

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій  
(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки  
(повна назва)

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

перший (бакалаврський)  
(рівень вищої освіти)

Розробка стенду контролю статико-динамічних параметрів FFF/FDM 3D принтерів  
(тема)

Виконав:

здобувач 4 року навчання,  
групи АКТАКІТ-21-1

Михайло БУРЛЕЙ

(власне ім'я, прізвище)

Спеціальність 151 Автоматизація та  
комп'ютерно-інтегровані технології

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Автоматизація та  
комп'ютерно-інтегровані технології

(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. Євгеній РАЗУМОВ-ФРИЗЮК

(посада, власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту  
Зав. кафедри КІТАР

(підпис)

Ігор НЕВЛЮДОВ

(власне ім'я, прізвище)

2025 р.

Я, Бурлей Михайло Павлович, як здобувач вищої освіти ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Я не використовував штучний інтелект для підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

"14" червня 2025 р



Михайло БУРЛЕЙ

## ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет \_\_\_\_\_ АКТ \_\_\_\_\_  
 Кафедра \_\_\_\_\_ КІТАР \_\_\_\_\_  
 Рівень вищої освіти \_\_\_\_\_ перший (бакалаврський) \_\_\_\_\_  
 Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології  
(код і повна назва)  
 Тип програми \_\_\_\_\_ Освітньо-професійна \_\_\_\_\_  
 Освітня програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології  
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри КІТАР \_\_\_\_\_  
(підпис)

« 28 » квітня 2025 р.

### ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Здобувачеві \_\_\_\_\_ Бурлею Михайлу Павловичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи \_\_\_\_\_ Розробка стенду контролю статико-динамічних параметрів  
 FFF/FDM 3D принтерів \_\_\_\_\_

затверджена наказом по університету від 19.05.2025 р. № 390 Ст \_\_\_\_\_

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії \_\_\_\_\_ 24.06.2025 р. \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до роботи \_\_\_\_\_

Середовище моделювання Autodesk Fusion 360 \_\_\_\_\_

Середовище розробки програмного забезпечення Microsoft Visual Studio \_\_\_\_\_

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі \_\_\_\_\_  
 Аналіз технічного завдання; Аналіз публікацій; Вибір типу кінематики, апаратних  
 модулів; Реалізація контролю вібрацій виникаючих при русі за допомогою  
 алгоритму Input shaping. Розробка та реалізація методу корекції  
 неперпендикулярності осей 3D-принтера при 3D-друці; Розробка методу контролю  
 екструзії \_\_\_\_\_

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) Демонстраційний матеріал, представлений у форматі презентації Power Point (\*.ppt) – 10 ст. формату А4

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1 )

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технічного завдання. Аналіз публікацій	28.04-04.05.2025	виконано
2	Вибір типу кінематики, вибір апаратних модулів.	05.05-10.05.2025	виконано
3	Реалізація контролю вібрацій за допомогою акселерометра та алгоритму Input Shaping	11.05-17.05.2025	виконано
4	Розробка та реалізація методу корекції неперпендикулярності осей 3D-принтера при 3D-друці	18.05-25.05.2025	виконано
5	Розробка методу контролю екструзії	25.05-30.05.2025	виконано
6	Подання роботи на перевірку Інтернет-сервісом StrikePlagiarism	17.06.2025	виконано
7	Оформлення пояснювальної записки	18.06-19.06.2025	виконано
8	Подання роботи на рецензію	20.06-21.06.2025	виконано
9	Подання роботи на підпис зав. кафедри	22.06-23.06.2025	виконано
11	Подання кваліфікаційної роботи в ЕК	24.06.2025	виконано

Дата видачі завдання 28 квітня 2025 р.

Здобувач \_\_\_\_\_ Михайло БУРЛЕЙ  
(підпис) (власне ім'я, прізвище)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ доц. Євгеній РАЗУМОВ-ФРИЗЮК  
(підпис) (посада, власне ім'я, прізвище)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 74 с., 6 табл., 29 рис., 2 додатки, 32 джерел.

FFF/FDM 3D-ДРУК, АКСЕЛЕРОМЕТР ADXL345, COREXY КІНЕМАТИКА, ЕКСТРУЗІЯ, INPUT SHAPING, КОРЕКЦІЯ НЕПЕРПЕНДИКУЛЯРНОСТІ ОСЕЙ, PRESSURE ADVANCE, РЕЗОНАНСНА ЧАСТОТА

Об'єкт розробки – технологічний процес екструзійного FFF/FDM 3D-друку.

Предмет розробки – методи та алгоритми компенсації програмних і конструкційних відхилень 3D-принтера, що впливають на якість друку.

Мета роботи – оптимізація високошвидкісного 3D-друку шляхом розробки і реалізації комплексу для контролю та калібрування параметрів, що впливають на якість 3D-друку, при високих параметрах швидкості зокрема шляхом застосування алгоритмів Input Shaping та Pressure Advance/Linear Advance.

У першому розділі здійснено аналіз впливу факторів на швидкість та якість друку. Визначено основні фактори, що впливають на якість друку: механічні вібрації, неперпендикулярність осей та динамічні зміни тиску екструзії.

У другому розділі розроблено експериментальний стенд, що включає структурну схему з модулем збору, обробки і аналізу даних, а також обґрунтовано вибір ключових компонентів.

У третьому розділі програму мовою C++, яка автоматично коригує G-code шляхом застосування алгоритмів однокутової та двокуткової компенсації відхилень осей. Пропоновані методи дозволяють адаптивно визначати векторні зсуви для усунення помилок у системі координат, забезпечуючи відновлення точності надрукованих моделей.

У результаті розроблено рішення для компенсації відхилень технологічного процесу екструзійного 3D-друку. Також, отримані результати можна віднести до Цілі сталого розвитку 9 «Промисловість, інновації та інфраструктура».

## ABSTRACT

Explanatory note: 74 pages, 29 pictures, 32 sources.

FFF/FDM 3D-PRINTING, ACCELEROMETER ADXL345, COREXY KINEMATICS, EXTRUSION, INPUT SHAPING, NON-ORTHOGONALITY CORRECTION, PRESSURE ADVANCE, FREQUENCY RESPONSE

The object of development is the technological process of extrusion FFF/FDM 3D printing.

The subject of development is methods and algorithms for compensating for software and structural deviations of a 3D printer that affect the quality of printing.

The purpose of the work is to optimize high-speed 3D printing by developing and implementing a complex for controlling and calibrating parameters that affect the quality of 3D printing at high speed parameters, in particular by using the Input Shaping and Pressure Advance/Linear Advance algorithms.

In the first section, an analysis of the influence of factors on the speed and quality of printing is carried out. The main factors that affect the quality of printing are determined: mechanical vibrations, non-perpendicularity of the axes and dynamic changes in extrusion pressure.

In the second section, an experimental stand is developed, which includes a block diagram with a data collection, processing and analysis module, and the choice of key components is justified.

In the third section, a program in C++ that automatically corrects G-code by using algorithms for single-angle and double-angle compensation of axis deviations. The proposed methods allow adaptively determining vector shifts to eliminate errors in the coordinate system, ensuring the restoration of the accuracy of printed models.

The result was a solution to compensate for the deviation of the extrusion 3D printing process. The results can also be attributed to Sustainable Development Goal 9 “Industry, Innovation and Infrastructure”.

## ЗМІСТ

Прелік скорочень.....	9
Вступ.....	10
1 Аналіз впливу статико-динамічних параметрів FFF/FDM 3D-принтерів на якість друку при різних швидкісних режимах .....	12
1.1 Аналіз впливу вібрацій елементів корпусу на швидкість друку.....	12
1.2 Аналіз впливу швидкості зміни тиску в екструдері на швидкість друку .....	16
1.3 Аналіз впливу перпендикулярності осей на швидкість та якість друку .....	20
2 Розробка макету стенду контролю статико-динамічних параметрів FFF/FDM 3D-принтерів .....	22
2.1 Розробка загальної структурної схеми стенду контролю статико-динамічних параметрів FFF/FDM 3D-принтерів .....	24
2.2 Вибір апаратних модулів та конструкції стенду.....	25
2.3 Збірка макету стенду контролю статико-динамічних параметрів FFF/FDM 3D принтерів .....	34
3 Реалізація методу контролю вібрацій, виникаючих при 3D-друці, методу корекції неперпендикулярності осей 3D-принтера , методу контролю екструзії .....	36
3.1 Прошивка стенду, підключення акселерометру Mellow Fly ADXL345 .....	36
3.2 Підключення акселерометра Mellow Fly ADXL345 до сервера.....	37
3.3 Налаштування Input Shaping .....	38
3.4 Отримання даних з акселерометра, та калібрування коефіцієнтів .....	39
3.5 Розробка методу корекції геометрії 3D-моделей.....	43
3.6 Реалізація методу корекції геометрії 3D-моделей.....	45
3.7 Реалізація методу контролю екструзії .....	48
3.8 Охорона праці при роботі з експериментальним стендом дослідження параметрів FFF/FDM 3D-друку .....	51
Висновки.....	53
Перелік джерел посилання.....	53
Додаток А Код програми .....	53

Додаток Б Демонстаційний матеріал .....	69
---	----

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АМР – автономний мобільний робот;

КІТАР – комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки;

НДР – науково-дослідна робота;

ПЗ – програмне забезпечення;

ПК – персональний комп'ютер;

ХНУРЕ – Харківський національний університет радіоелектроніки.

## ВСТУП

Технологія пошарового наплавлення (FFF) відома також як моделювання методом наплавлення (FDM), стала однією з найпоширеніших адитивних технологій завдяки своїй доступності та універсальності. FFF/FDM 3D-принтери знаходять широке застосування у різних сферах – від швидкого прототипування та кастомізованого виробництва до побутового використання. Проте, зі зростанням вимог до продуктивності, зокрема, до швидкості друку, гостро постає проблема збереження високої якості та точності виробів.

Якість друку на FFF/FDM принтерах безпосередньо залежить від комплексу статичних та динамічних характеристик обладнання. Недостатня жорсткість конструкції, вібрації елементів корпусу та рухомих частин, неперпендикулярність осей, а також динамічні параметри, такі, як характеристики прискорення та гальмування каретки екструдера, суттєво впливають на геометричну точність, якість поверхні та механічні властивості виробів. Особливо критичним стає контроль цих параметрів при підвищенні швидкості друку, оскільки зростають динамічні навантаження та вібрації, що може призводити до появи дефектів. Окрім механічних параметрів, важливим фактором, що впливає на якість при високих швидкостях, є стабільність процесу екструзії, зокрема, тиск розплавленого пластику в екструдері, контроль якого необхідний для забезпечення рівномірної подачі матеріалу.

Актуальність даної роботи визначається необхідністю створення інструментальних засобів для об'єктивного контролю ключових статико-динамічних параметрів FFF/FDM принтерів, що дозволить оптимізувати їх роботу для досягнення вищих швидкостей друку без суттєвої втрати якості. Хоча існують окремі методи та засоби для вимірювання деяких параметрів, бракує комплексних рішень у вигляді спеціалізованих стендів, які б дозволяли проводити взаємопов'язаний аналіз статичних, динамічних та технологічних характеристик. Розробка такого стенду є важливим кроком для поглибленого дослідження поведінки принтерів, конструктивних рішень, спрямованих на підвищення

швидкості, та розробки методик їх налаштування та калібрування.

Метою роботи є оптимізація високошвидкісного 3D-друку шляхом розробки і реалізації комплексу для контролю та калібрування параметрів, що впливають на якість 3D-друку, при високих параметрах швидкості зокрема шляхом застосування алгоритмів Input Shaping та Pressure Advance/Linear Advance.

Об'єкт розробки – технологічний процес екструзійного FFF/FDM 3D-друку.

Предмет дослідження – методи та алгоритми компенсації програмних та конструкційних відхилень 3D принтеру, що впливають на якість друку.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- аналіз впливу статико-динамічних параметрів FFF/FDM 3D-принтерів, перпендикулярності осей, вібрації корпусу, параметрів прискорення каретки, тиску пластику в екструдері на якість друку при різних швидкісних режимах;
- аналіз існуючих рішень по контролю дефектів, що проявляються під впливом вібрацій корпусу, зміні тиску в екструдері;
- вибір компонентів, датчиків, конструкції стенду контролю статико-динамічних параметрів FFF/FDM 3D-принтерів;
- розробка схеми підключення;
- розробка макету стенду контролю статико-динамічних параметрів FFF/FDM 3D-принтерів, його моделювання, та створення алгоритму для збору даних з датчиків.

Кваліфікаційна робота виконана згідно ДСТУ 3008 – 15 [1], керуючись навчальним посібником з дипломного проєкту [2] та методичними вказівками [3]. Також, отримані результати можна віднести до Цілі сталого розвитку 9 «Промисловість, інновації та інфраструктура».

# 1 АНАЛІЗ ВПЛИВУ СТАТИКО-ДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ FFF/FDM 3D-ПРИНТЕРІВ НА ЯКІСТЬ ДРУКУ ПРИ РІЗНИХ ШВИДКІСНИХ РЕЖИМАХ

## 1.1 Аналіз впливу вібрацій елементів корпусу на швидкість друку

Процес FFF/FDM 3D-друку нерозривно пов'язаний з рухом механічних компонентів принтера – двигунів, ременів, валів, каретки екструдера та робочої платформи. Ці рухи, особливо при зміні напрямку та швидкості, неминуче генерують вібрації, які передаються на конструкцію принтера та, зрештою, на деталь, що друкується. Жорсткість та маса конструкції принтера суттєво впливають на амплітуду та характер цих вібрацій.

