

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

Приладобудівний факультет

Кафедра комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем

«На правах рукопису»
УДК 004.42

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри

_____ Надія БУРАУ
(підпис)

«__» _____ 2025 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

за освітньо-професійною програмою

**«Комп'ютерно-інтегровані технології та системи в приладобудуванні»
зі спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка»**

**на тему: «АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ПОЗИЦІЮВАННЯ ЗРАЗКІВ ДЛЯ
ЦИФРОВОГО ОПТИЧНОГО МІКРОСКОПА»**

Виконав:

студент II курсу, групи ПГ-41мп
Кухтіна Олександра Олександрівна

(підпис)

Науковий керівник:

к.т.н., доцент
Боровицький Володимир Миколайович

(підпис)

Консультант з розроблення стартап-проекту:

д.е.н., проф., завідувач кафедри економічної кібернетики
Бояринова Катерина Олександрівна

(підпис)

Рецензент:

к.т.н., доцент
Писарець Анна Валеріївна

(підпис)

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

Студент _____
(підпис)

Київ – 2025

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

Приладобудівний факультет

Кафедра комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем
Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 174- Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно-інтегровані технології та системи в приладобудуванні»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Надія БУРАУ

«_» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студентки

Кухтіної Олександри Олександрівні

1. Тема дисертації «Автоматизована система позиціонування зразків для цифрового оптичного мікроскопа», науковий керівник дисертації Боровицький Володимир Миколайович, д.т.н., доцент, затверджені наказом по університету від «_» _____ 20__ р. № _____

2. Термін подання студентом дисертації: 10 грудня 2025 року

3. Об'єкт дослідження: автоматизована система позиціонування зразків (АСПЗ).

4. Предмет дослідження: процес формування тримірних цифрових зображень та вимірювання нахилу поверхні зразка у цих зображеннях.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

5.1. Порівняльний аналіз технічних рішень для отримання тримірних цифрових зображень в цифрових оптичних мікроскопах.

5.2. Дослідження формування сигналів в цифровому оптичному мікроскопі, вибір та обґрунтування методу вимірювання нахилу поверхні зразка.

5.3. Розробка апаратної частини АСПЗ.

5.4. Розробка програмного забезпечення АСПЗ.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: структурна та функціональна АСПЗ, 3D модель АСПЗ та її складових, схема електрична принципова АСПЗ, структурна схема програмного забезпечення та блок-схема алгоритму.

7. Орієнтовний перелік публікацій: 1 стаття в матеріалах конференції

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розроблення стартап-проекту			

9. Дата видачі завдання 27 жовтня 2025 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1.	Порівняльний аналіз технічних рішень для отримання тримірних цифрових зображень в цифрових оптичних мікроскопах.	10.11.2025	
2.	Дослідження формування сигналів в цифровому оптичному мікроскопі	15.11.2025	
3.	Вибір та обґрунтування методу вимірювання нахилу поверхні зразка	15.11.2025	

4.	Розробка апаратної частини АСПЗ	30.11.2025	
5.	Розробка програмного забезпечення АСПЗ	30.11.2025	
6.	Розроблення стартап-проекту	30.11.2025	
7.	Підготовка графічного (ілюстративного) матеріалу	10.12.2025	
8.	Підготовка магістерської дисертації	10.12.2025	

Студент

Олександра КУХТІНА

Науковий керівник дисертації

Володимир БОРОВИЦЬКИЙ

РЕФЕРАТ

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ПОЗИЦІЮВАННЯ ЗРАЗКІВ ДЛЯ ЦИФРОВОГО ОПТИЧНОГО МІКРОСКОПА

Пояснювальна записка: 102 сторінки, включаючи 17 ілюстрацій, 26 таблиць, 1 додаток. Список використаних джерел: 43.

У роботі досліджено автоматизоване позиціонування та вирівнювання зразка в цифровому оптичному мікроскопі на основі методів обробки зображень і високоточного мікропозиціонування. Проаналізовано принципи формування оптичного зображення, вплив нахилу зразка на різкість і рівномірність фокусування, а також сучасні методи автофокусування та оцінювання просторового нахилу поверхні.

Розроблено структурну та функціональну схеми автоматизованої системи позиціонування, що реалізує замкнений контур керування з використанням результатів аналізу зображень для корекції положення зразка відносно оптичної осі мікроскопа. Проведено порівняльний аналіз двох варіантів механічної конструкції платформи — триточкової системи на п'єзоприводах та комбінованої схеми з двома п'єзоприводами і шаровою опорою, для яких наведено математичні моделі та алгоритми визначення кутів нахилу.

Результати дослідження формують науково-технічну основу для подальшої розробки фізичної моделі АСПЗ, визначають вимоги до її ключових компонентів і підтверджують ефективність використання методів аналізу зображень у замкнених системах мікропозиціонування. Запропонований підхід дозволяє підвищити точність вирівнювання поверхні зразка та зменшити вплив операторських похибок. Практичне значення роботи полягає у можливості інтеграції розробленої системи в цифрові мікроскопи для автоматичного фокусування, вирівнювання та серійного аналізу зразків у наукових і лабораторних дослідженнях.

Ключові слова: цифровий оптичний мікроскоп, автоматизована система позиціонування, автофокусування, фокус-метрики, п'єзоприводи, енкодер, драйвер, обробка зображень, градієнтні методи, вирівнювання зразка, система керування.

ABSTRACT

AUTOMATED SAMPLE POSITIONING SYSTEM FOR A DIGITAL OPTICAL MICROSCOPE

Explanatory note: 102 pages, including 17 illustrations, 26 tables, 1 appendices.
List of references: 43.

This work investigates automated sample positioning and alignment in a digital optical microscope based on image processing methods and high-precision micro-positioning. The principles of optical image formation, the influence of sample tilt on image sharpness and focus uniformity, as well as modern autofocus techniques and methods for estimating surface inclination are analyzed.

Structural and functional diagrams of an automated sample positioning system implementing a closed-loop control architecture are developed. The system uses image analysis results to correct the sample position relative to the optical axis of the microscope. A comparative analysis of two mechanical platform designs is performed: a three-point system based on piezoelectric actuators and a combined design with two piezo actuators and a spherical support. For both configurations, mathematical models and tilt-estimation algorithms are presented.

The obtained results provide a scientific and technical foundation for the further development of a physical ASPS model, define requirements for its key components, and confirm the effectiveness of image-based feedback in closed-loop micro-positioning systems. The proposed approach improves sample alignment accuracy and reduces operator-dependent errors. The system can be integrated into digital microscopes for automatic focusing, alignment, and serial analysis of samples in research and laboratory applications.

Keywords: digital optical microscope, automated sample positioning system, autofocus, focus metrics, piezo actuators, encoder, driver, image processing, gradient methods, sample alignment, control system.

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	5
ABSTRACT	6
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	9
ВСТУП.....	10
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ТЕОРЕТИЧНИХ ОСНОВ І СУЧАСНИХ РІШЕНЬ	12
1.1 Принципи роботи цифрових оптичних мікроскопів.....	12
1.2 Методи керування предметним столиком у мікроскопах	14
1.3 Моторизовані платформи та приводи фокусування	15
1.4 Системи автоматизації мікроскопічних досліджень	17
1.5 Огляд архітектури системи	19
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1	21
РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЮВАННЯ ТА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ	22
2.1 Математична модель руху платформи.....	22
2.1.1. Принцип дії та формування руху	22
2.1.2 Рівняння руху	23
2.1.3. Передавальна характеристика та гістерезис	24
2.2 Розрахунки оптичного мікроскопа	25
2.3 Автоматизована система фокусування	29
2.4 Математичне моделювання та оптимізація алгоритмів автофокусування в системі цифрової мікроскопії	32
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2	40
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА АПАРАТНОЇ ЧАСТИНИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ПОЗИЦІЮВАННЯ ЗРАЗКА (АСПЗ)	42
3.1 Вибір апаратного забезпечення	42
3.2. Розробка алгоритмів керування та позиціонування	47
3.3 Вибір та обґрунтування методу вимірювання нахилу поверхні зразка	51
3.4 Розробка апаратної частини АСПЗ	54
3.6. Розробка принципової електричної схеми драйвера.....	58
3.6.1 Опис принципової схеми	58
3.7 Розробка програмного забезпечення автоматизованої системи позиціонування зразка (АСПЗ)	59
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3	62

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ «АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ПОЗИЦІЮВАННЯ ЗРАЗКІВ ДЛЯ ЦИФРОВОГО ОПТИЧНОГО МІКРОСКОПА»	64
4.1. Опис технології та технологічний аудит ідеї проекту	64
4.2 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту	68
4.3. Розроблення ринкової стратегії проекту	77
4.4. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту	80
4.5. Бізнес-модель та реалізація стартап-проекту	85
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4	90
ВИСНОВКИ	92
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	95
ДОДАТОК А	98

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

АСПЗ – автоматизована система позиціонування зразка

АС – автоматизована система

ПЗ – програмне забезпечення

ЦОМ – цифровий оптичний мікроскоп

ROI (Region of Interest) – область інтересу

PWM (Pulse Width Modulation) – широтно-імпульсна модуляція

API – програмний інтерфейс застосунків

USB – універсальна послідовна шина

RS-232 – послідовний інтерфейс зв'язку

CAD – система автоматизованого проєктування

OpenCV – бібліотека комп'ютерного зору та обробки зображень

STM32 – сімейство мікроконтролерів ARM Cortex-M

PID-регулятор – пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор

HV amplifier – високовольтний підсилювач

Piezo actuator – п'єзоелектричний привід

Encoder – датчик положення (енкодер)

TB6612FNG – драйвер двигуна постійного струму

N-470 – мікрометричний п'єзоелектричний actuator від PI

z-stack – стек зображень, отриманих при різних положеннях по осі Z

ВСТУП

У сучасних наукових дослідженнях та промислових застосуваннях цифрові оптичні мікроскопи займають одне з провідних місць серед інструментів для аналізу структури матеріалів, біологічних зразків та мікроелектронних компонентів. Їхня перевага полягає у можливості отримання високоякісних зображень з великим збільшенням, збереження цифрових копій та подальшої обробки результатів за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення.

Одним із важливих завдань при використанні мікроскопа є точне позиціонування зразка. У більшості випадків для цього застосовується ручне переміщення предметного столика, що має ряд недоліків: низьку швидкість роботи, значну залежність від кваліфікації оператора, труднощі з відтворенням координат під час повторних досліджень. У випадках, коли необхідно виконати серійний аналіз великої кількості зразків або провести детальне картування поверхні, ручне позиціонування стає надзвичайно трудомістким процесом і обмежує ефективність досліджень.

Вирішенням цієї проблеми є автоматизація процесу переміщення зразка. Автоматична система позиціонування дозволяє забезпечити високу точність руху у мікронному діапазоні, повторюваність вимірювань та інтеграцію з алгоритмами комп'ютерного зору для пошуку областей інтересу. Крім того, така система значно скорочує час досліджень, зменшує ймовірність помилок та відкриває можливості для реалізації складних сценаріїв сканування поверхні. У зв'язку з цим розробка автоматичної системи позиціонування зразка на цифровому оптичному мікроскопі є актуальним завданням.

Метою даної роботи є розробка та дослідження автоматичної системи позиціонування зразка, яка здатна забезпечити підвищену точність, швидкість та зручність використання у лабораторних і виробничих умовах.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

- провести аналіз існуючих методів автоматизованого позиціонування у мікроскопах;
- обґрунтувати вибір апаратних та програмних засобів для створення системи;

- розробити алгоритми керування рухом предметного столика;
- побудувати математичну модель системи та провести її моделювання;
- створити прототип автоматизованої платформи для зразків;
- провести експериментальні дослідження з визначення точності та ефективності роботи системи.

Об'єктом дослідження у даній роботі є процес автоматизованого позиціонування зразка у цифровому оптичному мікроскопі. **Предметом дослідження** є методи та технічні засоби реалізації системи автоматичного керування рухом предметного столика мікроскопа.

У роботі застосовуються методи теоретичного аналізу науково-технічної літератури, математичного моделювання у спеціалізованих програмних середовищах, системного аналізу для розробки архітектури, експериментальні методи для перевірки працездатності прототипу, а також статистичні методи для обробки результатів вимірювань.

Наукова новизна дипломної роботи полягає у розробці структури та алгоритмів автоматичної системи позиціонування, яка інтегрується з цифровим оптичним мікроскопом і забезпечує підвищену точність позиціонування зразків. Запропонований підхід передбачає використання сучасних апаратних і програмних засобів, що дозволяє розширити функціональні можливості мікроскопа.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості застосування створеної системи в різних галузях. У біології та медицині вона може використовуватися для автоматичного сканування клітин і тканин; у матеріалознавстві – для вивчення мікроструктури матеріалів і контролю якості поверхонь; у мікроелектроніці – для інспекції друкованих плат і мікросхем. Крім того, розробка може стати основою для створення доступних навчальних комплексів у закладах освіти.

Таким чином, дипломна робота присвячена створенню та дослідженню автоматичної системи позиціонування зразка для цифрового оптичного мікроскопа, що має важливе значення як для фундаментальних досліджень, так і для практичних застосувань.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ТЕОРЕТИЧНИХ ОСНОВ І СУЧАСНИХ РІШЕНЬ

1.1 Принципи роботи цифрових оптичних мікроскопів

Цифрові оптичні мікроскопи, приклад якого зображено на рис. 1.1, є сучасним різновидом класичних світлових мікроскопів, у яких замість ока дослідника використовується електронний сенсор для формування зображення [1]. На відміну від традиційних моделей, де зображення спостерігається через окуляри, цифрові мікроскопи передають оптичний сигнал на матрицю (CCD або CMOS), після чого дані обробляються електронною системою і відображаються на моніторі у вигляді цифрового зображення.

Основним елементом будь-якого оптичного мікроскопа є об'єтив [2]. Він формує збільшене проміжне зображення об'єкта, розташованого на предметному столику. У цифрових мікроскопах окуляр може бути відсутній або виконувати допоміжну функцію, оскільки головна роль відведена сенсору зображення. Відповідно до принципів геометричної оптики, об'єтив збирає промені світла від об'єкта та формує збільшене дійсне зображення. Це зображення проектується на світлочутливу поверхню сенсора, де відбувається перетворення світлового потоку в електричні сигнали.

Отримані дані надходять до мікропроцесора або комп'ютера, де здійснюється їхня первинна обробка: компенсація шумів, баланс білого, корекція різкості [2]. У результаті формується цифрове зображення, яке може зберігатися у вигляді файлу, передаватися мережею або піддаватися подальшому аналізу.

Важливим принципом роботи цифрових оптичних мікроскопів є використання програмного забезпечення для розширення можливостей дослідження. Програми дозволяють змінювати масштаб зображення, вимірювати геометричні параметри об'єкта, застосовувати фільтри та алгоритми обробки, виконувати тривимірну реконструкцію поверхні. Це забезпечує значно вищу функціональність у порівнянні з класичними оптичними мікроскопами [3].

Особливу увагу приділяють освітлювальним системам, оскільки якість зображення безпосередньо залежить від характеру освітлення. У сучасних цифрових мікроскопах застосовуються світлодіодні джерела світла з регулюванням інтенсивності та напрямку освітлення, що дозволяє досліднику підбирати оптимальні умови спостереження.

Таким чином, принцип роботи цифрового оптичного мікроскопа полягає у перетворенні оптичного зображення, сформованого об'єктивом, на цифровий сигнал за допомогою сенсора та подальшій обробці цього сигналу для відображення і збереження [3]. Це поєднання класичних оптичних принципів і сучасних цифрових технологій відкриває широкі можливості для проведення досліджень у біології, медицині, матеріалознавстві та мікроелектроніці.



Рисунок 1.1 – Цифровий оптичний мікроскоп

1.2 Методи керування предметним столиком у мікроскопах

Предметний столик мікроскопа є одним із ключових вузлів, оскільки саме він забезпечує точне розташування зразка в полі зору об'єктива. Від якості та способу керування рухом столика залежить точність фокусування, можливість дослідження окремих ділянок та зручність роботи користувача.

У традиційних оптичних мікроскопах застосовується ручне керування. Для цього використовуються механічні гвинтові механізми з мікрометричними гвинтами, що дозволяють пересувати зразок у площинах X та Y [4]. Рух у вертикальній площині (вісь Z) забезпечує наведення на різкість. Таке рішення є простим і надійним, однак воно має суттєві обмеження: низьку швидкість дослідження великих зразків, складність у відтворенні точних координат та залежність від навичок оператора.

З розвитком техніки все більшого поширення набувають механізовані системи керування предметним столиком. У таких мікроскопах переміщення здійснюється за допомогою електродвигунів (переважно крокових або серводвигунів), які керуються від зовнішнього контролера [4]. Це дозволяє автоматизувати процес сканування зразка, забезпечити високу точність та повторюваність рухів.

Крокові двигуни є найбільш поширеним рішенням завдяки простоті керування та можливості реалізації мікрокрокового режиму, що забезпечує плавне переміщення у діапазоні від кількох мікрометрів до міліметрів. Серводвигуни, у свою чергу, дозволяють реалізувати замкнені системи керування з датчиками зворотного зв'язку, що дає змогу досягати ще вищої точності позиціонування та компенсації похибок [5].

Для точних наукових досліджень використовуються також п'єзоелектричні приводи, здатні переміщати зразок у нанометричному діапазоні. Такі системи особливо актуальні для біологічних досліджень, де важливо отримати високу стабільність під час сканування живих клітин, а також для мікроелектроніки при роботі з тонкими структурами.

Крім апаратних методів, важливу роль відіграють програмні алгоритми керування. Сучасні цифрові мікроскопи інтегруються з комп'ютерними системами, що дозволяє реалізувати автоматичне сканування за заданими координатами, пошук

області інтересу за допомогою комп'ютерного зору, створення мозаїчних зображень великої площі та автоматичне збереження даних для подальшого аналізу [6].

Таким чином, еволюція методів керування предметним столиком пройшла шлях від простого ручного переміщення до складних систем з електроприводами та програмним забезпеченням. Перехід до автоматизованих систем відкрив можливість значного підвищення точності та ефективності досліджень, що є необхідною умовою для розвитку сучасної мікроскопії.

1.3 Моторизовані платформи та приводи фокусування

Моторизовані платформи (рис. 1.2) та приводи фокусування є невід'ємними елементами сучасних цифрових мікроскопів, що забезпечують точне позиціонування зразків і стабільне наведення на фокус у процесі автоматизованих досліджень [7]. Їх застосування дозволяє реалізувати повну автоматизацію процесів спостереження, сканування поверхні та побудови тривимірних зображень. Головним призначенням таких систем є кероване переміщення зразка у просторі мікроскопа з мікронною або субмікронною точністю, що забезпечує відтворюваність експериментів і високу якість отриманих зображень.

Моторизовані платформи (предметні столи) поділяються за кількістю ступенів свободи на двокоординатні (XY) та трикоординатні (XYZ) системи [7]. До складу останніх входить додатковий привід по осі Z, який відповідає за фокусування. За типом приводу розрізняють електромеханічні (на базі крокових або сервоприводів) та п'єзоелектричні системи. Електромеханічні платформи забезпечують великий діапазон переміщення (до сотень міліметрів) і високу точність, тоді як п'єзоелектричні використовуються для нанопозиціонування в межах кількох сотень мікрометрів, де потрібна надвисока роздільність і швидкість відгуку [7].

Типова моторизована платформа складається з прецизійних лінійних напрямних, гвинтових пар із мікромеханічним кроком, енкодерів для контролю положення та електродвигунів постійного струму з редукторами. Для керування використовується контролер, який формує сигнали зворотного зв'язку та забезпечує зв'язок із

персональним комп'ютером через інтерфейси RS-232 або USB. Залежно від конфігурації мікроскопа, існують inverted, upright та modular версії моторизованих столиків, що дає змогу інтегрувати їх у різні типи оптичних систем [8].

На прикладі моторизованих платформ ASI серій MS-2000, MS-4400 та MS-9500 можна виділити такі основні характеристики: діапазон переміщення у площині XY — від 125×125 мм до 225×125 мм, роздільність позиціонування — 0.022 мкм, повторюваність — до 0.7 мкм, максимальна швидкість руху — до 7 мм/с, точність позиціонування — 0.25 мкм/мм. [8] У якості зворотного зв'язку застосовуються лінійні або роторні енкодери, що забезпечують високу стабільність положення. Системи можуть працювати у замкненому контурі (closed-loop), що дозволяє усунути похибки позиціонування, викликані люфтом або інерційними ефектами [8].

Приводи фокусування, які забезпечують рух по осі Z, будуються за аналогічним принципом і часто поєднують механічну частину з п'єзоелектричними елементами для досягнення нанометрової точності. Діапазон переміщення у таких системах зазвичай становить 150–500 мкм, а швидкість реакції — до 1 мс, що дає змогу реалізувати високошвидкісне автофокусування.

До переваг моторизованих платформ і приводів фокусування належать:

- висока точність та повторюваність позиціонування;
- плавність руху навіть при мінімальних швидкостях;
- сумісність із різними мікроскопами (Leica, Nikon, Olympus, Zeiss);
- підтримка інтеграції із сучасним програмним забезпеченням (Micro-Manager, SlideBook тощо);
- можливість дистанційного та автоматичного керування через API чи командні протоколи.

Разом з тим, моторизовані платформи мають певні недоліки. Висока точність та складність конструкції призводять до значної вартості обладнання. Крім того, система потребує періодичного калібрування енкодерів, а також врахування умов експлуатації (вібрацій, температури) для запобігання відхиленням у фокусуванні. П'єзоелектричні

системи мають обмежений хід переміщення і потребують стабільного живлення для збереження положення.

