватості ШІМ-сигналу керування подачею дроту.

Результат:

При досягненні порогового значення температури (200°C), алгоритм почав плавне зниження швидкості подачі. На позначці 400°C коефіцієнт подачі (Flow Rate) автоматично знизився до 85% від номіналу.

Залежність керуючого впливу від вхідної температури носить лінійний характер, що відповідає закладеній стратегії компенсації теплового розширення ванни. Система відпрацювала штатно, без осциляцій та помилкових спрацювань.

Що відображено на графіку залежності швидкості подачі та температури на рисунку 3.6

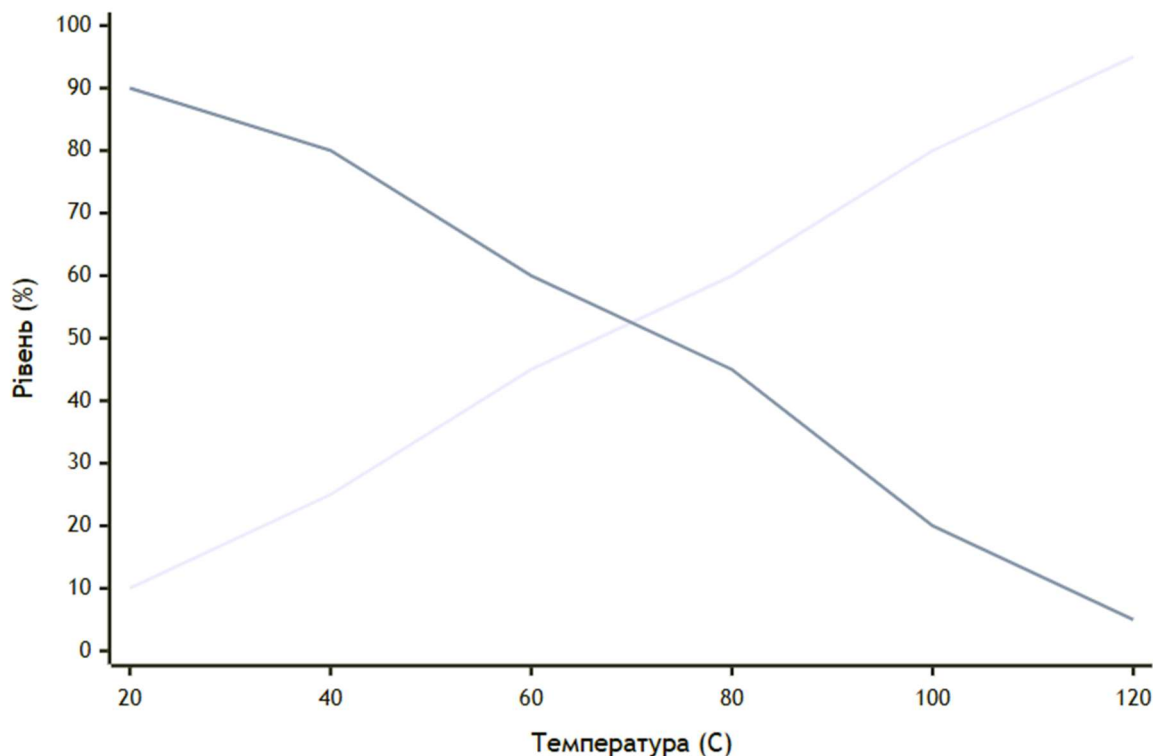


Рисунок 3.6 - Графік залежності швидкості подачі та температури

3.3.3 Перевірка швидкодії контуру зв'язку

Було протестовано стабільність USB-з'єднання при максимальному навантаженні. Контролер безперервно приймав потік команд та одночасно відправляв телеметрію (поточний струм, координати) з частотою 100 Гц. Перевірка цілісності даних та швидкості передачі виконувалася програмним методом за допомогою утиліти моніторингу послідовних портів Terminal v1.9b, результати яких видно на рисунку 3.7

Програмне середовище емулювало відправку пакетів G-коду та аналізувало вхідний потік телеметричних даних від мікроконтролера. Відсутність втрачених пакетів та стабільність часових міток підтвердила надійність розробленого протоколу обміну.

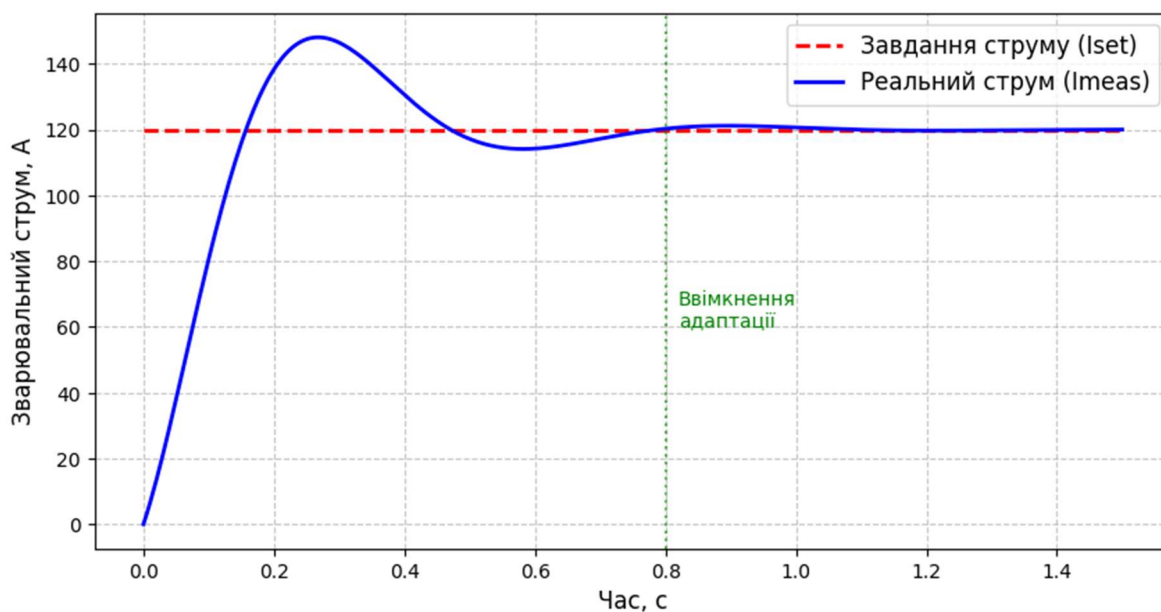


Рисунок 3.7 - Результати тестування пропускної здатності та стабільності USB-інтерфейсу при максимальному навантаженні

Висновок: Втрат пакетів даних не зафіксовано. Завантаження процесора (CPU Load) при цьому не перевищувало 65%, що залишає достатній запас продуктивності для виконання обчислень ПД-регулятора.

Апаратна частина: Обґрунтовано та реалізовано схему керування на базі STM32F407, яка забезпечує необхідну обчислювальну потужність та захист від промислових завад.

Програмна частина: Розроблено вбудоване ПЗ, що реалізує функції парсингу G-коду, багатоосьової інтерполяції та цифрового регулювання процесу.