Одним із ключових факторів, що посилюють вібрації, є швидкість друку. Підвищення швидкості переміщення друкуючої головки та платформи, великі значення прискорень, вимагають від кінематики принтера здатності до швидких змін напрямку руху. Це призводить до зростання інерційних сил та, як наслідок, до збільшення амплітуди вібрацій. Якщо конструкція принтера недостатньо жорстка або має компоненти, що схильні до резонансу, ці вібрації можуть стати значними, це призведе до того, що вібрації почнуть проявлятися у вигляді видимих дефектів на поверхні надрукованої моделі. Чим вища швидкість друку, тим більший вплив вище перелічених факторів на якість друку, що змушує користувачів обирати між швидкістю та якістю.

Вібрації елементів конструкції під час друку можуть проявлятися у вигляді різних артефактів, серед яких найбільш поширеними є:

Ghosting / ringing: цей дефект виглядає як хвилеподібні візерунки або «відлуння» контурів, що з'являються на поверхні моделі після кутів або інших різких змін геометрії та швидкості руху друкуючої головки. Причиною виникнення цього дифекту є залишкові коливання друкуючої головки або інших рухомих частин принтера після різкої зміни напрямку руху або швидкості. На

високих швидкостях друку та при великих значеннях прискорення ці коливання не встигають затухнути до того, як сопло почне формувати наступну ділянку шару, що й призводить до видимих спотворень. Недостатньо натягнуті ремені або наявність люфтів у механічних з'єднаннях також можуть посилювати цей ефект. Зменшення швидкості друку та оптимізація налаштувань прискорення можуть зменшити ступінь проявлення цього дефекту. Приклад дефекту ghosting / ringing показано на рисунку 1.1.



Рисунок 1.1 – Приклад дефекту ghosting / ringing

Z-Wobble: дефект проявляється як періодичне зміщення шарів по горизонталі вздовж осі Z, створюючи характерний хвилеподібний візерунок на вертикальних стінках моделі. На відміну від Ghosting / ringing, яка пов'язана з динамікою руху по осях X та Y, Z-Wobble зазвичай викликаний проблемами в механіці осі Z.

Основними причинами можуть бути:

- 1) викривлення або нерівність ходового гвинта осі Z;
- 2) неспіввісність між валом крокового двигуна осі Z та ходовим гвинтом, часто через неякісну або неправильно встановлену муфту;
- 3) недостатнє або неправильне кріплення гайки ходового гвинта, що

призводить до її бічного зміщення під час обертання гвинта;

4) проблеми з напрямними осі Z, що призводять до нестроного вертикального руху платформи або порталу.

Періодичність візерунка Z-Wobble часто збігається з кроком різьби ходового гвинта. Хоча Z-Wobble не залежить напряду від швидкості друку по осях X/Y, він є суттєвим дефектом, що погіршує якість вертикальних поверхонь та точність моделі по осі Z.

Приклад дефекту ghosting / ringing показано на рисунку 1.2.

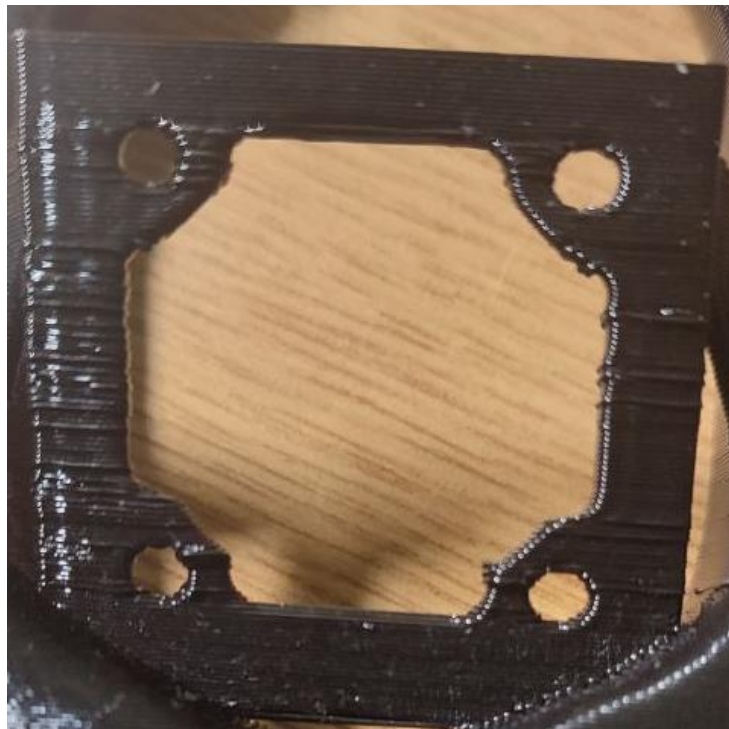


Рисунок 1.2 – Приклад дефекту Z-Wobble

Таким чином, вібрації, що виникають в елементах корпусу та рухомих частинах FFF/FDM 3D-принтера, є значним обмежуючим фактором при підвищенні швидкості друку. Дефекти, такі як Ghosting / ringing, безпосередньо посилюються зі збільшенням швидкості та прискорень. Інші проблеми, як Z-Wobble, хоч і не пов'язані на пряму з швидкістю та прискореннями, також впливають на загальну якість виробу. Розуміння причин виникнення цих вібрацій а також розробка методів для їх мінімізації є ключовим завданням для досягнення

високошвидкісного та одночасно якісного 3D-друку.

Сучасні методи зменшення вібрацій можна умовно поділити на апаратні та програмні.

Апаратні методи: посилення конструкції принтера, зменшення маси рухомих частин, натяг і заміна ременів, використання демпферів і гумових ніжок для гасіння зовнішніх вібрацій.

Однак навіть за умови якісної апаратної бази повністю усунути резонансні коливання неможливо. Тому дедалі ширше застосовуються програмні методи компенсації вібрацій, серед яких найефективнішим є алгоритм Input Shaping.

Input Shaping – метод цифрової фільтрації, який модифікує вхідний сигнал керування рухом, таким чином, щоб зменшити або повністю придушити збудження резонансних коливань у механічній системі.

Алгоритм роботи передбачає калібрування резонансів за допомогою акселерометра, встановленого на каретці друкуючої головки, проводиться сканування вібраційних характеристик. Вимірюється частота основного резонансу по осях X та Y. Результати записуються у вигляді графіка FFT. При виборі типу шейпера, найчастіше використовуються такі типи: ZV, ZVD, EI, 2HUMP\_EI, MZV. Залежно від амплітуди та ширини резонансного піку обирається оптимальний Shaper, який максимально гасить вібрації, не надто зменшуючи швидкість руху.

Формування скоригованого керуючого сигналу: звичайна команда переміщення трансформується у послідовність імпульсів з часовими зсувами. Кожен імпульс має визначену амплітуду та затримку, яка обраховується на основі резонансної частоти та демпфірування. Таким чином, замість прямої команди "рухайся з нуля до 100 мм/с", контролер спочатку подає кілька менших імпульсів у певні моменти часу, щоб уникнути збудження вібрацій. Отриманий сигнал надсилається драйверам двигунів. Завдяки корекції команда вже не викликає вібрацій на частоті резонансу, отже, не генерує ringing/ghosting.

## 1.2 Аналіз впливу швидкості зміни тиску в екструдері на швидкість друку

Процес екструзії в FFF/FDM 3D-принтері передбачає проштовхування філаменту через нагрівальний блок, де він плавиться і видавлюється через сопло малого діаметру. Для стабільного та рівномірного видавлювання необхідної кількості матеріалу в зоні плавлення має створюватися певний тиск. Величина цього тиску залежить від багатьох факторів, зокрема: в'язкості розплаву пластику, діаметра сопла, швидкості подачі філаменту.

Ключовою проблемою, яка стає особливо помітною при спробах збільшити швидкість друку, є динаміка зміни цього тиску. Розплавлений пластик у хотенді має певну в'язкість, через що тиск не може змінюватися миттєво у відповідь на зміну швидкості роботи подаючого механізму екструдера. Виникає певна інерційність або затримка, а саме: на початку екструзії, коли друкуюча головка починає рух і екструдер починає подавати філамент, тиск у соплі наростає поступово. Якщо головка одразу набирає високу швидкість, на початковій ділянці траєкторії тиску може бути недостатньо для видавлювання потрібного об'єму пластику. Це призводить до недоекструзії – лінія виходить тоншою, ніж потрібно, або взагалі з'являється із запізненням, особливо після холостих переміщень

В кінці екструзії, коли екструдер сповільнює або припиняє подачу філаменту перед зміною напрямку або перед ретрактом, накопичений у соплі тиск не спадає миттєво. Залишковий тиск продовжує видавлювати пластик ще деякий час. Це призводить до переекструзії – на кутах моделі утворюються напливи, а після завершення лінії може залишатися «крапля» або «нитка» пластику .

Приклад дефекту що пов'язаний з швидкістю зміну тиску показано на рисунку 1.3.



Рисунок 1.3 – Приклад дефекту пов'язаного з швидкістю зміну тиску

Зі збільшенням швидкості друку ці ефекти значно посилюються.

Вищі швидкості вимагають вищого тиску: щоб проштовхнути більший об'єм пластику за одиницю часу, потрібен вищий робочий тиск в екструдері.

Швидкі зміни швидкості руху головки: на високих швидкостях прискорення та гальмування відбуваються значно різкіше. Це означає, що тиск в екструдері повинен наростати та спадати набагато швидше, щоб відповідати миттєвій потребі в матеріалі. Затримка стає критичною: час, необхідний для стабілізації тиску, стає порівняним або навіть більшим за час проходження коротких сегментів чи кутів на високій швидкості. В результаті недоекструзія на початку руху та переоекструзія наприкінці стають більш вираженими, що суттєво погіршує якість друку, особливо точність геометрії та якість кутів.

Для боротьби з цими ефектами в сучасних прошивках 3D-принтерів

реалізовані спеціальні алгоритми компенсації динаміки тиску, найвідоміші з яких є Pressure Advance в Klipper та Linear Advance в Marlin. Ідея цих алгоритмів полягає в тому, щоб «передбачити» зміну тиску. Прошивка змушує двигун екструдера працювати з випередженням під час прискорення і трохи сповільнювати/втягувати пластик перед гальмуванням, таким чином намагаючись підтримувати більш стабільний тиск безпосередньо на виході з сопла, незалежно від поточної швидкості руху головки. Ефективність цих функцій сильно залежить від правильного калібрування.

Pressure Advance базується на уявленні, що для компенсації ефекту затримки формування тиску потрібно випередити екструзію відносно швидкості переміщення головки. Тобто, екструдер подає трохи більше філаменту під час прискорення і трохи менше під час гальмування. Швидкість обертання мотору екструдера ( $V_e(t)$ ) коригується відповідно до зміни швидкості головки наведена у формулі (1.1):

$$V_{e(t)} = V_{base} + K * \frac{dV_g(t)}{dt} \quad (1.1)$$

де  $V_e(t)$  – швидкість мотору екструдера у момент часу  $t$ ;

$V_{base}$  – базова швидкість подачі відповідно до поточної швидкості руху головки;

$dV_g(t)$  – похідна від швидкості головки (тобто прискорення/сповільнення);

$K$  – коефіцієнт `pressure_advance`, що задається вручну.

Linear Advance працює за схожим принципом, але математична реалізація інша: він компенсує тиск залежно від зміни швидкості екструзії ( $dE/dt$ ), а не безпосередньо прискорення головки. Основна формула (1.2):

$$E_{actual} = E_{nominal} + K * \frac{dE}{dt} \quad (1.2)$$

де  $E_{actual}$  – фактична кількість поданого філаменту;

$dE/dt$  – швидкість зміни екструзії;

K – коефіцієнт Linear Advance (K-factor);

Порівняння Pressure Advance і Linear Advance надано в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Порівняння Pressure Advance і Linear Advance

№	Критерій	Pressure Advance	Linear Advance
1	Реалізація	pressure_advance	K-factor
2	Залежність	від прискорення головки	від зміни швидкості екструзії
3	Прошивка	Klipper	Marlin
4	Підтримка вимірювань	Можливе поєднання з акселерометром	Можлива ручна або автоматична
5	Гнучкість на складних траєкторіях	Вища	Обмежена, якщо немає гарної сегментації

Таким чином, нездатність миттєво змінювати тиск в екструдері є одним з фундаментальних обмежень для підвищення швидкості FFF/FDM. Швидкість зміни тиску в екструдері напряму впливає на здатність принтера точно дозувати матеріал під час швидких прискорень та гальмувань. Контроль цієї динаміки або її ефективна компенсація за допомогою програмних алгоритмів є необхідною умовою для досягнення високих швидкостей друку з прийнятною якістю, особливо щодо рівномірності ліній та чіткості кутів. Дослідження параметрів, що характеризують цей процес, може надати цінні дані для оптимізації як конструкції екструдерів, так і алгоритмів керування.

Алгоритми Pressure Advance та Linear Advance є невід'ємною частиною сучасного підходу до підвищення якості FDM-друку, особливо при високих швидкостях. Вони дозволяють: зменшити час стабілізації тиску, уникнути

недоекструзії та переекструзії на початку та в кінці ліній, покращити геометричну точність та візуальну якість моделей. Оскільки в різних конструкціях принтерів характеристики екструзії можуть істотно відрізнятись, індивідуальне калібрування Pressure Advance або Linear Advance є критично важливим для досягнення найкращого результату.

### 1.3 Аналіз впливу перпендикулярності осей на швидкість та якість друку

Основою для створення геометрично правильних об'єктів за допомогою FFF/FDM 3D-принтера є точна система координат, у якій рухається друкуюча головка та/або робоча платформа. В ідеальній декартовій системі осі X, Y та Z мають бути взаємно перпендикулярними. Дотримання цієї умови є фундаментальною вимогою для забезпечення розмірної точності надрукованих деталей та їх відповідності цифровій моделі.

На практиці, особливо в бюджетних моделях принтерів або пристроях, зібраних самостійно, досягти ідеальної перпендикулярності буває складно.