Таким чином, моторизовані платформи та приводи фокусування є ключовими елементами у побудові сучасних автоматизованих мікроскопічних систем. Вони забезпечують необхідну точність позиціонування, стабільність фокусування та інтеграцію з алгоритмами комп'ютерного керування, що дозволяє реалізувати повну автоматизацію процесу спостереження і підвищити ефективність наукових досліджень та виробничого контролю якості.



Рисунок 1.2 Моторизована платформа з двома осями переміщення (XY)

1.4 Системи автоматизації мікроскопічних досліджень

З розвитком інформаційних технологій та прецизійної техніки мікроскопія отримала новий етап розвитку, пов'язаний з широким впровадженням автоматизованих систем. Якщо раніше мікроскопічні дослідження повністю залежали

від оператора, то сьогодні більшість сучасних лабораторій застосовує автоматизовані комплекси, здатні самостійно виконувати низку рутинних операцій.

Автоматизація у мікроскопії передбачає інтеграцію механічних, електронних та програмних засобів для забезпечення таких функцій:

- автоматичне переміщення предметного столика у заданих координатах;
- автофокусування на об'єкті дослідження;
- зміна об'єктивів та параметрів освітлення;
- сканування великої площі зразка та складання мозаїчного зображення;
- запис та збереження результатів у цифровому вигляді;
- використання алгоритмів комп'ютерного зору для пошуку областей інтересу.

У біології автоматизовані системи застосовуються для високопродуктивного аналізу клітин і тканин, що дозволяє одночасно обробляти сотні або тисячі зразків. У матеріалознавстві та металографії автоматизовані мікроскопи забезпечують сканування поверхні зразків, побудову карт розподілу структурних елементів та виявлення дефектів. У мікроелектроніці вони використовуються для інспекції друкованих плат, мікросхем та наноструктур із високою точністю позиціонування.

Важливим напрямом є створення інтегрованих програмних комплексів для автоматизації мікроскопії. Серед найвідоміших можна відзначити ImageJ, Zen (Zeiss), Olympus Stream [9]. Такі системи дозволяють керувати мікроскопом, зберігати результати, проводити вимірювання та здійснювати цифрову обробку зображень. Використання програмного забезпечення забезпечує зручний інтерфейс користувача та можливість інтеграції з зовнішніми алгоритмами, наприклад, на основі штучного інтелекту [9].

Окремим напрямом розвитку є роботизовані системи мікроскопії, які поєднують автоматичне позиціонування зразків, зміну об'єктивів, регулювання освітлення та повну комп'ютерну обробку даних. Такі комплекси фактично зводять участь людини лише до етапу підготовки експерименту та інтерпретації результатів.

Таким чином, системи автоматизації мікроскопічних досліджень суттєво розширюють можливості класичної мікроскопії, дозволяючи проводити дослідження

швидше, точніше та з меншим впливом людського фактора. Це створює основу для подальшого розвитку інтелектуальних лабораторних комплексів, де основну роль виконуватимуть комп'ютерні алгоритми, а не оператор.

1.5 Огляд архітектури системи

Автоматична система позиціонування зразка на цифровому оптичному мікроскопі являє собою комплекс апаратних та програмних засобів, що забезпечують узгоджену роботу всіх вузлів [10]. Основна мета архітектури полягає у забезпеченні точного та стабільного переміщення предметного столика відповідно до команд користувача або автоматичних алгоритмів.

Загалом архітектуру системи можна умовно поділити на три основні рівні:

- механічний рівень — рухомі елементи предметного столика та приводи, які забезпечують переміщення у координатах X , Y , Z ;
- електронний рівень — контролер, драйвери двигунів та датчики, що реалізують керування приводами та зворотний зв'язок;
- програмний рівень — комп'ютерне або вбудоване програмне забезпечення, яке здійснює взаємодію з користувачем та автоматичне керування рухами [10].

У структурну схему системи (рис. 1.3) входять такі основні компоненти:

1. Цифровий оптичний мікроскоп – базовий модуль для формування зображення зразка.
2. Предметний столик із приводами – механічна платформа з можливістю переміщення у трьох осях. Переміщення здійснюється кроковими або сервоприводами.
3. Контролер керування – мікроконтролер (Arduino, STM32) або одноплатний комп'ютер (Raspberry Pi), що формує керуючі сигнали для приводів і збирає інформацію з датчиків.
4. Драйвери двигунів – електронні модулі для живлення та керування кроковими чи серводвигунами.

5. Датчики положення – оптичні енкодери або кінцеві вимикачі, які забезпечують контроль координат і безпечне обмеження рухів.
6. Персональний комп'ютер (ПК) – виконує обчислювальні функції, обробляє зображення з мікроскопа та реалізує інтерфейс користувача.
7. Програмне забезпечення – забезпечує взаємодію користувача із системою, задає алгоритми позиціонування, виконує обробку отриманих зображень.

Принцип роботи системи полягає у наступному: користувач задає параметри переміщення через інтерфейс програмного забезпечення. ПК передає команди на контролер, який формує сигнали для драйверів двигунів. Двигуни здійснюють переміщення предметного столика у відповідних координатах. Датчики положення передають інформацію про фактичний стан системи, що дозволяє реалізувати зворотний зв'язок і забезпечити точність рухів. Зображення з мікроскопа надходить на ПК, де відображається у режимі реального часу та може бути використане для подальшої обробки [11].

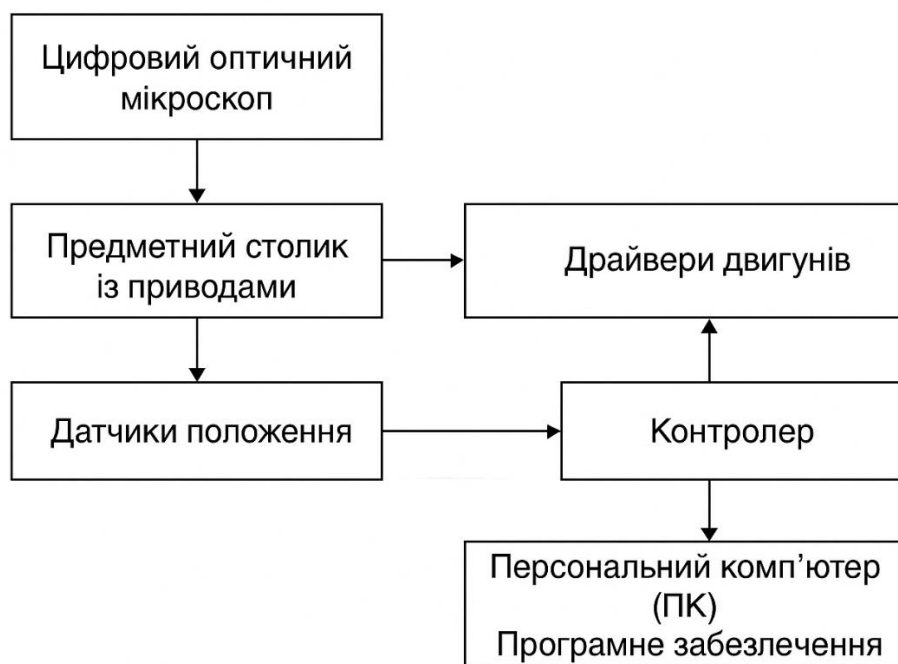


Рисунок 1.3 – Структурна схема роботи системи

Таким чином, запропонована архітектура поєднує апаратні та програмні компоненти в єдину систему, що забезпечує автоматизацію процесу позиціонування зразка з високою точністю та гнучкістю у керуванні.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

У даному розділі проаналізовано фізико-технічні основи роботи цифрових оптичних мікроскопів та сучасні підходи до керування положенням зразка у процесі мікроскопічних досліджень. Розглянуто принципи формування цифрового зображення, роль оптичних і освітлювальних систем, а також значення програмної обробки для розширення функціональних можливостей мікроскопії. Показано, що якість та інформативність отриманих зображень істотно залежать від точності позиціонування і вирівнювання зразка відносно оптичної осі мікроскопа.

Проаналізовано еволюцію методів керування предметним столиком — від ручних механічних рішень до сучасних моторизованих і п'єзоелектричних систем, які забезпечують високу точність, повторюваність і можливість автоматизації. Особливу увагу приділено моторизованим платформам та приводам фокусування як ключовим елементам автоматизованих мікроскопічних комплексів, що дозволяють реалізувати замкнені контури керування з використанням зворотного зв'язку.

Також розглянуто сучасні системи автоматизації мікроскопічних досліджень, їх застосування в різних галузях науки й техніки та роль інтегрованого програмного забезпечення у керуванні обладнанням і аналізі результатів. Проведений огляд архітектури автоматизованої системи позиціонування зразка дозволив виділити її основні рівні — механічний, електронний та програмний — і визначити функції кожного з них.

Таким чином, результати аналізу, наведені в розділі, підтверджують доцільність переходу до автоматизованих систем позиціонування зразка в цифрових оптичних мікроскопах та створюють теоретичне підґрунтя для подальшої розробки, моделювання й реалізації автоматизованої системи позиціонування зразка, що є предметом подальших розділів роботи.

РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЮВАННЯ ТА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ

2.1 Математична модель руху платформи

Математичне моделювання механічної системи позиціонування є необхідним етапом для синтезу алгоритмів керування, оскільки дозволяє врахувати специфіку динаміки п'єзоелектричних приводів та дискретний характер їхнього руху [12]. Метою моделювання є встановлення функціонального зв'язку між вхідним електричним сигналом контролера та лінійним переміщенням точок опори предметного столика.

Предметний столик розглядається як тверде тіло, положення якого у просторі регулюється трьома точками опори [12]. Як виконавчі механізми використовуються лінійні інерційні п'єзоприводи (типу PiezoMike N-470), принцип дії яких базується на ефекті «stick-slip» (зачеплення-ковзання) [13]. Відмінністю таких приводів від класичних п'єзопакетів є теоретично необмежений робочий хід при збереженні нанометрової роздільної здатності.

2.1.1. Принцип дії та формування руху

Рух рухомого елемента (штока) відбувається циклічно за рахунок різниці сил тертя спокою та ковзання при різній швидкості деформації п'єзоелемента. Керуючий сигнал $u(t)$ має форму асиметричної «пилки» (sawtooth waveform) [14].

Динаміка одного кроку складається з двох фаз:

1. Фаза зачеплення (Stick): На п'єзоелемент подається напруга, що повільно зростає. П'єзокераміка розширюється, і завдяки силі тертя спокою штовхає рухому масу (гвинт/шток). Прискорення системи на цьому етапі мале, тому інерційна сила менша за силу тертя [14]:

$$|F_{inert}| < F_{fric}^{static} \quad (2.1)$$

2. Фаза ковзання (Slip): Напруга різко спадає до нуля. П'єзоелемент стискається з високим прискоренням. Через інерцію маси штока сила інерції перевищує силу тертя, і відбувається проковзування контакту [14]. П'єзоелемент повертається у вихідний стан, а шток залишається у новому положенні:

$$|F_{inert}| > F_{fric}^{kinetic} \quad (2.2)$$

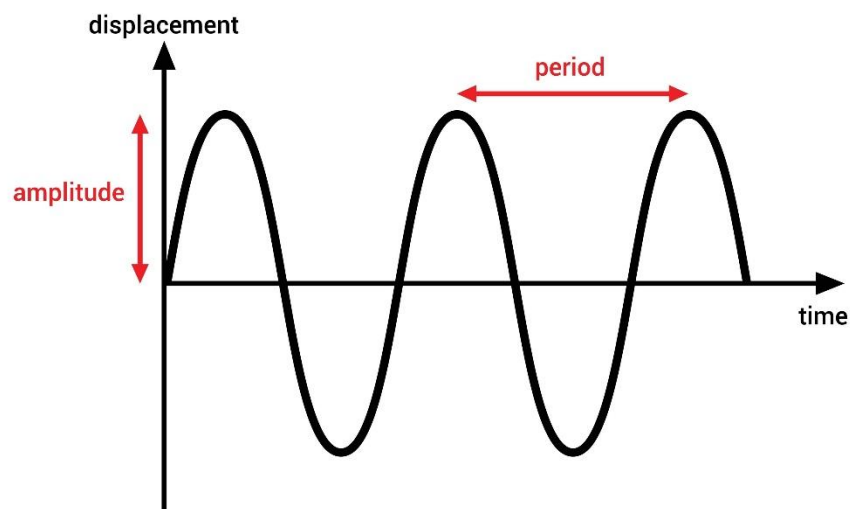


Рисунок 2.1 – Часові діаграми керуючої напруги та переміщення штока при реалізації принципу Stick-Slip.

2.1.2 Рівняння руху

Лінійне видовження самого п'єзоелемента Δl пропорційне прикладеній напрузі $u(t)$:

$$\Delta l(t) = n \cdot d_3 \cdot u(t) \quad (2.3)$$

де n — кількість шарів п'єзокераміки, d_3 — п'єзоелектричний модуль (м/В).

Однак, результуючий рух штока $x(t)$ є сумою дискретних мікрокроків [15]. Для моделювання системи керування доцільно використовувати дискретну модель, де положення актуатора на k -му кроці керування описується різницеvim рівнянням:

$$x_k = x_{k-1} + \Delta x_{step} \cdot N_{imp} \cdot \text{sgn}(u) \quad (2.4)$$

де:

- x_k — поточна координата приводу (мкм);
- Δx_{step} — величина одного мікрокроку (залежить від амплітуди напруги та навантаження, типово 0.02 – 0.1 мкм);
- N_{imp} — кількість імпульсів пилкоподібної напруги, згенерованих драйвером за такт керування;
- $sgn(u)$ — напрямок руху (визначається полярністю пилки).

2.1.3. Передавальна характеристика та гістерезис

На відміну від двигунів постійного струму, інерційні приводи є суттєво нелінійними системами. Швидкість руху v визначається частотою проходження імпульсів f_{drive} [16]:

$$v \approx \Delta x_{step} \cdot f_{drive} \quad (2.5)$$

При проектуванні системи керування необхідно враховувати явище гістерезису при реверсі (backlash), яке виникає через пружність механічних контактів та перехід від тертя спокою до ковзання [17]. Модель реального переміщення з урахуванням втрат має вигляд:

$$x_{real} = x_{ideal} - \delta_{hyster}, \quad (2.6)$$

δ_{hyster} — похибка мертвого ходу при зміні знаку швидкості.

Для компенсації цього явища в алгоритм керування вводиться програмна корекція: при зміні напрямку руху драйвер генерує додаткову пачку імпульсів N_{corr} для вибірки люфту [17].

Таким чином, математична модель приводу для системи автоматичного фокусування являє собою інтегруючу ланку з дискретним входом:

$$X(z) = \frac{\Delta x_{step} \cdot T}{1 - z^{-1}} \cdot F(z), \quad (2.7)$$

де $F(z)$ — частота керуючих імпульсів, T — період дискретизації системи. Це підтверджує, що для точного позиціонування необхідно використовувати замкнений контур керування зі зворотним зв'язком по положенню або по якості зображення [18].

Розрахунок кутів нахилу площини (за 3 точками)

Вектор нормалі N перпендикулярний до поверхні зразка. Він знаходиться його через векторний добуток двох векторів, утворених точками опор:

Вектори сторін трикутника:

$$V_{12} = (x_2 - x_1, y_2 - y_1, z_2 - z_1) \quad (2.8)$$

$$V_{13} = (x_3 - x_1, y_3 - y_1, z_3 - z_1)$$

$$\text{Вектор нормалі } N = V_{12} \times V_{13} = (N_x, N_y, N_z) \quad (2.9)$$

де:

$$N_x = (y_2 - y_1)(z_3 - z_1) - (z_2 - z_1)(y_3 - y_1)$$

$$N_y = (z_2 - z_1)(x_3 - x_1) - (x_2 - x_1)(z_3 - z_1)$$

$$N_z = (x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (y_2 - y_1)(x_3 - x_1)$$

Крок 2: Перехід до кутів керування (θ_x, θ_y)

Для керування нам потрібні проекції нахилу (обертання навколо осей X та Y). Оскільки в мікроскопії кути дуже малі (менше 5°), ми можемо спростити тригонометрію.

• Кут α (поворот навколо осі X , нахил "вперед-назад"):

$$\theta_x \approx -\frac{N_y}{N_z} \text{ (рад)} \quad (2.10)$$

• Кут β (поворот навколо осі Y , нахил "вліво-вправо"):

$$\theta_y \approx \frac{N_x}{N_z} \text{ (рад)} \quad (2.11)$$

2.2 Розрахунки оптичного мікроскопа

Оптичний мікроскоп є складною оптико-механічною системою, у якій формування зображення визначається поєднанням законів геометричної та хвильової оптики, характеристиками оптичних елементів, параметрами освітлювальної системи та властивостями цифрової камери. Математична модель процесу зображення дозволяє описати ключові параметри мікроскопа, визначити обмеження його

просторової роздільної здатності, оцінити глибину різкості, а також сформувати основу для створення алгоритмів автоматизованого фокусування [19]. У цифровому оптичному мікроскопі загальне збільшення визначається співвідношенням між фокусною відстанню об'єктива, конфігурацією тубуса та характеристиками світлочутливого сенсора. Загальне збільшення для традиційної оптичної системи визначається добутком збільшення об'єктива та окуляра [19]:

$$M = M_{obj} \cdot M_{ocu}. \quad (2.12)$$

У цифрових системах роль окуляра виконує матриця CMOS/CCD, і збільшення стає залежним від розміру пікселя та проєкції зображення на сенсор [20]. Загальне збільшення системи M_{tot} визначається добутком збільшення об'єктива та адаптера камери:

$$M_{tot} = M_{obj} \cdot M_{adapter}, \quad (2.13)$$

Масштаб зображення на сенсорі (розмір пікселя в просторі зразка) визначається як:

$$Scale = \frac{p_{sensor}}{M_{tot}} \quad (2.14)$$

де p_{sensor} — фізичний розмір пікселя камери (наприклад, 2.2 мкм).

Це значення є критичним для переведення піксельних зміщень у мікрометри. Одним із ключових параметрів об'єктива, що визначає світлосилу та здатність системи до розрізнення дрібних деталей, є числова апертура [21]:

$$NA = n \sin \alpha, \quad (2.14)$$

де n — показник заломлення середовища між об'єктивом і зразком, а α — максимальний кут, під яким промені входять до об'єктива. Числова апертура безпосередньо визначає дифракційно обмежену роздільну здатність мікроскопа, яка описується критерієм Релея:

$$d = \frac{0.61\lambda}{NA}, \quad (2.15)$$

де λ — довжина хвилі освітлення. Це рівняння задає мінімальний розмір об'єкта, який може бути відокремлений від сусідніх структур у полі зору. Чим більша числова

апертура, тим менше значення d , а отже вища чутливість до дрібних структур. Однак збільшення NA неминуче призводить до зменшення глибини різкості, яка визначає діапазон осьового положення, у межах якого зображення залишається прийнятно різким. Глибина різкості, яка визначає допустиму похибку позиціонування по осі Z для оптичної системи описується:

$$DoF \approx \frac{n\lambda}{NA^2} + \frac{n \cdot p_{sensor}}{NA \cdot M_{tot}}, \quad (2.16)$$

Для об'єктивів з великим збільшенням (40x-100x) це значення становить менше 1 мкм, що вимагає використання прецизійних п'єзоприводів.

Допустимий кут нахилу зразка ϕ_{max} , при якому краї кадру залишаються у фокусі, розраховується як:

$$\phi_{max} = \arctan\left(\frac{2 \cdot DoF}{FOV}\right) \quad (2.17)$$

де FOV — поле зору камери.

Для реалізації автоматичного фокусування необхідно мати математичний критерій, який дозволяє оцінити ступінь різкості зображення при певному положенні фокусувального механізму. Одним із найбільш ефективних критеріїв є міра різкості на основі модуля градієнта (MGC), яка описує інтенсивність локальних змін яскравості у зображенні [22]. Для одноканального зображення функція градієнта визначається:

$$g(x, y) = \sqrt{\left(\frac{\partial C}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial C}{\partial y}\right)^2}, \quad (2.18)$$

де $C(x, y)$ — значення яскравості у точці. Для кольорових зображень RGB може застосовуватися максимум градієнтів по каналах:

$$g_c(x, y) = \max(g_R, g_G, g_B), \quad (2.19)$$

що дозволяє коректно врахувати різницю у спектральній насиченості. На основі значень градієнта для кожного положення фокусу формується інтегральна міра різкості [23]:

$$FM(z) = \sum_{x,y} g_z(x,y), \quad (2.20)$$

де z — порядковий номер кадру у z -стеці. Положення оптимального фокусу визначається як

$$z_{opt} = \arg \max_z FM(z). \quad (2.21)$$

Таким чином, математична модель поєднує оптичні параметри (збільшення, NA, роздільну здатність), геометрію механічного приводу та алгоритмічну частину, що працює із цифровими зображеннями. Розрахункові рівняння дозволяють коректно оцінити межі можливостей оптичної системи, визначити вимоги до точності переміщення приводу та обґрунтувати вибір алгоритму фокусування, який має найкращу чутливість у межах заданої глибини різкості. Такий підхід дає змогу інтегрувати оптичну та цифрову частину в єдину автоматизовану систему мікроскопії, що забезпечує підвищену точність та стабільність формування зображень.