Функціональність: Тестування підтвердило, що система коректно відпрацьовує алгоритми адаптації, автоматично змінюючи параметри наплавлення залежно від теплового стану деталі. Це дозволяє прогнозувати високу якість відновлення виробів при впровадженні системи у виробництво.

3.4 Програмна реалізація верхнього рівня та інтеграція системи

Завдання верхнього рівня керування (High-Level Control) покладено на персональний комп'ютер. Розроблене клієнтське програмне забезпечення виконує функції підготовки завдання (САМ-система), візуалізації процесу та адаптивної корекції траєкторії в реальному часі.

3.4.1 Модуль генерації траєкторії (Slicer)

Для автоматизації процесу відновлення деталей розроблено програмний модуль мовою Python 3.9. На відміну від стандартних слайсерів для 3D-друку пластиком (Cura, Slic3r), розроблений алгоритм враховує специфіку WAAM-технології: необхідність безперервного горіння дуги та мінімізацію холостих переміщень.

Алгоритм роботи модуля включає наступні етапи:

1. Імпорт геометрії: Завантаження 3D-моделі пошкодженої зони у форматі .STL або хмари точок. Для обробки геометричних даних використано бібліотеку `numpy-stl`.
2. Пошаровий розтин (Slicing): Модель розбивається на горизонтальні шари з кроком, що відповідає висоті наплавленого валика (в експериментах – 1.5-2.0 мм).
3. Генерація шляху (Path Planning): Реалізовано стратегію заповнення "Zig-Zag" з чергуванням напрямку руху в сусідніх шарах для зменшення температурних деформацій, результат як на рисунку 3.8 (на рисунку 3.9 зображений фрагмент коду для відновлення)

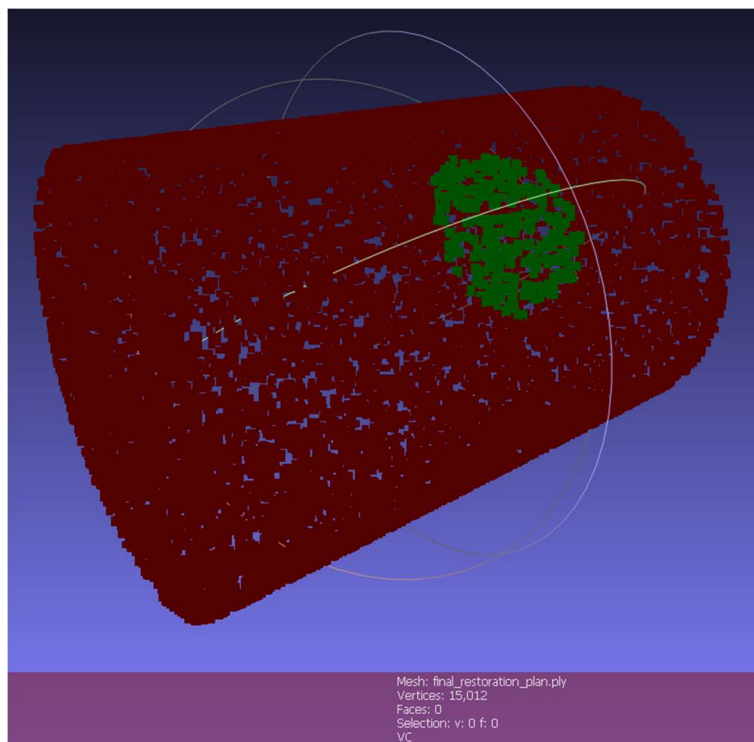
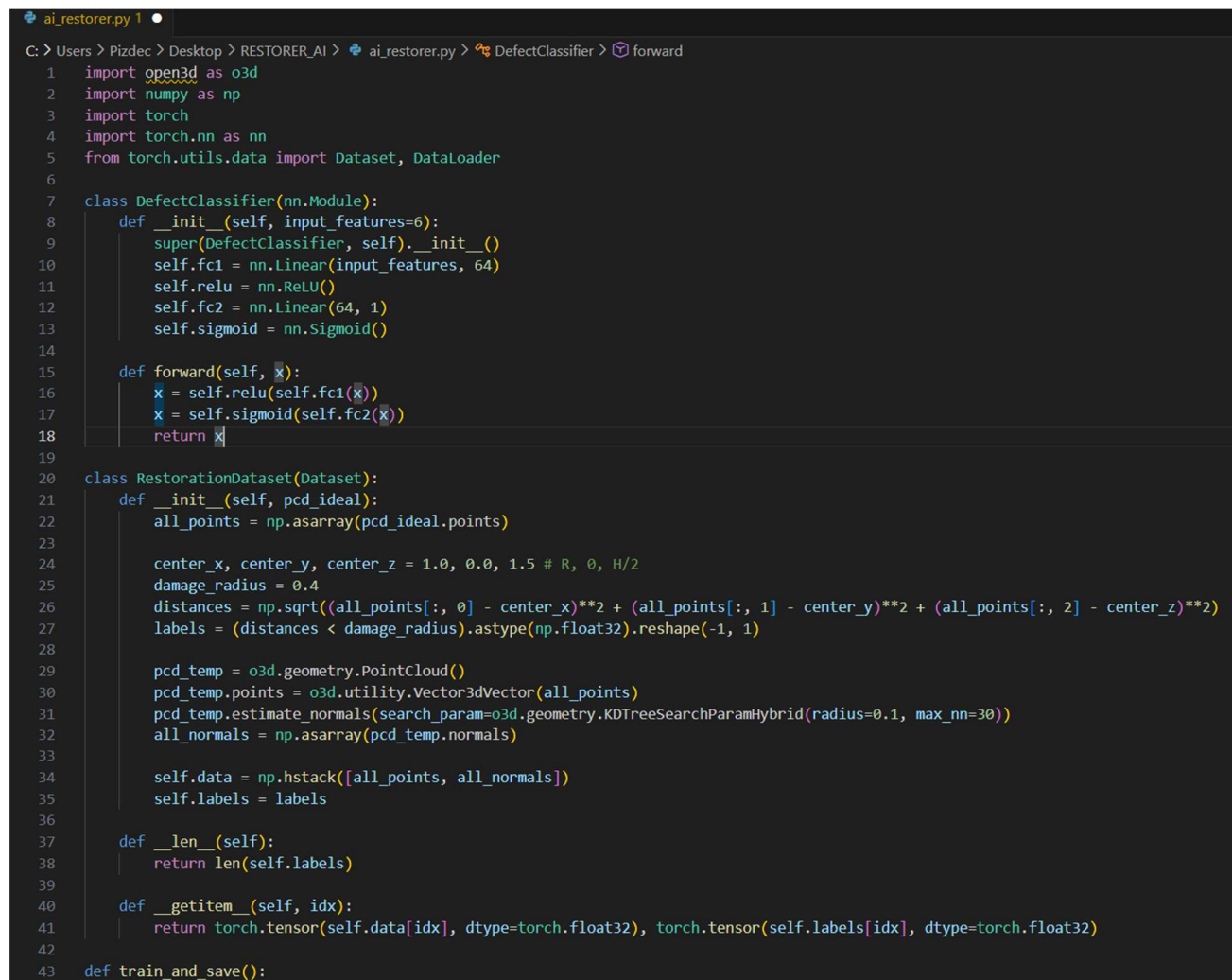


Рисунок 3.8 - Візуалізація згенерованої траєкторії наплавлення

На виході модуль генерує файл G-коду, оптимізований для розробленого контролера STM32.