Відхилення від ортогональності осей, відоме як *axis skew*, може виникати з кількох причин:

- помилки при збиранні: неточне з'єднання елементів рами, нерівномірне затягування кріплень;
- деформація рами: вигин або скручування конструктивних елементів через недостатню жорсткість, механічні навантаження або неякісні матеріали рами;
- нерівності компонентів: використання викривлених валів, напрямних або інших структурних частин.

Неперпендикулярність осей призводить до систематичних геометричних спотворень надрукованих об'єктів, що є серйозним дефектом якості. Найбільш очевидний прояв – об'єкти друкуються зі скосом. Наприклад, модель куба матиме форму ромбоїда, а квадрат в основі перетвориться на паралелограм. Прямі кути моделі не будуть відтворені як 90-градусні.

Деталі матимуть неправильні габаритні розміри, що особливо критично для функціональних прототипів або деталей, які мають точно з'єднуватися з іншими елементами. Похибка буде накопичуватися зі збільшенням розміру моделі.

Якщо друкується кілька деталей, що мають взаємодіяти між собою, неперпендикулярність осей може унеможливити їх правильне з'єднання.

Щодо впливу на швидкість друку, неперпендикулярність осей сама по собі зазвичай не є прямим обмежуючим фактором для максимальної швидкості переміщення механіки принтера. Принтер зі скошеними осями фізично може рухатися так само швидко, як і ідеально вирівняний. Однак, важливим є те, що підвищення швидкості друку на принтері з порушеною перпендикулярністю осей призведе лише до швидшого виготовлення геометрично неправильних деталей. Тобто, проблема лежить не в динаміці руху, а в базовій геометрії системи. Якщо для виробу важлива точність розмірів та форми, то висока швидкість друку на невідкаліброваному принтері втрачає сенс.

Варто зазначити, що сучасні прошивки іноді пропонують програмні методи компенсації скосу осей. Ці методи дозволяють частково виправити геометрію друку шляхом математичної корекції траєкторії руху на основі попередньо вимірених відхилень. Найкращим підходом є забезпечення максимальної перпендикулярності осей на етапі збирання та налаштування механіки принтера.

Таким чином, перпендикулярність осей є критично важливим статичним параметром FFF/FDM 3D-принтера, що безпосередньо визначає геометричну точність та якість друкованих виробів. Хоча вона прямо не обмежує максимальну швидкість руху, ігнорування вимог до перпендикулярності робить безглуздим прагнення до високих швидкостей, якщо кінцевою метою є отримання функціональних та точних деталей. Контроль та забезпечення перпендикулярності осей є необхідним базовим етапом перед оптимізацією швидкісних параметрів друку. Контроль та компенсація цього параметра є однією з важливих задач для розроблюваного стенду.

## 2 РОЗРОБКА МАКЕТУ СТЕНДУ КОНТРОЛЮ СТАТИКО-ДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ FFF/FDM 3D-ПРИНТЕРІВ

2.1 Розробка загальної структурної схеми стенду контролю статико-динамічних параметрів FFF/FDM 3D-принтерів

Було розроблено структурну схему системи стенду контролю статико-динамічних параметрів FFF/FDM 3D-принтерів, яка зображає взаємодію компонентів для збору інформації з датчиків для управління стендом в залежності від отриманих даних (рис. 2.1).

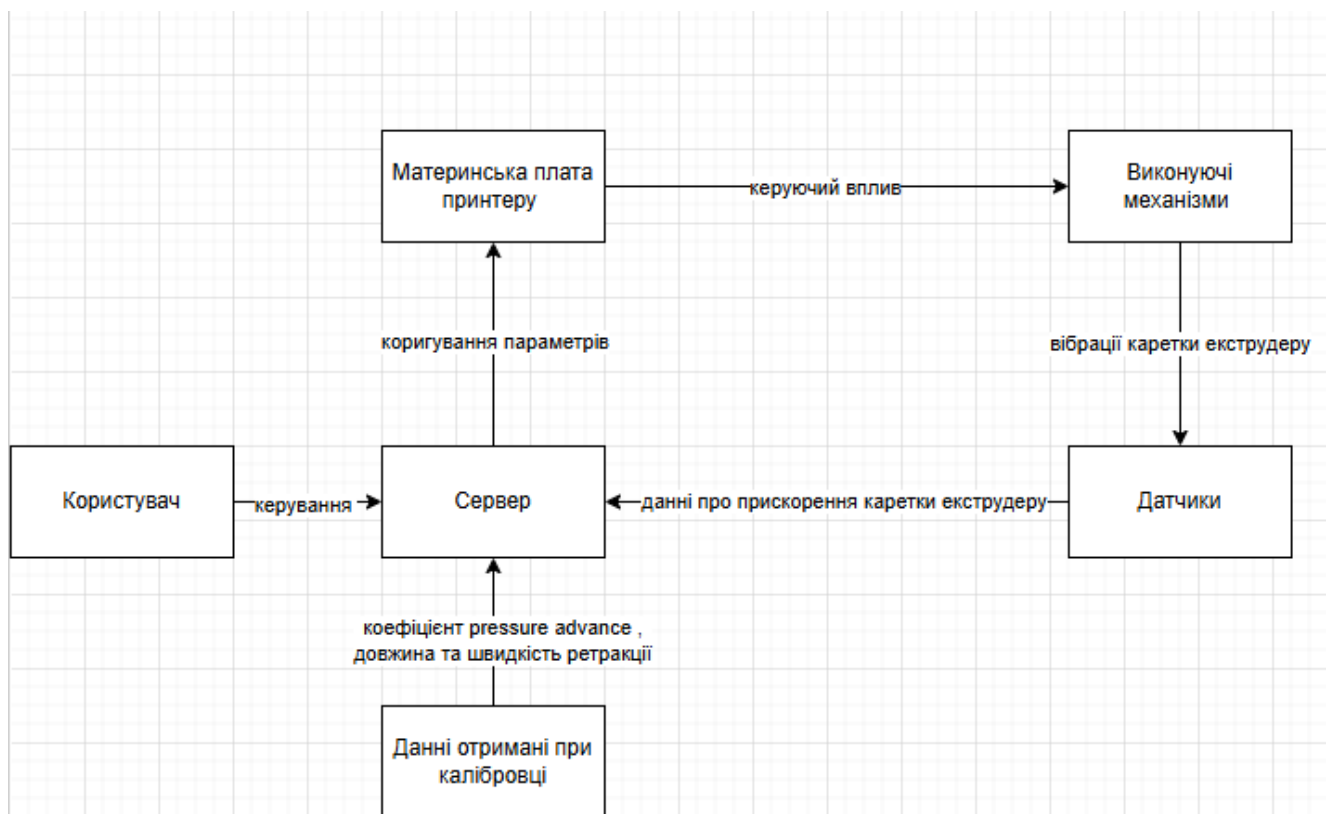


Рисунок 2.1 – Структурна схема стенду контролю статико-динамічних параметрів FFF/FDM 3D-принтерів

Дана структурна схема ілюструє інформаційно-керуючу взаємодію між компонентами 3D-принтера в контексті компенсації динамічного тиску екструзії та вібрацій каретки екструдера. Вона включає такі основні компоненти:

- виконавчі механізми – реалізують фізичний рух елементів принтера згідно з командами материнської плати. Сюди належать крокові двигуни осей та екструдера, які безпосередньо впливають на кінематику друку та екструзію матеріалу. Їхня робота створює вібрації, що можуть впливати на якість друку;

- датчики – вимірюють вібрації та прискорення каретки екструдера, надсилаючи ці дані на сервер. Типовим прикладом таких сенсорів є акселерометри, які використовуються під час калібрування системи Input Shaping;

- сервер – програмно-аналітичний модуль, що приймає сигнали від датчиків, обробляє інформацію про вібрації та прискорення, і передає на материнську плату оптимізовані параметри керування, зокрема: значення коефіцієнта Pressure Advance, довжину та швидкість ретракцій, тип шейпера для Input Shaping. Таким чином забезпечується зворотний зв'язок у системі;

- дані, отримані при калібруванні – містять експериментально визначені характеристики принтера: частоти резонансів, затримки подачі філаменту, поведінку матеріалу. Ці дані є основою для формування параметрів компенсації тиску та вібрацій, які обробляє сервер;

- користувач – має доступ до керування через Telegram-бот або веб-інтерфейс, отримує інформацію про статус принтера, повідомлення, управляє запуском друку.

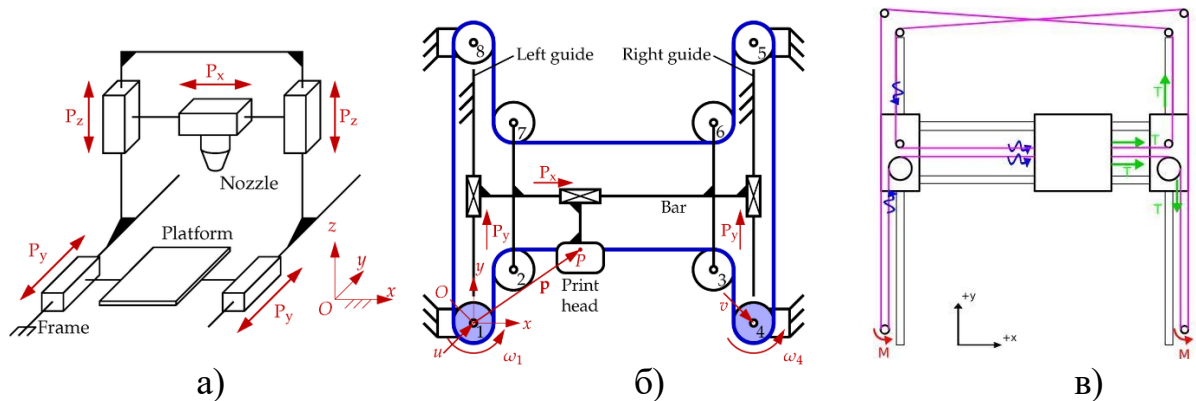
Ця структура реалізує адаптивну систему компенсації механічних ефектів, яка дозволяє зменшити вплив інерції та вібрацій на якість друку. Вона забезпечує точнішу екструзію та покращену геометрію деталей, особливо при високошвидкісному друці.

## 2.2 Вибір апаратних модулів та конструкції стану

Для створення стану контролю статико-динамічних параметрів FFF/FDM 3D-принтерів, визначимося з конструкцією та апаратними модулями стану, при підборі необхідно врахувати всі характеристики модулів та конструкції, включаючи ціну, недоліки та переваги. Визначення правильної комбінації компонентів має вирішальне значення для досягнення максимальної ефективності та надійності. Перш за все, механічна конструкція стану була розроблена з урахуванням технічних характеристик різних варіантів кінематик 3D-принтерів.

Використання акселерометру – ключове рішення для забезпечення контролю вібрацій конструкції та прискорень каретки екструдера. Акселерометр вимірює вібрації та прискорення каретки екструдера, надсилаючи ці дані на сервер.

Стенд повинен відповідати характеристикам, які необхідні для збору даних на різних швидкісних режимах роботи, для того, щоб обрати кінематику принтера (рис. 2.1), яка найкраще підходить під дані умови, було розроблено таблицю для порівняння (табл. 2.1).



a) Cartesian XZ[13]

б) H-bot[14]

в) CoreXY [18]

Рисунок 2.1 – Розглянуті варіанти кінематик

Таблиця 2.1 – Порівняння характеристик обраних кінематик

№	Характеристика, що порівнюється	Cartesian XZ [17]	H-bot[ [18]	CoreXY [19]
1	Особливості конструкції	Осі X і Z об'єднані (звично – каретка на X рухається вгору-вниз разом із хотендом)	Два двигуни, одна ремінна петля; рух головки реалізується за допомогою лінійних напрямних та ременів	Специфічна конфігурація ременів із двома незалежними моторами, що забезпечує синхронний рух по осях X та Y
2	Переваги	-Проста реалізація -Просте налаштування та обслуговування	-Компактна конструкція -Висока швидкість переміщення	-Дуже висока швидкість -Мала інерція рухомих частин -Висока точність -Відсутність скручування рами
3	Недоліки	- Висока інерція по Z	- Рух ременів створює крутильне навантаження	- Потрібна точна синхронізація приводів

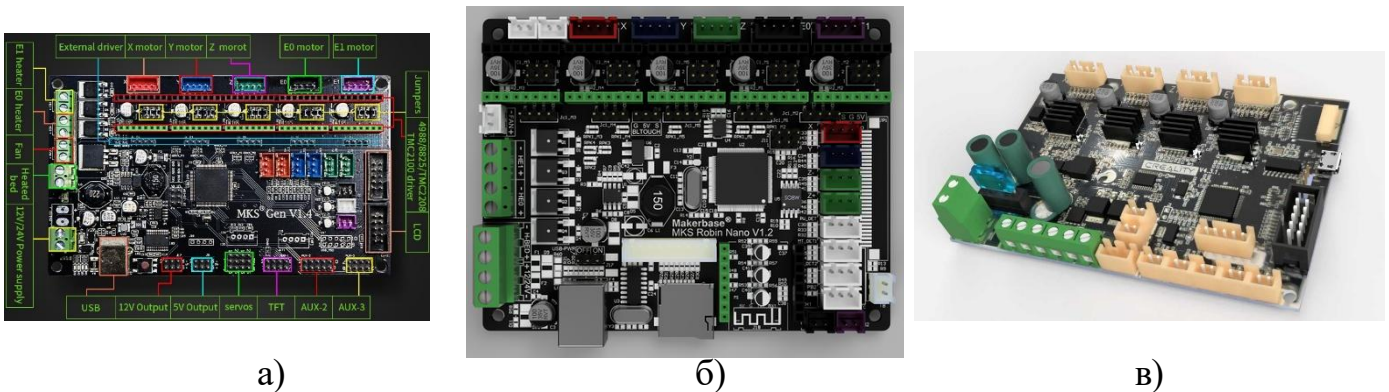
Експериментальним шляхом було виявлено, що при збільшенні швидкості друку до понад 100 мм/с конструкції з класичною Cartesian XZ-кінематикою починають демонструвати надмірні вібрації, особливо при зміні напрямку руху. Це негативно впливало на геометрію моделей та викликало ефекти ringing/ghosting.

