



НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Факультет(ННІ) \_\_\_\_\_ КОНСТРУЮВАННЯ ТА ДИЗАЙНУ \_\_\_\_\_

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри**

конструювання машин і обладнання

д.т.н., професор \_\_\_\_\_ Вячеслав ЛОВЕЙКІН  
(науковий ступінь, (підпис) (ПІБ)  
вчене звання)

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ року

**З А В Д А Н Н Я**

**ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ**

**ДОМБРОВСЬКИЙ МАКСИМ ВАЛЕРІЙОВИЧ**

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність \_\_\_\_\_ 133 «Галузеве машинобудування» \_\_\_\_\_  
(код і назва)

Освітня програма \_\_\_\_\_ Робототехнічні системи і комплекси сільськогосподарського виробництва \_\_\_\_\_  
(назва)

Орієнтація освітньої програми \_\_\_\_\_ освітньо-професійна \_\_\_\_\_  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Тема магістерської кваліфікаційної роботи \_\_\_\_\_ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ  
КОЛИВАНЬ НАГРІВАЛЬНОЇ ПЛАТФОРМИ 3D ПРИНТЕРА \_\_\_\_\_

затверджена наказом ректора НУБіП України від “ 16 ” грудня 2024 р. № 2269 “С”

Термін подання завершеної роботи на кафедру \_\_\_\_\_  
(рік, місяць, число)

Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи \_\_\_\_\_

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Провести аналіз літератури
2. Апаратна частина та програмне забезпечення для проведення дослідження
3. Експериментальне дослідження
4. Охорона праці

Перелік графічного матеріалу (за потреби) \_\_\_\_\_

Дата видачі завдання “ 19 ” грудня 2024 р.

Керівники магістерської кваліфікаційної роботи \_\_\_\_\_ Крушельницький В.В. \_\_\_\_\_  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання \_\_\_\_\_ Домбровський М.В. \_\_\_\_\_  
(підпис) (прізвище та ініціали студента)

## РЕФЕРАТ

Загальний обсяг роботи становить 65 сторінок основного тексту, містить 57 рисунків, 3 додатки. Список використаних джерел налічує 27 найменувань. Структурно робота складається з переліку позначень, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку джерел та додатків.

У вступі визначено актуальність дослідження вібраційних процесів у FDM 3D-принтерах, що істотно впливають на якість поверхні друкованих деталей, точність позиціонування та надійність роботи системи. Сформульовано мету, завдання, об'єкт, предмет дослідження і методи, використані в роботі.

У першому розділі розглянуто історію розвитку технології 3D-друку, сучасні тенденції та конструктивні особливості FDM-принтерів. Проаналізовано кінематичні схеми руху, їх вплив на коливальні процеси та стабільність позиціонування. Окрему увагу приділено джерелам вібрацій у процесі роботи 3D-принтер, руху друкарської каретки, інерційним силам, робочим режимам двигунів та механічним характеристикам напрямних. Представлено огляд наукових досліджень, що стосуються моделювання коливань, аналізу вібрацій та методів їх зменшення.

У другому розділі детально описано апаратну складову експериментальної установки. Описано принцип роботи датчика, схему його підключення, особливості I<sup>2</sup>C-комунікації та реалізацію програмної частини збору даних. Наведено структуру скрипту Python для збереження виміряних прискорень.

Третій розділ присвячено повному циклу експерименту. Наведено програму та методику дослідження, встановлення сенсора, налаштування вимірювальної системи та процес збору даних. Отримані дані містять значний високочастотний шум, тому для покращення співвідношення сигнал/шум застосовано фільтр Калмана. Наведено графічні результати до та після фільтрації. Виконано швидке перетворення Фур'є (FFT), що дозволило визначити основні резонансні частоти. Описано модернізацію конструкції 3D принтера.

У розділі «Охорона праці» розглянуто вимоги з охорони праці під час експлуатації 3D-принтера: електробезпечність, контроль температури, вентиляція, пожежна безпека, особливості роботи з нагрівальними елементами.