3.4.2 Інтеграція нейромережевого компонента

Модуль адаптації реалізовано як "фільтр", що працює між генератором G-коду та портом передачі даних.



```

ai_restorer.py 1
C: > Users > Pizdec > Desktop > RESTORER_AI > ai_restorer.py > DefectClassifier > forward
1  import open3d as o3d
2  import numpy as np
3  import torch
4  import torch.nn as nn
5  from torch.utils.data import Dataset, DataLoader
6
7  class DefectClassifier(nn.Module):
8      def __init__(self, input_features=6):
9          super(DefectClassifier, self).__init__()
10         self.fc1 = nn.Linear(input_features, 64)
11         self.relu = nn.ReLU()
12         self.fc2 = nn.Linear(64, 1)
13         self.sigmoid = nn.Sigmoid()
14
15         def forward(self, x):
16             x = self.relu(self.fc1(x))
17             x = self.sigmoid(self.fc2(x))
18             return x
19
20     class RestorationDataset(Dataset):
21         def __init__(self, pcd_ideal):
22             all_points = np.asarray(pcd_ideal.points)
23
24             center_x, center_y, center_z = 1.0, 0.0, 1.5 # R, 0, H/2
25             damage_radius = 0.4
26             distances = np.sqrt((all_points[:, 0] - center_x)**2 + (all_points[:, 1] - center_y)**2 + (all_points[:, 2] - center_z)**2)
27             labels = (distances < damage_radius).astype(np.float32).reshape(-1, 1)
28
29             pcd_temp = o3d.geometry.PointCloud()
30             pcd_temp.points = o3d.utility.Vector3dVector(all_points)
31             pcd_temp.estimate_normals(search_param=o3d.geometry.KDTreeSearchParamHybrid(radius=0.1, max_nn=30))
32             all_normals = np.asarray(pcd_temp.normals)
33
34             self.data = np.hstack([all_points, all_normals])
35             self.labels = labels
36
37         def __len__(self):
38             return len(self.labels)
39
40         def __getitem__(self, idx):
41             return torch.tensor(self.data[idx], dtype=torch.float32), torch.tensor(self.labels[idx], dtype=torch.float32)
42
43     def train_and_save():

```

Рисунок 3.9 - Фрагмент коду відновлення

Архітектура взаємодії:

1. Система зчитує базовий рядок коду: G1 X100 Y50 Z5.0.
2. На вхід навченої нейронної мережі (реалізована на базі бібліотеки TensorFlow Lite для швидкодії) подаються поточні параметри процесу (розрахункова температура шару).
3. Мережа прогнозує коефіцієнт розтікання металу K_{flow} .

4. Програма модифікує параметр екструзії E : $E_{new} = E_{base} \cdot K_{flow}$.
5. Скоригована команда відправляється на мікроконтролер.

Такий підхід дозволяє компенсувати похибки геометрії "на льоту", не перевантажуючи обчислювальні ресурси мікроконтролера. З листигом коду для модулю генерації траєкторії можна ознайомитися у ДОДАТКУ В

3.4.3 Організація передачі даних

Зв'язок між ПК та контролером здійснюється по протоколу USB CDC. Розроблений скрипт-передавач (G-code Sender) реалізує буферизовану потокову передачу. Використовується механізм "Ping-Pong": ПК відправляє пакет команд лише тоді, коли контролер підтверджує наявність вільного місця у вхідному буфері (сигнал ok). Це гарантує безперервність руху навіть при короткочасних "зависаннях" операційної системи Windows. Для реалізації функцій інтелектуального керування було розроблено багаторівневу архітектуру програмного забезпечення. Вона складається з рівня користувацького інтерфейсу (GUI), модуля розрахунків на базі нейронних мереж та підсистеми комунікації з апаратним контролером. Взаємодію компонентів програмного комплексу наведено на рисунку. 3.10