Кінематика H-Bot, попри вищу швидкість переміщення, виявилася чутливою до асиметричних навантажень і скручування ременів. Під час тестів при високих прискореннях виникали паразитні рухи каретки, що впливало на точність позиціонування. У результаті було зупинено вибір на кінематиці CoreXY. Ця система забезпечує мінімальну інерцію рухомої частини, оскільки рухаються тільки хотенд та каретка без масивної осі Z або столу. Завдяки специфічній

конфігурації ременів, що рівномірно розподіляють зусилля обох моторів, система дозволяє досягти плавного, стабільного та точного руху головки навіть при високих прискореннях. CoreXY також вирізняється механічною стабільністю конструкції – жорстка рама та правильне натягування ременів забезпечують високий рівень повторюваності без люфтів навіть при довготривалому друці.

Таким чином, кінематика CoreXY була обрана як оптимальна для реалізації швидкісного друку з високою якістю, мінімізацією вібрацій і стабільним позиціонуванням. Вона забезпечує найкращий баланс між швидкістю, точністю та конструктивною ефективністю, що робить її ідеальною для сучасних FDM-принтерів із високими вимогами до продуктивності.

Материнська плата 3D-принтера є ключовим пристроєм у системі, керує рухами 3D-принтера, температурою нагрівачів (рис. 2.2). Для стенду було обрано MKS Gen 1.4 і MKS Robin Nano, Creality 4.2.2, які порівняно в таблиці 2.2.



а)

б)

в)

а) MKS Gen 1.4 [20]

б) MKS Robin Nano [21]

а) Creality 4.2.2 [22]

Рисунок 2.2 – Розглянуті варіанти материнських плат

Таблиця 2.2 – Порівняння характеристик материнських плат

№	Характеристика	MKS Gen 1.4 [20]	MKS Robin Nano [21]	Creality 4.2.2 [22]
1	Мікроконтролер	ATmega2560	STM32 (32-біт)	STM32F103
2	Кількість драйверів	5(змінні)	4	4
3	Переваги	- Просте підключення - Недорога - Велика спільнота підтримки	- Тиха робота - Вища продуктивність	- Підходить для початківців
4	Недоліки	- Обмежена швидкість обробки даних - Немає підтримки 32-біт	- Менше документації - Ускладнена прошивка	- Слабка гнучкість (менше роз'ємів, обмежена пам'ять)

Експериментальним шляхом було виявлено, що під час налагодження та тестування високошвидкісної конфігурації принтера найбільш критичними параметрами є стабільність роботи електроніки, гнучкість при зміні компонентів, а також простота прошивки і підтримки драйверів. Порівнюючи сучасні 32-бітові плати, було встановлено, що, попри вищу продуктивність, ці рішення потребують більш складного налаштування, а також якісного живлення та охолодження, що ускладнює їх використання на експериментальному етапі. У результаті вибір було зупинено на MKS Gen 1.4, як на перевірених, стабільній і сумісній з популярними прошивками платформі. Плата підтримує змінні драйвери крокових двигунів, що дозволяє гнучко тестувати режими роботи з різними модулями.

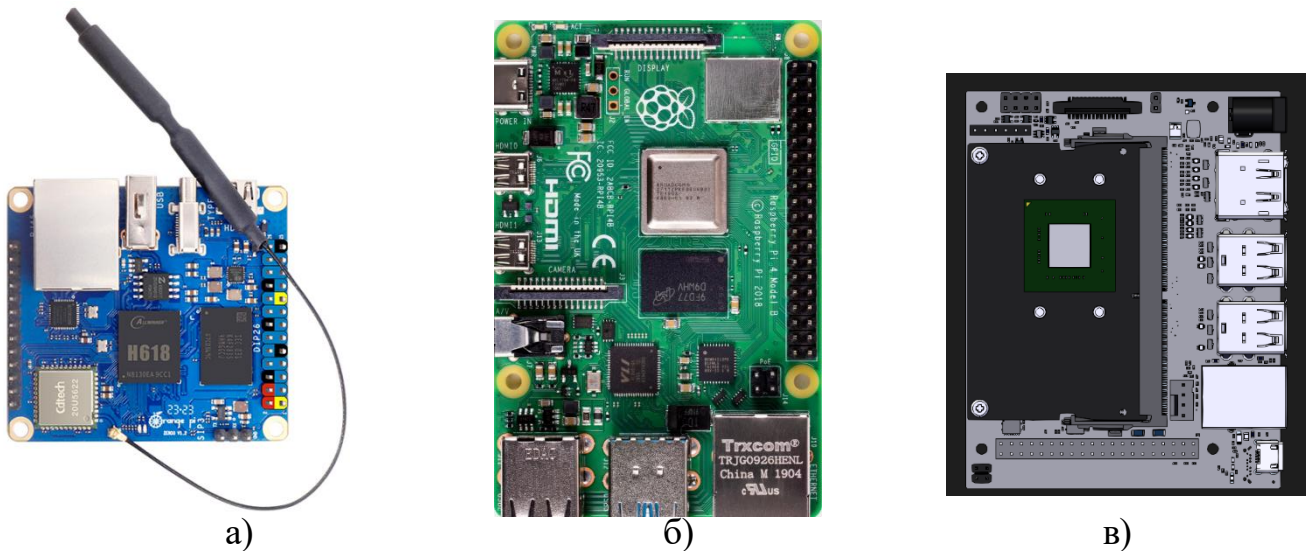
До основних переваг MKS Gen 1.4 належать:

- 1) велика кількість GPIO: легко підключити енкодера, LCD-дисплеї, сенсори;
- 2) підтримка 5 драйверів: достатньо для осей X, Y, Z, екструдера і другого Z або другого екструдера;

- 3) низька вартість: оптимально для стендів, прототипів або DIY-принтерів;
- 4) велика спільнота: легко знайти документацію, форуми, прошивки.

Таким чином, плата MKS Gen 1.4 обрана як ідеальний варіант для прототипу принтера з кінематикою CoreXY та підтримкою експериментальних функцій .Її універсальність та доступність дозволяє легко адаптувати конструкцію під зміну вимог і конфігурації.

У прошивці кліррег керування принтером здійснюється з серверу , тому необхідно ретельно підібрати одноплатний ПК, який буде виконувати функції серверу, керувати всім механізмом , приймати команди від оператора. Для стенду було обрано варіанти одноплатних ПК: Orange Pi Zero 3, Raspberry Pi 4, Jetson Nano (рис. 2.3), характеристики даних ПК порівняні в табл. 2.3.



a) Orange Pi Zero 3 [23]

б) Raspberry Pi 4 [24]

в) Jetson Nano [25]

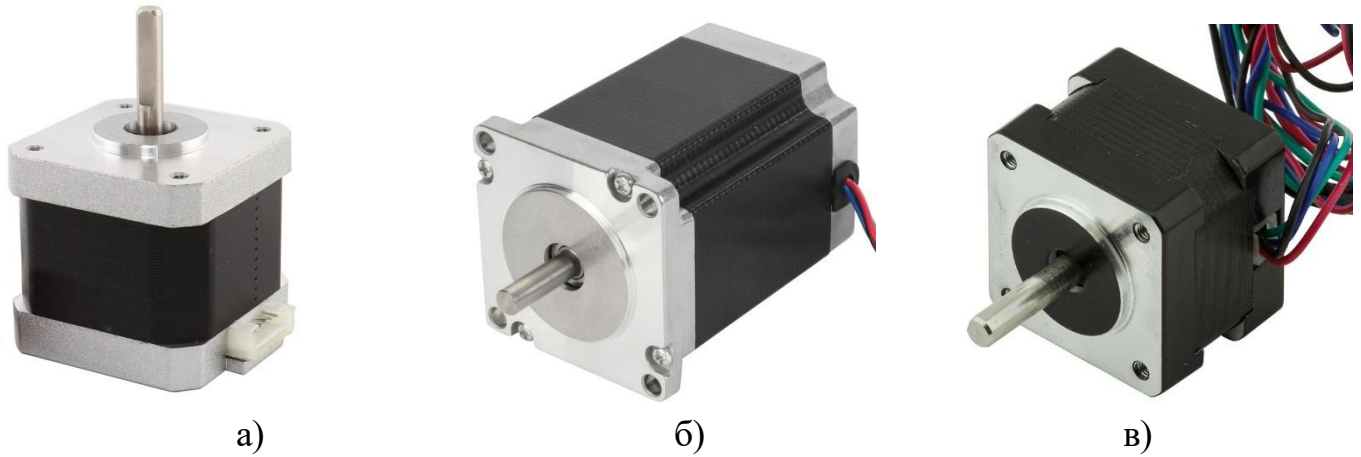
Рисунок 2.3 – Мікроконтролери для керування BEAM-робота

Таблиця 2.3 – Порівняння характеристик мікроконтролерів

№	Характеристик	Orange Pi Zero 3 [23]	Raspberry Pi 4 [24]	Jetson Nano [25]
1	Процесор	Allwinner H618 (4 ядра)	Broadcom BCM2711	NVIDIA Maxwell GPU
2	ОЗП	1–2 ГБ DDR4	2–8 ГБ	4 ГБ
3	Комунікації	Wi-Fi, Ethernet, USB, GPIO	2x HDMI, USB 3.0, Gigabit LAN	Ethernet, USB, GPIO, HDMI
4	Переваги	Низька ціна, компактність, підтримка Debian/Ubuntu, сучасна архітектура	Висока сумісність, велика спільнота	Потужність для AI/ML задач
5	Недоліки	Обмежений обсяг оперативної пам'яті	Вища ціна, велике споживання енергії	Висока ціна, потребує охолодження

Orange Pi Zero 3 обрано як оптимальний варіант завдяки балансу між продуктивністю, енергоефективністю, компактністю та ціною. Ця плата базується на процесорі Allwinner H618, має чотириядерну архітектуру, вбудований Wi-Fi, Ethernet, та підтримку Ubuntu/Debian – усе це робить її чудовим вибором для автономних або вбудованих систем з потребою у віддаленому доступі та гнучкому програмному середовищі.

Крокові двигуни (рис. 2.5), використовуються у 3D-принтерах для забезпечення руху осей, відрізняються від інших типів двигунів високу точність, також були проаналізовані та занесені в табл. 2.4.



а) NEMA 17 (42BYGH) [26]

б) NEMA 23 [27]

в) NEMA 14 [28]

Рисунок 2.5 – Обрані для порівняння крокові двигуни

Таблиця 2.4 – Порівняння характеристик крокових двигунів

№	Характеристик	NEMA 17 (42BYGH) [26]	NEMA 23 [27]	NEMA 14 [28]
1	Типорозмір	42×42×40 мм	57×57 мм	35×35 мм
2	Крок/оборот	1.8°	1.8°	0.9–1.8°
3	Крутний момент	4.2 кг·см	10–18 кг·см	1.5 кг·см
4	Струм (А)	1.2–2.0 А	2.5–3.0 А	0.5–1.0 А
5	Переваги	Універсальний, компактний, дешевий	Потужний момент, запас по навантаженню	Дуже компактний, тихий
6	Недоліки	Може бути замало для великих принтерів	Важкий, більший струм, перегрів	Недостатній момент для XY- осей або Z

У системах 3D-друку та інших прецизійних автоматизованих пристроях критично важливо забезпечити точне, повторюване позиціонування та надійний момент утримання при відносно компактних розмірах. Після тестування декількох типорозмірів крокових двигунів було виявлено, що NEMA 17 забезпечує оптимальний баланс між крутним моментом, енергоефективністю, масогабаритними характеристиками та ціною.

Цей тип двигуна має стандартний фланець 42×42 мм, сумісний із більшістю кріплень 3D-принтерів, та забезпечує достатній крутний момент для переміщення осей X, Y, Z і подачі філаменту без пропуску кроків.

NEMA 17 також підтримується всім спектром драйверів, включно з A4988, TMC2209, DRV8825, що робить його універсальним вибором для більшості прошивок і електроніки.

Таким чином, вибір було обрано кроковий двигуні NEMA 17, як надійному, перевіреному рішенні для побудови механіки 3D-принтера з кінематикою CoreXY, яке забезпечує стабільну роботу, точне керування та оптимальну ефективність.

Занесені дані про акселерометри для збору даних про вібрації та прискорення друкуючої каретки (рис. 2.6), можливо переглянути в таблиці 2.5.



а)

а) Mellow Fly ADXL345[29]



б)

б) ADXL345[30]

Рисунок 2.6 – Акселерометри

Таблиця 2.5 – Порівняння характеристик акселерометрів

№	Характеристик	Mellow Fly ADXL345	ADXL345
1	Діапазон вимірювання	$\pm 2g / \pm 4g / \pm 8g / \pm 16g$	$\pm 16g$
2	Інтерфейси	SPI	I2C/SPI
3	Сумісність з Klipper	Повна підтримка	через прошивку
4	Переваги	Компактний, стабільна передача, мінімальне налаштування	Доступний, недорогий
5	Недоліки	Потрібне правильне підключення SPI	Потрібна пайка та конфігурація вручну

У системах високошвидкісного 3D-друку однією з ключових задач для підтримки швидкісного та якісного друку є компенсація вібрацій, які виникають під час прискорення/гальмування друкуючої каретки. Для цього сучасні прошивки використовують алгоритм Input Shaping, який потребує точних вимірювань резонансних частот принтера. Ці вимірювання проводяться за допомогою акселерометрів, встановлених на картку екструдера.