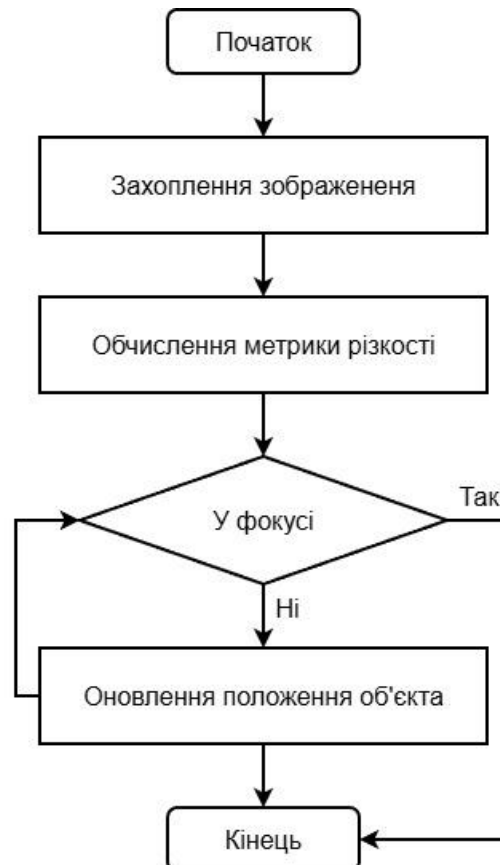


Рисунок 2.2 – Блок-схема алгоритму роботи системи фокусування

2.3 Автоматизована система фокусування

Автоматизована система фокусування та вирівнювання поверхні зразка відносно оптичної осі мікроскопа є комплексом, що поєднує оптичний модуль, електронні компоненти керування, високоточні п'єзоелектричні приводи та програмне забезпечення, яке здійснює аналіз зображень і формування коригувальних команд. Основна мета системи полягає у забезпеченні перпендикулярності поверхні зразка до оптичної осі, що є критично важливим для формування рівномірної фокусної площини, зменшення аберацій та усунення сферичних спотворень, які виникають при нахилі об'єкта відносно об'єктива.

Процес функціонування системи ґрунтується на ітераційному підході: комп'ютер отримує стек зображень, обчислює локальну міру різкості та нахил поверхні зразка, після чого генерує команди для контролера п'єзоелектричних приводів, що відповідають за мікронні та субмікронні переміщення [24]. Приводи здійснюють корекцію просторового положення зразка, після чого система повторно захоплює стек зображень і виконує новий цикл обчислень доти, доки поверхня не стане ортогональною до оптичної осі.

Система, структурна схема якої зображена на рис. 2.3, складається з таких основних блоків:

- Оптичний модуль мікроскопа
- Платформа зразка з п'єзоелектричними приводами нахилу
- Контролер приводів
- Драйвери п'єзоприводів
- Комп'ютер із програмним забезпеченням обробки зображень
- Зворотний зв'язок



Рисунок 2.3 – Структурна схема

Функціональна схема на рис. 2.4 описує послідовність дій:



Рисунок 2.4 – Функціональна схема

Більш детальний опис елементів системи, що були розглянуті раніше:

Оптичний модуль мікроскопа формує зображення на матриці CMOS/CCD, яке служить основним джерелом даних для алгоритму. Можливість отримати стек зображень при зміні положення зразка дозволяє реконструювати локальну глибину різкості над усією площиною.

П'єзоелектричні приводи нахилу забезпечують надточне переміщення в діапазоні 1–10 мкм або навіть нанометрів. Для реалізації нахилу застосовуються три приводи, кожен з яких працює у вертикальному напрямку, створюючи результуючу площину.

Контролер приводів приймає команди від ПК, перетворює їх у електричні сигнали та подає на п'єзоактуатори. У системі можливе використання PID-регуляції для досягнення плавного переходу до цільового положення.

Програмне забезпечення реалізує цифрову обробку зображень, обчислює градієнти, локальні міри різкості та нахил поверхні, формує команди керування.

Детальний опис рівнянь, що описують систему

Міри різкості та поверхня фокусних глибин

Для кожного зображення витягується градієнт яскравості:

$$g(x, y, z) = \sqrt{\left(\frac{\partial C}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial C}{\partial y}\right)^2} \quad (2.22)$$

Міра різкості шару:

$$FM(z) = \sum_{x,y} g(x, y, z) \quad (2.23)$$

Визначення локального фокусного положення

Для кожного пікселя:

$$z_{\max}(x, y) = \arg \max_z g(x, y, z), \quad (2.24)$$

що дає **карту фокусної глибини**, залежну від топографії зразка.

Обчислення нахилу поверхні

Поверхня нахилу описується рівнянням площини:

$$z(x, y) = ax + by + c, \quad (2.25)$$

де коефіцієнти a і b визначають нахил уздовж осей X та Y .

Вони обчислюються методом найменших квадратів:

$$\min_{a,b,c} \sum_{x,y} (z_{\max}(x, y) - (ax + by + c))^2 \quad (2.26)$$

Матриця корекції положення

Для вирівнювання зразка (приведення $a = 0$, $b = 0$) необхідно змінити висоту трьох опорних точок, де розташовані актуатори. Нехай координати актуаторів у площині XY : $P_1(x_1, y_1)$, $P_2(x_2, y_2)$, $P_3(x_3, y_3)$.

Вектор необхідних зміщень приводів $\Delta Z = [\Delta z_1, \Delta z_2, \Delta z_3]^T$ розраховується через матрицю координат:

$$\begin{bmatrix} \Delta z_1 \\ \Delta z_2 \\ \Delta z_3 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

Отримані значення Δz_i переводяться у кількість кроків для кожного контролера згідно з моделлю.

2.4 Математичне моделювання та оптимізація алгоритмів автофокусування в системі цифрової мікроскопії

Автоматичне фокусування є одним із ключових процесів сучасних цифрових мікроскопічних систем, що безпосередньо впливає на точність, швидкість та якість отримуваних зображень. Основна мета цього процесу полягає у визначенні такого положення предметного столика або оптичного вузла, при якому зображення спостережуваного об'єкта має максимальну різкість. У традиційних мікроскопах це завдання виконується оператором вручну, проте в умовах високої точності досліджень

або при необхідності обробки великої кількості зразків ручне керування втрачає ефективність. Саме тому все більшого значення набувають методи автоматизованого фокусування, що базуються на математичних моделях оцінювання різкості зображення.

Математичне моделювання процесу автофокусування полягає у формалізації взаємозв'язку між положенням оптичних елементів і числовими характеристиками зображення, які відображають рівень його фокусування. Для цього застосовуються спеціальні функції фокусної міри (Focus Measure Functions), які визначають ступінь різкості зображення на основі його контрасту, частотних або градієнтних характеристик [25]. Найбільш ефективні функції фокусування мають одновершинну форму, тобто мають єдиний максимум у положенні найкращого фокусу.

Одним із сучасних і ефективних підходів до оцінювання фокусу є метод модуля градієнта кольору (MGC – Modulus of the Gradient of Color) [25]. Цей метод базується на врахуванні просторових змін кольорової інтенсивності у трьох каналах зображення – червоному (R), зеленому (G) та синьому (B). На відміну від класичних методів, які аналізують лише яскравісну складову, метод MGC використовує повну інформацію про колірне зображення, що підвищує точність визначення моменту фокусування.

У загальному вигляді кольорове зображення можна представити як векторну функцію:

$$C(x, y) = R(x, y)i^{\wedge} + G(x, y)j^{\wedge} + B(x, y)k^{\wedge}$$

де $R(x, y)$, $G(x, y)$, $B(x, y)$ – інтенсивності кольорових каналів, а i, j, k – одиничні вектори у тривимірному кольоровому просторі RGB. Окрім простору RGB, кольорові зображення також обробляються в колірному просторі відтінку, насиченості та інтенсивності (HSI), оскільки це придатна модель для опису та аналізу кольорів. Простір HSI моделюється як подвійний конус, де відтінок представляє домінуючий колір, насиченість – чистоту кольору, а інтенсивність – яскравість відповідно. Як зазначали Гонсалес та Вудс, ця модель відокремлює компонент інтенсивності від інформації про колір (відтінок-насиченість) у кольоровому зображенні [26]. Канал інтенсивності є важливим дескриптором монохроматичних зображень, і він класично використовується для багатоканального перетворення на зображення у градаціях

сірого. Вимірювання різниці при роботі в колірному просторі HSI модифікується, як встановлено Кошаном та Абіді.

Для визначення зміни інтенсивності в просторі вводиться градієнт кольорового зображення:

$$\nabla C(x, y) = \frac{\partial C(x, y)}{\partial x} i^{\wedge} + \frac{\partial C(x, y)}{\partial y} j^{\wedge} \quad (2.28)$$

де $\partial C/\partial x$ та $\partial C/\partial y$ – часткові похідні, які відображають зміну кольору за горизонталлю та вертикаллю. Для кожного каналу окремо ці похідні можна подати як:

$$gRx = \frac{\partial R}{\partial x}, gRy = \frac{\partial R}{\partial y}$$

$$gGx = \frac{\partial G}{\partial x}, gGy = \frac{\partial G}{\partial y}$$

$$gBx = \frac{\partial B}{\partial x}, gBy = \frac{\partial B}{\partial y}$$

Далі обчислюється модуль градієнта для кожного з каналів:

$$gR = \sqrt{(gRx)^2 + (gRy)^2}, gG = \sqrt{(gGx)^2 + (gGy)^2}, gB = \sqrt{(gBx)^2 + (gBy)^2}$$

Після цього комбінуються інформація про всі три канали для отримання єдиного значення модуля градієнта кольору:

$$MGC(x, y) = \sqrt{(g_R^2 + g_G^2 + g_B^2)} \quad (2.29)$$

Отримане значення $MGC(x, y)$ характеризує локальний рівень контрасту зображення. Для визначення загальної різкості всього зображення обчислюють середнє або середньоквадратичне значення MGC по всіх пікселях:

$$F = \left(\frac{1}{MN}\right) \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N MGC(x, y)$$

або

$$F = \left(\frac{1}{MN}\right) \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [MGC(x, y)]^2$$

де M і N – розміри зображення. Значення F використовується як критерій фокусування: чим воно більше, тим ближче зображення до найкращого фокусного положення.

Метод MGC має низку переваг: він інваріантний до змін яскравості, враховує кольорову інформацію та не потребує попереднього перетворення у градації сірого. Недоліком є більша обчислювальна складність порівняно з монохромними методами, однак ця проблема вирішується застосуванням сучасних паралельних архітектур обробки.

Будь-яка мікроскопічна система зображення здатна сфокусувати лише ту частину поля зору (FOV) зразка, що знаходиться в межах глибини різкості (DOF) об'єктива. Це означає, що тільки певні осьові площини зразка перебувають у фокусі. Сучасним рішенням цієї проблеми є багатофокусне злиття зображень (multifocus image fusion), що дозволяє відтворити загальне «все-в-фокусі» (all-in-focus) зображення всього поля зору певного об'єкта. Цей процес здійснюється шляхом отримання серії зображень зразка на різних осьових площинах фокусування.

Позначимо множину вхідних зображень як $C_z(x, y, i)$, де $z = 1, 2, \dots, Z$ - індекс осової площини, а $i = 1, 2, 3$ — номер кольорового каналу (RGB).

Для кожної осової площини обчислюється складене градієнтне зображення згідно з рівнянням (2). Потім для кожного пікселя (x, y) визначається максимальне значення серед усіх площин:

$$sap(x, y) = \max_z \{g_{c1}(x, y), \dots, g_{cz}(x, y)\}. \quad (2.30)$$

Матриця $sap(x, y)$ позначає осьову позицію зрізу, в якій відповідний піксель є у фокусі вздовж осі z .

Після цього виконується етап постобробки, що забезпечує просторову узгодженість (spatial consistency). Для цього використовується низькочастотна фільтрація (наприклад, медіанний фільтр) розміром $p \times q$, застосована до матриці $f_{sap}(x, y)$. Цей алгоритм гарантує, що більшість інтенсивнісних пікселів у межах вікна $p \times q$ походять із тієї самої осової площини або з найближчої. Просторову

узгодженість показано на Рис. 3: на частині (а) зображено початкову карту позицій, а на частині (b) — скориговану після фільтрації поверхню, що зберігає безперервність зразка

Щоб уникнути введення штучної інформації, об'єднане зображення $\Phi(x, y, i)$ формується лише з тих багатоканальних пікселів вихідних зображень $C_z(x, y, i)$, які відповідають знайденій фокусній площині $z \in \{sap(x, y)\}$. Таким чином, алгоритм багатофокусного злиття можна записати як:

$$\Phi(x, y, i) = C_{sap(x,y)}(x, y, i). \quad (2.31)$$

Щоб прискорити обчислення, процедура злиття реалізована на графічному процесорі (GPU), що забезпечує значне підвищення швидкодії.

Отримані об'єднані зображення оцінюються за метрикою якості без еталонного зображення, яка базується на вимірюванні анізотропії. Анізотропний індекс якості (AQI) для зображення $\Phi(x, y, i)$ визначається за формулою [26]:

$$AQI(\Phi) = \sqrt{\frac{1}{S} \sum_{s=1}^S [\mu_{\Phi} - R(t, \theta_s)]^2}, \quad (2.32)$$

де μ_{Φ} — середнє значення ентропії Реньї $R(\Phi, \theta_s)$, обчисленої в напрямках $\theta_s \in [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_S]$.

Ентропія Реньї характеризує частотний вміст зображення через його напрямну псевдо-Вігнерову розподільчу функцію.

Окрім MGC, у цифровій мікроскопії активно застосовуються й інші класичні методи оцінки різкості. Найбільш відомі серед них – Vollath-4 (VOL4), Tenengrad (TEN), Laplacian (LAP) і Mid-frequency DCT (MDCT) [27]. Кожен з них базується на різних математичних принципах, що визначають їхню чутливість до шуму, текстурних особливостей та освітлення.

Метод **Vollath-4 (VOL4)** використовує автокореляційний підхід, який порівнює інтенсивності сусідніх пікселів. Його формула має вигляд [27]:

$$VOL4 = \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^N g(i, j) \cdot g(i+1, j) - \sum_{i=1}^{M-2} \sum_{j=1}^N g(i, j) \cdot g(i+2, j) \quad (2.33)$$

Цей метод ефективно відображає рівень фокусування навіть у випадках, коли на зображенні присутній шум, оскільки він враховує відносну зміну інтенсивності, а не її абсолютні значення.

Метод **Tenengrad (TEN)** ґрунтується на градієнтному аналізі яскравості [27]. Для обчислення різкості використовується оператор Собеля, який виділяє просторові зміни інтенсивності:

$$TEN = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N ([g(i,j) \otimes Sx]^2 + [g(i,j) \otimes Sy]^2)$$

де Sx і Sy – фільтри Собеля у горизонтальному та вертикальному напрямках. Метод Tenengrad добре підходить для зображень з високим контрастом і деталізацією, але може бути чутливим до шумів низької частоти.

Метод **Laplacian (LAP)** базується на другій похідній функції яскравості, що дозволяє виділити області з максимальною зміною інтенсивності [27]:

$$LAP = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [g(i,j) \otimes K_{LAP}]^2 \quad (2.34)$$

де K_{LAP} – маска Лапласіана. Перевагою цього методу є висока точність у визначенні фокусного положення, проте він погано працює при низькому рівні освітлення.

Метод **Mid-frequency DCT (MDCT)** застосовує дискретне косинусне перетворення (DCT) і аналізує енергетичний розподіл середньочастотних компонентів [28]:

$$MDCT = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [g(i,j) \otimes K_{DCT}]^2 \quad (2.35)$$

Цей підхід дозволяє ефективно відокремлювати структурну різкість від високочастотного шуму, що робить його придатним для біологічних зразків із м'якими контурами.

Порівняльні дослідження показують, що методи VOL4 і MDCT забезпечують найкраще поєднання точності, швидкодії та стійкості до шумів, тоді як MGC демонструє найвищу стабільність для кольорових зображень.

З точки зору обчислювальної складності, алгоритми автофокусування мають різний рівень ресурсозатратності. Найменш складними є VOL4 та TEN, які виконуються за час $O(N^2)$, де N – кількість пікселів. Методи MGC і MDCT потребують додаткових операцій множення та обчислення квадратного кореня, що підвищує складність до $O(N^2 \log N)$. Для великих зображень це може бути критичним, тому постає потреба у паралельній реалізації алгоритмів.

Для прискорення розрахунків у цифровій мікроскопії застосовуються технології паралельних обчислень на базі багатоядерних процесорів (CPU) і графічних процесорів (GPU). Одним із найпоширеніших підходів є використання OpenMP для розпаралелювання обчислень на CPU. У такій реалізації кожен потік обробляє окрему частину зображення, а результат агрегується у спільну змінну. Цей підхід забезпечує прискорення у 8–12 разів залежно від кількості ядер [29].

Більш ефективним є використання CUDA – архітектури програмування GPU, що дозволяє виконувати одночасно тисячі паралельних потоків. Завдяки технологіям nested parallelism та Hyper-Q, обчислення функцій фокусування можуть бути виконані з максимальною ефективністю завантаження обчислювальних ядер GPU. Дослідження показують, що реалізація алгоритму MDCT на GPU Tesla K20 дозволяє досягти швидкості до 296 кадрів/с, що еквівалентно 23-кратному прискоренню порівняно з традиційною CPU-реалізацією [29].

Паралельна обробка дозволяє не лише прискорити розрахунок функцій фокусування, а й реалізувати їх у режимі реального часу, що особливо важливо для систем автоматичного сканування зразків. У таких системах автофокусування може виконуватись у фоновому режимі, не впливаючи на швидкість руху предметного столика. Таким чином, загальна архітектура цифрового мікроскопа з автоматичним позиціонуванням та фокусуванням може бути побудована як багаторівнева система, де рівень алгоритмічної обробки працює синхронно з апаратними вузлами приводу.

Отже, математичне моделювання алгоритмів автофокусування базується на поєднанні точних градієнтних методів (MGC, Tenengrad) із частотними та автокореляційними (VOL4, MDCT), що забезпечує високу точність та надійність у різних умовах зйомки. Впровадження паралельних обчислень суттєво підвищує

продуктивність таких систем, дозволяючи проводити аналіз у реальному часі навіть при високій роздільній здатності. Розроблені алгоритми можуть бути інтегровані у програмне забезпечення мікроскопа для автоматичного регулювання положення фокусу, що створює передумови для повної автоматизації процесу спостереження.

Таким чином, розглянуті математичні моделі автофокусування демонструють можливість поєднання точності аналітичних методів та швидкодії паралельних обчислень, що є основою для побудови інтелектуальних цифрових мікроскопічних систем нового покоління.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

У другому розділі виконано комплексне математичне та алгоритмічне обґрунтування автоматизованої системи фокусування і вирівнювання зразка в цифровому оптичному мікроскопі. Проведене моделювання механічної частини системи дозволило формалізувати рух платформи зразка, що реалізується за допомогою інерційних п'єзоелектричних приводів типу *stick-slip*. Запропонована дискретна модель руху адекватно описує залежність між керуючими електричними сигналами та мікропереміщеннями платформи, а також враховує нелінійні ефекти, зокрема гістерезис і мертвий хід, що є критичними для високоточного позиціонування.

У розділі наведено аналітичні залежності для розрахунку кутів нахилу поверхні зразка на основі координат трьох опорних точок, що дозволяє перейти від геометричної моделі поверхні до керувальних параметрів приводу. Це створює основу для реалізації замкненого контуру керування, у якому корекція положення зразка виконується за результатами аналізу зображень.

Окрему увагу приділено математичному моделюванню алгоритмів автофокусування, заснованих на аналізі різкості зображення. Розглянуто градієнтні, автокореляційні та частотні методи оцінки фокусу, серед яких особливе місце займає метод модуля градієнта кольору (MGC), що забезпечує підвищену стабільність та точність для кольорових зображень. Показано, що поєднання алгоритмів оцінки різкості з методами багатофокусного злиття дозволяє не лише визначати оптимальне фокусне положення, а й формувати зображення з розширеною глибиною різкості.

Запропоновані структурна та функціональна схеми автоматизованої системи фокусування відображають взаємодію оптичного, механічного, електронного та програмного рівнів і демонструють принцип ітераційної корекції положення зразка на основі зворотного зв'язку за зображенням. Деталізований опис рівнянь, що описують роботу системи, підтверджує можливість інтеграції оптичної та цифрової обробки в єдиний керований комплекс.

Таким чином, результати, отримані у другому розділі, формують цілісну математичну та алгоритмічну основу для побудови автоматизованої системи фокусування і позиціонування зразка. Вони дозволяють обґрунтувати вибір апаратних компонентів, параметрів приводу та алгоритмів обробки зображень, а також створюють необхідне підґрунтя для подальшої реалізації та експериментальної перевірки системи, що розглядається у наступних розділах роботи.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА АПАРАТНОЇ ЧАСТИНИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ПОЗИЦІОНУВАННЯ ЗРАЗКА (АСПЗ)

3.1 Вибір апаратного забезпечення

Для побудови автоматичної системи позиціонування зразка необхідно обрати такі апаратні компоненти, які забезпечуватимуть високу точність руху, стабільність роботи та сумісність із цифровим мікроскопом. Вибір складових здійснюється на основі аналізу технічних характеристик, вимог до точності, вартості та доступності компонентів.

Мікроконтролер або керуюча плата

Центральним елементом системи керування є мікроконтролер STM32F103C8T6 (рис. 3.1), який використовується як функціональний модуль верхнього рівня. Його вибір зумовлений такими перевагами:

- наявністю апаратних таймерів високої роздільності для формування керуючих сигналів;
- підтримкою інтерфейсів UART, SPI, I²C, що забезпечують обмін даними з п'єзо-контролером та датчиками;
- низьким рівнем джитера, що є критичним для точного керування приводами;
- можливістю роботи в режимі реального часу;
- високою продуктивністю при низькому енергоспоживанні.

У системі STM32 виконує функції обробки зворотних сигналів, передачі команд від ПК, формування профілів руху та реалізації алгоритмів безпеки приводів [30].



Рисунок 3.1 – STM32F103C8T6 — основна мікроконтролерна плата [31]

Як альтернативу розглядалися STM32 Nucleo та Raspberry Pi, однак вони потребують складнішого налаштування периферії або мають більшу вартість. Тому для створення лабораторного прототипу доцільним є використання платформи Arduino.