Наведено посилання на чинні нормативні документи та стандарти: ДБН, ДСН, НАПБ, ПУЕ.

У роботі виконано експериментальне дослідження коливань нагрівальної платформи FDM 3D-принтера. Застосування фільтра Калмана дозволило якісно відфільтрувати шум і виділити реальні динамічні коливання. Спектральний аналіз виявив основні резонансні частоти, критичні для якості друку, насамперед у діапазоні 40–50 Гц.

Порівняння результатів до та після модернізації підтвердило ефективність конструктивних змін, що забезпечили зменшення амплітуди вібрацій та підвищення стабільності платформи. Розроблені рекомендації можуть бути застосовані для вдосконалення конструкцій 3D-принтерів і підвищення точності друку.

Ключові слова: 3D-принтер, частота, вібрація, резонанс, прискорення, акселерометр, спектральний аналіз, коливання, фільтр Калмана.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	6
ВСТУП.....	7
АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРИ.....	8
1.1. Історія розвитку та сучасний стан технології 3D-друку .....	8
1.2. Кінематика 3D-принтера.....	9
1.3. Джерела вібрацій у процесі 3D-друку та методи їх досліджень .....	14
1.4. Аналіз наукових досліджень .....	15
АПАРАТНА ЧАСТИНА ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ .....	18
2.1. Апаратна частина.....	18
2.2. Програмна частина збору даних .....	25
ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ .....	27
3.1. Програма та методика дослідження .....	27
3.2. Встановлення сенсора та підготовка вимірювальної системи.....	27
3.3. Збір експериментальних даних .....	29
3.4. Передача даних до комп'ютера та їх збереження.....	30
3.5. Первинна обробка сигналів та фільтрація шумів.....	32
3.6. Спектральний аналіз коливань.....	39
3.7. Дослідження вібрацій після вдосконалення 3D-принтера .....	43
3.8. Порівняння результатів досліджень .....	50
РОЗДІЛ 4 .....	54
ВИСНОВКИ.....	56
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	57
ДОДАТКИ.....	62

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

FDM - моделювання шляхом пошарового наплавлення.

PLA - полілактид.

PET-G - поліетилентерефталат модифікований гліколем.

ABS - акрилонітрилбутадієностирол.

MPU9250 - інерційний датчик прискорення, гіроскопа та магнітометра.

IMU - інерціальний вимірювальний модуль.

FIFO - буфер типу «першим прийшов - першим вийшов».

I<sup>2</sup>C - інтерфейс цифрового зв'язку.

SPI - синхронний послідовний інтерфейс зв'язку.

UART - асинхронний інтерфейс передачі даних.

PWM - широтно-імпульсна модуляція.

АЦП - аналогово-цифровий перетворювач.

IDE — інтегроване середовище розробки.

FFT – швидке перетворення Фур'є.

## ВСТУП

Сьогодні 3D-друк активно використовується не лише в промисловості, а й у навчальних і наукових цілях. Завдяки цій технології можна швидко створювати прототипи, замітники деталей або цілі вузли машин, що значно скорочує час розробки. Проте, якість друку залишається залежною від стабільності роботи механічних вузлів принтера, особливо під час швидких переміщень.

У процесі друку часто виникають коливання, які можуть спричинити неточності позиціонування або деформацію шару матеріалу. Тому аналіз динамічної поведінки друкарських вузлів має важливе значення для підвищення точності та повторюваності результатів.

Дослідження вібрацій 3D-принтера дає змогу виявити резонансні частоти системи, оцінити вплив конструктивних елементів і запропонувати рішення для зниження коливань. Практична модернізація окремих частин конструкції дозволяє підвищити жорсткість, зменшити паразитні вібрації та покращити якість друку.

Метою роботи є експериментальне дослідження вібрацій робочої платформи 3D-принтера до та після модернізації, а також оцінка ефективності внесених конструктивних змін.