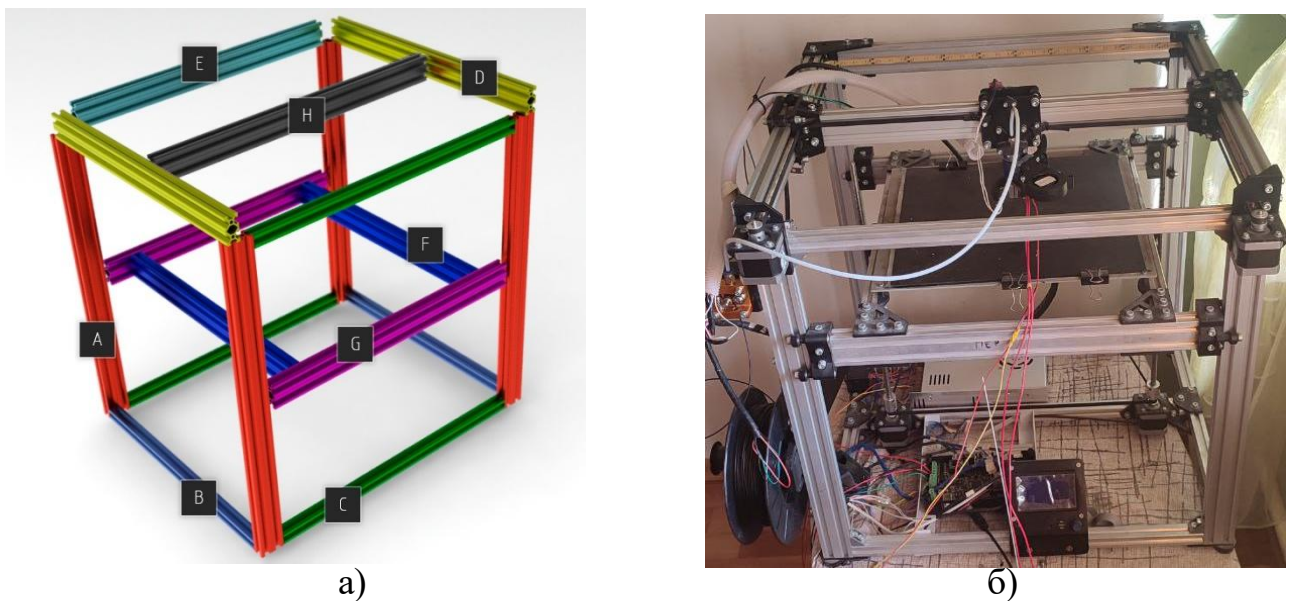
Після тестування декількох моделей акселерометрів було виявлено, що Mellow Fly ADXL345 є найбільш сумісним, простим в інтеграції та точним пристроєм для задач аналізу вібрацій в 3D-друці.

Він має апаратну підтримку протоколу SPI, високий динамічний діапазон до  $\pm 16g$  та високу чутливість, що дозволяє знімати якісні дані навіть при малих амплітудах коливань. Крім того, модуль повністю сумісний з вимогами прошивки Klipper, має попередньо зібране SPI-підключення, а також поставляється з конектором, який спрощує монтаж.

Таким чином, вибір було зупинено на Mellow Fly ADXL345 як оптимальному акселерометрі для точного вимірювання вібрацій і автоматичного калібрування Input Shaping, що дозволяє значно покращити якість друку на високих швидкостях.

### 2.3 Збірка макету стенду контролю статико-динамічних параметрів FFF/FDM 3D принтерів

Грунтуючись на перегляді проектної документації, було підготовлено всі необхідні компоненти для зборки стенду контролю статико-динамічних параметрів FFF/FDM 3D-принтерів. У цьому етапі було перевірено наявність всіх необхідних компонентів та їх коректність. Після цього компоненти було розділено на групи відповідно до їх функціонального призначення. Зібраний макет стенду та схему зборки показано на рис. 2.7.



а) Схема основи макету[16] б) Зібраний макет стенду

Рисунок 2.7 – Зібраний макет стенду контролю статико-динамічних параметрів FFF/FDM 3D принтерів

Спочатку було зібрано основну макета, на якій будуть розміщені всі інші компоненти. Це включало в себе прикріплення базової конструкції, на яку будуть монтуватись інші елементи (рис. 2.7, б).

Для виконання конструкції було обрано алюмінієвий профіль T-track[12]. Наступним кроком були закріплені мотори NEMA 17 (42BYGH) [26] до конструкції стенду. Кожен мотор був змонтований з врахуванням його майбутньої

ролі у русі станку (рис. 2.8).

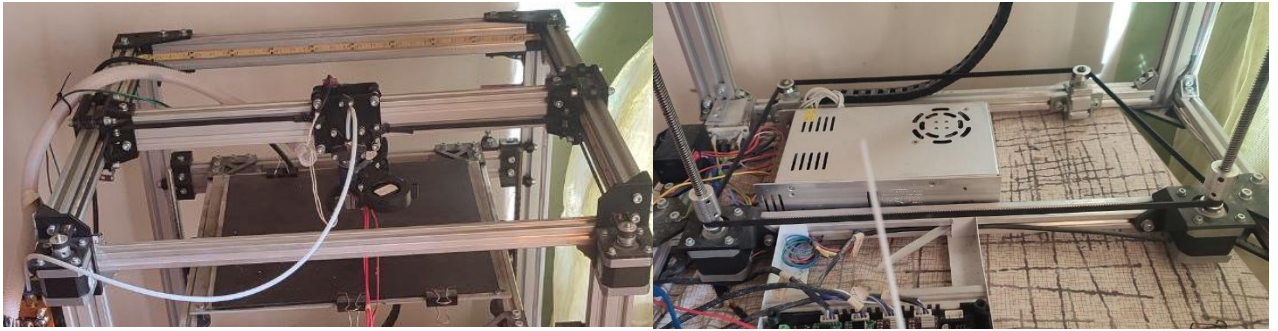


Рисунок 2.8 – Зібраний макет станку з підключеними моторами

Наступним кроком закріплюємо на конструкції материнську плату, ПК, що буде використовуватись як сервер, буде під'єднано до материнської плати по дроту, до конструкції станку ПК не під'єднаний. Встановлену материнську плату показано на рис.2.9.

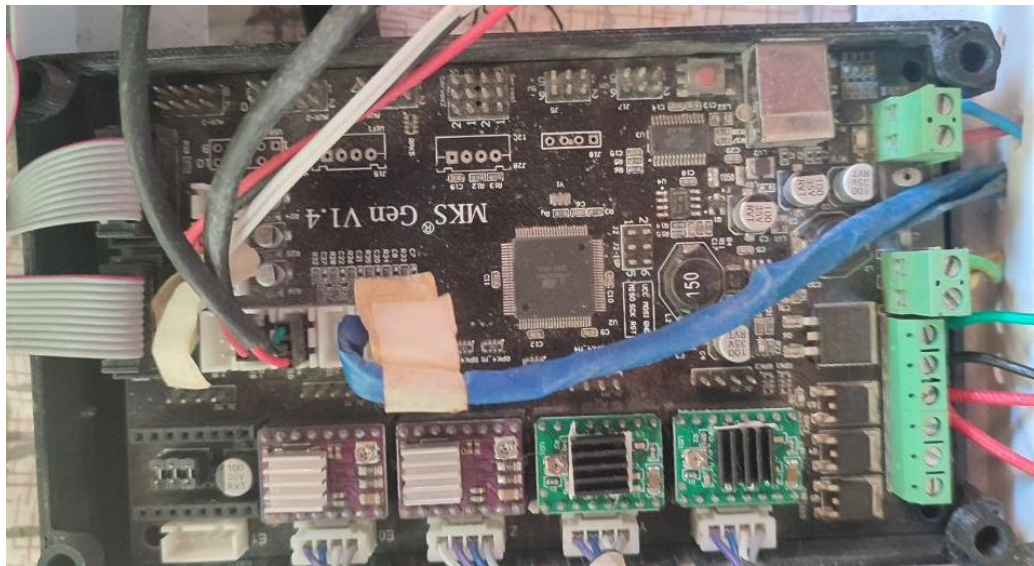


Рисунок 2.9 – Встановлена материнська плата MKS GenV1.4

Після цього було встановлено блок живлення, компоненти були підключені, акселерометр Mellow Fly ADXL345 [29] був закріплений на каретці екструдера та під'єднаний до сервера. Встановлений блок живлення показаний на рис.2.10.

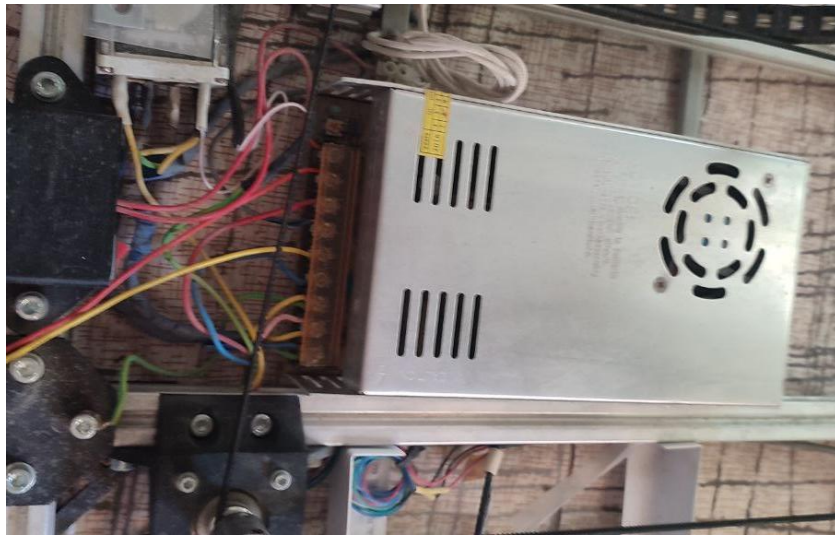


Рисунок 2.10 – Встановлений блок живлення

Таким чином, було зібрано макет стенду контролю статико-динамічних параметрів FFF/FDM 3D принтерів, підбрано та підключено необхідні компоненти, датчики. Компоненти були підбрані відповідно до вимог функцій зібраного стенду, а саме, контролю вібрацій та прискорень каретки екструдера.

Контроль тиску, перпендикулярності осей здійснюватиметься шляхом друку тестових моделей та контролю розбіжності геометрії надрукованих моделей.

Вигляд стенду контролю статико-динамічних параметрів FFF/FDM 3D принтерів надано на рис. 2.11.

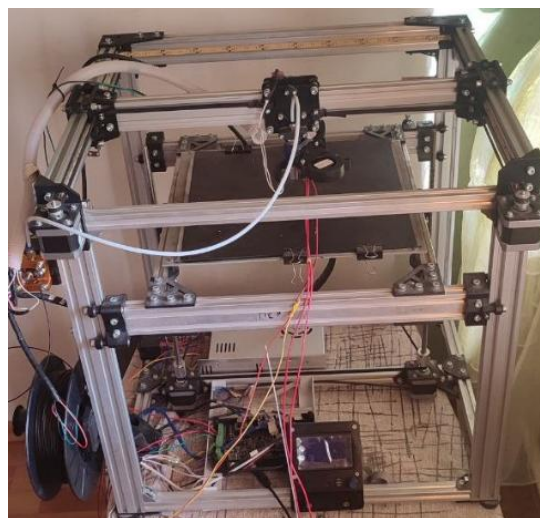


Рисунок 2.11 – Зібраний стенд контролю статико-динамічних параметрів FFF/FDM 3D принтерів

### **3 РЕАЛІЗАЦІЯ МЕТОДУ КОНТРОЛЮ ВІБРАЦІЙ , ВИНИКАЮЧИХ ПРИ 3D ДРУЦІ, МЕТОДУ КОРЕКЦІЇ НЕПЕРПЕНДИКУЛЯРНОСТІ ОСЕЙ 3D-ПРИНТЕРА, МЕТОДУ КОНТРОЛЮ ЕКСТРУЗІЇ**

#### **3.1 Прошивка стенду, підключення акселерометру Mellow Fly ADXL345**

Для керування 3D-принтером з боку сервера використовується Klipper, це сучасна прошивка, що поєднує високу швидкість обробки команд і розділення задач між мікроконтролером принтера та зовнішнім одноплатним ПК.

Перед початком процесу необхідно підготувати: вихідний код прошивки Klipper, доступ до терміналу Orange Pi , інструмент `make menuconfig` для налаштування конфігурації компіляції.

Налаштування прошивки:

- 1) терміналі виконується команда: `make menuconfig`;
- 2) у меню обираються наступні параметри: Micro-controller Architecture: Atmega AVR, Processor model: atmega2560 Communication interface: Serial (UART);
- 3) після збереження конфігурації запускається компіляція: `make`;
- 4) отриманий файл `klipper.hex` переноситься на ПК та прошивається в плату через `avrdude`.

Підключення материнської плати до сервера : з'єднання материнської плати MKS Gen 1.4 з Orange Pi Zero 3 виконується через UART-інтерфейс. На сервері вказується порт, а також завантажується файл конфігурації `printer.cfg`, в якому прописані параметри кінематики, PID-нагрівачів, драйверів двигунів тощо. Успішне підключення материнської плати підтверджується повідомленням "Printer is ready" у веб-інтерфейсі.