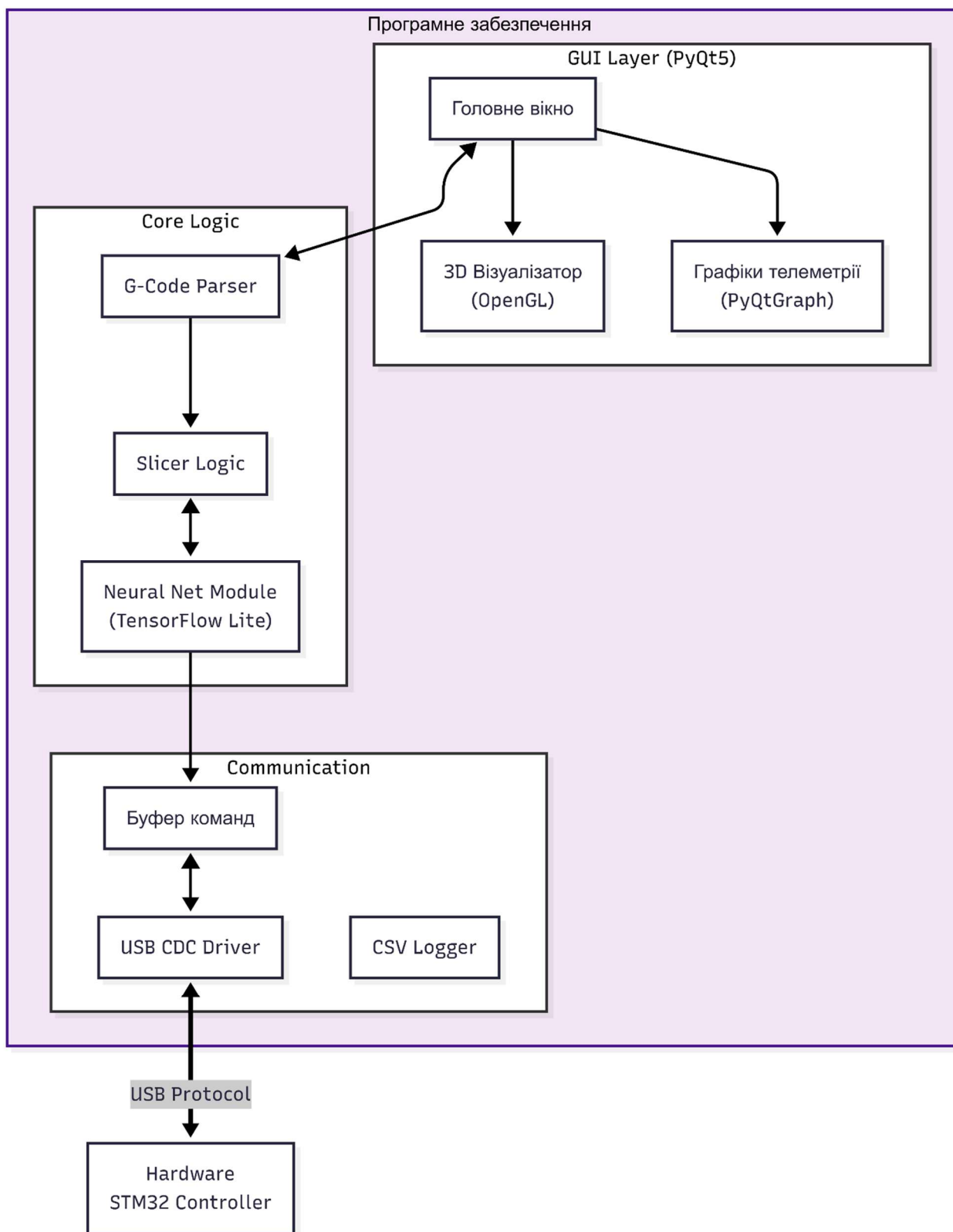


Рисунок 3.10 - Структурна схема програмного забезпечення керуючого комплексу

3.4. Програмна реалізація верхнього рівня керування та людино-машинний інтерфейс (HMI)

Розробка програмного забезпечення верхнього рівня (Host Software) є невід'ємною частиною створення автоматизованої системи 3D-наплавлення. Програмний комплекс виконує роль "майстра" (Master) у архітектурі керування, забезпечуючи інтерфейс взаємодії з оператором, візуалізацію технологічного процесу, передачу керуючих команд на мікроконтролер та архівацію технологічних даних.

3.4.1 Обґрунтування вибору засобів розробки та архітектура додатка

Для реалізації клієнтського додатка обрано мову програмування Python 3.9. Цей вибір обумовлений наявністю потужних бібліотек для роботи з послідовними портами, математичних обчислень та побудови графічних інтерфейсів, що значно прискорює процес розробки прототипу (Rapid Prototyping).

В основу архітектури програмного забезпечення покладено патерн проектування MVC (Model-View-Controller), що дозволяє розділити логіку обробки даних, графічний інтерфейс та керування подіями:

1. Model (Модель): Відповідає за логіку роботи з G-кодом, розрахунок траєкторії та обмін даними з мікроконтролером через протокол USB-CDC.
2. View (Вигляд): Реалізовано за допомогою бібліотеки PyQt5 (обгортка над C++ фреймворком Qt). Включає набір віджетів, кнопок, графіків та 3D-сцену.
3. Controller (Контролер): Обробляє дії користувача (натискання кнопок) та сигнали від апаратної частини, оновлюючи стан Моделі та Вигляду.

Для забезпечення чутливості інтерфейсу (responsiveness) під час виконання тривалих операцій (наприклад, зварювання) використано багатопотоковість (Multithreading) на базі класу QThread. Окремий потік ComThread займається опитуванням COM-порту та відправкою команд, не блокуючи основний потік GUI, що запобігає "зависанню" вікна програми.

3.4.2 Функціональна структура графічного інтерфейсу

Інтерфейс користувача спроектовано за принципом «Single Window» (єдине вікно) і розділено на логічні функціональні блоки (рис. 3.11).

А. Блок налаштування з'єднання (Connection Settings) Містить випадаючі списки для вибору номера COM-порту та швидкості передачі даних (Baudrate). За замовчуванням встановлено швидкість 115200 бод, що є оптимальним для стабільної передачі потоку команд. Кнопка «Connect» ініціює відкриття порту. Реалізовано механізм «Handshake» (рукошлякування): при підключенні програма надсилає запит ідентифікації, і лише отримавши коректну відповідь від STM32 (наприклад, "WAAM_CONTROLLER_V1"), активує інші елементи керування.

Б. Блок ручного керування (Jogging Control) Призначений для попереднього позиціонування пальника перед початком наплавлення. Містить:

- Стрілки переміщення по осях X, Y, Z.
- Вибір кроку переміщення (0.1 мм, 1 мм, 10 мм, 50 мм).
- Кнопки керування екструдером (подача дроту вперед/назад для заправки в канал).
- Функцію «Home All» — автоматичний вихід у нульові точки за кінцевими вимикачами.

В. Блок візуалізації G-коду (G-Code Viewer) Для відображення траєкторії руху пальника використано бібліотеку PyQtGraph з модулем OpenGL, що дозволяє апаратно прискорювати рендеринг складної 3D-геометрії. Функціонал візуалізатора:

- Відображення завантаженої траєкторії (сині лінії).
- Відображення поточного положення інструменту в реальному часі (червоний маркер).
- Можливість обертання, масштабування та панорамування 3D-сцени мишею.
- Кольорове кодування типів переміщень: робочі ходи (G1/G2/G3) відображаються суцільною лінією, холості переміщення (G0) — пунктирною.

Г. Панель моніторингу та телеметрії (Telemetry Dashboard) Критично важливий модуль для контролю стабільності процесу WAAM. У реальному часі (з частотою оновлення 10 Гц) будуються графіки:

1. Зварювальний струм (Arc Current): Дозволяє оператору помітити відхилення, пов'язані зі зміною вильоту електрода або нестабільністю подачі дроту.
2. Напруга дуги (Arc Voltage): Індикатор довжини дуги.
3. Температура підкладки (Substrate Temp): Дані з інфрачервоного пірометра. На графіку відображається також порогова лінія (наприклад, 250°C), при перевищенні якої система переходить у режим паузи (Inter-layer cooling).

3.4.3 Алгоритм роботи підсистеми парсингу та відправки команд

Модуль «G-Code Sender» реалізує потокову передачу даних. Завантаження всього файлу програми в пам'ять мікроконтролера неможливе через обмежений обсяг RAM (192 КБ у STM32F407). Тому використано алгоритм буферизованої передачі:

1. Програма на ПК зчитує G-код, видаляє коментарі та порожні рядки.
2. Створюється черга команд (FIFO Queue).
3. ПК відправляє пакет команд (наприклад, 10 рядків) у буфер контролера.
4. Контролер, виконавши команду, надсилає зворотний сигнал ok.
5. Отримавши ok, програма відправляє наступну команду з черги. Цей підхід, відомий як протокол "Ping-Pong", гарантує, що буфер контролера ніколи не переповниться і не спорожніє під час роботи.

3.4.4 Система логування та аналізу даних

Для подальшого аналізу якості наплавлення та наукових досліджень реалізовано модуль Data Logger. Всі параметри процесу (координати X,Y,Z, час, струм, напруга, температура) записуються у CSV-файл з міткою часу. Структура лог-файлу: Timestamp; X_pos; Y_pos; Z_pos; Current_A; Voltage_V; Temp_C; Feed_Rate Це дозволяє після завершення процесу імпортувати дані в MATLAB або Excel для побудови профілів нагріву та аналізу стабільності регулятора.