Об'єкт дослідження: Коливальні процеси нагрівальної платформи 3D-принтера під час його роботи.

Предмет дослідження: Прискорення коливань нагрівальної платформи 3D-принтера.

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРИ

#### 1.1. Історія розвитку та сучасний стан технології 3D-друку

Технологія 3D-друку, яку також називають цифровим виготовленням або адитивним виробництвом, створює фізичні об'єкти з геометричного представлення шляхом послідовного додавання матеріалів. Цей процес передбачає друк об'єкта шар за шаром, накладаючи матеріал безпосередньо з моделі, створеної за допомогою автоматизованого проектування (CAD).

Ідея пошарового створення тривимірних об'єктів виникла ще у 1970–1980-х роках у процесі розвитку числового програмного керування (ЧПК) і автоматизованого виробництва. У 1986 році інженер Чарльз Халл отримав патент США №4575330 на технологію стерео літографії (SLA), що використовувала затвердіння фото-полімерної смоли під дією лазера. Цей винахід став відправною точкою розвитку адитивного виробництва [1].

У 1990-х роках були розроблені інші методи:

- Selective Laser Sintering (SLS) - спікання порошкових матеріалів лазером;
- Fused Deposition Modeling (FDM) - екструзія розплавленого пластику;
- Laminated Object Manufacturing (LOM) - склеювання шарів плівки.

FDM-технологія, запропонована Скоттом Крапом, стала наймасовішою через низьку вартість та простоту реалізації.

У 2005 році з появою проєкту RepRap (Replicating Rapid Prototyper) розпочалася ера відкритих рішень і домашніх 3D-принтерів. Це дозволило науковцям і студентам проводити дослідження в області механіки, вібрацій, матеріалів і автоматизації без потреби у дорогому промисловому обладнанні [2].

Сьогодні 3D-друк використовується у машинобудуванні, медицині, авіації, архітектурі, сільському господарстві, освіті та наукових лабораторіях. Точність і якість надрукованих деталей залежать від динамічної стабільності рухомих елементів, температурного контролю та рівня механічних коливань системи.

## 1.2. Кінематика 3D-принтера

У сучасних FDM-принтерах застосовуються різні кінематичні схеми, які визначають принцип руху друкувальної головки або платформи. Від вибору типу кінематики залежить точність позиціонування, швидкість переміщення, стабільність конструкції та загальна якість друку. Найбільш поширеними системами є картезіанська, CoreXY, Delta, Polar, SCARA та конвеєрна [3].

Картезіанська кінематика – це найпоширеніший тип кінематики, який використовується у більшості настільних принтерів, таких як Prusa i3 чи Creality Ender 3. Принцип роботи базується на переміщенні по трьох ортогональних осях - X, Y та Z. Кожен двигун відповідає за свою вісь, що робить конструкцію простою у налаштуванні та обслуговуванні (Рис. 1.1). До основних переваг відноситься висока точність позиціонування, доступність запчастин та стабільна робота навіть при тривалому друці. Недоліком є обмежена швидкість руху через інерційність рухомих елементів, особливо при великих розмірах платформи.