### 3.2 Підключення акселерометра Mellow Fly ADXL345 до сервера

Для аналізу вібрацій під час друку використовується акселерометр ADXL345 від Mellow Fly. Він підключається безпосередньо до Orange Pi через SPI-інтерфейс. Підключення акселерометра до GPIO Orange Pi показано на рис. 3.1.

```
biqu@bigtreotech-cb1:~$ ls /dev/serial/by-id/*
/dev/serial/by-id/usb-1a86_USB_Serial-if00-port0 /dev/serial/by-id/usb-Klipper_rp2040_E66368254F4B7E29-if00
biqu@bigtreotech-cb1:~$
```

Рисунок 3.1 – Підключення акселерометра до GPIO Orange Pi

На сервері у розділі `/home/biqu/p1_data/config` створено файл конфігурації акселерометра `adxl.cfg`, зміст файлу показано на рис. 3.2.

```
adxl.cfg
1 [mcu adxl]
2 serial: /dev/serial/by-id/usb-Klipper_rp2040_E66368254F4B7E29-if00
3
4 [adxl345]
5 cs_pin: adxl:gpio9
6 spi_software_sclk_pin: adxl:gpio10
7 spi_software_mosi_pin: adxl:gpio11
8 spi_software_miso_pin: adxl:gpio12
9
10 [resonance_tester]
11 accel_chip: adxl345
12 probe_points:
13 117.5,117.5,10
14
```

Рисунок 3.2 – Зміст файлу `adxl.cfg`

У функціях `mcu adxl`, `adxl345`, `resonance_tester` записано послідовний порт, до якого підключено акселерометр, конфігурація пінів акселерометру, мікросхема акселерометру, та позиція, у якій буде відбуватись контроль вібрацій.

### 3.3 Налаштування Input Shaping

Input Shaping – це метод попередньої обробки керуючого сигналу, який модифікує його у вигляді послідовності імпульсів з певними затримками й амплітудами. Мета – знищити збудження резонансів шляхом інтерференції імпульсів, які «гаситимуть» одне одного.

Розглянемо систему з одним ступенем вільності, яка має власну частоту ( $\omega_n$ ) і коефіцієнт демпфування ( $\zeta$ ). Передавальна функція такої системи у частотній області (3.1)[32]:

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\omega_n\zeta s + \omega_n^2} \quad (3.1)$$

Якщо подати вхідний сигнал  $u(t)$ , то відгук  $y(t)$  міститиме коливальні складові, особливо якщо  $u(t)$  є ступінчастим або імпульсним.

Формування імпульсного шаблону полягає у подачі кількох імпульсів замість одного. Наприклад, найпростіший шаблон ZV (Zero Vibration) складається з двох імпульсів:

Імпульси ZV Shaper (3.2):

$$A_1 = A_2 = \frac{1}{2}, \quad t_1 = 0, \quad t_2 = \frac{\pi}{\omega_d} \quad (3.2)$$

де  $\omega_d$  – затухаюча частота.

Суть: другий імпульс подається з такою затримкою, щоб погасити коливання, викликане першим імпульсом.

ZVD Shaper, цей шаблон створює більш плавне згладжування коливань, але водночас дещо уповільнює реакцію системи. Для підвищення стійкості до похибок у частоті вводять третій імпульс (3.3):

$$A_1 = \frac{1}{4}, A_2 = \frac{1}{2}, A_3 = \frac{1}{4} \quad (3.3)$$

$$t_1 = 0, \quad t_2 = \frac{\pi}{\omega_d}, \quad t_3 = \frac{2\pi}{\omega_d}$$

Klipper дозволяє застосовувати готові шаблони: ZV, ZVD, EI, 2HUMP\_EI, MZV.

Після калібрування акселерометром прошивка виконує:

- 1) вимірювання частоти коливань по X та Y;
- 2) обчислення затримок для імпульсів;
- 3) формування shaped move profile.

Управління рухом принтера виконується на основі згладженого графіка прискорень (3.4):

$$u_{shaped}(t) = \sum_{i=1}^n A_i * u(t - t_i) \quad (3.4)$$

де  $A_i$  – амплітуда  $i$ -го імпульсу;  
 $t_i$  – затримка.

### 3.4 Отримання даних з акселерометра, та калібрування коефіцієнтів

Перед початком роботи перевіримо правильність підключення акселерометру за допомогою команди ACCELEROMETER\_QUERY, результат введення команди показано на рис. 3.3.

```
15:50 accelerometer values (x, y, z): -740.205942, 74.020594,
9422.974625
15:50 ACCELEROMETER_QUERY
```

Рисунок 3.3 – Результат введення команди ACCELEROMETER\_QUERY

На рис.3.3 видно, акселерометр підключено до сервера та він функціонує коректно.

Наступним кроком проведемо калібровку коефіцієнтів осі x для подальшого збору даних з вібрацій протягом руху по даних осі, калібровка по осі x показана на рис. 3.4.

```

16:38 shaper_type_y:mzv shaper_freq_y:50.000 damping_ratio_y:0.100000
16:38 shaper_type_x:3hump_ei shaper_freq_x:70.200 damping_ratio_x:0.100000
16:38 Recommended shaper_type_x = 3hump_ei, shaper_freq_x = 70.2 Hz
16:38 To avoid too much smoothing with '3hump_ei', suggested max_accel <= 3600 mm/sec^2
16:38 Fitted shaper '3hump_ei' frequency = 70.2 Hz (vibrations = 2.0%, smoothing ~= 0.166)
16:38 To avoid too much smoothing with '2hump_ei', suggested max_accel <= 2800 mm/sec^2
16:38 Fitted shaper '2hump_ei' frequency = 50.0 Hz (vibrations = 6.3%, smoothing ~= 0.216)
16:38 To avoid too much smoothing with 'ei', suggested max_accel <= 4200 mm/sec^2
16:38 Fitted shaper 'ei' frequency = 47.4 Hz (vibrations = 14.7%, smoothing ~= 0.143)
16:38 To avoid too much smoothing with 'mzv', suggested max_accel <= 4700 mm/sec^2
16:38 Fitted shaper 'mzv' frequency = 40.0 Hz (vibrations = 14.9%, smoothing ~= 0.127)
16:38 To avoid too much smoothing with 'zv', suggested max_accel <= 8100 mm/sec^2
16:38 Fitted shaper 'zv' frequency = 45.6 Hz (vibrations = 35.1%, smoothing ~= 0.080)
16:38 Calculating the best input shaper parameters for x axis
16:37 Re-enabled [input_shaper]
16:37 Testing frequency 134 Hz

```

Рисунок 3.4 – Результат калібрування осі x

На рис 3.4 видно, що калібрування виконано для частот 1-134 Hz, рекомендований шейпер : 3hump\_ei, shaper\_freq\_x = 70.2 Hz.

Далі побудуємо графік спектральної щільності потужності для осей X, Y на основі зібраних даних, графік наведено на рис. 3.5.

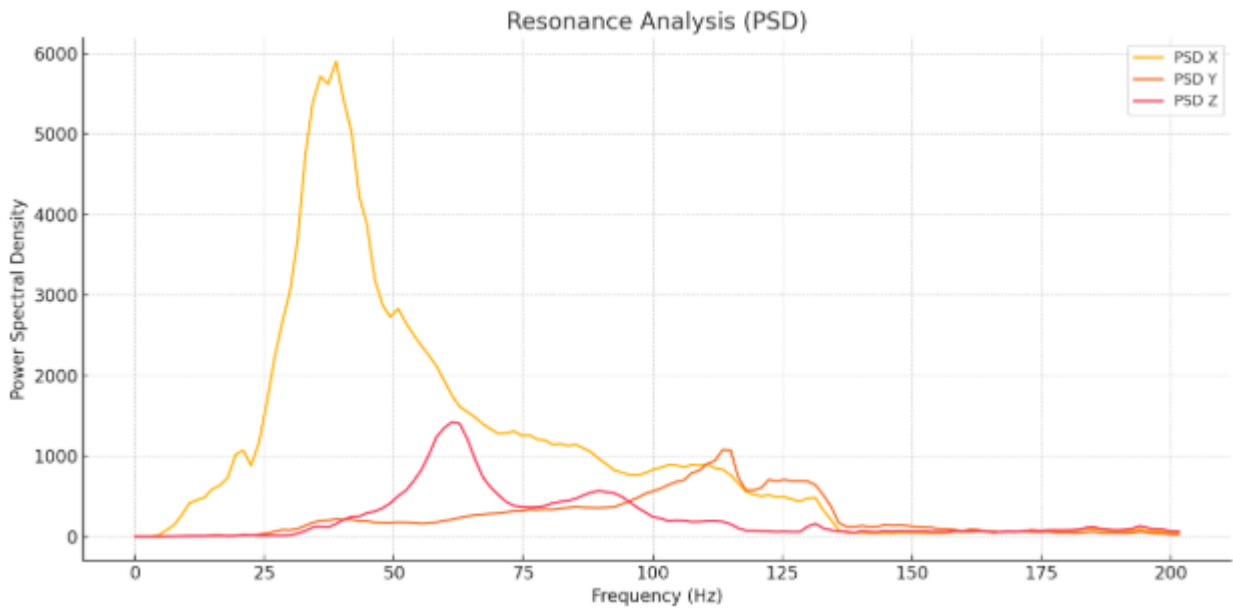


Рисунок 3.5 – Графік спектральної щільності потужності (PSD) для осей X, Y

Далі визначимо частоту резонансу, оберемо тип шейпера (наприклад, ZV або ZVD) і виконаємо повний розрахунок імпульсів з формулами та поясненнями. З побудованого графіка видно, що основний резонанс по осі X знаходиться приблизно на частоті:  $f_0 \approx 35$  Гц.

Це найвища амплітуда PSD, тому саме ця частота буде цільовою частотою для придушення вібрацій.

Початкові параметри системи :

- 1) частота коливань (резонансу):  $f=45$  Гц;
- 2) власна кутова частота:  $\omega_n=2\pi f=2\pi \cdot 35 \approx 219.91$  рад/с;
- 3) коефіцієнт демпфування: Якщо не вимірюється експериментально – приймаємо стандартне значення.

$$4) \text{ загасаюча частота: } \omega_d = \omega_n * \sqrt{1 - \zeta^2} \approx 219.35 \text{ рад/с.}$$

Розглянемо формування ZV Shaper. ZV шейпер складається з 2 імпульсів, амплітуди:  $A_1=A_2=0.5$ . Часові затримки:  $t_1=0$ ,  $t_2=\pi/\omega_d \approx 0.01432$ с(14.32мс).

Результатом є отримані імпульси :

- 1) імпульс 1: 0.5 при  $t = 0$ ;
- 2) імпульс 2: 0.5 при  $t = 14.32$ мс.

Формування ZVD Shaper цей шаблон більш стійкий до похибок у визначенні

частоти. Складається з 3 імпульсів, амплітуди:  $A_1=1/4, A_2=1/2, A_3=1/4$ , затримки:  $t_1=0, t_2=\pi/\omega_d \approx 14,32 \text{ мс}, t_3=2\pi/\omega_d \approx 28,64 \text{ мс}$ .

Результатом є отримані імпульси :

- 1) Імпульс 1: 0.25 при  $t = 0$ ;
- 2) Імпульс 2: 0.5 при  $t = 14,32 \text{ мс}$ ;
- 3) Імпульс 3: 0.25 при  $t = 28,64 \text{ мс}$ .

Підсумок: Для частоти 35 Гц, при  $\zeta = 0.05$ : ZV: 2 імпульси з затримкою  $\sim 14,32 \text{ мс}$ . ZVD: 3 імпульси з затримками 0,  $\sim 14,32 \text{ мс}$  і  $\sim 28,64 \text{ мс}$ .

Графіки імпульсів ZV, ZVD представлено на рис 3.6.

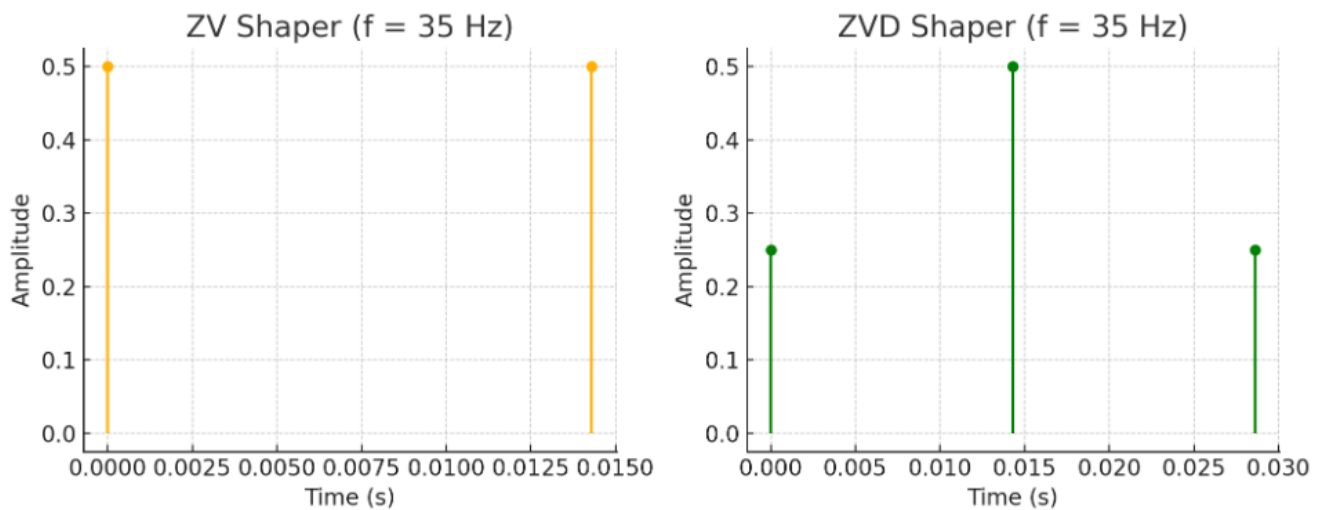


Рисунок 3.6 – Графіки імпульсів ZV, ZVD

Шейпер ZVD рекомендується, якщо частота резонансу може трохи змінюватись при зміні ваги каретки, прискорень тощо.