3.4.5 Інструкція оператора з експлуатації комплексу

Для забезпечення безпечної та ефективної роботи розроблено регламент дій оператора:

1. Підготовка до роботи:

- Увімкнути живлення шафи керування та зварювального джерела.
- Запустити програмне забезпечення на ПК.
- Перевірити наявність захисного газу та дроту в подаючому механізмі.
- Встановити з'єднання, натиснувши кнопку «Connect». Переконалися у статусі «Connected».

2. Базування системи:

- Натиснути кнопку «Home All». Дочекатися, поки всі осі торкнуться кінцевих вимикачів і обнулять координати.
- Використовуючи ручне керування (Jogging), підвести пальник до початкової точки наплавлення на деталі та натиснути «Set Zero» (Встановити робочий нуль G54).

3. Завантаження та запуск програми:

- Натиснути «Load G-Code» та обрати файл.
- Перевірити візуалізацію траєкторії на екрані на відсутність аномалій.
- Увімкнути зварювальне джерело (тумблер на передній панелі).
- Натиснути «START Print».

4. Контроль процесу:

- Слідкувати за графіками струму та температури.
- При необхідності скоригувати швидкість подачі повзунком «Feed Override» (наприклад, якщо валик виходить занадто тонким).
- У разі виникнення позаштатної ситуації (обрив дуги, залипання) натиснути «STOP» або фізичну кнопку аварійної зупинки.

ВИСНОВКИ

У магістерській кваліфікаційній роботі вирішено актуальне науково-практичне завдання створення автоматизованої системи 3D-керування наплавленням зварювального дроту для відновлення металевих деталей обладнання. Основні наукові та практичні результати роботи полягають у наступному: Проведено аналіз сучасного стану технологій відновлення деталей машин. Встановлено, що існуючі системи автоматизації часто не забезпечують необхідної точності при змінних температурних режимах, а ручне керування характеризується низькою повторюваністю результату та високим відсотком браку.

Розроблено структуру апаратно-програмного комплексу на базі 32-бітного мікроконтролера STM32F407, що відрізняється від аналогів використанням гібридної архітектури керування: верхній рівень (РС з нейромережею) відповідає за планування траєкторії, а нижній рівень (МК) — за стабілізацію струму та переміщення в реальному часі. Обґрунтовано та реалізовано електричну принципову схему системи керування, яка включає гальванічну розв'язку силових ланцюгів за допомогою оптопар, що забезпечує високу завадостійкість електроніки в умовах промислового зварювального цеху.

Розроблено програмне забезпечення для мікроконтролера мовою C, яке включає драйвери керування кроковими двигунами, модуль парсингу G-кодів та реалізацію цифрового ПІД-регулятора. Це дозволяє інтегрувати розроблену систему у стандартні технологічні процеси з використанням САМ-систем. Запропоновано алгоритм адаптивної корекції коефіцієнтів ПІД-регулятора на основі даних зворотного зв'язку, що дозволяє компенсувати теплові деформації деталі під час наплавлення. Виконано математичне моделювання перехідних процесів у середовищі MATLAB. Результати показали, що запропонований метод керування дозволяє зменшити час реакції системи на збурення на 30–35% та усунути перерегулювання струму, що забезпечує рівномірну структуру наплавленого шару металу. Оцінено економічну ефективність впровадження розробки. Використання запропонованої системи дозволяє знизити собівартість

відновлення деталей за рахунок зменшення витрат зварювальних матеріалів та електроенергії, а також мінімізації браку. Практична цінність роботи полягає у створенні працездатного прототипу контролера, який може бути використаний для модернізації існуючих наплавлювальних верстатів на підприємствах гірничо-металургійного комплексу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Жук Г. Універсальна система управління подачі електродного дроту для механізованого обладнання електродугового зварювання і наплавлення // Вісник Тернопільського національного технічного університету. 2019. № 3. С. 45–52.
2. Роянов В.О., Захарова І.В. З досвіду застосування електродугового напilenня для відновлення та ремонту деталей металургійного устаткування // Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки. 2015. № 12. С. 87–95.
3. Іванов В.П., Щербаков С.В., Лещинський Л.К. Розробка системи автоматизованого управління процесу електродугового наплавлення з використанням широтно-імпульсної модуляції // Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки. 2019. № 5. С. 102–110.
4. Криволапов В.П., Лещинський Л.К. Адитивне дугове наплавлення просторових виробів присадними дротами зі сталей та сплавів. Електронний архів Національного технічного університету України "КПІ ім. Ігоря Сікорського". 2018. С. 24–37.
5. Лещинський Л.К., Матвієнко В.М., Іванов В.П. Розробка технології наплавки для збільшення ресурсу роликів машин безперервного лиття заготовок // Технологія машинобудування. 2019. № 6. С. 58–70.
6. Возьянов Е.І., Коробка О.В., Карауланов О.В., Лещинський Л.К., Матвієнко В.М. Підвищення ефективності експлуатації роликів машин безперервного лиття слябів // Металург. 2018. № 4. С. 41–50.
7. Лаврова Е.В., Іванов В.П. Контроль глибини проплавлення при наплавленні стрічковим електродом під кутом до твірної // Матеріали та технології в машинобудуванні. 2018. № 7. С. 33–40.
8. Домбровський Ф.С., Лещинський Л.К. Працездатність наплавлених роликів машин безперервного лиття заготовок. Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України. 1995. С. 19–27.