П'єзоелектричні приводи предметної платформи

Для реалізації переміщення предметного столика у координатах X, Y, Z п'єзоелектричні мікроприводи Physik Instrumente (PI) N-470 PiezoMike (рис. 3.2), які забезпечують:

- робочий хід від 7 до 11 мм;
- мінімальний крок переміщення 20–50 нм;
- високу повторюваність та нульовий люфт;
- можливість створення триточнової або двоточнової схеми вирівнювання;
- сумісність з високовольтними драйверами PI та іншими контролерами [31].

На відміну від крокових двигунів, п'єзоактюатори забезпечують точне мікропозиціонування без вібрацій, що є критичним для мікроскопічних операцій.



Рисунок 3.2 – П'єзоелектричний моторизований мікрометричний гвинтовий актуатор (PI) N-470 PiezoMike [31]

Драйвери та контролери п'єзоелектричних приводів

Оскільки п'єзоелектричні приводи потребують високовольтного сигналу (типово 0–75 В або 0–100 В), керування здійснюється через спеціалізований п'єзо-контролер. В АСПЗ використовується контролер класу PI E-871 (рис. 3.3) або аналогічний високовольтний драйвер

Він забезпечує:

- формування високовольтних імпульсів з низьким електричним шумом;
- цифрове керування через USB або UART;
- підтримку режимів відкритого та закритого контуру;
- можливість програмування профілів руху;
- високу лінійність та стабільність керуючої напруги.

Такі контролери дозволяють поєднати мікропозиціонування з алгоритмами автофокусування, що робить систему придатною для освітніх, лабораторних та інспекційних застосувань.



Рисунок 3.3 – Контролер PI E-871 [31]

Датчики положення

Для забезпечення високої точності та роботи системи в замкненому контурі передбачено використання сенсорів положення, сумісних із п'єзоелектричними приводами. У базовій конфігурації система працює за алгоритмом оптичного зворотного зв'язку (на основі аналізу стеків зображень), однак для підвищення точності можуть застосовуватися:

- ємнісні датчики, що забезпечують роздільну здатність до 1–5 нм;
- оптичні енкодери, які дозволяють отримувати інформацію про реальне переміщення привода;
- мікрореле (кінцеві обмежувачі) для захисту механізму від перевищення ходу.

Застосування датчиків дозволяє реалізувати гібридну систему керування, де дані зображення доповнюються інформацією про реальне переміщення п'єзоелементів.

Механічна конструкція предметного столика

Механічна частина автоматизованої системи позиціонування зразка побудована на базі кінематичної опори з трьома точками регулювання. У роботі розглядаються два варіанти конструкції:

1. Триточкова система на трьох п'єзоелектричних приводах (N-470). Кожен привід окремо змінює висоту точки опори, забезпечуючи незалежний контроль кутів нахилу по осях X і Y та загального рівня Z [32].

2. Система на двох п'єзоприводах із шаровою опорою. Два п'єзоприводи формують нахил у двох площинах, а шарова опора виконує роль третьої точки дотику, що забезпечує стабільність конструкції. [32]

Обидва варіанти побудовані на металевій платформі з високою жорсткістю, що мінімізує вібрації та підвищує точність мікропозиціонування. Конструкція забезпечує точність переміщення до 20–50 нм, відсутність люфтів, можливість роботи при високих збільшеннях мікроскопа.

Оптичний модуль

В якості оптичного модуля використовується цифровий оптичний мікроскоп із CMOS-сенсором (рис. 3.4) високої роздільної здатності (до 2 Мп і більше) та можливістю формування стеків зображень (z-stack) [32]. Мікроскоп підтримує:

- регульовану оптичну систему з постійною або змінною апертурою;
- формування зображень для алгоритмів автофокусування;
- високу стабільність світлового потоку при роботі з фокус-метриками.

Дані з мікроскопа передаються на ПК у режимі реального часу для подальшої обробки.

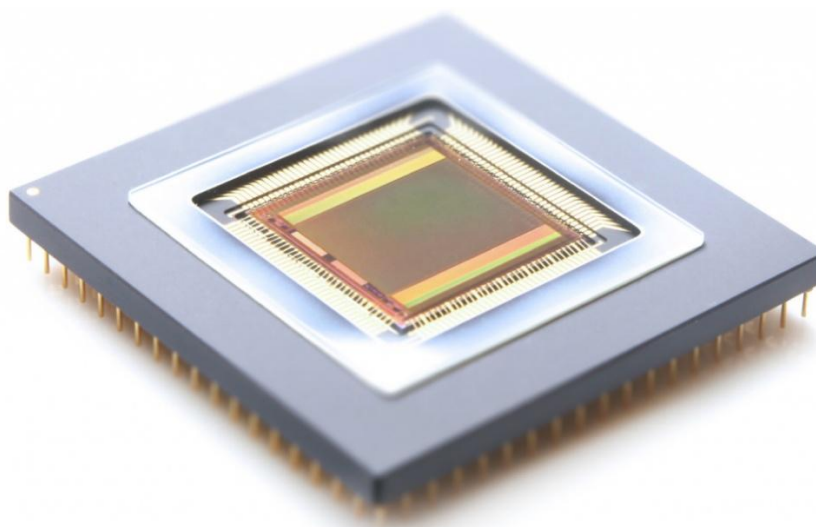


Рисунок 3.4 – CMOS-сенсор для мікроскопа [32]

Блок живлення

Система живиться від стабілізованого джерела постійної напруги 12 В, 10 А (рис. 3.5), яке забезпечує достатній запас потужності для п'єзоелектричних приводів класу

PI N-470 та сумісні з високовольтними драйверами типу PI E-871 / E-625. Для захисту електроніки передбачено плавкий запобіжник і фільтр від імпульсних перешкод.



Рисунок 3.5 – Високотужний імпульсний лабораторний блок живлення [32]

Таким чином, обраний набір апаратних засобів забезпечує необхідний баланс між точністю, надійністю та вартістю реалізації. Комбінація контролера PI E-871, П'єзоелектричних мікрометричних гвинтових актуаторів (PI) N-470 PiezoMike та мікроконтролера STM32F103C8T6 дозволяє створити ефективну систему автоматичного позиціонування зразка, яка може бути інтегрована з будь-яким цифровим мікроскопом для лабораторних та навчальних досліджень.

3.2. Розробка алгоритмів керування та позиціонування

Програмна частина автоматичної системи позиціонування зразка на цифровому оптичному мікроскопі є ключовим елементом, який забезпечує узгоджену роботу всіх апаратних компонентів та точне виконання команд користувача. Основною метою алгоритмів керування є забезпечення плавного, стабільного та високоточного переміщення предметного столика у трьох координатах відповідно до заданих параметрів. Програмна логіка реалізується у вигляді комплексу модулів, що відповідають за обробку команд користувача, формування керуючих сигналів для

приводів, зчитування даних із датчиків положення та організацію зворотного зв'язку між контролером і комп'ютером.

Робота системи починається з процедури ініціалізації, під час якої здійснюється перевірка наявності зв'язку з мікроконтролером, визначення початкового положення осей за допомогою кінцевих вимикачів, встановлення нульових координат та завантаження параметрів калібрування з пам'яті. Після цього система переходить у робочий режим, у якому користувач може задавати координати переміщення, швидкість руху або запускати автоматичні сценарії позиціонування. Команди з персонального комп'ютера передаються на контролер у вигляді текстових інструкцій через послідовний інтерфейс (UART/USB), де вони інтерпретуються програмною частиною мікроконтролера. Кожна команда містить набір параметрів, які визначають напрямок, швидкість та відстань переміщення, після чого контролер формує відповідну послідовність імпульсів для керування кроковими двигунами [33].

Керування приводами здійснюється шляхом генерації сигналів типу STEP і DIR, які задають напрямок обертання вала та кількість кроків, що відповідає необхідному лінійному переміщенню столика. Величина інтервалу між імпульсами визначає швидкість руху, а загальна кількість імпульсів — відстань переміщення. Для зменшення механічних коливань і забезпечення плавності ходу в алгоритмі використовується профіль швидкості типу «трапеція» [33]. Це означає, що на початку руху система поступово збільшує швидкість, далі здійснює переміщення з постійною швидкістю, а перед досягненням цільового положення плавно знижує її до нуля. Такий підхід дає змогу уникнути інерційних ривків, підвищити точність зупинки та зменшити навантаження на механічні елементи приводу.

Зворотний зв'язок у системі реалізовано за допомогою датчиків положення, які передають контролеру інформацію про фактичні координати предметного столика. Це дозволяє порівнювати реальні та задані положення, визначати відхилення та виконувати корекцію руху у режимі реального часу. У простішому варіанті система працює у відкритому контурі, використовуючи лише кінцеві вимикачі для визначення межі руху, однак програмна структура передбачає можливість інтеграції оптичних енкдерів, що дозволить реалізувати замкнену систему керування з точністю до

десятків мікрометрів. Завдяки цьому забезпечується не лише точне позиціонування, але й можливість стабілізації положення при наявності зовнішніх вібрацій або збурень [34].

Важливим етапом є процедура калібрування, яка виконується під час першого запуску або після скидання системи. У цьому режимі кожна вісь рухається до спрацювання свого кінцевого вимикача, що дозволяє визначити нульову позицію. Після завершення калібрування координати записуються у пам'ять контролера і використовуються як відлікові точки для подальших переміщень [34]. Такий підхід забезпечує відтворюваність координат при багаторазовому використанні системи та дозволяє точно відновлювати положення зразка під час повторних експериментів.

Зв'язок між контролером і персональним комп'ютером організовано через послідовний інтерфейс, який забезпечує двосторонній обмін інформацією. Програмне забезпечення на ПК не лише надсилає команди руху, але й приймає відповіді від мікроконтролера, що містять дані про поточний стан системи, координати, швидкість або повідомлення про помилки. Така комунікація дозволяє реалізувати повноцінний режим моніторингу та діагностики. Користувач може задавати рухи вручну або у вигляді автоматизованих сценаріїв сканування, а також спостерігати поточні координати предметного столика у режимі реального часу. Це особливо важливо при синхронізації переміщень з отриманням зображення від мікроскопа, оскільки дозволяє автоматично формувати мозаїчні панорами поверхні або виконувати послідовне сканування заданої області.

Для підвищення надійності розроблено алгоритм аварійного зупинення, який активується при спрацюванні будь-якого кінцевого вимикача або у разі втрати зв'язку між контролером і ПК. У такій ситуації система миттєво припиняє подачу імпульсів на двигуни, що запобігає виходу за межі робочої області та пошкодженню механічних вузлів. Додатково реалізовано функцію ручного перезапуску та відновлення останньої позиції після відновлення зв'язку.

Таким чином, розроблені алгоритми (рис. 3.6) керування забезпечують узгоджену взаємодію між усіма компонентами системи, дозволяючи досягти високої точності, стабільності та повторюваності позиціонування. Використання мікрокрокового

керування в поєднанні з профілем швидкості типу «трапеція» забезпечує плавний рух предметного столика без ривків, а реалізація процедур калібрування та зворотного зв'язку гарантує правильність координат і безпечну роботу комплексу. Така програмна структура є універсальною і може бути легко адаптована до інших типів оптичних систем або модернізована шляхом додавання алгоритмів автофокусування та адаптивного сканування з використанням методів комп'ютерного зору.

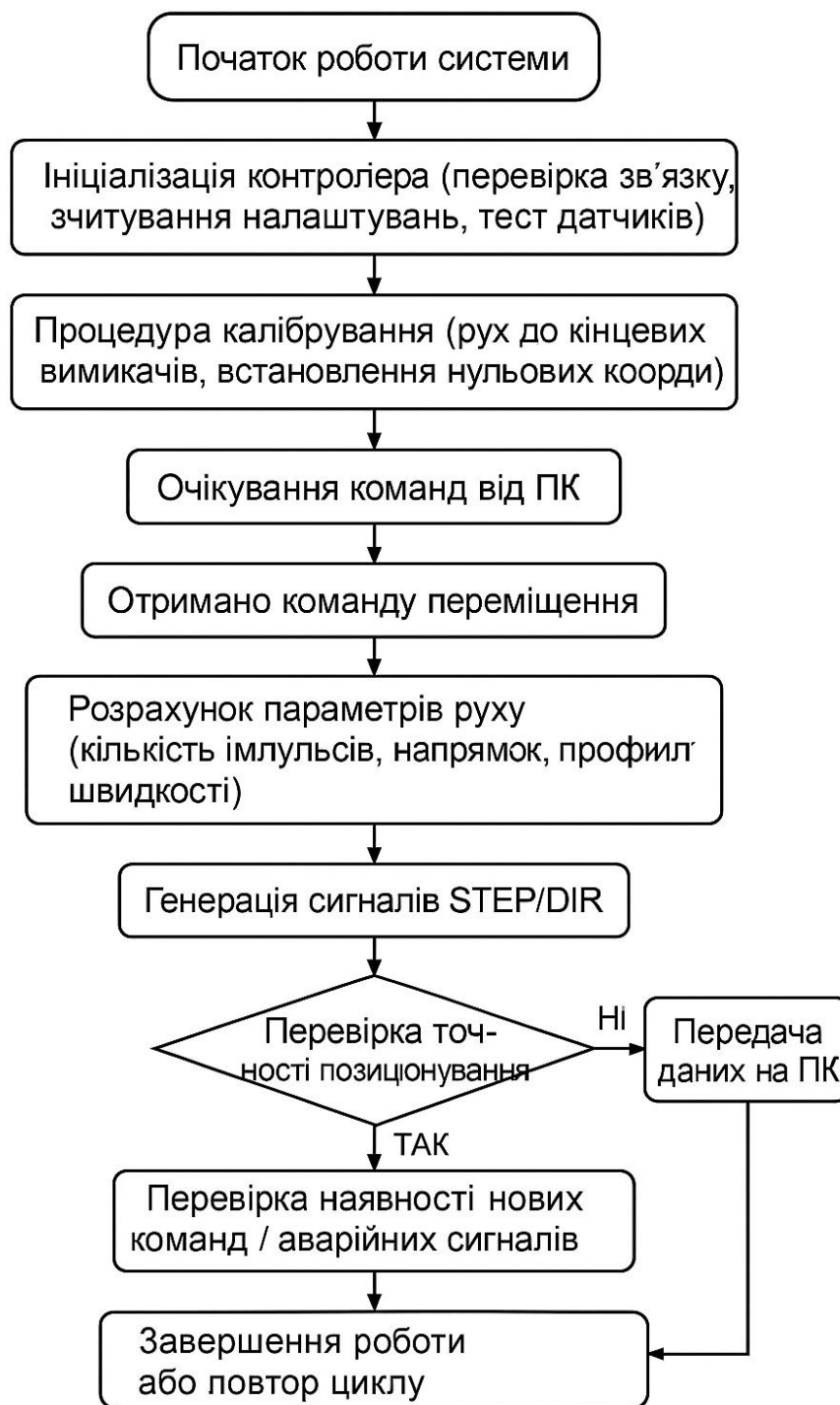


Рисунок 3.6 – Алгоритм керування АСПЗ

3.3 Вибір та обґрунтування методу вимірювання нахилу поверхні зразка

Ефективність роботи автоматизованої системи позиціювання зразка у цифровому мікроскопі значною мірою визначається точністю вимірювання нахилу поверхні та здатністю механічної платформи забезпечувати мікропереміщення зразка з високою повторюваністю. Коректне визначення нахилу поверхні є критично важливим для формування однорідної фокусної площини, зменшення абераційних спотворень та досягнення максимальної роздільної здатності оптичної системи. У даній роботі метод вимірювання нахилу ґрунтується на аналізі стека зображень, отриманих при різних положеннях фокусної площини. Для кожного пікселя визначається рівень різкості вздовж осі Z , після чого формується карта локальних фокусних максимумів, що відображає мікрорельєф поверхні зразка. Побудована карта дозволяє апроксимувати площину зразка методом найменших квадратів та обчислити кути її нахилу відносно оптичної осі мікроскопа. Таким чином, застосовується безконтактний, оптично орієнтований метод, який не потребує додаткових сенсорів нахилу й забезпечує високу точність за рахунок аналізу інформації безпосередньо з каналу зображення.

Після визначення нахилу програмне забезпечення формує коригувальні команди для п'єзоелектричних приводів, які змінюють просторове положення зразка. Після корекції система повторно захоплює стек зображень, обчислює нову карту фокусних максимумів і визначає величину залишкового нахилу. Процес триває до досягнення практично нульового кута нахилу поверхні та її перпендикулярності оптичній осі. Такий підхід формує замкнений цикл адаптивного керування, який забезпечує поступову збіжність та стабільність системи в умовах мікрометричних і субмікрометричних переміщень.

Для реалізації зазначеного методу були розглянуті два варіанти конструкції механічної платформи вирівнювання поверхні: трипунктова схема з трьома мікрометричними п'єзоелектричними приводами на рис. 3.7 (складальне креслення та специфікація у Додатку А) та двопунктова схема з двома приводами у поєднанні з шаровою опорою на рис. 3.8 (складальне креслення та специфікація у Додатку А).

Обидві конструкції виконані таким чином, щоб забезпечити можливість застосування як п'єзоелектричних приводів (наприклад, PI N-470), так і традиційних мікрометричних гвинтів із ручним або моторизованим керуванням.

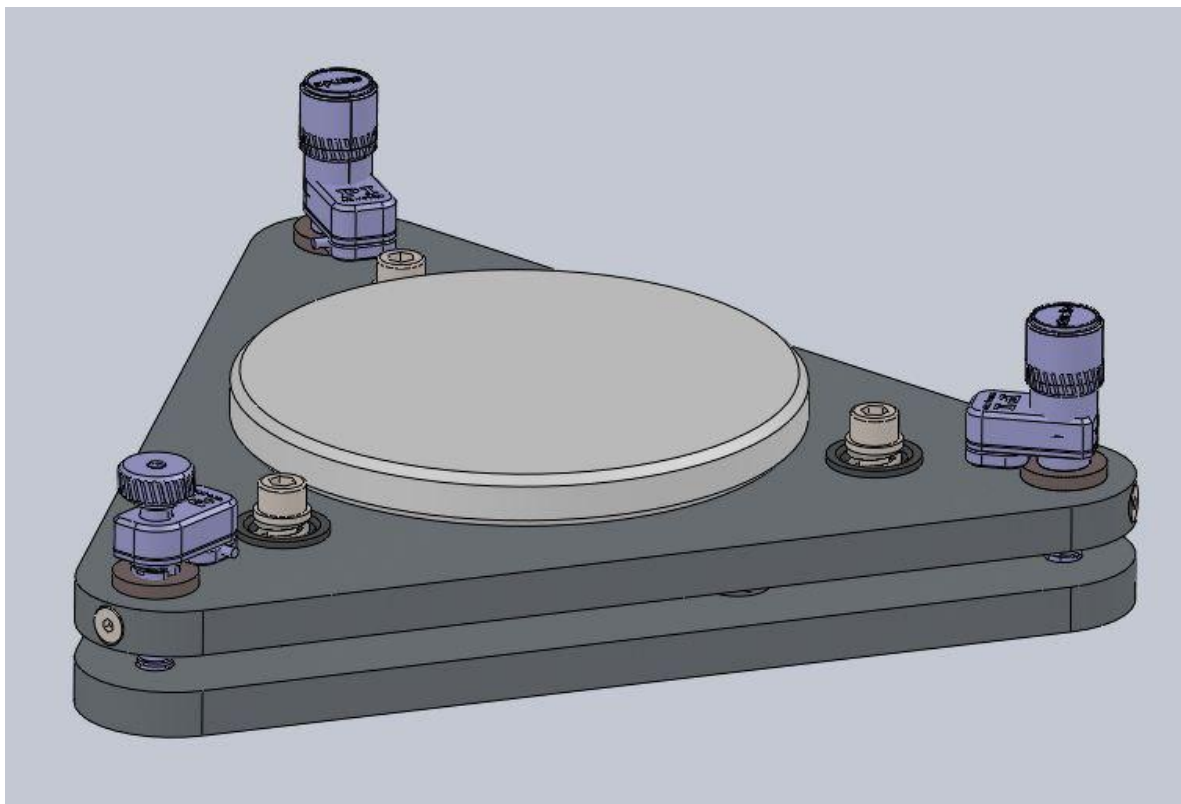


Рисунок 3.7 – АС з трьома мікрометричними п'єзо приводами

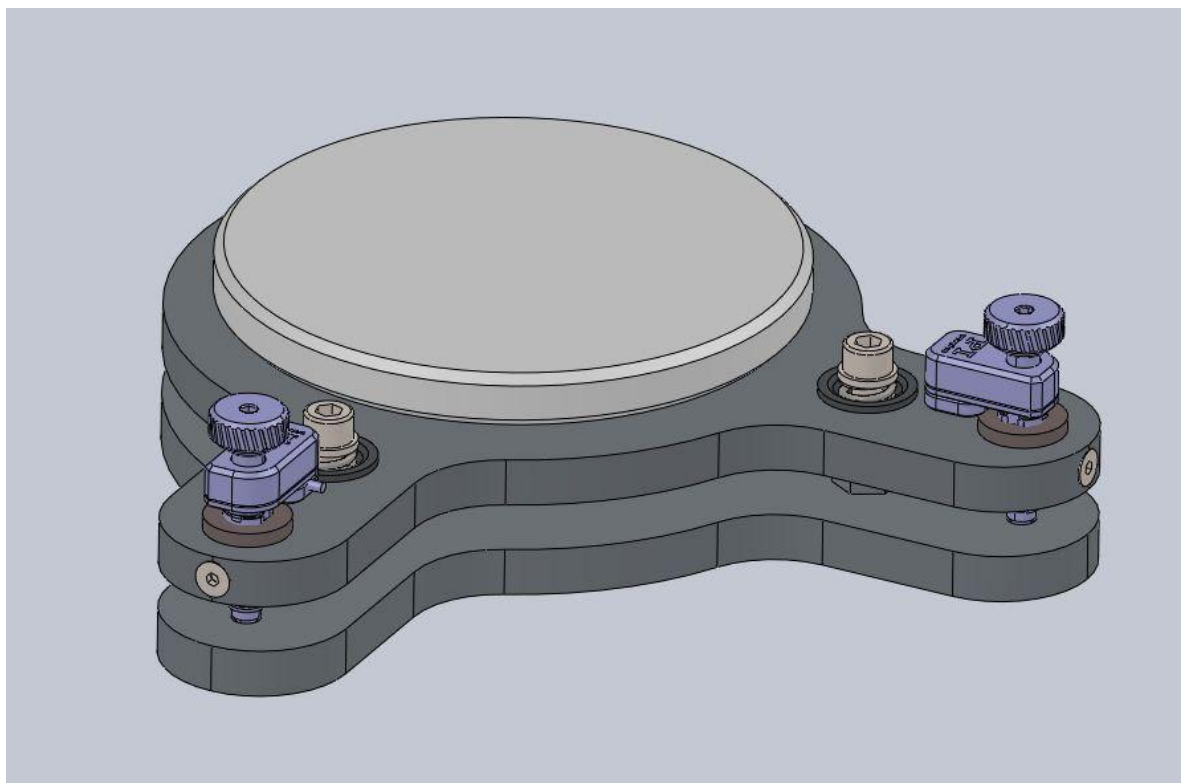


Рисунок 3.8 - АС з двома мікрометричними п'єзо приводами та шаровою опорою

Перший варіант конструкції являє собою трикутну платформу, де верхня плита спирається на три мікропідпори, розташовані на вершинах рівностороннього або близького до рівностороннього трикутника. Кожна підпора містить мікрометричний п'єзопривід, що здійснює мікропереміщення вздовж вертикальної осі. Таке компонування дозволяє однозначно визначити положення площини зразка, оскільки три точки завжди задають площину без надмірних ступенів свободи. Конструкція характеризується високою жорсткістю, рівномірним розподілом навантаження та мінімальною чутливістю до паразитних деформацій. Кінематика такої системи є передбачуваною, а взаємозв'язок переміщень приводів та кутів нахилу має лінійний характер у робочому діапазоні. Завдяки цьому досягається висока стабільність, точність позиціонування та повторюваність мікропереміщень. Розміщення трьох приводів дозволяє реалізувати незалежне керування нахилом у двох взаємно перпендикулярних площинах, а також, за необхідності, здійснювати малий компенсаційний рух уздовж осі Z . Така схема найбільш відповідає вимогам прецизійної мікроскопії, де критичною є можливість відтворюваного переміщення у діапазоні одиниць або десятків нанометрів.