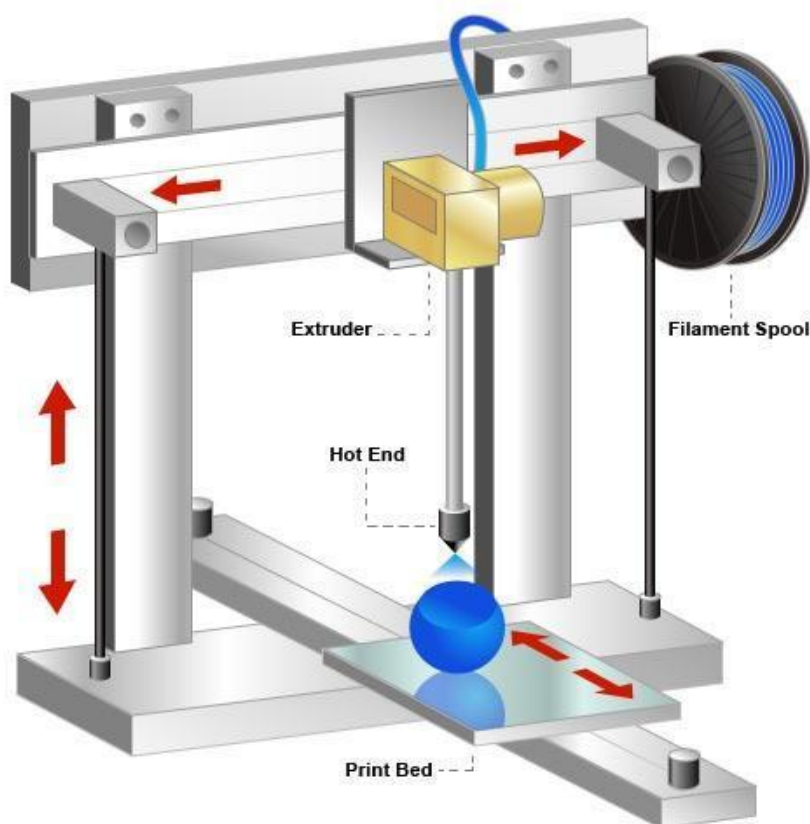


Рис. 1.1. Картезіанська кінематика [4]

CoreXY або H-Bot – цей тип кінематики є вдосконаленням картезіанської схеми. Тут рух по осях X і Y здійснюється двома двигунами одночасно через систему перехрещених ременів (Рис. 1.2). Платформа рухається тільки по осі Z, що значно зменшує масу рухомих частин і підвищує швидкість друку. CoreXY-схеми використовуються у принтерах Bambu Lab P1P, Voron 2.4 та інших високошвидкісних моделях. Основні переваги це плавність рухів, відсутність інерційних перевантажень і висока жорсткість рами. Недоліком можна вважати складність регулювання ременів. При неправильному натягу ременів можливі перекоси під час друку [5].

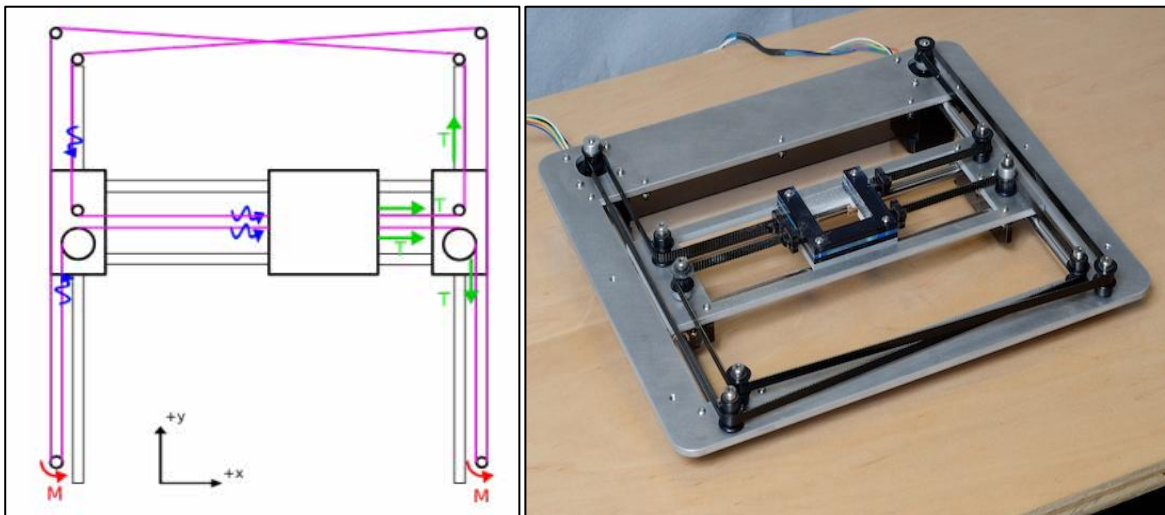


Рис. 1.2. CoreXY кінематика [6]