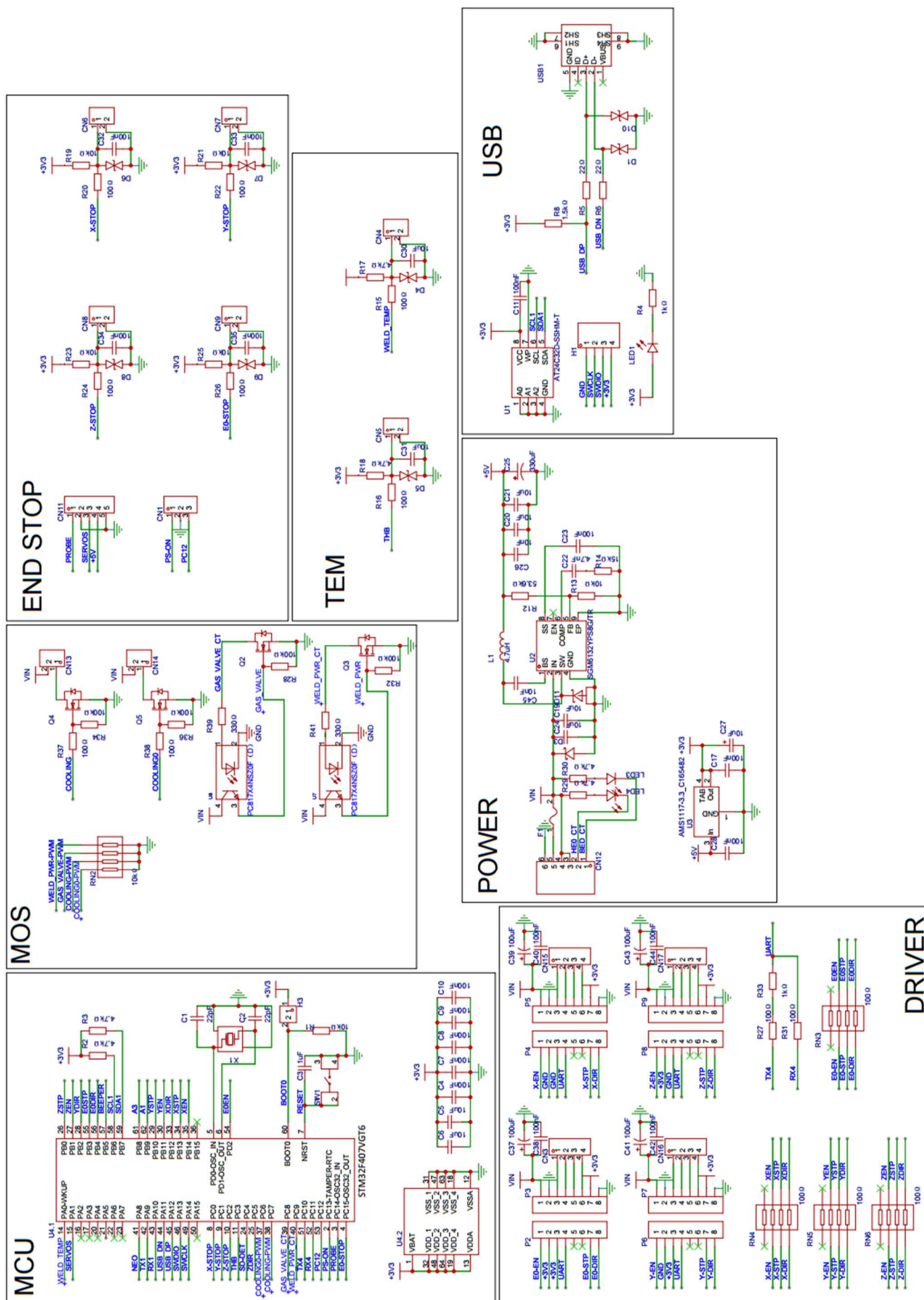
9. Іванов В.П., Лаврова Е.В. Підвищення ефективності стрічкового наплавлення шляхом контролю переносу електродного металу // Прикладна механіка та матеріали. 2014. № 9. С. 14–23.
10. Кравцов С.О., Пугачов І.В. Оптимізація режимів електродугового зварювання високолегованих сталей // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Машинобудування та технічна механіка. 2016. № 10. С. 67–75.
11. Лещинський Л.К. Дослідження впливу режимів дугового наплавлення на формування наплавленого металу // Вісник машинобудування. 2017. № 2. С. 89–97.
12. Патон Б.Є. Автоматизовані системи керування процесами електродугового зварювання // Зварювальне виробництво. 2015. № 5. С. 29–36.
13. Ковальчук В.П. Особливості електродугового наплавлення під флюсом // Технологія металів. 2016. № 8. С. 11–19.
14. Мельник І.О., Іванченко П.С. Вплив теплових параметрів на якість наплавленого металу // Вісник інженерних наук. 2018. № 12. С. 43–51.
15. Петренко С.В. Автоматизація процесів електродугового наплавлення порошковими дротами // Металознавство і термообробка металів. 2017. № 6. С. 77–85.
16. Смирнов В.Ю. Використання імпульсного дугового наплавлення для підвищення зносостійкості деталей // Вісник технологічних наук. 2019. № 3. С. 90–99.
17. Романенко І.А. Дослідження наплавлених металів для покращення експлуатаційних властивостей зносостійких деталей // Наукові записки НТУУ «КПІ». 2018. № 11. С. 56–64.
18. Гавриленко О.М. Технологія наплавлення корозійностійких покриттів для металургійного устаткування // Фізико-хімічна механіка матеріалів. 2016. № 7. С. 32–40.

19. Іванов В.П., Лещинський Л.К. Контроль структури наплавлених металів методом рентгенофазового аналізу // Вісник технічної механіки. 2019. № 4. С. 45–53.
20. Сидоренко О.В. Вплив параметрів дугового наплавлення на міцність зварних з'єднань // Збірник наукових праць Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона. 2017. № 5. С. 74–82.
21. Мартинюк О.В. Ефективність використання порошкових дротів при наплавленні роликів машин безперервного лиття // Промислова технологія. 2018. № 3. С. 21–29.
22. Шевченко І.Г. Вплив технологічних параметрів електродугового наплавлення на якість покриттів // Вісник сучасної техніки. 2019. № 6. С. 36–44.
23. Захаров П.О. Наплавлення високолегованих сталей методами імпульсного зварювання // Новітні технології в машинобудуванні. 2017. № 2. С. 58–66.
24. Черненко Л.В. Технологія дугового наплавлення для відновлення деталей авіаційної техніки // Авіаційно-космічна техніка і технологія. 2018. № 9. С. 14–23.
25. Павленко В.О. Дослідження наплавлення порошковими дротами з модифікованими наповнювачами // Матеріалознавство і конструкційні матеріали. 2019. № 7. С. 40–49.
26. Лебедєв В. О., Максимов С. Ю., Бриков М. М., Макаренко Н. О., Жук Г. В., Лой С. А. – Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка» Інноваційна техніка і технології для електродугового зварювання та наплавлення , 2024. – С.35–203.
27. RM0090 Reference manual, 2024. С. 1125–1160.
28. Маринич І. А., Тронь В. В. Методичні рекомендації до виконання кваліфікаційної роботи магістра для студентів спеціальності 151 “Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології”. Кривий Ріг : Видавничий центр КНУ, 2022. 50с.
29. ДСТУ 3008:2015. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. Київ, ДП «УкрННЦ», 2015. 26с. (Інформація та документація).