### 3.5 Розробка методу корекції геометрії 3D-моделей

Розглянемо алгоритм корекції геометрії деталі, який виникає внаслідок відхилення осей при 3D-друкці від ідеального положення. Для цього введено два моделі розрахунків.

У першому випадку проаналізуємо ситуацію, що відповідає відхиленню між осями, в даному випадку форма бажаної деталі є багатокутник ABCD, що на рис.3.6 позначено суцільною лінією, а реальна форма деталі – AEFD, що на рис. 3.6 позначено пунктирною лінією. У цьому випадку кути між сторонами ідеального квадрата та реальної форми визначаються як кут відхилення осі, що використовується для корекції координат. Нехай точка F, що належить реальній формі, відображає положення цільової точки C. При цьому характеристичною довжиною для розрахунку вважається значення CF, яке в даному випадку є координатою за віссю y ідеальної форми. Горизонтальний зсув GF, що відповідає корекції по осі x, обчислюється як добуток CF на синус кута відхилення, тобто  $GF = CF \cdot \sin(\theta)$ , де  $\theta$  – кут між стороною ромба та відповідною стороною ідеального квадрата. Для визначення вертикальної компоненти зміщення спочатку обчислюється прилеглий катет GD як  $GD = CF \cdot \cos(\theta)$ , після чого вертикальне зміщення GC визначається як  $GC = CF - GD$ . Таким чином, нове положення точки формується шляхом віднімання від ідеальних координат відповідних векторних зсувів: нова координата за віссю x дорівнює  $x' = x - GF$ , а координата за віссю y –  $y' = y - GC$ , при цьому координата за віссю z залишається незмінною. Представлення корекції неперпендикулярності між осями X Y показано на рис 3.7.

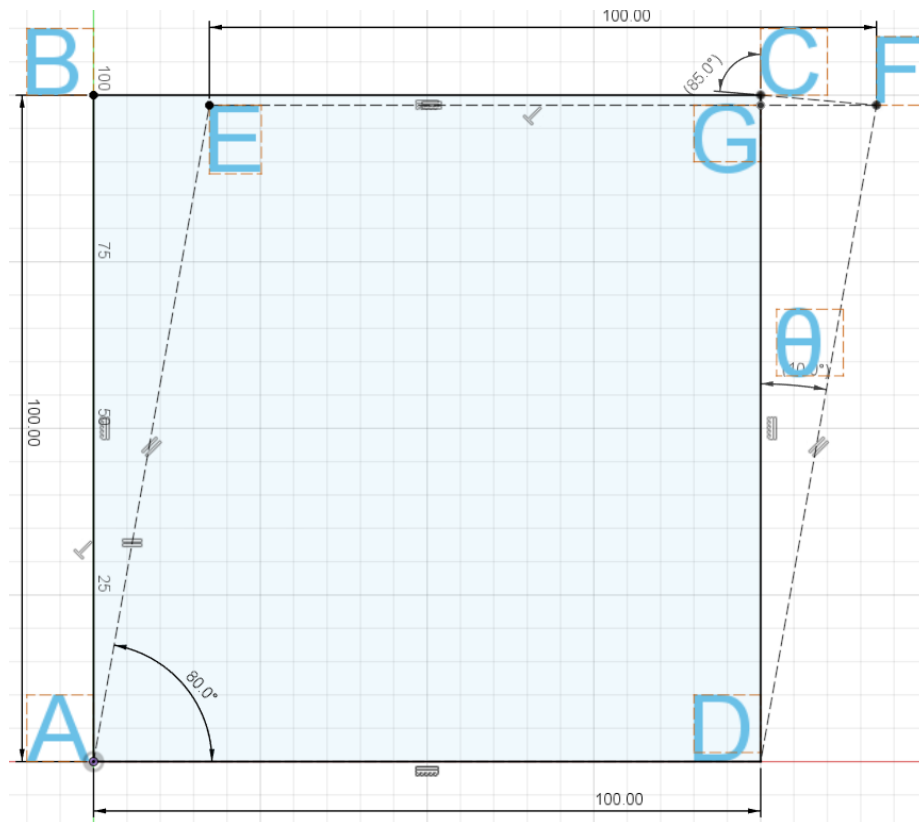


Рисунок 3.7 – Представлення корекції неперпендикулярності між осями X Y

У другому випадку розглянемо рівномірну деформацію бажаної форми квадрата внаслідок відхилення осей від нормалі, нехай формою бажаної деталі є квадрат, тоді дефект проявляється у вигляді перетворення квадрата у ромб, сторони якого залишаються рівними сторонам квадрату. При цьому кут між стороною ромба та відповідною стороною ідеального квадрата є відомим. Позначимо кут, що характеризує відхилення осі  $x$ , як  $\beta$ , а кут для осі  $y$  – як  $\alpha$ . Для обчислення нових координат точки з ідеальної форми введено таке перетворення:  $x' = x \cdot \cos(\beta) - y \cdot \sin(\alpha)$  та  $y' = x \cdot \sin(\beta) - y \cdot \cos(\alpha)$ . Відповідно, вектор зміщення визначається як різниця між новими та початковими координатами, що записується у вигляді:  $\Delta x = x \cdot (\cos(\beta) - 1) - y \cdot \sin(\alpha)$  та  $\Delta y = x \cdot \sin(\beta) - y \cdot (\cos(\alpha) - 1)$ . Таким чином, зсув для кожної точки розраховується адаптивно, оскільки розрахунок зміщення точки відбувається за її координатами. У випадку, коли  $\alpha$  та  $\beta$  рівні нулю, система повертається до ідеального стану тобто,  $\Delta x = \Delta y = 0$ . Представлення другого випадку корекції неперпендикулярності між осями X Y показано на рис. 3.8.

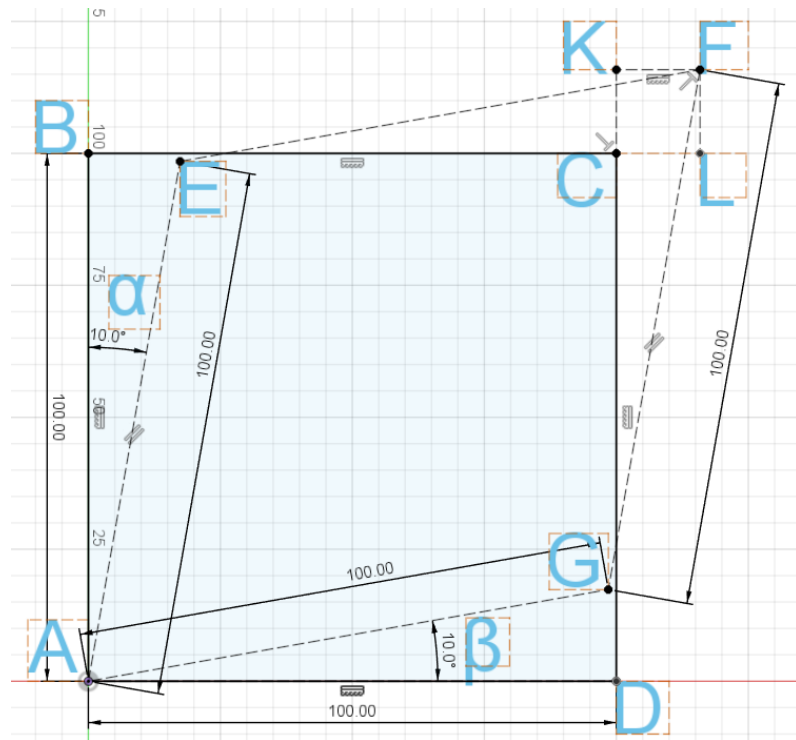


Рисунок 3.8 – Представлення другого випадку корекції неперпендикулярності неперпендикулярності між осями X Y

### 3.6 Реалізація методу корекції геометрії 3D-моделей

Для реалізації методу корекції геометрії 3D-моделей створимо програму на C++. Створена програма повинна виконувати наступні дії: зчитування координат з вхідного файлу, розрахунок необхідної зміни координат, запис змін у новий файл. На рис. 3.9 представлено реалізацію логіки корекції координат точок.

```

Point correctPointSingleAngle(const Point& p, double theta) {
    // CF – ідеальна позиція по y
    double CF = p.y;
    // Обчислюємо горизонтальний зсув GF з трикутника FGD:
    double GF = CF * std::sin(theta * M_PI / 180.0);
    // Обчислюємо GD – сусідній катет трикутника FGD:
    double GD = CF * std::cos(theta * M_PI / 180.0);
    // Вертикальний зсув GC = CF – GD:
    double GC = CF - GD;

    // Нові координати обчислюються як:
    // x коригується на GF, а y – на GC.
    return Point(p.x - GF, p.y - GC, p.z);
}

Point correctPointDualAngle(const Point& p, double alpha, double beta) {
    // alpha – кут зміщення осі Y (відносно ідеальної вертикалі)
    // beta – кут зміщення осі X (відносно ідеальної горизонталі)
    //
    // В ідеальній моделі точка має координати (x, y)
    // Реальна координата визначається як:
    // x' = x*cos(beta) + y*sin(alpha)
    // y' = x*sin(beta) + y*cos(alpha)
    // Тобто, вектор зміщення:
    // Δx = x*(cos(beta) - 1) + y*sin(alpha)
    // Δy = x*sin(beta) + y*(cos(alpha) - 1)
    //
    // Перекладаємо кутові значення з градусів у радіани.
    double radAlpha = alpha * M_PI / 180.0;
    double radBeta = beta * M_PI / 180.0;

    double deltaX = p.x * (std::cos(radBeta) - 1.0) + p.y * std::sin(radAlpha);
    double deltaY = p.x * std::sin(radBeta) + p.y * (std::cos(radAlpha) - 1.0);

    return Point(p.x - deltaX, p.y - deltaY, p.z);
}

```

Рисунок 3.9 – Реалізація корекції геометрії друкованої моделі

Далі виміряємо кут між осями зібраного станку, та виконаємо корекцію Gcode, за допомогою розробленої програми. Вимірювання кутів між осями зібраного станку показано на рис. 3.10.

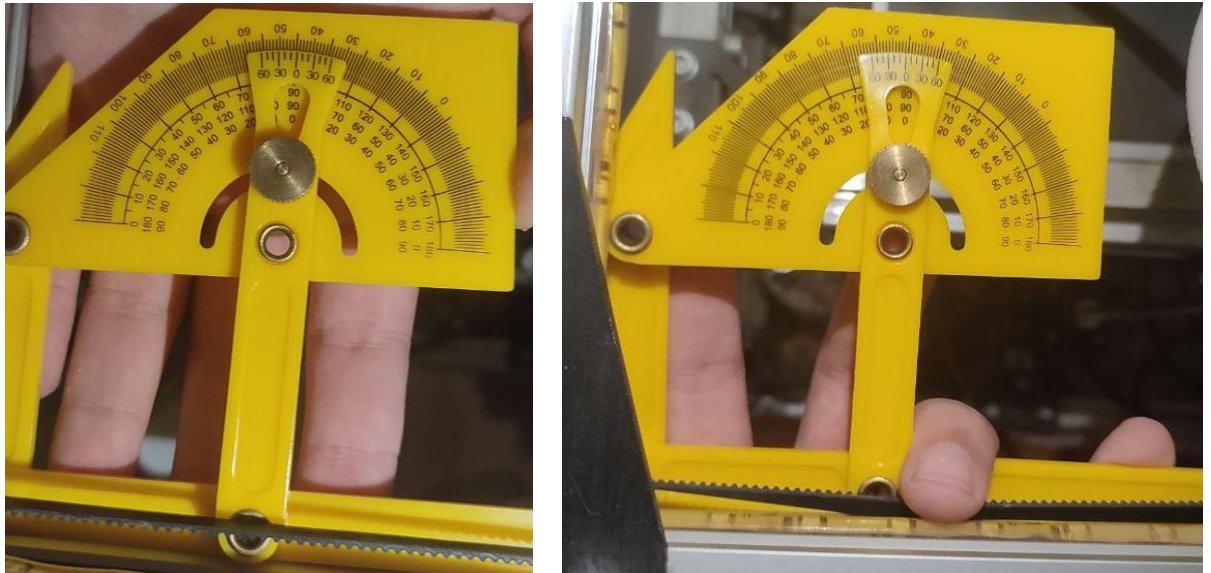


Рисунок 3.10 – Вимірювання куту між осями стану

Маючи значення кутів, порахуємо кут відхилення осей зібраного стану, створимо Gcode для перевірки роботоздатності створеної програми. Візуалізація створеного Gcode показано на рис 3.11.