Delta-кінематика. У цій системі використовується три вертикальні колони, по яких рухаються каретки, з'єднані з друкувальною головою трьома тягами (Рис. 1.3). Положення екструдера визначається зміною довжини кожної тяги. Такі принтери відрізняються плавністю рухів та високою швидкістю позиціонування. Конструкція симетрична та легка, тому вібрації мінімальні. До недоліків належать складне калібрування та зниження точності біля країв робочої зони. Типові представники - Anycubic Kossel, FLSun V400 [7].

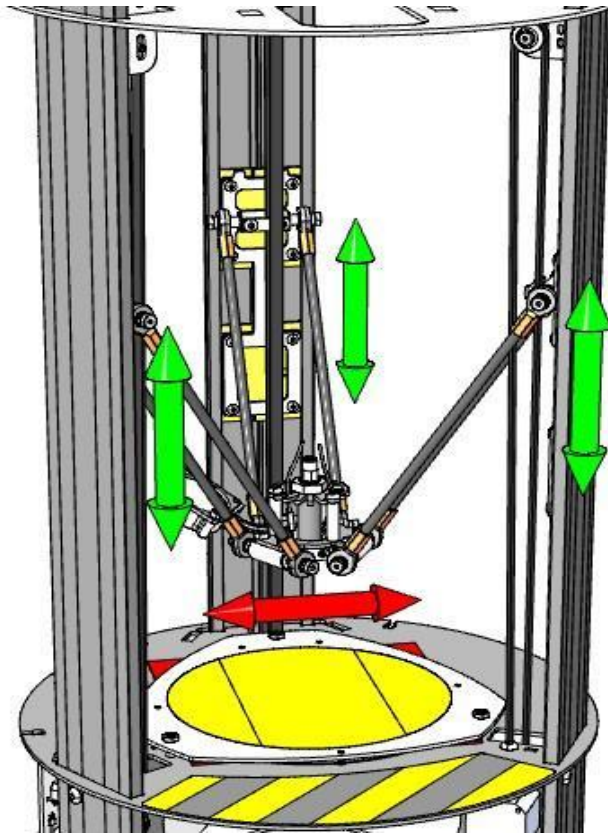


Рис. 1.3. Delta кінематика [4]

Полярна система координат передбачає, що положення екструдера визначається двома параметрами - кутом обертання навколо центру та радіальним віддаленням. Зазвичай платформа обертається, а екструдер переміщується по радіусу. Основна перевага такої системи - мінімальна кількість двигунів і компактність конструкції. Водночас керування у полярній системі складніше, оскільки координати потребують додаткових обчислень, а швидкість руху змінюється залежно від кута обертання. Через це такі принтери використовуються переважно для експериментальних або навчальних цілей [8].

SCARA кінематика. SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm) - це система з двома обертовими важелями, які забезпечують рух екструдера у площині X-Y. Вісь Z використовується для регулювання висоти шару (Рис. 1.4). Такі конструкції відзначаються високою швидкістю роботи та компактністю. Крім того вони можуть друкувати на нерівних поверхнях, що робить їх цікавими для промислового використання. Недоліком є складна геометрія руху через що

потрібне точне калібрування, а також нижча точність порівняно з картезіанськими системами [6].



Рис. 1.4. SCARA кінематика [6]

Цей тип передбачає заміну класичної платформи на рухому стрічку, розташовану під кутом приблизно 45 градусів. Завдяки цьому можна друкувати об'єкти будь-якої довжини або організувати безперервний друк серійних виробів (Рис. 1.5). Такі принтери, як Creality CR-30, дозволяють автоматично скидати готові моделі, що робить їх придатними для невеликого виробництва. Недоліки - складніша геометрія шарів і проблеми з адгезією матеріалу до стрічки. Додатковою особливістю є те, що напрямок нарощування шару фактично зміщується, що впливає на міцність виробу та вимагає окремого налаштування параметрів друку. Також конвеєрні системи потребують точного калібрування натягу стрічки, оскільки її деформація може призводити до накопичення похибок у довготривалому друці [9].