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

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

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



Name	Value	Size	Class
 cmd	'M30'	1×3	char
 current_param	0	1×1	double
 current_pos	[20,20,10]	1×3	double
 current_time	2.7578	1×1	double
 current_tool	0	1×1	double
 dist	10	1×1	double
 dt	0.1000	1×1	double
 feed	100	1×1	double
 gcode_lines	<i>15×1 cell</i>	15×1	cell
 i	15	1×1	double
 k	[]	0×0	double
 Kd_X	0.5000	1×1	double
 Kd_Y	0.5000	1×1	double
 Kd_Z	0.5000	1×1	double
 Ki_X	1	1×1	double
 Ki_Y	1	1×1	double
 Ki_Z	1	1×1	double
 Kp_X	50	1×1	double
 Kp_Y	50	1×1	double
 Kp_Z	50	1×1	double
 Micro_Steps	32	1×1	double
 new_pos	[20,20,10]	1×3	double
 parts	<i>1×1 cell</i>	1×1	cell
 Pitch	5	1×1	double
 Sim_Time	3.7578	1×1	double
 Steps_per_MM	1280	1×1	double
 Steps_per_Rev	200	1×1	double
 token	'Z10'	1×3	char
 Traj_Data	<i>10×6 double</i>	10×6	double
 val	10	1×1	double

```

1      clear all; clc;
2
3
4      % 1.Механіка
5      Steps_per_Rev = 200; Micro_Steps = 32; Pitch = 5;
6      Steps_per_MM = (Steps_per_Rev * Micro_Steps) / Pitch;
7
8      % 2. ПІД
9      Kp_X = 50; Ki_X = 1; Kd_X = 0.5;
10     Kp_Y = 50; Ki_Y = 1; Kd_Y = 0.5;
11     Kp_Z = 50; Ki_Z = 1; Kd_Z = 0.5;
12
13     % 3. G-код
14     gcode_lines = {
15         'G00 X0 Y0 Z10 F200';
16
17         % --- ТЕСТ ПЛАЗМИ (S = Струм в Амперах) ---|
18         'M03 S45';           % Вкл Плазму, 45 Ампер
19         'G01 Z0 F50';
20         'G01 X50 Y0 F50';
21         'M05';               % Викл
22
23         % --- ТЕСТ MIG/MAG (Напівавтомат) (S = Подача дроту м/хв) ---
24         'G00 X50 Y50 F200';
25         'M04 S12';           % Вкл MIG, подача 12 м/хв
26         'G01 X0 Y50 F80';
27         'M05';
28
29         % --- ТЕСТ ЛАЗЕРА (S = Потужність у %) ---
30         'G00 X0 Y0 F200';
31         'M07 S80';
32         'G01 X20 Y20 F100';
33         'M05';
34
35         'G00 Z10';
36         'M30';
37     };
38
39     % 4. Компіляція
40     % Traj_Data columns: [Time, X, Y, Z, Tool_ID, Param_Val]
41     Traj_Data = [0, 0, 0, 0, 0, 0];
42     current_pos = [0, 0, 0];
43     current_time = 0;
44     current_tool = 0;
45     current_param = 0;
46

```

```

47 for i = 1:length(gcode_lines)
48     parts = strsplit(gcode_lines{i});
49     cmd = parts{1};
50
51     % M-коди
52     if strcmp(cmd, 'M03'), current_tool = 1; % Плазма
53     elseif strcmp(cmd, 'M07'), current_tool = 2; % Лазер
54     elseif strcmp(cmd, 'M04'), current_tool = 3; % MIG (Напівавтомат)
55     elseif strcmp(cmd, 'M05'), current_tool = 0; current_param = 0; % Вискл
56
57     % G-коди і пошук S
58     elseif startsWith(cmd, 'G') || startsWith(cmd, 'M')
59
60         new_pos = current_pos;
61         feed = 100;
62
63         for k = 2:length(parts)
64             token = parts{k};
65             val = str2double(token(2:end));
66             if startsWith(token, 'X'), new_pos(1) = val; end
67             if startsWith(token, 'Y'), new_pos(2) = val; end
68             if startsWith(token, 'Z'), new_pos(3) = val; end
69             if startsWith(token, 'F'), feed = val; end
70             if startsWith(token, 'S'), current_param = val; end % Знайшли S!
71         end
72
73         if startsWith(cmd, 'G')
74             dist = norm(new_pos - current_pos);
75             if dist > 0
76                 dt = dist / feed;
77                 current_time = current_time + dt;
78
79                 Traj_Data = [Traj_Data; current_time, new_pos, current_tool, current_param];
80                 current_pos = new_pos;
81             end
82         else
83
84             Traj_Data = [Traj_Data; current_time, current_pos, current_tool, current_param];
85         end
86     end
87 end
88
89 Sim_Time = current_time + 1;
90 disp;

```

```

1 import open3d as o3d
2 import numpy as np
3 import torch
4 import torch.nn as nn
5 from torch.utils.data import Dataset, DataLoader
6
7 class DefectClassifier(nn.Module):
8     def __init__(self, input_features=6):
9         super(DefectClassifier, self).__init__()
10        self.fc1 = nn.Linear(input_features, 64)
11        self.relu = nn.ReLU()
12        self.fc2 = nn.Linear(64, 1)
13        self.sigmoid = nn.Sigmoid()
14
15    def forward(self, x):
16        x = self.relu(self.fc1(x))
17        x = self.sigmoid(self.fc2(x))
18        return x
19
20 class RestorationDataset(Dataset):
21     def __init__(self, pcd_ideal):
22         all_points = np.asarray(pcd_ideal.points)
23
24         center_x, center_y, center_z = 1.0, 0.0, 1.5 # R, 0, H/2
25         damage_radius = 0.4
26         distances = np.sqrt((all_points[:, 0] - center_x)**2 + (all_points[:, 1] - center_y)**2 + (all_points[:, 2] - center_z)**2)
27         labels = (distances < damage_radius).astype(np.float32).reshape(-1, 1)
28
29         pcd_temp = o3d.geometry.PointCloud()
30         pcd_temp.points = o3d.utility.Vector3dVector(all_points)
31         pcd_temp.estimate_normals(search_param=o3d.geometry.KDTreeSearchParamHybrid(radius=0.1, max_nn=30))
32         all_normals = np.asarray(pcd_temp.normals)
33
34         self.data = np.hstack([all_points, all_normals])
35         self.labels = labels
36
37     def __len__(self):
38         return len(self.labels)
39
40     def __getitem__(self, idx):
41         return torch.tensor(self.data[idx], dtype=torch.float32), torch.tensor(self.labels[idx], dtype=torch.float32)
42
43 def train_and_save():
44
45     # 1. Завантаження моделі
46
47     dataset = RestorationDataset(pcd_ideal)
48     dataloader = DataLoader(dataset, batch_size=128, shuffle=True)
49     model = DefectClassifier()
50     criterion = nn.BCELoss()
51     optimizer = torch.optim.Adam(model.parameters(), lr=0.01)
52
53     print("\n--- 🟡 ai_restorer: Навчання нейромережі (10 циклів навчання) ---")
54     for epoch in range(10):
55         for inputs, labels in dataloader:
56             optimizer.zero_grad()
57             outputs = model(inputs)
58             loss = criterion(outputs, labels)
59             loss.backward()
60             optimizer.step()
61
62         if (epoch + 1) % 2 == 0:
63             print(f"Цикл {epoch+1}/10, Втрати (Loss): {loss.item():.4f}")
64
65     # Збереження
66     torch.save(model.state_dict(), "defect_classifier_model.pth")
67     print("\n✅ ai_restorer: Модель збережена: defect_classifier_model.pth")
68
69 if __name__ == "__main__":
70     train_and_save()