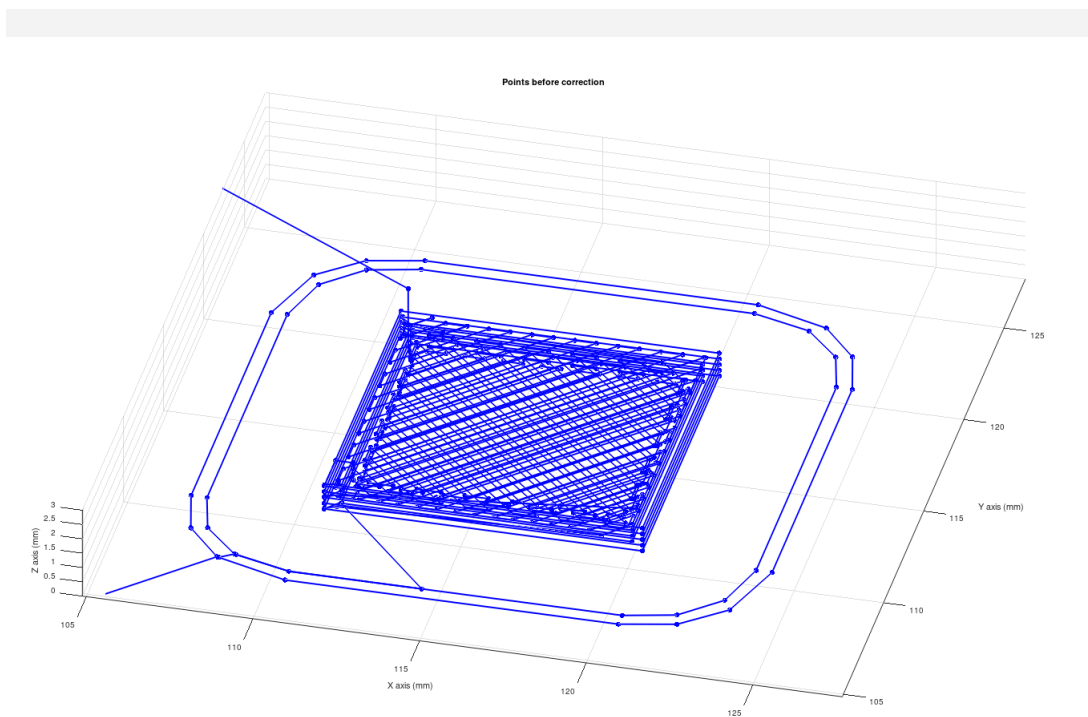


Рисунок 3.11 – Візуалізація створеного Gcode

Далі проведемо корекцію геометрії за допомогою розробленої програми.  
Виконання програми показано на рис. 3.12.

```
Choose correction type: 1 - one angle, 2 - two angles: 2
Enter angle theta in degrees: 1
Enter angle phi in degrees: 1
New G-code saved to NewGcode.txt
Visualization code saved to before.txt and after.txt

C:\Users\mihai\source\repos\ConsoleApplication1\x64\Debug\ConsoleApplication1.exe (process 28396) exited with code 0 (0x0).
To automatically close the console when debugging stops, enable Tools->Options->Debugging->Automatically close the console when debugging stops.
Press any key to close this window . . .|
```

Рисунок 3.12 – Результат виконання розробленої програми.

Візуалізація скоректованого Gcode показано на рис. 3.13.

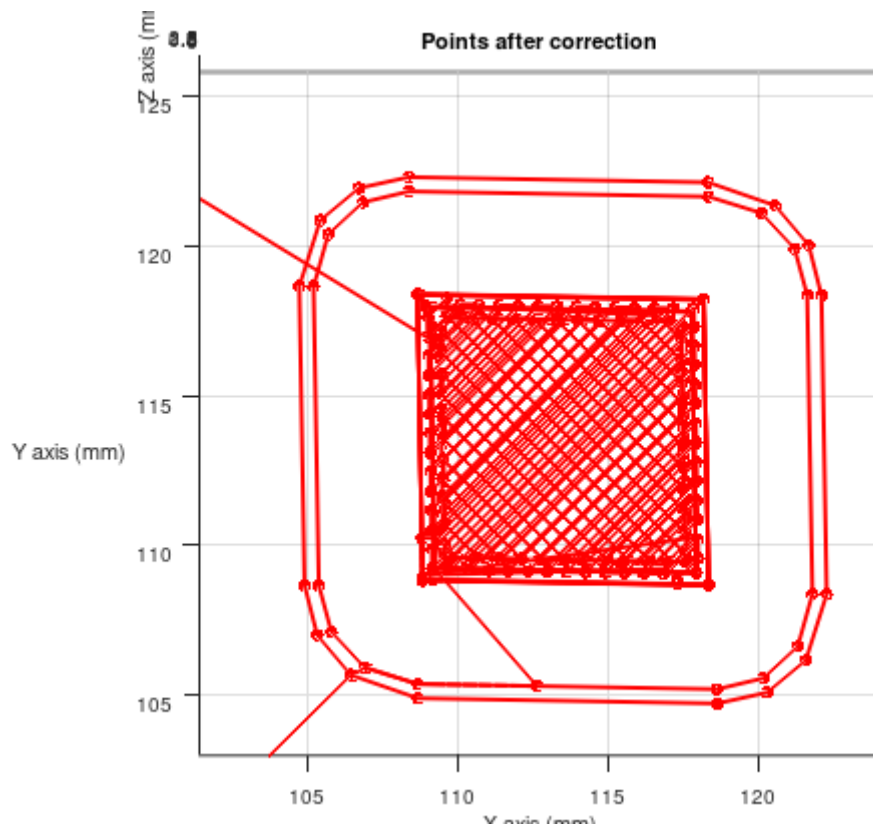


Рисунок 3.13 – Візуалізація скоректованого Gcode

На рис 3.13 видно, що програмою були змінені координати точок, відповідно розрахованих за допомогою розробленої програми величин.

### 3.7 Реалізація методу контролю екструзії

Наступним кроком, реалізуємо контроль екструзії шляхом порівняння кількості філаменту, що повинна була бути використана, з кількістю філаменту, що була фактично використано, таким чином, якщо ці величини не будуть співпадати, то хотенд принтера не встигає видавлювати пластик у потрібному темпі. Найпростіший метод реалізації цього принципу передбачує вимірювання швидкості обертання подаючих колес фідери, вимірювання швидкості руху філаменту, та порівняння цих величин. Запланований об'єм філаменту – визначається через лінійну швидкість подачі, задану в G-code. Фактичний об'єм філаменту – вимірюється оптичним енкودером FC-03 з змодельованим колесом діаметром 35 мм із 20 отворами, таким чином по частоті спрацювань енкодера можна виміряти швидкість витрати філаменту. Klipper на основі імпульсів сенсора обчислює поточну швидкість подачі. У розробленому макросі CHECK\_FILAMENT ці величини порівнюються так: Якщо фактична швидкість  $< (\text{DESIRED} \times \text{THRESHOLD})$ , де THRESHOLD – допустима частка, то в веб-інтерфейсі Mainsail висвітлюється попередження «Недоподача!» і друк призупиняється. Якщо ж фактична швидкість  $\geq (\text{DESIRED} \times \text{THRESHOLD})$ , виводиться «Подача в нормі». 3D модель розробленого механізму для вимірювання фактичної швидкості подачі філаменту показано на рис 3.14.

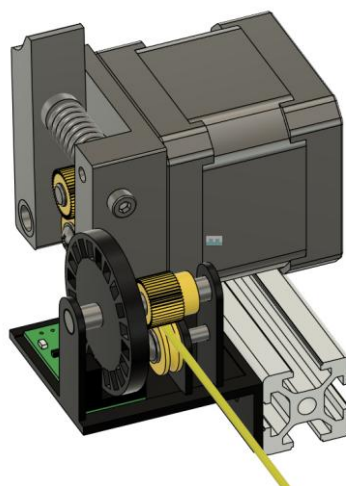
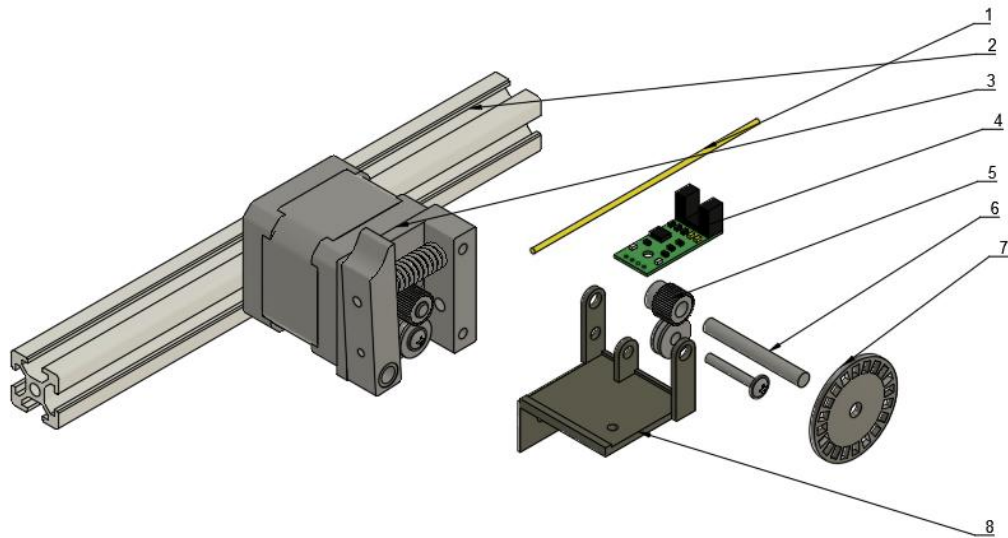


Рисунок 3.14– 3D модель розробленого механізму для вимірювання фактичної швидкості подачі філаменту

На принциповій схемі (рис. 3.15) показано схему розробленого механізму для вимірювання фактичної подачі філаменту.



1 – філамент; 2 – частина корпусу принтеру, до якої кріпиться механізм; 3 – кроковий двигун з фідером; 4 – FC-03; 5 – колеса вимірювального механізму, крізь які проходить філамент; 6 – вали, на яких кріпляться колеса вимірювального механізму; 7 – колесо для вимірювання швидкості обертання; 8 – деталь для кріплення вимірювального механізму.

Рисунок 3.15– Принципова схема розробленого механізму для вимірювання фактичної швидкості подачі філаменту

Для реалізації даної частини було обрано датчик FC-03 на основі схеми LM393. Далі необхідно модифікувати файл macros.cfg у відповідному розділі сервера, для того, щоб сервер міг коректно зчитувати дані. Модифіковану частину файла macros.cfg показано на рис. 3.16.

```

# 1) Налаштування оптичного енодера як датчика швидкості
[filament_motion_sensor filament]
switch_pin: ^PA6
pulses_per_rotation: 20
rotation_distance: 88.91
filter_count: 2
# 2) Макрос порівняння швидкостей із діалоговим вікном UI
[gcode_macro CHECK_FILAMENT]
description:
  """
  Порівняння запланованої та фактичної швидкості подачі філаменту
  з виводом вебморду Mainsail через Macro Prompts.
  Виклик: M118 CHECK_FILAMENT DESIRED=<mm/s> THRESHOLD=0.9
  """
default_parameter_THRESHOLD: 0.9

gcode:
  {% set desired = params.DESIRED|float %}
  {% set threshold = params.THRESHOLD|float %}
  {% set actual = printer.filament_motion_sensor.filament.speed %}

  # action:prompt_begin Фільмент: перевірка подачі
  # action:prompt_text Бажано: {{'{:.1f}'.format(desired)}} мм/хв
  # action:prompt_text Фактично: {{'{:.1f}'.format(actual)}} мм/хв

  {% if actual < desired * threshold %}
  | # action:prompt_text Статус: Недоподача!
  {% else %}
  | # action:prompt_text Статус: Подача в нормі
  {% endif %}

  # action:prompt_button Закрити||primary

# 3) Приклад використання в G-code:
#
# G1 E10 F1800 ; F=1800 мм/хв → 30 мм/хв
# M118 CHECK_FILAMENT DESIRED=30 THRESHOLD=0.9

```

Рисунок 3.16– Розроблена частина macros.cfg.

### 3.8 Охорона праці при роботі з експериментальним стендом дослідження параметрів FFF/FDM 3D-друку

Дотримання норм безпеки при роботі з таким стендом є фундаментальною умовою як для забезпечення здоров'я і життя персоналу, так і для гарантування надійності експериментальних досліджень. Враховуючи вимоги Закону України «Про охорону праці», ДСТУ ГОСТ 12.2.003-91, а також норм ДСТУ EN 60204-1:2015 та інших нормативних документів у сфері безпечної роботи з виробничим обладнанням.

При виконанні роботи з експериментальним стендом можуть виникати небезпечні виробничі фактори. Механічні ризики, а саме, рухомі частини стенду (каретка, ремені, двигуни) можуть спричинити травмування при неправильному

поводженні. Високовольтні компоненти (блок живлення, нагрівальні елементи), можливість ураження електрострумом. Нагрівання екструдера та платформи, що може призвести до опіків. Висока температура нагрівальних елементів, використання легкозаймистих матеріалів.

Заходи забезпечення безпеки : захист механічних частин, використання термостійких матеріалів у місцях контакту з нагрівальними елементами, забезпечення якісного заземлення електронних модулів, проведення інструктажу з техніки безпеки перед початком роботи, забезпечення належного рівня освітлення робочого місця, дотримання ергономічних вимог щодо розташування монітора та клавіатури. Таким чином, при роботі з експериментальним стендом необхідно дотримуватись норм охорони праці, зокрема вимог електробезпеки, механічного захисту, пожежної безпеки та санітарно-гігієнічних норм. Виконання запропонованих заходів мінімізує ризики травматизму, забезпечує безпечні умови роботи та сприяє ефективному використанню технологій FFF/FDM 3D-друку в дослідженнях.

## ВИСНОВКИ

У результаті проведеної роботи було розроблено та реалізовано експериментальний стенд для дослідження статико-динамічних характеристик FFF/FDM 3D-принтерів з кінематикою CoreXY, що дозволяє контролювати параметри, які мають критичне значення для якості високошвидкісного 3D-друку. Ретельний аналіз механічних, електричних та технологічних факторів показав, що ключовими серед них є вібрації конструкції, динаміка зміни тиску в екструдері та неперпендикулярність осей. Для врахування цих факторів у розробленій системі було запропоновано два підходи корекції геометрії друкованих деталей. Перший підхід базується на компенсації відхилення між ідеальною формою та реальною формою шляхом розрахунку векторних зсувів на основі одного кута. Другий підхід передбачає застосування двокутової корекції, за якої відхилення осей від нормалі визначається за допомогою двох параметрів (кутів) з урахуванням адаптивного підрахунку базових величин для кожної точки. Реалізація запропонованих алгоритмів у програмному модулі на мові C++ дозволила автоматизувати процес корекції G-коду, що є надзвичайно важливим для забезпечення точності і відтворення запроектованої моделі при високих швидкостях друку.

Також, отримані результати можна віднести до Цілі сталого розвитку 9 "Промисловість, інновації та інфраструктура".