Другий варіант конструкції використовує дві регульовані точки підтримки та одну фіксовану шарову опору. Шарова опора виконує роль кінематичного центру обертання платформи, тоді як два мікрометричні п'єзоприводи забезпечують керування двома ступенями свободи – нахилом у напрямках осей X та Y . Така схема є механічно простішою, дешевшою у виготовленні та обслуговуванні. Вона використовує меншу кількість приводів і може бути легко адаптована для роботи з ручними мікрометричними гвинтами без модифікації конструкції. Однак наявність шарової опори створює низку обмежень: центр обертання не є жорстко фіксованим і може зміщуватися через знос або локальні деформації, що призводить до збільшення люфту та зменшення точності встановлення. Концентрація навантаження на одній опорній точці спричиняє нерівномірність контактних сил, що підвищує вимоги до якості поверхонь і механічної обробки. Крім того, динамічна поведінка такої конструкції менш передбачувана, а нелінійність геометричних переміщень ускладнює математичну модель системи керування [37].

Порівнюючи обидві конструкції за сукупністю технічних параметрів — точністю, повторюваністю, жорсткістю, стабільністю роботи, здатністю до інтеграції з високоточними п'єзоприводами — можна зробити висновок, що трипунктова схема з трьома приводами є більш придатною для побудови високоточних мікроскопічних систем. Вона забезпечує кращий розподіл навантаження, стабільніше положення площини зразка та лінійніші характеристики переміщення. При роботі з прецизійними п'єзоелектричними актуаторами така конструкція забезпечує мінімальну похибку, дозволяє реалізувати точне керування нахилом площини та забезпечує високу повторюваність у процесі автоматичної компенсації нахилу.

У той же час двоточкова схема з шаровою опорою може бути виправданим вибором у випадках, коли вимоги до точності є нижчими, а ключовими критеріями виступають простота виготовлення та зниження вартості системи. Такий варіант є доцільним для систем навчального або демонстраційного призначення, а також для попередніх експериментальних досліджень, де не потрібна нанометрична точність та надвисока стабільність.

Отже, для побудови високоточної автоматизованої системи позиціонування зразка, що працює у взаємодії з алгоритмами визначення нахилу поверхні на основі стékів зображень, оптимальним рішенням є застосування трипунктової конструкції з трьома мікрометричними п'єзоприводами. Вона забезпечує максимальну точність компенсації, передбачуваність динаміки та найвищу сумісність із цифровими алгоритмами керування. Другий варіант конструкції, попри нижчу точність, зберігає певні переваги за рахунок своєї простоти та універсальності, що дозволяє йому бути альтернативою в системах із помірними вимогами до точності позиціонування.

3.4 Розробка апаратної частини АСПЗ

Апаратна частина автоматизованої системи позиціонування зразка (АСПЗ) є ключовим елементом, який визначає точність та стабільність функціонування всієї системи фокусування. Незважаючи на наявність двох різних кінематичних схем — трипідпірної конструкції та конструкції на основі шарової опори — апаратна частина

обох варіантів є майже ідентичною за складом та принципами роботи. Обидві реалізації використовують спільні механічні елементи, аналогічні методи передачі руху та однакові вимоги до жорсткості системи. Відмінності полягають лише у виборі типу опорної точки та конфігурації приводів, тоді як базова структура та слотування компонентів залишаються незмінними.

Обидві конструкції включають: нижню базову плиту, верхню рухому платформу для встановлення зразка, механізми регулювання положення (п'єзоприводи або мікрометричні гвинти), пружинні стискаючі вузли, елементи кінематичної опори (плоскі або кульові), фіксатори та систему кріплення. Конструкція була спеціально розроблена таким чином, щоб забезпечити повну функціональну взаємозамінність п'єзоприводів та звичайних мікрометричних гвинтів. Це дозволяє використовувати одну й ту саму механічну базу як у високоточній системі з нанопозиціонуванням, так і в бюджетнішому варіанті з ручним регулюванням.

Нижче наведено детальний опис складових частин апаратної частини АСПЗ.

1. Нижня опорна плита

Нижня плита виконує роль основи всієї системи та забезпечує необхідну жорсткість конструкції. Вона виготовляється з алюмінієвого або сталевого сплаву та містить отвори під кріплення п'єзоприводів (або мікрометричних гвинтів) і фіксує елементів. На цю плиту передаються всі зусилля від регулювальних приводів і ваги верхньої платформи із зразком, тому стабільність її геометрії є критично важливою для точності позиціонування.

2. Верхня платформа

Верхня плита є рухомих елементом конструкції, на якому встановлюється тримач зразка. Вона спроектована таким чином, щоб передавати переміщення від приводів у формі нахилу або мікропереміщень. У трипідпирній конструкції вона спирається на три опорні точки; у варіанті з шаровою опорою — на одну опорну сферу та два регулювальні вузли. Плита має високу планарність поверхні, що дозволяє уникнути локальних деформацій під час роботи.

3. Мікрометричні п'єзоприводи (або мікрометричні гвинти)

Приводи забезпечують точні механічні переміщення у вертикальному напрямку та зміну нахилу платформи. У високоточному варіанті використовуються п'єзоприводи PI N-470 з мікрометричним дозволом та мінімальною затримкою. У спрощеній версії їм відповідають стандартні мікрометричні гвинти з ходом до 20 мм.

Функції:

- створення вертикального переміщення Δh ;
- формування нахилів θ_x та θ_y ;
- можливість роботи в режимі замкненого контуру (для п'єзоприводів) [38].

Незалежно від типу приводу система дозволяє регулювати положення зразка у двох кутових ступенях свободи.

4. Пружинні вузли (пружинні болти)

Пружинні елементи формують попереднє навантаження, яке необхідне для уникнення люфту та забезпечення стабільного контакту між верхньою та нижньою плитами. Пружинні болти притискають платформу до опор, компенсують зворотні переміщення та гарантують, що верхня плита повторює рух приводів без затримок та коливань.

5. Опорні поверхні

У конструкції з трьома приводами опори є плоскими та працюють як кінематичні точки опори верхньої платформи. У другому варіанті використовується одна кульова опора, яка забезпечує рух у всіх напрямках, дозволяючи платформі обертатися навколо центру сфери. Опорні поверхні виконуються з твердих матеріалів для збереження точності під тривалими навантаженнями.

6. Шарова опора (для другого варіанту)

Кульова опора є центральним обертальним вузлом. Вона забезпечує:

- високу рухливість платформи у кутових ступенях свободи;
- зменшення кількості керованих точок із трьох до двох;
- швидше реагування конструкції на зміни положення.

Проте такий елемент потребує високої точності виготовлення й має більший ризик зносу порівняно із плоскими опорами.

7. Тримач зразка

Тримач зразка кріпиться до верхньої платформи та фіксує об'єкт дослідження. Його функція — забезпечити нерухомість зразка, передати геометричні нахили та не створювати додаткових механічних деформацій. Конструкція допускає встановлення різних типів зразків, що розширює універсальність системи.

8. Механічні напрямні та фіксатори

Додаткові елементи, такі як втулки, напрямні поверхні та обмежувачі, забезпечують правильне положення рухомих частин, захищають від бокових зміщень та підвищують довговічність системи.

3.5. Обґрунтування вибору апаратної архітектури контролера

Реалізація високоточного позиціювання на базі інерційних п'єзоелектричних приводів вимагає створення спеціалізованого електронного блоку керування, який забезпечує формування керуючих сигналів специфічної форми. На відміну від традиційних п'єзоактуаторів, що керуються рівнем постійної напруги, інерційні приводи типу *Stick-Slip* потребують динамічного керування формою хвилі (sawtooth waveform) для реалізації мікрокрокового переміщення [39].

Основні вимоги до апаратної частини контролера:

1. Діапазон вихідної напруги: Від 0 до +45...100 В (залежно від типу п'єзокераміки) для забезпечення фази повільного розширення («Stick»).
2. Висока швидкість наростання/спаду вихідної напруги (Slew Rate): Для реалізації фази ковзання («Slip») швидкість зміни напруги повинна перевищувати 10–20 В/мкс [39]. Недотримання цієї вимоги призведе до того, що сила інерції не перевищить силу тертя спокою, і рух не відбудеться.
3. Робота на ємнісне навантаження: П'єзоелектричний елемент є реактивним навантаженням ємнісного характеру ($C \approx 0.1 \dots 2.0$ мкФ). Драйвер повинен забезпечувати імпульсні струми перезарядки:

$$I = C \frac{dU}{dt} \quad (2.36)$$

3.6. Розробка принципової електричної схеми драйвера

Розроблений драйвер п'єзоприводів базується на топології високовольтного лінійного підсилювача з глибоким зворотним зв'язком. Структурно схема одного каналу керування складається з цифро-аналогового перетворювача (ЦАП) та підсилювача потужності.

3.6.1 Опис принципової схеми

Принципова електрична схема каналу керування наведена на рис. 3.9:

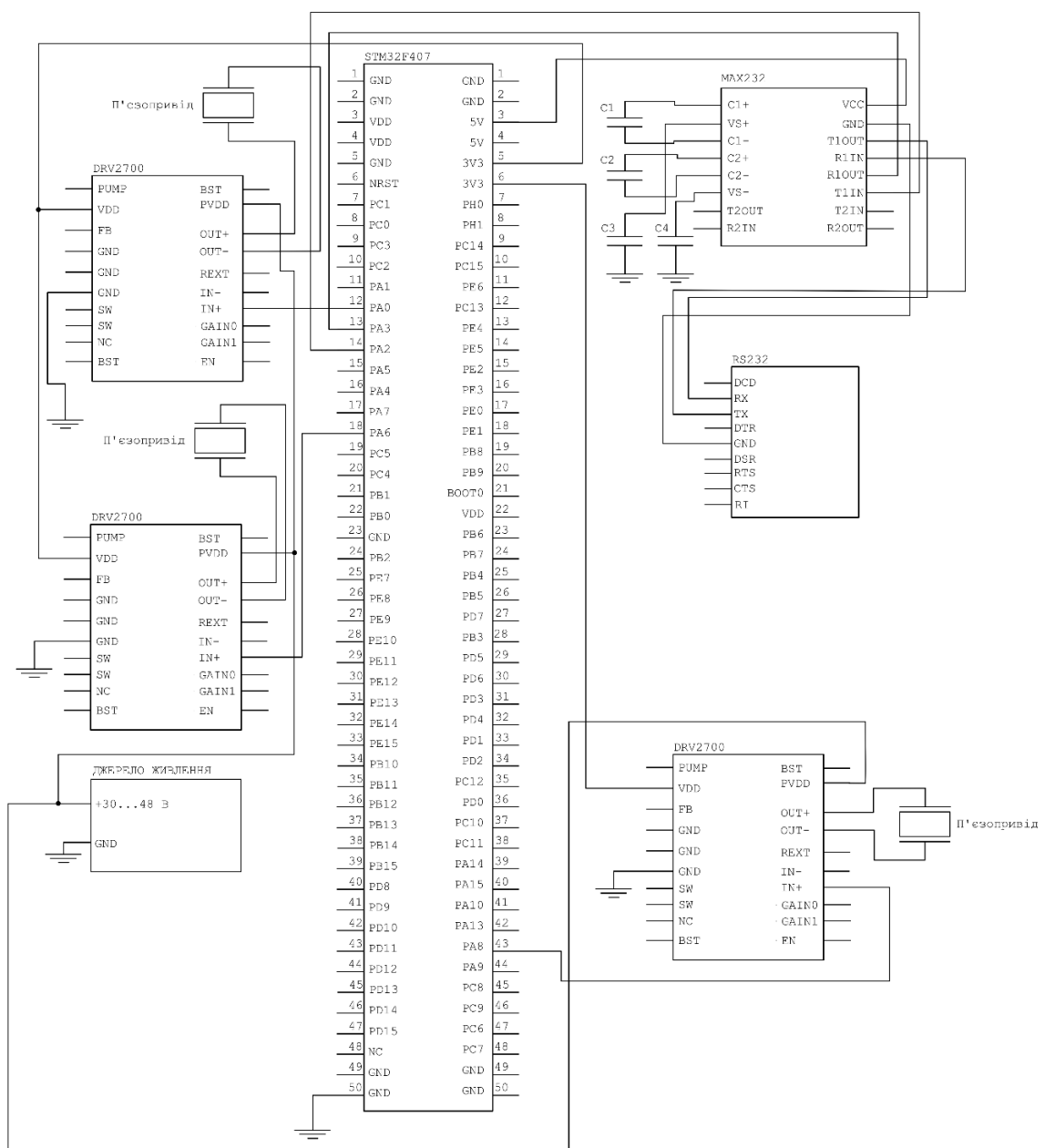


Рисунок 3.9 – Принципова електрична схема

Основним елементом схеми є високовольтний операційний підсилювач (ОП) DA1 (наприклад, серії *Apex PA* або *TI OPA454*) [40]. Вхідний сигнал керування $U_{in}(0...3.3\text{ В})$ надходить від мікроконтролера або плати збору даних.

Підсилювач включено за неінвертуючою схемою. Коефіцієнт підсилення K_U визначається співвідношенням резисторів зворотного зв'язку R_2 та R_1 :

$$K_U = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (2.37)$$

Для узгодження логічних рівнів мікроконтролера (3.3 В) з робочою напругою п'єзоелемента (45 В) обрано $K_U \approx 13.6$.

На виході підсилювача встановлено обмежувальний резистор $R_{iso}(10\text{--}47\text{ Ом})$, який забезпечує стійкість підсилювача при роботі на ємнісне навантаження (п'єзоелемент PZ1) та обмежує піковий струм у фазі швидкого розряду. Діоди VD1, VD2 захищають вихідний каскад від зворотних електрорушійних сил, що можуть виникати при механічній деформації п'єзоелемента.

3.7 Розробка програмного забезпечення автоматизованої системи позиціонування зразка (АСПЗ)

Програмне забезпечення (ПЗ) автоматизованої системи позиціонування зразка є ключовим елементом, що забезпечує взаємодію між опто-механічною частиною системи та алгоритмами аналізу зображень. ПЗ виконує функції управління п'єзоприводами, обробки стека мікроскопічних зображень, визначення нахилу поверхні зразка та формування корекційних команд для досягнення перпендикулярності поверхні зразка оптичній осі. Таким чином, програмна частина забезпечує повністю автоматизований цикл роботи АСПЗ та визначає точність, швидкодію та стабільність всієї системи.

Архітектура ПЗ складається з декількох логічних модулів: модуля захоплення зображень, модуля обробки та аналізу, модуля обчислення геометричних параметрів нахилу зразка, модуля керування приводами та модуля логування та візуалізації результатів. Модульна структура дозволяє забезпечити масштабованість, адаптацію

до різних типів датчиків та механічних конфігурацій, а також спрощує тестування та подальше модернізування ПЗ.

Першим етапом роботи ПЗ є отримання стека зображень з цифрового мікроскопа. Камера мікроскопа формує серію зображень при різних положеннях фокусувальної осі, що створює набір даних для обчислення карти різкості. Кожне зображення нормалізується за яскравістю та контрастом, після чого програмні алгоритми визначають ступінь різкості для кожного пікселя або фрагмента зображення. Для цього використовуються градієнтні, спектральні або комбіновані методи оцінки різкості, зокрема: модуль градієнта, лапласіан, вейвлет-аналіз або алгоритми на основі локальної ентропії. Обчислена матриця різкості формує тривимірне представлення поверхні зразка, де координата z відповідає позиції, на якій спостерігається максимальна різкість для кожної точки.

У наступному етапі ПЗ виконує оцінювання нахилу поверхні зразка. На основі карти різкості формується карта висот, для якої визначається апроксимуюча площина. Геометричний аналіз виконується методом найменших квадратів, що дозволяє отримати коефіцієнти площини у вигляді $z(x, y) = a \cdot x + b \cdot y + c$, де параметри a та b задають нахил поверхні вздовж осей X та Y [41]. Ці параметри порівнюються з еталонними ($a = 0, b = 0$), що відповідає ідеально перпендикулярному розташуванню зразка відносно оптичної осі. На основі різниці між поточними та ідеальними параметрами програмне забезпечення формує корекційні команди для приводів.

Модуль керування приводами реалізує механізм зворотного зв'язку. Залежно від конструкції платформи, ПЗ визначає необхідні зміни положення кожного приводу $\Delta h_1, \Delta h_2, \Delta h_3$ або лише Δh_1 та Δh_2 у конструкції з шаровою опорою [42]. Команди формуються у реальному часі з урахуванням характеристик приводів: амплітуди переміщення, максимальної швидкості, гістерезису (для п'єзоприводів) та фізичних обмежень конструкції. Для п'єзоприводів PZ N-470 ПЗ підтримує роботу через USB/RS232 інтерфейс, використовуючи стандартний API виробника. Модуль також здійснює корекцію кроку керування, щоб уникнути перенасичення та осциляцій системи під час позиціонування.

Програмне забезпечення реалізує циклічний процес вирівнювання поверхні зразка. Після виконання корекцій ПЗ повторно зчитує новий стек зображень, перевіряє різницю між поточним та бажаним нахилом та виконує наступну ітерацію. Процес триває до тих пір, поки похибка нахилу не стане меншою за встановлений поріг ϵ , після чого система переходить у режим стабілізації. Такий підхід дозволяє досягти високої точності вирівнювання зразка, оскільки користувач не бере участі у процесі налаштування, а всі операції виконуються у замкненому автоматизованому циклі.

Додатковою функціональністю ПЗ є логування роботи системи та візуалізація даних. Інтерфейс користувача відображає карту різкості, параметри нахилу, поточні положення приводів, гістограму яскравості та інші діагностичні параметри [43]. Це дозволяє оператору не лише контролювати процес автоматичного вирівнювання, а й отримувати інформацію для аналізу якості зразка, виявлення дефектів або нестабільності положення.

Таким чином, розроблене програмне забезпечення АСПЗ забезпечує повний цикл автоматичного аналізу та корекції положення зразка. Поєднання обробки зображень, математичного моделювання та високоточного керування приводами дозволяє створити інтелектуальну систему, здатну забезпечувати високий рівень точності та повторюваності у мікроскопічних дослідженнях. Модульний підхід до розробки програмної частини гарантує можливість подальшої інтеграції з іншими системами, переходу до більш складних алгоритмів та підтримки нових типів приводів та сенсорів.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

Виконано комплексну розробку апаратно-програмної частини автоматизованої системи позиціонування зразка (АСПЗ) для цифрового оптичного мікроскопа. Основну увагу приділено обґрунтованому вибору апаратних компонентів, розробці алгоритмів керування та створенню програмного забезпечення, що забезпечує замкнений цикл автоматичного вирівнювання поверхні зразка відносно оптичної осі мікроскопа.

На основі аналізу технічних вимог до точності, стабільності та сумісності з алгоритмами обробки зображень обґрунтовано вибір мікроконтролера STM32F103C8T6 як центрального елемента системи керування. Його апаратні можливості дозволяють реалізувати формування керуючих сигналів у реальному часі, організацію обміну даними з персональним комп'ютером та інтеграцію з високовольтними контролерами п'єзоелектричних приводів. Як виконавчі механізми обрано інерційні п'єзоелектричні приводи типу PI N-470 PiezoMike, що забезпечують мікро- та нанометричну роздільну здатність переміщень без люфту та з високою повторюваністю, що є критично важливим для мікроскопічних застосувань.