Рис. 1.5. Конвеєрна кінематика [9]

Типова конструкція 3D-принтера на основі технології FDM складається з таких основних підсистем:

Рама - металева або композитна структура, що забезпечує жорсткість і точність позиціонування.

Екструдер - механізм подачі філаменту до нагрівального блоку (гарячого кінця, “hotend”), який плавить полімер і подає його через сопло на платформу.

Нагрівальна платформа - рухомий або фіксований елемент, що забезпечує приклеювання шару та стабільну геометрію друку (Рис. 1.6). Вона складається з алюмінієвої або скляної плити, під якою розташований нагрівальний елемент. Термо-датчик регулює температуру поверхні зазвичай 50–110 °С. Для компенсації теплових розширень і мікро вібрацій використовуються пружини або силіконові прокладки.

Електронна система керування - мікроконтролер (наприклад, Arduino Mega + Marlin, або 32-бітні плати типу SKR + Klipper), драйвери крокових двигунів, живлення, сенсори температури й кінцеві вимикачі [10].

Програмне забезпечення - реалізує інтерпретацію G-коду, керує рухами двигунів, температурними циклами та зворотним зв'язком від датчиків.

Основні рухи здійснюються кроковими двигунами NEMA17 або NEMA23, з'єднаними з ремінними чи гвинтовими передачами. Точність позиціонування

залежить від мікро кроків драйверів (1/16 - 1/256) і механічної стабільності напрямних [11].

У більшості FDM-принтерів платформа рухається по осі Y (схема Prusa), тоді як екструдер переміщується по XZ. Така кінематика створює динамічне навантаження на платформу, що стає основним джерелом коливань [12].

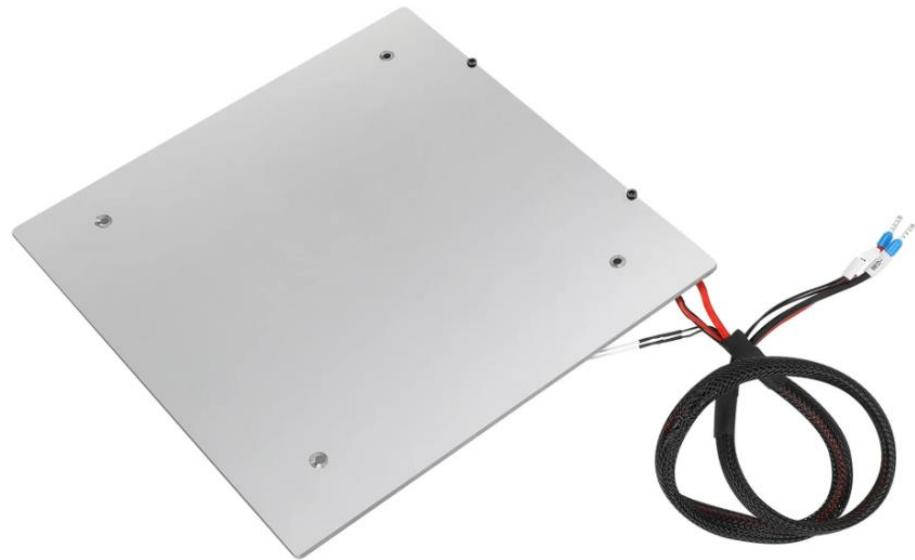


Рис. 1.6. Нагрівальна платформа 3D принтера [13]

### **1.3. Джерела вібрацій у процесі 3D-друку та методи їх досліджень**

Коливання виникають унаслідок взаємодії таких факторів:

Кінематичні імпульси - зміна напрямку руху головки створює короткочасні прискорення, які передаються на платформу.