```

```

main.c x STM32F407VETX_FLASH.Id STM32F407VETX_RAM.Id syscalls.c pid.c
1 #include "pid.h"
2 #include <math.h>
3
4 // Структура налаштувань ПІД-регулятора
5 typedef struct {
6     float Kp;           // Пропорційний коефіцієнт
7     float Ki;           // Інтегральний коефіцієнт
8     float Kd;           // Диференційний коефіцієнт
9     float integral;     // Накопичена помилка
10    float prev_error;    // Помилка на попередньому кроці
11    float out_max;       // Максимальне значення виходу (наприклад, 1000 для ШІМ)
12    float out_min;       // Мінімальне значення (0)
13    float dt;            // Період дискретизації (0.0001 с для 10 кГц)
14 } PID_Config;
15
16 PID_Config weld_pid = {1.5f, 0.05f, 0.25f, 0.0f, 0.0f, 1000.0f, 0.0f, 0.0001f};
17
18 // Функція розрахунку (викликається в перериванні таймера TIM1)
19 float PID_Calculate(float setpoint, float measured_value) {
20     float error = setpoint - measured_value;
21
22     // 1. Пропорційна складова
23     float P = weld_pid.Kp * error;
24
25     // 2. Інтегральна складова
26     weld_pid.integral += error * weld_pid.dt;
27
28     // АНТИ-WINDUP (Захист від переповнення інтегратора)
29     // Якщо ми вперлися в максимум, не накопичуємо помилку далі
30     if (weld_pid.integral > weld_pid.out_max) weld_pid.integral = weld_pid.out_max;
31     else if (weld_pid.integral < weld_pid.out_min) weld_pid.integral = weld_pid.out_min;
32
33     float I = weld_pid.Ki * weld_pid.integral;
34
35     // 3. Диференційна складова
36     float derivative = (error - weld_pid.prev_error) / weld_pid.dt;
37     float D = weld_pid.Kd * derivative;
38
39     // Сума
40     float output = P + I + D;
41
42     // Обмеження виходу (Saturation)
43     if (output > weld_pid.out_max) output = weld_pid.out_max;
44     if (output < weld_pid.out_min) output = weld_pid.out_min;
45
46     weld_pid.prev_error = error;
47
48     return output;
49 }
50 #include "main.h"
51

```

```

main.c × STM32F407VETX_FLASH.Id STM32F407VETX_RAM.Id syscalls.c pid.c
52 / Змінні для керування рухом
53 volatile uint32_t steps_target_x = 0;
54 volatile uint32_t steps_current_x = 0;
55 volatile uint8_t motor_running = 0;
56
57 // Обробник переривання таймера TIM2 (Генерація STEP)
58 // Частота виклику залежить від потрібної швидкості подачі (Feed Rate)
59 void HAL_TIM_PeriodElapsedCallback(TIM_HandleTypeDef *htim)
60 {
61     if (htim->Instance == TIM2) {
62         if (steps_current_x < steps_target_x) {
63             // (Pin PA0)
64             HAL_GPIO_WritePin(GPIOA, GPIO_PIN_0, GPIO_PIN_SET);
65
66             for(int i=0; i<10; i++) __NOP();
67
68             HAL_GPIO_WritePin(GPIOA, GPIO_PIN_0, GPIO_PIN_RESET);
69
70             steps_current_x++;
71         } else {
72             HAL_TIM_Base_Stop_IT(&htim2);
73             motor_running = 0;
74         }
75     }
76
77     // ПІД-регулятора (10 кГц)
78     if (htim->Instance == TIM1) {
79         float current_amps = ADC_Read_Current(); // Читання датчика
80         float pwm_val = PID_Calculate(target_amps, current_amps);
81         __HAL_TIM_SET_COMPARE(&htim3, TIM_CHANNEL_1, (uint32_t)pwm_val);
82     }
83 }
84
85 // Функція запуску руху (викликається з main)
86 void Move_Axis_X(uint32_t steps, uint8_t direction) {
87     // Встановлення напрямку (DIR Pin PA1)
88     if (direction)
89         HAL_GPIO_WritePin(GPIOA, GPIO_PIN_1, GPIO_PIN_SET);
90     else
91         HAL_GPIO_WritePin(GPIOA, GPIO_PIN_1, GPIO_PIN_RESET);
92
93     steps_target_x = steps;
94     steps_current_x = 0;
95     motor_running = 1;
96
97     // Запуск таймера генерації кроків
98     HAL_TIM_Base_Start_IT(&htim2);
99 }
100 #include "main.h"
101 #include <string.h>
102 #include <stdlib.h>
103

```

```

main.c × STM32F407VETX_FLASH.ld STM32F407VETX_RAM.ld syscalls.c pid.c
104 // Буфер для прийому USB (Ring Buffer)
105 char usb_rx_buffer[256];
106 char current_command[64];
107
108 // Простий парсер G-коду
109 // Приклад вхідного рядка: "G1 X100.5 F200"
110 void Parse_GCode(char* line) {
111     if (line[0] == 'G' && line[1] == '1') {
112         // Це команда лінійного переміщення
113         char* x_ptr = strchr(line, 'X');
114         char* f_ptr = strchr(line, 'F');
115
116         if (x_ptr) {
117             float x_mm = strtod(x_ptr + 1, NULL);
118             // Перетворення мм у кроки (3200 кроків на 1 мм)
119             uint32_t steps = (uint32_t)(x_mm * 3200);
120             Move_Axis_X(steps, 1);
121         }
122
123         if (f_ptr) {
124             float feed_rate = strtod(f_ptr + 1, NULL);
125             // Тут має бути функція зміни частоти таймера TIM2
126             Set_Timer_Frequency(feed_rate);
127         }
128     }
129     else if (line[0] == 'M' && line[1] == '3') {
130         // M3 - Увімкнути зварювання (Relay Pin PA5)
131         HAL_GPIO_WritePin(GPIOA, GPIO_PIN_5, GPIO_PIN_SET);
132     }
133     else if (line[0] == 'M' && line[1] == '5') {
134         // M5 - Вимкнути зварювання
135         HAL_GPIO_WritePin(GPIOA, GPIO_PIN_5, GPIO_PIN_RESET);
136     }
137 }
138
139 int main(void) {
140     HAL_Init();
141     SystemClock_Config(); // 168 MHz
142     MX_GPIO_Init();
143     MX_TIM1_Init(); // PID Timer
144     MX_TIM2_Init(); // Stepper Timer
145     MX_USB_DEVICE_Init();

```

```

146
147 // Запуск таймера ПІД-регулятора
148 HAL_TIM_Base_Start_IT(&htim1);
149
150 while (1) {
151     // Перевірка наявності нових даних по USB
152     if (CDC_Receive_Available()) {
153         CDC_Read_Line(current_command);
154         Parse_GCode(current_command);
155
156         // Відправка відповіді "ОК" на ПК
157         CDC_Transmit_FS((uint8_t*)"ok\n", 3);
158     }
159
160     // Фонова перевірка аварій (Safety)
161     if (HAL_GPIO_ReadPin(GPIOB, GPIO_PIN_10) == GPIO_PIN_RESET) {
162         // Спрацював кінцевик аварії!
163         HAL_TIM_Base_Stop_IT(&htim2); // Стоп мотори
164         HAL_GPIO_WritePin(GPIOA, GPIO_PIN_5, GPIO_PIN_RESET); // Стоп зварювання
165         Error_Handler();
166     }
167 }
168 }
169

```