У розділі розглянуто та порівняно дві кінематичні схеми механічної платформи — трипунктову конструкцію з трьома п'єзоприводами та двопунктову схему з шаровою опорою. Проведений аналіз показав, що трипунктова схема є більш придатною для високоточних автоматизованих систем, оскільки забезпечує кращу жорсткість, рівномірний розподіл навантаження та лінійний зв'язок між переміщеннями приводів і кутами нахилу поверхні зразка. Двопунктова схема з шаровою опорою може бути використана у спрощених або навчальних системах, де вимоги до точності є нижчими.

Розроблені алгоритми керування забезпечують ініціалізацію системи, калібрування, формування профілів руху, обробку зворотного зв'язку та реалізацію аварійних режимів захисту. Програмна логіка побудована таким чином, щоб забезпечити плавність руху, мінімізацію коливань і високу повторюваність позиціонування. Реалізовано можливість розширення системи до повністю

замкненого контуру керування з використанням оптичного зворотного зв'язку на основі аналізу стеків зображень.

Таким чином, у третьому розділі сформовано цілісну апаратно-програмну концепцію автоматизованої системи позиціонування зразка, яка поєднує високоточну механіку, спеціалізовану електроніку та інтелектуальні алгоритми обробки зображень. Отримані результати створюють науково-технічне підґрунтя для подальшої реалізації фізичної моделі АСПЗ, її експериментальної перевірки та впровадження у цифрові оптичні мікроскопи для лабораторних, навчальних і дослідницьких застосувань.

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ «АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ПОЗИЦІЮВАННЯ ЗРАЗКІВ ДЛЯ ЦИФРОВОГО ОПТИЧНОГО МІКРОСКОПА»

П'ятий розділ присвячено комплексному економічному обґрунтуванню та аналізу комерційного потенціалу розробленої автоматизованої системи позиціювання зразків у форматі стартап-проєкту. В умовах стрімкого розвитку ринку лабораторної автоматизації, зростання вимог до точності мікропозиціювання та переходу підприємств до цифрових технологій контролю якості критично важливим етапом стає трансформація інженерного прототипу в конкурентоспроможний промисловий продукт.

У цьому розділі проведено маркетинговий аналіз конкурентного середовища, визначено стратегічні сегменти цільових клієнтів, сформовано стратегію просування та бізнес-модель інновації, а також здійснено розрахунок ключових фінансово-економічних показників, які підтверджують інвестиційну привабливість проєкту та доцільність його серійного впровадження.

4.1. Опис технології та технологічний аудит ідеї проєкту

В Розглянувши у попередніх розділах принципи побудови та особливості функціонування цифрових оптичних мікроскопів, а також вимоги до точності позиціювання зразків у процесі мікроскопічних досліджень, у цьому розділі буде проведено маркетинговий аналіз стартап-проєкту, спрямованого на створення автоматизованої системи XY-Z мікропозиціювання для цифрових мікроскопів. Такий аналіз дозволяє оцінити перспективи впровадження розробленого технічного рішення, його конкурентоспроможність та потенційне місце на ринку інноваційного лабораторного обладнання.

Ідея проєкту полягає у створенні високоточної модульної платформи для автоматичного позиціювання зразків у трьох координатах (X, Y, Z) на базі крокових двигунів, драйверів із мікрокроком та лінійних направляючих, що забезпечують

точність переміщення на рівні 1–2 мкм. Система інтегрується з цифровими мікроскопами різних виробників та дозволяє виконувати автоматичне сканування поверхні, побудову панорам високої роздільної здатності, автотрекінг об'єктів і повторювані траєкторії руху без участі оператора. Використання сучасних алгоритмів керування, компенсації люфтів і програмного калібрування забезпечує стабільність та точність позиціонування, що є критично важливими у задачах контролю якості, вимірювань, мікроструктурного аналізу та мікродосліджень.

В умовах стрімкого розвитку промислової автоматизації в Україні та підвищеного попиту на високоточне лабораторне обладнання, держава та приватний сектор активно підтримують інноваційні технічні рішення, зокрема ті, що застосовуються на підприємствах із виробництва електроніки, оптичних компонентів та механічних деталей. З огляду на дані ринку, сегмент обладнання для автоматизованої мікроскопії демонструє стабільне зростання, зумовлене потребою підприємств у підвищенні точності контролю продукції та мінімізації людських помилок у процесах інспекції. Це створює сприятливі умови для впровадження системи автоматизованого мікропозиціонування як доступної альтернативи дорожчим закордонним рішенням.

Перспективним напрямом є також співпраця з промисловими підприємствами, науковими лабораторіями та освітніми закладами, які потребують модернізації існуючих мікроскопічних комплексів або впровадження автоматизованих систем сканування. Таке партнерство сприятиме не лише тестуванню й відпрацюванню технології у реальних умовах, але й подальшому вдосконаленню конструкції та програмного забезпечення відповідно до специфічних запитів користувачів. Це значно підвищує практичну цінність проєкту та його готовність до масштабування.

У таблиці 4.1 подано зміст ідеї стартап-проєкту та можливі потенційні ринки, у межах яких доцільно визначати цільові групи майбутніх споживачів.

Таблиця 4.1.Опис ідеї стартап-проекту

<i>Зміст ідеї</i>	<i>Напрямки застосування</i>	<i>Вигоди для користувача</i>
Розробка автоматизованої XY-Z системи позиціонування зразків для цифрових мікроскопів. Інтегрований програмний комплекс для автоматичного сканування, побудови панорам, автотрекінгу та позиціонування. Низька собівартість порівняно з комерційними аналогами.	1. Лабораторний контроль якості продукції.	Висока точність позиціонування (1–2 мкм), стабільність та повторюваність результатів.
	2. Інструментальний контроль на підприємствах (електроніка, оптика, механіка).	Зменшення часу інспекцій, автоматизація рутинних операцій.
	3. Навчально-наукові лабораторії підприємств та НДІ.	Доступність, простота обслуговування, дешевші комплектуючі.

Запропонована автоматизована система позиціонування відрізняється від існуючих аналогів поєднанням високої точності (1–2 мкм) та доступної середньої вартості, чого не забезпечують бюджетні китайські рішення. На відміну від них, система має модульну конструкцію, що дозволяє гнучко адаптувати її під різні мікроскопи та завдання. Завдяки використанню лінійних направляючих високого класу, драйверів із мікрокроком і алгоритмів компенсації люфтів забезпечуються висока повторюваність і стабільність переміщення, що недосяжно для більшості замінників. Крім того, інтегроване програмне забезпечення з функціями автосканування, панорамування та автотрекінгу робить систему функціональнішою за прості платформи без ПЗ, а її обслуговування та ремонт є значно доступнішими порівняно з дорогими брендовими автоматизованими столами.

Далі проведемо аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї порівняно із пропозиціями конкурентів:

- визначимо перелік техніко-економічних властивостей та характеристик ідеї;
- визначимо реальних конкурентів або товари-аналоги, що вже існують на ринку;
- Проведемо порівняльний аналіз показників для власної ідеї та проєктів-конкурентів відповідно до визначеного переліку.

Результати аналізу наведено у таблиці 4.2 нижче.

Таблиця 4.2. Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко- економічні характерис- тики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слаб- ка сторо- на)	N (нейтр- альна сторон- а)	S (сильн- а сторо- на)
		Мій проект	Конкурен- т1	Конкуре- нт2	Конку- рент3			
1.	Точність позиціюва- ння	1–2 мкм	5–10 мкм	10–20 мкм	5–7 мкм			S
2.	Повторюва- ність	висока (до 1 мкм)	середня	низька	середня			S
3.	Модульніс- ть конструкці- ї	висока, замінні модулі XYZ	низька	низька	середня			S
4.	Надійність і ресурс	високі	низькі	низькі	середні			S
5.	Ціна	середній рівень	низька	низька	середня- висока	W		
6.	Складність обслугову- вання	низька	середня	середн- я	висока		N	
7.	Швидкість переміщен- ня	середня	середня	низька	висока		N	

Аналіз Таблиці 4.2 показує, що запропонована система має виражені сильні сторони — високу точність позиціювання, повторюваність, модульність конструкції та надійність, що помітно переважає над існуючими аналогами. Слабкою стороною є дещо вища ціна порівняно з найдешевшими рішеннями, однак вона компенсується значно кращими функціональними та експлуатаційними показниками. Нейтральними залишаються показники швидкості та складності обслуговування. Загалом система демонструє конкурентні переваги та високу перспективність для ринкового впровадження.

В рамках технологічного аудиту ідеї проекту необхідно визначити технології, за допомогою яких можна відповідно реалізувати саму ідею. У Таблиці 4.3 представлено аналіз технологічної здійсненності проекту.

Таблиця 4.3. Технологічна здійсненність ідеї проекту

<i>№ n/n</i>	<i>Ідея проекту</i>	<i>Технології її реалізації</i>	<i>Наявність технологій</i>	<i>Доступність технологій</i>
1.	Система XY-Z позиціонування	Лінійні направляючі + NEMA17 + драйвери TMC2209/TMC5160	Наявні на ринку	Доступні
2.	Високоточне мікропозиціонування	Алгоритми мікрошагу, калібрування, компенсація люфтів	Частково наявні, частково треба адаптувати	Доступні
3.	Автосканування + панорамування	Python/Matlab/C++ + OpenCV	Наявні на ринку	Доступні
4.	Програмна інтеграція з мікроскопом	API камери, SDK	Є в більшості камер	Доступні
5.	Корпус і механіка	3D-друк / CNC	Наявні на ринку	Доступні
Обрані технології реалізації ідеї проекту: крокові двигуни + TMC-драйвери + лінійні направляючі + власне програмне забезпечення.				

Проаналізувавши Таблицю 4.3, можна зробити висновок, що проект технологічно здійснений і може бути реалізований з компонуванням доступних технологій. Використання сучасних мов програмування та бібліотек, а також розробка власних алгоритмів дозволить реалізувати всі поставлені задачі ефективно та якісно.

4.2 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Для оцінки перспектив проекту необхідно визначити ринкові можливості, які можна використати під час його впровадження, та ринкові загрози, які можуть перешкоджати його реалізації. Спочатку проведемо аналіз попиту, результати якого представлені в Таблиці 4.4.

Таблиця 4.4. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

<i>№ n/n</i>	<i>Показники стану ринку (найменування)</i>	<i>Характеристика</i>
------------------	---	-----------------------

1.	Кількість головних гравців, од	10–15
2.	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	500 000 000 \$/рік
3.	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає (мікроелектроніка, біомедицина, автоматизація)
4.	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Середні (технологічні, патентні, технічні стандарти)
5.	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	ISO 10330, лабораторні вимоги, точність механіки
6.	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	20–40%

Аналіз показників стану ринку свідчить, що сегмент обладнання для автоматизованої мікроскопії є привабливим для входження. Ринок демонструє стабільне зростання, зумовлене розвитком мікроелектроніки, біомедицини та промислової автоматизації, а загальний обсяг продажів залишається значним. Хоча існують певні технологічні, патентні та стандартизаційні бар'єри, вони є середніми за рівнем складності та не створюють критичних перешкод для нових учасників. Додатковою перевагою є висока середня норма рентабельності в галузі (20–40%), що робить цей ринок економічно вигідним для запуску інноваційного стартап-проєкту.

Далі визначимо потенційні групи клієнтів та їх характеристики, що представлені в Таблиці 4.5.

Таблиця 4.5. Характеристика потенційних клієнтів стартап-проєкту

<i>№ п/п</i>	<i>Потреба, що формує ринок</i>	<i>Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)</i>	<i>Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів</i>	<i>Вимоги споживачів до товару</i>
1.	Автоматизація контролю мікродефектів	Промислові підприємства (електроніка, оптика)	Потреба у швидкості та точності	Точність, інтеграція в виробництво
2.	Сканування поверхонь для аналізу	Лабораторії контролю якості	Робота за стандартами	Надійність, повторюваність

3.	Автоматизація рутинних задач	Інструментальні лабораторії	Швидкість, програмна сумісність	Простий софт, API
----	------------------------------	-----------------------------	---------------------------------	-------------------

Як видно з Таблиці 4.5, аналіз потенційних клієнтів показує, що попит на автоматизовану систему позиціювання формується переважно промисловими підприємствами, лабораторіями контролю якості та інструментальними лабораторіями, для яких критичними є точність, повторюваність та швидкість проведення мікроскопічних досліджень. Різні цільові групи мають специфічні поведінкові особливості — від роботи за строгими стандартами до вимог програмної сумісності та простоти інтеграції у виробничі процеси. Водночас усі сегменти одночасно висувають вимоги до високої надійності обладнання, стабільності результатів та доступності програмного забезпечення. Це свідчить про високий потенціал розробленої системи у задоволенні потреб різних груп користувачів і підтверджує доцільність її ринкового впровадження.

При застосуванні даної технології існують певні загрози, що представлені в Таблиці 4.6.

Таблиця 4.6. Фактори загроз

<i>№ n/n</i>	<i>Фактор</i>	<i>Зміст загрози</i>	<i>Можлива реакція компанії</i>
1.	Дешеві китайські аналоги	Цінова конкуренція	Ставка на точність і модульність
2.	Поява нових систем	Технологічний тиск, швидке вдосконалення альтернатив	Постійне оновлення ПЗ та механіки
3.	Патентні обмеження	Ризики порушення прав ІВ при розробці вузлів або ПЗ	Проведення патентного аналізу, унікальні техрішення
4.	Залежність від імпортних комплектуючих	Коливання цін, затримки постачання, логістичні ризики	Пошук кількох постачальників, локалізація частини виробництва
5.	Зростання вимог до стандартизації	Необхідність відповідати ISO, лабораторним нормам, технічним регламентам	Документування процесів, сертифікація, тестування

Як видно з Таблиці 4.6, аналіз зовнішніх загроз показує, що ринок автоматизованих систем мікропозиціонування є конкурентним і динамічним, із наявністю як цінового, так і технологічного тиску. Найбільш суттєві ризики пов'язані з активною присутністю дешевих китайських аналогів, залежністю від імпортних комплектуючих та високими вимогами до стандартизації лабораторного обладнання. Водночас, кожна з визначених загроз може бути ефективно мінімізована завдяки чіткому позиціонуванню продукту на основі точності та модульності, постійному оновленню програмного забезпечення, патентній перевірці технічних рішень, а також диверсифікації постачальників. Це свідчить про можливість успішного ринкового впровадження продукту за умови правильно обраної стратегії розвитку та адаптації до змін ринкового середовища.

Поряд із загрозами існують і певні можливості, які представлені в Таблиці 4.7.

Таблиця 4.7. Фактори можливостей

<i>№ n/n</i>	<i>Фактор</i>	<i>Зміст можливості</i>	<i>Можлива реакція компанії</i>
1.	Зростання ринку автоматизації	Розширення сегментів збуту	Масштабування виробництва
2.	Попит на доступні системи	Формування сильної ринкової позиції «доступна точна система»	Оптимізація собівартості, покращення цінової пропозиції
3.	Інтерес підприємств до модернізації лабораторного обладнання	Можливість інтеграції в існуючі мікроскопічні комплекси	Розробка універсальних адаптерів та API
4.	Підтримка інноваційних проєктів державними та приватними фондами	Доступ до грантових коштів, фінансування та технічної підтримки	Подання заявок на гранти, участь у стартап-програмах
5.	Розвиток суміжних технологій (мікроелектроніка, мехатроніка, оптика)	Покращення компонентної бази, зниження вартості деталей	Впровадження нових комплектуючих, оновлення конструкції

Таким чином, аналіз факторів можливостей показує, що ринок автоматизованих систем мікропозиціонування має значний потенціал для розвитку, особливо в умовах зростаючої автоматизації виробництв та модернізації лабораторної інфраструктури. Суттєвою перевагою є підвищений попит на доступні, але високоточні рішення, що створює сприятливі умови для формування стабільної конкурентної позиції продукту. Додаткові можливості відкриваються завдяки активній підтримці інноваційних стартапів, розвитку компонентної бази та інтересу підприємств до кастомізованих технічних рішень. Реалізація цих можливостей шляхом оптимізації собівартості, розробки модульних конфігурацій, інтеграції універсального API та участі у грантових програмах дозволить значно прискорити впровадження проєкту та зміцнити його позиції на ринку.

Переходимо до подальшого аналізу ринку. Після аналізу загроз та можливостей, необхідно провести ступеневий аналіз конкуренції на ринку, щоб зрозуміти за яких умов буде існувати проєкт. Це наведено на Таблиці 4.8

Таблиця 4.8. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

<i>Особливості конкурентного середовища</i>	<i>В чому проявляється дана характеристика</i>	<i>Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)</i>
1. Тип конкуренції: монополістична	На ринку присутні як дешеві китайські автоматизовані столи, так і дорогі високоточні брендові системи, що створює широкий спектр пропозицій.	Розробка унікальних технічних рішень, акцент на точності 1–2 мкм, модульності та доступній ціні.
2. Рівень конкурентної боротьби: міжнародний	Основні конкуренти — іноземні виробники (Китай, США, ЄС). Продукція доступна в Україні через прямий імпорт і маркетплейси.	Адаптація продукту під потреби місцевих клієнтів, забезпечення сервісної підтримки, сертифікація.
3. Галузева ознака: внутрішньогалузева	Конкуренція між компаніями, що працюють у сфері лабораторної автоматизації, оптичних систем та електроніки.	Постійне підвищення якості, оновлення конструкції, удосконалення програмного забезпечення.

4. Конкуренція за видами товарів: товарно-видова	На ринку представлено різні рішення, що виконують схожі функції: XY-столи, Z-підйомники, автоматизовані мікроскопічні платформи.	Диференціація через модульну конструкцію, точність позиціонування, інтелектуальні функції ПЗ.
5. Характер конкурентних переваг: нецінова	Покупці орієнтуються на точність, стабільність, повторюваність, надійність та зручність інтеграції.	Інвестиції в R&D, впровадження алгоритмів компенсації люфту, покращення інтерфейсу ПЗ.
6. Інтенсивність: марочна	Ринок характеризується наявністю сильних брендів (Thorlabs, ASI, Prior) та високим рівнем довіри до них.	Формування власного бренду, акцент на сервісі, гарантіях, адаптивності та довгостроковій підтримці.

Отже, проведений в Таблиці 4.8. Ступеневий аналіз конкурентного середовища показує, що ринок автоматизованих систем мікропозиціонування є динамічним, розвиненим та характеризується високим рівнем міжнародної конкуренції. Основними гравцями виступають відомі іноземні бренди, які формують марочний тип конкурентної боротьби та встановлюють високі стандарти якості. У таких умовах підприємство може бути конкурентоспроможним завдяки чіткій диференціації продукту — поєднанню високої точності, модульності та доступності. Сильний акцент на сервісній підтримці, адаптації під локальні потреби та постійному вдосконаленні програмного забезпечення дозволить ефективно позиціонувати продукт на ринку та успішно конкурувати з міжнародними компаніями.

Для детальнішого аналізу конкурентного середовища в галузі застосовано модель п'яти сил М. Портера, яка є класичним інструментом стратегічного управління. Цей підхід дозволяє систематизувати та оцінити вплив основних ринкових факторів на інтенсивність конкуренції та привабливість галузі для нового учасника. На Рисунку 4.1 зображено п'ять основних сил, які визначають конкурентну динаміку в галузі.



Рисунок 4.1 – Складові моделі 5 сил М. Портера

Цей підхід йде далі за традиційний SWOT-аналіз, спрощуючи прийняття рішень щодо привабливості галузі, враховуючи зовнішні чинники на основі мікроекономічної теорії. Модель Портера враховує п'ять основних сил, які визначають конкурентну динаміку в галузі:

1. загроза нових учасників ринку: аналізує бар'єри для входження нових гравців на ринок;
2. сила покупців: оцінює здатність клієнтів диктувати певні умови;
3. загроза товарів-замінників: визначає ризик заміщення основного продукту його аналогами;
4. сила постачальників: оцінює їхній вплив на компанії галузі.
5. конкуренція серед існуючих учасників: центральна сила, що об'єднує і узагальнює вплив раніше перелічених чотирьох.

Таблиця 4.9. Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

	<i>Прямі конкуренти в галузі</i>	<i>Потенційні конкуренти</i>	<i>Постачальники</i>	<i>Клієнти</i>	<i>Товари-замінники</i>
<i>Складові аналізу</i>	Китайські автоматизовані ХУ-столи, недорогі платформи з AliExpress	Низьковартісні виробники, які можуть швидко копіювати конструкцію	Мають середню силу через залежність від імпортерів, направляючих, двигунів і драйверів	Вимагають високу точність (1–2 мкм), повторюваність і просту інтеграцію	Ручні ХУ-столи, бюджетні мікроскопи з простими механізмами
Висновки:	Висока інтенсивність конкурентної боротьби з боку low-cost аналогів	Можливість появи нових гравців через доступність технологій; швидке копіювання рішень	Постачальники можуть диктувати строки та умови поставок через зовнішню залежність	Клієнти можуть впливати на конфігурацію, ціну та функціональність продукту	Замінники обмежують сегмент простих застосувань, але не є прямою альтернативою для високоточної системи

Аналіз конкурентних сил за моделлю М. Портера демонструє, що ринок автоматизованих ХУ-Z систем позиціонування є висококонкурентним і динамічним. Найбільший тиск на стартап здійснюють *прямі конкуренти* — низьковартісні китайські платформи, які формують агресивну цінову конкуренцію. *Потенційні конкуренти* також становлять суттєву загрозу, оскільки технологічна доступність дає змогу новим виробникам швидко входити на ринок і копіювати конструктивні рішення. *Постачальники* мають помірну силу впливу через залежність від імпортерів комплектуючих, що може впливати на собівартість та строки виробництва. Водночас *клієнти* здатні диктувати вимоги до точності, стабільності, функціональності ПЗ та сервісу, що обумовлює необхідність постійного підвищення якості продукту. *Товари-замінники* створюють загрозу лише в сегменті базових задач, але не можуть конкурувати у високоточних застосуваннях. Загалом результати показують, що для успішного позиціонування на ринку необхідні чітка диференціація, інноваційні функції та формування унікальної ціннісної пропозиції.

Після всіх аналізів визначається та обґрунтовується перелік факторів конкурентоспроможності. Це допоможе зрозуміти, на чому варто зосередитися для успішного виходу на ринок. Результати наведено у Таблиці 5.10.

Таблиця 4.10. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/ п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1.	Висока точність	Критично для контролю
2.	Модульність	Адаптація під різні задачі
3.	Програмна автоматизація	Менше людських помилок
4.	Доступна ціна	Вигідно підприємствам
5.	Повторюваність	Вимога QA-лабораторій

Далі проведемо порівняльний аналіз сильних та слабких сторін нашого проекту у порівнянні з конкурентами.

Таблиця 4.11. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін

№ п/ п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з FOCUS Компану						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1.	Точність	19						+	
2.	Модульність	18							+
3.	Ціна	14			+				
4.	Програмна автоматизація	17					+		
5.	Надійність	16						+	

Наступним кроком є проведення SWOT-аналізу, який дозволить систематизувати внутрішні сильні та слабкі сторони, а також зовнішні можливості та загрози.

Таблиця 4.12. SWOT- аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: Висока точність (1–2 мкм) Модульна конструкція Програмна автоматизація	Слабкі сторони: Ціна вища за найдешевші аналоги Потреба у калібруванні Залежність від імпортних комплектуючих
Можливості: Ріст попиту на автоматизацію Потреба у точних і недорогих системах Можливість масштабування	Загрози: Дешеві аналоги AliExpress Патентні ризики Жорсткі стандарти якості

На основі SWOT-аналізу можна розробити альтернативи ринкової поведінки та визначити оптимальну стратегію впровадження проєкту. Таким чином, проєкт має сильні внутрішні сторони, які можуть бути використані для пом'якшення або усунення зовнішніх загроз. Існують також значні можливості для зростання та розвитку, які можна використати для повної або часткової компенсації слабких сторін. Після аналізу розробимо альтернативи ринкового впровадження стартапроєкту, представлені в Таблиці 4.13.

Таблиця 4.13. Альтернативи ринкового впровадження стартап-проєкту

<i>№ n/n</i>	<i>Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки</i>	<i>Ймовірність отримання ресурсів</i>	<i>Строки реалізації</i>
1	Вихід на ринок через В2В (прямі продажі підприємствам)	Висока	3–6 місяців
2	Інтеграція в існуючі мікроскопи (ОЕМ-співпраця)	Середня	6–12 місяців
3	Власна лінійка модулів (розширення продуктового портфеля)	Висока	12–18 місяців

Розгляд альтернатив показує, що найбільш швидким і ресурсно доступним шляхом ринкового впровадження є вихід на ринок через В2В-сегмент, який забезпечує оперативні перші продажі та мінімальні вимоги до адаптації продукту. Інтеграція в існуючі мікроскопи та розширення власної лінійки модулів є перспективними довгостроковими стратегіями, що дозволяють масштабувати бізнес та зміцнити позиції стартапу, проте потребують більше часу та додаткових інвестицій.

4.3. Розроблення ринкової стратегії проєкту

Першим кроком у створенні ринкової стратегії є визначення підходу до охоплення ринку, що включає опис цільових груп потенційних клієнтів. Аналіз наведено у Таблиці 5.14 нижче.

Таблиця 4.14. Вибір цільових груп потенційних споживачів

<i>№ n/n</i>	<i>Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів</i>	<i>Готовність споживачі в сприйняти продукт</i>	<i>Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)</i>	<i>Інтенсивність конкуренції в сегменті</i>	<i>Простота входу у сегмент</i>
1.	Промислові підприємства (електроніка, оптика, механообробка)	Висока	Високий	Середня	Складна (потрібні інтеграція, технічні вимоги)
2.	Лабораторії контролю якості та технічної інспекції	Середня–висока	Середній	Низька–середня	Середня
3.	Науково-дослідні установи, освітні лабораторії	Висока	Низький–середній	Низька	Проста

Які цільові групи обрано: Після аналізу характеристик цільових груп було прийнято рішення зосередитися на промислових підприємствах та лабораторіях контролю якості, оскільки саме ці сегменти мають найвищу потребу у високоточній автоматизації мікроскопічних процесів, демонструють стабільний попит і готовність до впровадження сучасних технічних рішень.

Таким чином, обрані цільові групи з високою готовністю сприйняти продукт та значним обсягом попиту дозволять максимально ефективно використати ресурси компанії та забезпечити швидке зростання.

Щоб успішно працювати в обраному сегменті ринку, важливо визначити основну стратегію розвитку. У Таблиці 4.15 представлено ключові елементи цієї стратегії.

Таблиця 4.15. Визначення базової стратегії розвитку

<i>№ n/n</i>	<i>Обрана альтернатива розвитку проекту</i>	<i>Стратегія охоплення ринку</i>	<i>Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи</i>	<i>Базова стратегія розвитку*</i>
1.	Розширення присутності на промисловому та лабораторному сегментах	Концентрований маркетинг (фокус на 1–2 пріоритетних сегментах)	Висока точність (1–2 мкм), доступність у порівнянні з дорогими брендами, модульність XY-Z, програмна автоматизація	Стратегія диференціації

Отже, базовою стратегією розвитку є стратегія фокусування, яка передбачає зосередження зусиль на обслуговуванні конкретних сегментів ринку, де проєкт має найбільші шанси на успіх. Це дозволить максимально використати конкурентні переваги та забезпечити ефективний вихід на ринок. Наступний етап – це визначення стратегії конкурентної поведінки, яка представлена в Таблиці 4.16.

Таблиця 4.16. Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

<i>№ n/n</i>	<i>Чи є проєкт «першопрохідцем» на ринку?</i>	<i>Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?</i>	<i>Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?</i>	<i>Стратегія конкурентної поведінки*</i>
1.	Проект не є першопрохідцем	Клієнтів беремо у конкурентів	Копіюємо тільки базові характеристики, але додаємо точність і модульність	Стратегія виклику лідера (флангова атака)

Аналіз базової стратегії конкурентної поведінки показує, що проєкт не є «піонером» на ринку, тому його розвиток передбачає боротьбу за вже сформований сегмент споживачів, які наразі користуються конкурентними рішеннями. Обрана стратегія флангової атаки дає змогу не копіювати повністю конкурентні продукти, а вдосконалити їх шляхом додавання ключових переваг — високої точності, модульності та розширених функцій програмної автоматизації. Такий підхід дозволяє сфокусовано конкурувати з існуючими гравцями, пропонуючи клієнтам технологічно сильнішу та водночас доступнішу альтернативу.

На основі вимог споживачів з обраного сегменту до постачальника і продукту, а також в залежності від стратегії розвитку та конкурентної поведінки, було розроблено стратегію позиціонування, представлену в Таблиці 4.17.

Таблиця 4.17. Визначення стратегії позиціонування

<i>№ n/n</i>	<i>Вимоги до товару цільової аудиторії</i>	<i>Базова стратегія розвитку</i>	<i>Ключові конкурентоспромо жні позиції власного стартап- проекту</i>	<i>Вибір асоціацій, які мають сформувавши комплексну позицію власного проекту (три ключових)</i>
1.	Точність 1–2 мкм, інтеграція у промислові процеси, стабільність результатів	Модульна та адаптивна система (стратегія диференціації)	Доступна ціна для промисловості, модульність XY-Z, інтелектуальні функції ПЗ (сканування, автотрекінг, API)	Точність, Доступність, Інноваційність

Таким чином, обрана стратегія позиціонування передбачає формування у свідомості клієнтів асоціацій із точністю, доступністю та інноваційністю продукту. Це дозволить виділити систему позиціонування серед конкурентів, підкреслить її технологічні переваги та сприятиме підвищенню довіри з боку промислових та лабораторних споживачів.

4.4. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Першим етапом створення маркетингової програми є розробка концепції продукту, який буде запропоновано споживачам. В Таблиці 4.18 представлено узагальнені результати аналізу конкурентоспроможності товару.

Таблиця 4.18. Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

<i>№ n/n</i>	<i>Потреба</i>	<i>Вигода, яку пропонує товар</i>	<i>Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)</i>
1.	Автоматизація контролю	Точність і швидкість	Висока точність позиціонування 1–2 мкм, стабільність руху та відсутність люфтів
2.	Позиціонування поверхонь	Повторюваність	Модульна конструкція XY-Z, можливість адаптації під різні задачі та конфігурації
3.	Панорамування	Зменшення часу	Розширений програмний функціонал: інтелектуальне ПЗ, автоматизоване сканування, панорамування, API для інтеграції

Отже, продукт задовольняє ключові потреби споживачів, пропонуючи унікальні переваги перед конкурентами, що підвищує його привабливість на ринку. Щоб глибше розкрити сутність продукту та його сприйняття клієнтами, застосовуємо концепцію трьох рівнів товару за моделлю Т. Левіта: товар за задумом, товар у реальному виконанні та товар із підкріпленням (augmented product). Це дозволяє врахувати як функціональні, так і емоційні аспекти сприйняття продукту споживачами. Ці рівні детально наведено в Таблиці 4.19 нижче.

Таблиця 4.19. Опис трьох рівнів моделі товару

<i>Рівні товару</i>	<i>Сутність та складові</i>		
I. Товар за задумом	Забезпечення високоточної автоматизації позиціювання зразків у цифрових оптичних мікроскопах; основна вигода — точність 1–2 мкм, швидкість, повторюваність, автоматизація сканування та панорамування.		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	Властивості/характеристики:		
	1. Точність позиціювання 1–2 мкм	Нм	Тх
	2. Модульна конструкція XY-Z	М	Тл
	3. Інтелектуальне ПЗ (сканування, панорамування, автотрекінг, API)	Нм	Ор
	4. Висока повторюваність руху	Нм	Тх
	5. Швидкість переміщення	Нм	Тх
	6. Інтеграція з промисловими лініями та лабораторним обладнанням	Нм	Ор
	Якість: відповідає стандартам лабораторної та промислової техніки; параметри тестування — точність, повторюваність, стабільність.		
	Пакування: електронна дистрибуція ПЗ + комплект технічної документації; модулі поставляються в індивідуальній захисній тарі.		
	Марка: новий український бренд		
III. Товар із підкріпленням	До продажу: консультації, демонстрація можливостей, тестова версія ПЗ.		
	Після продажу: технічна підтримка, навчання персоналу, оновлення ПЗ, розширення модульної лінійки, сервісне обслуговування.		
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: Унікальний програмний функціонал, власні алгоритми компенсації люфтів, модульна конструкція, оптимізовані траєкторії руху, документація та технічні стандарти, реєстрація ТМ, можливий патент на окремі вузли або ПЗ.			

Після формування маркетингової моделі товару слід особливо відмітити – чим саме проект буде захищено від копіювання. Захист може бути організовано за рахунок

захисту ідеї товару (захист інтелектуальної власності), або ноу-хау, чи комплексне поєднання властивостей і характеристик, закладене на другому та третьому рівнях товару.

Цінова політика є одним з найважливіших елементів маркетингової програми, оскільки вона безпосередньо впливає на прибутковість проекту та сприйняття продукту споживачами. При встановленні ціни необхідно враховувати рівень цін на товари-аналоги, платоспроможність цільової аудиторії та позиціонування продукту на ринку. Таблиця 4.20 містить аналіз меж встановлення ціни.

Таблиця 4.20. Визначення меж встановлення ціни

<i>№ п/п</i>	<i>Рівень цін на товари- замінники</i>	<i>Рівень цін на товари- аналоги</i>	<i>Рівень доходів цільової групи споживачів</i>	<i>Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу</i>
	200–400\$	1000–6000\$	середній сегмент підприємств	700–1500\$

Аналіз трьох рівнів моделі товару показує, що розроблена автоматизована система позиціонування зразків формує комплексну цінність для споживача завдяки поєднанню основної функціональної вигоди — високої точності та автоматизації — з низкою додаткових характеристик, які посилюють її конкурентоспроможність. В загальному, це дозволяє забезпечити конкурентоспроможність та досягти фінансових цілей проекту.

Ефективна система збуту є необхідною для забезпечення доступності продукту для цільових клієнтів та максимального охоплення ринку. Таблиця 4.21 детальніше описує формування системи збуту.

Таблиця 4.21. Формування системи збуту

<i>№ п/п</i>	<i>Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів</i>	<i>Функції збуту, які має виконувати постачальник товару</i>	<i>Глибина каналу збуту</i>	<i>Оптимальн а система збуту</i>
1.	професійна, через тендери	доставка, інтеграція, підтримка	1-рівневий (через торгових представників)	B2B продажі

Отже, обраний шлях показує, що для даного стартап-проекту найбільш ефективною є орієнтація на професійних клієнтів, які здійснюють закупівлі через тендерні процедури або прямі договірні поставки. У таких умовах постачальник має

виконувати не лише функцію доставки, а й забезпечувати інтеграцію системи у робочі процеси та надавати повноцінну технічну підтримку. Оптимальною моделлю збуту є однорівневий канал із безпосередньою взаємодією через торгових представників, що дозволяє контролювати якість сервісу та адаптацію продукту до потреб клієнтів. Такий підхід підсилює цінність пропозиції та сприяє стабільному формуванню довгострокових партнерств у сегменті B2B.

Маркетингові комунікації відіграють ключову роль у формуванні обізнаності про продукт, створенні позитивного іміджу та стимулюванні попиту. Важливо розробити комплексний підхід, який враховує специфіку поведінки цільових клієнтів та використовує ефективні канали комунікацій. Правильна комунікаційна стратегія дозволить донести до клієнтів цінність продукту та переконає їх у його перевагах. Вона структурована та наведена у Таблиці 4.22.

Таблиця 4.22. Концепція маркетингових комунікацій

<i>№ n/n</i>	<i>Специфіка поведінки цільових клієнтів</i>	<i>Канали комунікацій, якими користують ся цільові клієнти</i>	<i>Ключові позиції, обрані для позиціонування</i>	<i>Завдання рекламного повідомлення</i>	<i>Концепція рекламного звернення</i>
1.	Пошук високоточного обладнання, участь у профільних заходах, орієнтація на рекомендації та кейси	Спеціалізовані виставки і форуми, професійні видання, технічні портали, LinkedIn, YouTube-огляди	Точність, Інноваційність, Модульність	Поінформувати про унікальні можливості системи, підкреслити точність 1–2 мкм, переваги ПЗ та модульності	Презентація продукту, демонстрації роботи, відеоогляди, успішні кейси інтеграції та відгуки клієнтів

Таким чином, запропонована концепція маркетингових комунікацій спрямована на використання каналів, які максимально відповідають поведінковим моделям цільової аудиторії та її професійним інформаційним потребам. Акцент на технічних демонстраціях, оглядах і практичних кейсах дозволяє ефективно донести унікальні переваги продукту — точність, інноваційність та модульність. Такий підхід

забезпечує формування позитивного сприйняття системи, зміцнює довіру до бренду та сприяє підвищенню результативності ринкових комунікацій.

4.5. Бізнес-модель та реалізація стартап-проєкту

На завершальному етапі розробки стартап-проєкту важливо сформулювати чітку та життєздатну бізнес-модель, яка забезпечить отримання стабільних доходів та довгострокову прибутковість. Бізнес-модель має відображати, як продукт або послуга приносить цінність користувачам, яким чином відбуватиметься монетизація, а також враховувати структуру витрат і управління ресурсами.

Для стартап-проєкту «Автоматизована система позиціонування зразків для цифрового оптичного мікроскопа» ефективна бізнес-модель має спиратися на особливості продукту: поєднання високої точності позиціонування, модульної конструкції XY-Z, а також інтелектуального програмного забезпечення для автоматизації процесів сканування, панорамування та аналізу. Важливою перевагою є можливість гнучкої інтеграції системи з існуючим лабораторним та промисловим обладнанням, що забезпечує адаптацію під потреби конкретних замовників. Це дозволить вийти на сегменти ринку, де критично важливі автоматизація складних лабораторних і промислових процесів.

Нижче у Таблиці 4.23 наведено структуровану бізнес-модель «Автоматизована система позиціонування зразків для цифрового оптичного мікроскопа»

Таблиця 4.23 – Бізнес-модель

Ключові партнери	Ключові види діяльності	Ціннісна пропозиція	Відносини з клієнтами	Сегменти користувачів
Постачальники лінійних направляючих, двигунів, драйверів. Виробники мікроскопів (потенційні OEM-партнери). Інтегратори лабораторного та	Розробка програмного забезпечення (сканування, автотрекінг, панорама). Проектування та збірка XY-Z модулів. Тестування точності та повторюваності. Інтеграція з	Точність позиціонування 1–2 мкм. Модульність і можливість адаптації під задачі клієнта. Інтелектуальне ПЗ з API. Автоматизація контролю, сканування та панорамування	Підтримка 24/7 (онлайн-консультації). Персональна інтеграція системи під процеси клієнта. Навчання персоналу. Регулярні оновлення ПЗ.	Промислові підприємства (електроніка, оптика, механообробка) . Лабораторії контролю якості. Науково-дослідні інститути. Освітні лабораторії.

промислового обладнання. Наукові установи для тестування. Логістичні компанії.	обладнанням клієнтів. Маркетинг і технічна підтримка. Ключові ресурси Команда розробників (механіка, ПЗ, електроніка). Технологічна база для виготовлення модулів. Сервери для обробки даних і хмарних сервісів. Тестові лабораторії та полігони. Інтелектуальна власність (алгоритми ПЗ, конструкції модулів).	Доступна ціна порівняно з брендовими аналогами. Прискорення лабораторних і виробничих процесів.	Супровід під час проєктів. Канали збуту Прямі B2B-продажі. Власний сайт. Участь у виставках, технічних конференціях. Партнерські канали через інтеграторів обладнання.	Постачальники лабораторного обладнання.
Структура витрат Витрати на R&D (ПЗ, механіка); Закупівля комплектуючих; Виробництво модулів; Маркетинг і участь у виставках; Підтримка та навчання; Оренда серверів.		Джерела доходів Продаж комплектів XY-Z модулів; Продаж ліцензій на ПЗ; Абонентська плата за оновлення та техпідтримку; Інтеграційні проєкти під клієнта; Продаж додаткових модулів і розширень.		

Отже, запропонована бізнес-модель спрямована на створення адаптивного, високоточного та доступного рішення, яке дозволить замовникам автоматизувати ключові процеси мікроскопічного аналізу та значно підвищити ефективність позиціонування зразків. Орієнтація на промисловий та лабораторний сегменти, що мають високі вимоги до точності й стабільності, забезпечить швидке формування

клієнтської бази та стійкий попит. Чітко структурований підхід до розробки, інтеграції й технічної підтримки посилює конкурентні позиції стартапу та створює потенціал для масштабування на суміжні ринки, включаючи OEM-співпрацю з виробниками мікроскопів.

Для реалізації наданої бізнес-моделі в життя необхідно структурувати часові межі та послідовність основних етапів реалізації. Створення календарного плану (див. Таблицю 4.24) допоможе контролювати виконання завдань, вчасно реагувати на можливі проблеми, оптимізувати ресурси та фінанси.

Таблиця 4.24 – Календарний план реалізації проекту

Етап	Тривалість	Опис робіт
Проектування та оптимізація конструкції XY-Z системи	2 місяці	Розробка механічної структури модулів XY-Z, вибір двигунів та направляючих, оптимізація точності та жорсткості конструкції. Підготовка 3D-моделей та розрахунок кінематичних параметрів.
Створення базової версії програмного забезпечення	1 місяць	Інтеграція алгоритмів сканування, панорамування та автотрекінгу. Створення UI/UX-інтерфейсу для користувача. Реалізація початкової версії API для інтеграції з мікроскопами та лабораторним обладнанням.
Тестування, калібрування та відлагодження модулів	3 місяці	Випробування системи на тестових зразках, калібрування точності 1–2 мкм, стабільності та повторюваності руху. Виявлення та усунення помилок, валідоване тестування спільно з технічними фахівцями.
Маркетинг, демонстрації та пілотні впровадження	2 місяці	Підготовка демонстраційних матеріалів, участь у виставках та технічних конференціях, проведення презентацій для промислових і лабораторних клієнтів. Запуск пілотних проектів на базі партнерських установ.
Комерційний запуск та вихід на ринок	1 місяць	Перші комерційні поставки, оформлення партнерських угод, ліцензій та договорів. Організація технічної підтримки, запуск оновлень ПЗ та сервісного супроводу.

Таким чином, запропонований у Таблиці 4.24 календарний план забезпечує послідовний та ефективний розвиток проекту — від створення базових механічних та програмних компонентів до їх повноцінного тестування й адаптації під реальні умови експлуатації. Паралельне проведення маркетингових активностей і пілотних

впровадженнь дозволить отримати ранній зворотний зв'язок від користувачів та сформувати першу клієнтську базу. Завдяки такому підходу забезпечується оперативний вихід продукту на ринок та формування позитивної репутації системи в цільових сегментах.

Успіх реалізації стартап-проекту напряму корелює з ефективністю обраної команди професіоналів, здатних забезпечити належну якість розробки, адаптації або просування продукту на ринку. Також дуже важливий попередній досвід людини. У Таблиці 4.25 подано команду проекту.

Таблиця 4.25 – Команда проекту

Роль	Вміння і вклад у розробку
Керівник проекту	Координація робіт, планування етапів розробки XY-Z системи, управління ресурсами, прийняття технічних і стратегічних рішень, налагодження співпраці з партнерами та клієнтами.
Інженер-механік	Проектування та оптимізація механічної конструкції XY-Z, підбір двигунів і направляючих, модульність системи, забезпечення точності 1–2 мкм.
Інженер-програміст	Розробка ПЗ: алгоритми сканування, панорамування, автотрекінгу; створення API; UX/UI; інтеграція ПЗ з обладнанням; тестування та оптимізація.
Спеціаліст з обробки даних	Обробка результатів калібрування, статистичний аналіз точності та повторюваності, формування масивів даних для тренування алгоритмів, підготовка технічної документації.
Інженер-електронік	Розробка та налаштування контролерів руху, плата керування двигунами, інтеграція електронних модулів, забезпечення стабільності та безпеки роботи системи.
Маркетолог	Аналіз ринку лабораторного та промислового обладнання, формування маркетингової стратегії, участь у виставках, підготовка презентацій і кейсів, взаємодія з потенційними клієнтами.

Отже, збалансована команда з необхідним спектром технічних, наукових та маркетингових компетенцій здатна забезпечити успішне виконання календарного плану та ефективно просування продукту на ринку.

Реалізація стартап-проекту вимагає чіткого розуміння витрат, пов'язаних з розробкою продукту, маркетингом, тестуванням та впровадженням. Їхнє прогнозування дозволяє планувати бюджет, контролювати грошові потоки та

приймати обґрунтовані фінансові рішення. У Таблиці 4.26 наведено структуру витрат проекту.

Таблиця 4.26 – Структура витрат

Категорія витрат	Сума (у грн)	Коментар
Розробка та оптимізація ПЗ і механіки	80,000	Оплата праці інженерів-програмістів, механіків, електроніків; розробка алгоритмів сканування, панорамування, автотрекінгу; створення API та UX/UI.
Закупівля комплектуючих та інфраструктури	50,000	Придбання лінійних направляючих, двигунів, драйверів, електронних модулів, прототипних деталей; оренда хмарних серверів для зберігання даних.
Тестування, калібрування та пілотні проекти	35,000	Тестові зразки, вимірювальне обладнання, калібрувальні стенди, організація пілотних впроваджень на базі партнерських лабораторій і підприємств.
Маркетинг і промоактивності	25,000	Участь у виставках, створення демонстраційних матеріалів, відеопрезентацій, просування в професійних медіа та соцмережах.
Юридичні та адміністративні витрати	15,000	Реєстрація стартапу, оформлення договорів, ліцензування ПЗ, бухгалтерські та юридичні послуги.
Непередбачені витрати	10,000	Резерв на випадок додаткових закупівель, оновлення комплектуючих або форс-мажорних ситуацій.
Загальна сума:	215,000 грн	—

Таким чином, сформована структура витрат забезпечує раціональний та збалансований розподіл фінансових ресурсів між ключовими напрямками діяльності проекту. Інвестиції у R&D, закупівлю комплектуючих, калібрування та маркетингові активності дають можливість оперативно підготувати продукт до виходу на ринок і забезпечити його конкурентоспроможність. Продумана частка адміністративних і непередбачених витрат мінімізує ризики та сприяє стабільній реалізації проекту.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4

Проведений маркетинговий аналіз та опрацювання концепції стартап-проєкту дали чітке розуміння його ринкового потенціалу та напрямів майбутнього розвитку. Автоматизована система позиціювання зразків для цифрового оптичного мікроскопа є перспективним рішенням для українського та міжнародного ринку, насамперед у сферах електроніки, прецизійного машинобудування, біомедицини та лабораторної автоматизації. Закладені в основу проєкту технологічні рішення — точність позиціювання 1–2 мкм, висока повторюваність руху, модульна конструкція XY-Z та інтелектуальне програмне забезпечення — відповідають критичним потребам сучасних виробничих і дослідницьких процесів.

Підґрунтя для успіху проєкту формується завдяки сукупності ключових чинників. По-перше, інноваційні властивості продукту, такі як автоматизоване сканування, панорамування, автотрекінг та наявність API, відкривають можливості для інтеграції з існуючими лабораторними системами та промисловими лініями. По-друге, тренд на автоматизацію мікропроцесів у лабораторіях та промисловості сприяє зростанню попиту на високоточні, гнучкі й доступні рішення. По-третє, значна частина потенційних покупців активно шукає заміну дорогому обладнанню провідних світових брендів, що створює вікно можливостей для входження на ринок.

Аналіз ринку показав наявність реальної зацікавленості у системах, здатних підвищити точність досліджень, пришвидшити обробку зразків і зменшити людський фактор. Сегменти цільової аудиторії — від інструментальних лабораторій до виробництв електронних компонентів — мають різновекторні потреби, проте їхня спільна вимога полягає у надійності, модульності та легкій інтеграції обладнання. Запропонований продукт повністю відповідає цим критеріям, а також забезпечує простоту впровадження та мінімальний час навчання персоналу завдяки продуманому інтерфейсу.

На основі отриманих результатів визначено стратегію розвитку стартапу: концентрований маркетинг, орієнтація на вузькі професійні сегменти та стратегія диференціації, що ґрунтується на точності, доступності та модульності. Бізнес-

модель, яка включає продаж обладнання, ліцензій на ПЗ, абонентську плату за оновлення та технічну підтримку, а також можливість індивідуальної інтеграції, забезпечує стабільність грошових потоків та створює основу для масштабування.

Розроблений календарний план дозволяє системно керувати ресурсами, контролювати терміни виконання робіт та забезпечувати якість продукту на всіх етапах — від механічної розробки та програмної оптимізації до тестування і пілотних впроваджень. Збалансована команда, що складається з інженерів-механіків, програмістів, спеціалістів з комп'ютерного зору, аналітиків та маркетологів, створює необхідну синергію технічних, дослідницьких і комунікаційних компетенцій.

Таким чином, сформовано цілісну концепцію успішного запуску стартапу. Проєкт має всі ключові передумови для реалізації: технологічну новизну, ринкову актуальність, конкурентні переваги, гнучку бізнес-модель, стратегічно обґрунтовану маркетингову програму та сильну команду. Наступними кроками стануть фінансово-економічне обґрунтування, пошук інвесторів та підготовка до серійного виробництва. Зважаючи на наявні переваги та комплексно опрацьовану стратегію розвитку, проєкт має високі шанси на успішну комерціалізацію й масштабування у найближчій перспективі.

ВИСНОВКИ

У магістерській дисертації вирішено актуальну науково-технічну задачу розробки автоматизованої системи позиціонування та вирівнювання зразків для цифрового оптичного мікроскопа, що поєднує методи прецизійного мікропозиціонування, цифрової обробки зображень і автоматизованого керування. Актуальність теми зумовлена зростанням вимог до точності, повторюваності та швидкодії мікроскопічних досліджень у матеріалознавстві, мікроелектроніці, біомедицині та автоматизованих лабораторних комплексах.

У першому розділі виконано аналіз принципів роботи цифрових оптичних мікроскопів, методів керування предметним столиком і сучасних підходів до автоматизації мікроскопічних досліджень. Показано, що перехід від ручного керування до моторизованих і п'єзоелектричних систем є необхідною умовою підвищення точності та ефективності досліджень. Проаналізовано архітектуру автоматизованих мікроскопічних систем і обґрунтовано доцільність використання замкнених контурів керування з оптичним зворотним зв'язком.

У другому розділі розроблено математичні моделі механічної платформи та оптичної системи мікроскопа. Побудовано модель руху платформи на базі інерційних п'єзоелектричних приводів типу *stick-slip*, що дозволяє описати дискретний характер мікропереміщень і врахувати нелінійності, пов'язані з гістерезисом та тертям. Виконано розрахунки основних оптичних параметрів мікроскопа, зокрема збільшення, числової апертури, глибини різкості та допустимого кута нахилу зразка. Розроблено математичний апарат визначення нахилу поверхні зразка за результатами аналізу стеків зображень і обґрунтовано застосування градієнтних та комбінованих фокус-метрик для оцінювання різкості. Показано, що поєднання оптичних моделей, геометричних співвідношень і методів цифрової обробки зображень дозволяє реалізувати високоточне автоматичне фокусування та вирівнювання поверхні.

У третьому розділі виконано проєктування апаратно-програмної частини автоматизованої системи позиціонування зразка. Обґрунтовано вибір

мікроконтролера STM32F103C8T6 як центрального елемента керування та інерційних п'єзоелектричних приводів PI N-470 PiezoMike як виконавчих механізмів. Розглянуто та порівняно дві кінематичні схеми платформи — трипунктову конструкцію з трьома приводами та двопунктову схему з шаровою опорою — і доведено перевагу трипунктової схеми для високоточних мікроскопічних застосувань. Розроблено принципову електричну схему високовольтного драйвера п'єзоприводів і сформульовано вимоги до апаратної архітектури керування. Запропоновано алгоритми позиціонування, калібрування та аварійного захисту, а також програмне забезпечення, що реалізує повністю автоматизований цикл визначення нахилу поверхні та його компенсації у замкненому контурі.

У результаті виконано комплексне дослідження та проєктну розробку автоматизованої системи позиціонування зразка, яка поєднує прецизійну механіку, спеціалізовану електроніку та інтелектуальні алгоритми аналізу зображень. Запропонований підхід дозволяє суттєво підвищити точність вирівнювання поверхні зразка, зменшити вплив людського фактора та створює основу для подальшої реалізації фізичного прототипу й експериментальної верифікації системи. Поставлена мета роботи досягнута, а всі основні завдання — виконані в повному обсязі.

Проведений маркетинговий аналіз та опрацювання концепції стартап-проєкту дали чітке розуміння ринкового потенціалу розробленої автоматизованої системи позиціонування зразків для цифрового оптичного мікроскопа. Запропоноване рішення є перспективним для українського та міжнародного ринку, насамперед у сферах електроніки, прецизійного машинобудування, біомедицини та лабораторної автоматизації. Технологічні характеристики системи — точність позиціонування на рівні 1–2 мкм, висока повторюваність, модульна конструкція та інтелектуальне програмне забезпечення — відповідають актуальним потребам сучасних дослідницьких і виробничих процесів.

Підґрунтя для успішної реалізації стартапу формується завдяки поєднанню інноваційних технічних рішень, зростаючого попиту на автоматизацію мікропроцесів та наявності ринкової ніші між дорогими системами провідних світових брендів і спрощеними бюджетними рішеннями. Запропонована бізнес-модель, що передбачає

продаж обладнання, програмного забезпечення та сервісної підтримки, забезпечує потенціал для масштабування та стабільного розвитку проекту.

Таким чином, виконана робота має як науково-технічну, так і практичну цінність. Отримані результати можуть бути використані для подальшої розробки та впровадження автоматизованих мікроскопічних систем, а також слугують обґрунтованою основою для комерціалізації розробки у форматі стартап-проекту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Focus measure method based on the modulus of the gradient of the color planes for digital microscopy,
- [2] Іванова Т.А., Кириловський В.К. Проектування й контроль оптики мікроскопів.
- [3] <https://www.spiedigitallibrary.org/journals/journal-of-medical-imaging>
- [4] M. Subbarao and J. K. Tyan, “Selecting the optimal focus measure for autofocusing and depth-from-focus,” *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 20(8)
- [5] Ogata K. *Modern Control Engineering*. — 6th ed. — Pearson Education, 2021. — 992 p.
- [6] Golnaraghi F., Kuo B. *Automatic Control Systems*. — 10th ed. — Wiley, 2017. — 912 p.
- [7] Bechhoefer J. Feedback for physicists: A tutorial essay on control // *Reviews of Modern Physics*. — 2005. — Vol. 77. — P. 783–836.
- [8] Pawley J. B. *Handbook of Biological Confocal Microscopy*. — 3rd ed. — Springer, 2006. — 985 p.
- [9] Born M., Wolf E. *Principles of Optics*. — 7th ed. — Cambridge University Press, 1999. — 952 p.
- [10] Goodman J. W. *Introduction to Fourier Optics*. — 3rd ed. — Roberts & Company, 2005. — 491 p.
- [11] Rastogi P. K. *Optical Measurement Techniques and Applications*. — Artech House, 1997. — 454 p.
- [12] Zhang Y., Li Z. Autofocus algorithms for digital microscopy: A survey // *Pattern Recognition Letters*. — 2018. — Vol. 115. — P. 1–13.
- [13] Pertuz S., Puig D., Garcia M. A. Analysis of focus measure operators for shape-from-focus // *Pattern Recognition*. — 2013. — Vol. 46. — P. 1415–1432.
- [14] Subbarao M., Choi T., Nikzad A. Focusing techniques // *Optical Engineering*. — 1993. — Vol. 32. — P. 2824–2836.
- [15] Li Y., Wu X. Autofocus algorithm based on image gradient // *Applied Optics*. — 2016. — Vol. 55. — P. 736–742.

- [16] Nayar S. K., Nakagawa Y. Shape from focus // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. — 1994. — Vol. 16. — P. 824–831.
- [17] Santos A., Ortiz de Solórzano C. Focus measures for automated microscopy // *Microscopy Research and Technique*. — 2012. — Vol. 75. — P. 1136–1146.
- [18] Physik Instrumente (PI). *PiezoMike Linear Actuator N-470 Datasheet*. — Karlsruhe, Germany, 2023.
- [19] Physik Instrumente (PI). *Piezo Controllers and Drivers — Technical Manual*. — 2022.
- [20] Thorlabs. *Piezo Actuators and Controllers — Application Notes*. — Newton, USA, 2021.
- [21] SmarAct GmbH. *Piezo Positioning Systems: Theory and Applications*. — Oldenburg, Germany, 2020.
- [22] Leo D. J. *Engineering Analysis of Smart Material Systems*. — Wiley, 2007. — 504 p.
- [23] Uchino K. *Piezoelectric Actuators and Ultrasonic Motors*. — Springer, 1997. — 347 p.
- [24] Wang Q., Cross L. E. Constitutive equations of piezoelectric materials // *Journal of Applied Physics*. — 1998. — Vol. 83. — P. 435–444.
- [25] Fleming A. J., Moheimani S. O. R. Control-oriented synthesis of piezoelectric systems // *IEEE Control Systems Magazine*. — 2007. — Vol. 27. — P. 62–89.
- [26] STM32F103 Reference Manual. — STMicroelectronics, 2023.
- [27] STMicroelectronics. *AN4044: Using STM32 Timers for Precision Control*. — 2022.
- [28] OpenCV Documentation. *Image Processing and Computer Vision Library*. — <https://opencv.org>
- [29] Bradski G., Kaehler A. *Learning OpenCV*. — O’Reilly Media, 2008. — 555 p.
- [30] Szeliski R. *Computer Vision: Algorithms and Applications*. — Springer, 2010. — 812 p.
- [31] Gonzalez R. C., Woods R. E. *Digital Image Processing*. — 4th ed. — Pearson, 2018. — 1192 p.
- [32] Jain A. K. *Fundamentals of Digital Image Processing*. — Prentice Hall, 1989. — 592

p.

[33] Russ J. C. *The Image Processing Handbook*. — 7th ed. — CRC Press, 2016. — 1024

p.

[34] ISO 12233:2017. Photography — Electronic still picture imaging — Resolution and spatial frequency responses.

[35] IEC 61340. Electrostatics — Standards for electronic systems.

[36] Micro-Manager Software. *Open-source microscopy control*. — <https://micro-manager.org>

[37] Zeiss. *Digital Microscopy Systems — Technical Overview*. — 2020.

[38] Nikon Instruments. *Microscope Automation and Control*. — 2019.

[39] Olympus. *Motorized Microscopy Platforms*. — 2021.

[40] Leica Microsystems. *Automated Optical Microscopy Systems*. — 2022.

[41] IEEE Standard 1788-2015. IEEE Standard for Interval Arithmetic.

[42] Press W. H. et al. *Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing*. — 3rd ed. — Cambridge University Press, 2007.

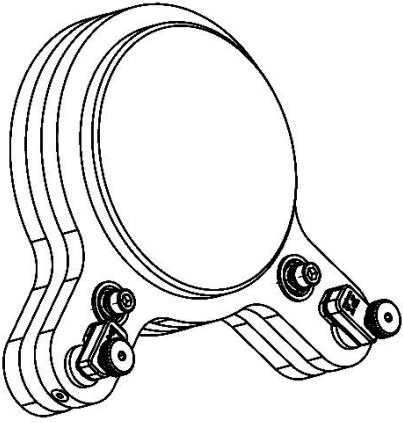
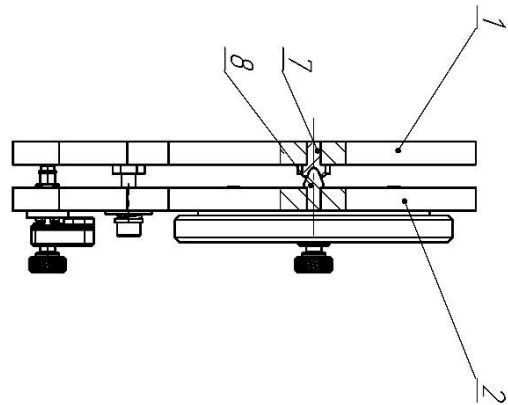
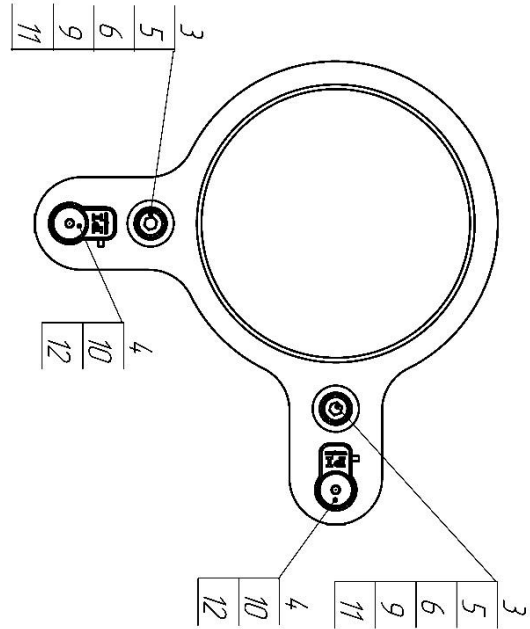
[43] Åström K. J., Murray R. M. *Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers*. — Princeton University Press, 2008.

Формат	Зона	Поз.	Позначення	Назва	К-сть	Примітка		
<u>Документація</u>								
A3			ДП ПГ41МПО6.10.000.0	Складальний кресленник				
<u>Складальні одиниці</u>								
A4	1		ДП ПГ41МПО6.10.100.0	Пластина верхня зібрана	1			
<u>Деталі</u>								
A3	2		ДП ПГ41МПО6.10.001.0	Пластина нижня	1			
A3	3		ДП ПГ41МПО6.10.002.0	Втулка	3			
A3	4		ДП ПГ41МПО6.10.003.0	Втулка	3			
A3	5		ДП ПГ41МПО6.10.004.0	Пружина	3			
A3	6		ДП ПГ41МПО6.10.005.0	Контргайка	3			
ДП ПГ41МПО6.10.000.0								
			Зм.	Акр.	№ докум.	Підп.	Дата	
			Розроб.	Кухтіна				
			Перев.	Боровицький				
			Н. контр.					
			Затв.					
				Автоматизована система позиціювання зразків для цифрового оптичного мікроскопа		Літ.	Аркуш	Аркушів
							1	2
						НТУУ "КПІ"		
						ПБФ		

ДП ПГ 4 ІМПОб 20 000 0 СК

Довід. №	Перв. застос.
	ДП ПГ 4 ІМПОб 20 000 0

Інв. № правдн.	Підп. та дата	Зам. інв. №	Інв. № дубл.	Підп. та дата



1. Розміри для довідок
2. Ск. од. поз. 1 приєднаний до дем. поз. 2 за допомогою дем. поз. 9.
3. Дем. поз. 6 закріплений до упору
4. Дем. поз. 4 і 12 встановити і закріпити дем. поз. 10
5. Передришити надійність ходів ск. од. поз. 1. Звідання не допускаться.

Зм. №	№ докум.	Підп.	Дата
Розроб.	Квітня		
Перев.	березень		
Т. комп.			
Н. комп.			
Замб.			

ДП ПГ 4 ІМПОб 20 000 0 СК			
Автоматизована система позиціонування зразків для цифрового оптичного мікроскопа			
Клавіатурний креслений			
Лист	Маса	Мештаб	
	1,4	1:2	
Архив	Архив	1	
НТЗУ "КПІ		ІІСФ	

Щифр

Копія

Формат А3

Формат	Зона	Поз.	Позначення	Назва	К-сть	Примітка		
<u>Документація</u>								
A3			ДП ПГ41МПО6.20.000.0	Складальний кресленник				
<u>Складальні одиниці</u>								
A4	1		ДП ПГ41МПО6.20.100.0	Пластина верхня зібрана	1			
<u>Деталі</u>								
A3	2		ДП ПГ41МПО6.20.001.0	Пластина нижня	1			
A3	3		ДП ПГ41МПО6.20.002.0	Втулка	2			
A3	4		ДП ПГ41МПО6.20.003.0	Втулка	2			
A3	5		ДП ПГ41МПО6.20.004.0	Пружина	2			
A3	6		ДП ПГ41МПО6.20.005.0	Контргайка	2			
A3	7		ДП ПГ41МПО6.20.006.0	Шарнір	1			
A3	8		ДП ПГ41МПО6.20.007.0	Опора	1			
			ДП ПГ41МПО6.20.000.0					
			Зм.	Акр.	№ докум.	Підп.	Дата	
			Розроб.	Кухтіна				
			Перев.	Боровицький				
			Н. контр.					
			Затв.					
				Автоматизована система позиціювання зразків для цифрового оптичного мікроскопа		Літ.	Аркуш	Аркушів
							1	2
						НТУУ "КПІ"		
						ПБФ		