Механічні дефекти конструкції - люфти, нерівномірний натяг ременів, вібрації крокових двигунів.

Резонансні явища - співпадіння частоти руху та власних коливань платформи або рами [14].

Зовнішні впливи - вібрації столу, підлоги або навколишніх механізмів.  
Для аналізу динаміки 3D-принтерів використовують:

- тривісні акселерометри (MPU6050, MPU9250) для фіксації прискорень у режимі реального часу;
- гіроскопічні сенсори для визначення кутових зміщень;
- спектральний аналіз (FFT) для виділення гармонічних складових сигналу;
- фільтр Калмана для згладжування шуму.

#### 1.4. Аналіз наукових досліджень

Вібрації в процесі 3D-друку є одним із ключових факторів, що визначають якість, точність та стабільність виготовлених виробів. Низка дослідників у світі зосереджує увагу на аналізі джерел коливань, їх впливі на механічні властивості матеріалів, а також на методах зниження амплітуди вібрацій у системах FDM-друку.

У 2021 році Венкеш Агарвал з Університету Дьюка провів дослідження [15], у якому проаналізував, як вібрації впливають на міцність та пружні властивості деталей, надрукованих методом FDM із матеріалів ABS та PETG. У ході експериментів було встановлено, що коливання, які виникають під час друку, здатні провокувати мікро-дефекти між окремими шарами, що згодом знижує модуль пружності й границю міцності готових зразків. Водночас автор відзначає, що вироби з PET-G краще переносять динамічні навантаження, тоді як ABS-деталі виявляють схильність до втомних руйнувань. Загалом дослідження підтверджує, що вібрації принтера під час формування шарів мають суттєвий вплив на якість друку та механічну стабільність готових компонентів.

Подібні результати отримали Мендерес Кам, Хаміт Сарухан і Ахмет Іпекчі (Університет Дюздже) у 2018 році [16]. Дослідники вивчили вплив системних вібрацій 3D-принтера на механічні характеристики деталей, виготовлених методом FDM із матеріалу PET-G. У роботі проведено експерименти з орієнтацією напрямку друку зразків  $45^\circ \times 45^\circ$  та  $60^\circ \times 30^\circ$  і трьома швидкостями друку (3600, 3900 та 4200 мм/хв) (Рис. 1.7.). Вібраційні амплітуди вимірювалися акселерометрами у трьох осях (X, Y, Z) на екструдері та столі принтера.

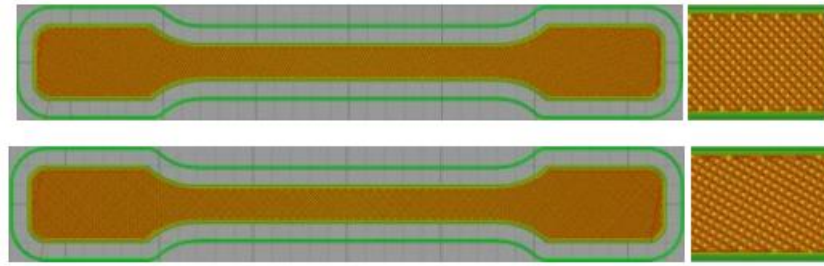


Рис. 1.7. Тестовий зразок з прямолінійною структурою заповнення та двома різними кутами орієнтації:  $45^\circ$  на  $45^\circ$  та  $60^\circ$  на  $30^\circ$

Результати показали, що амплітуда коливань по вісі Y є найбільшою, а мінімальні значення спостерігалися при орієнтації  $60^\circ \times 30^\circ$  та швидкості 3600 мм/хв, що збігається з максимальними показниками міцності та стійкості зразків. Таким чином, автори довели, що геометрична орієнтація шарів та режим друку безпосередньо впливають на вібраційний відгук системи, а контроль цих параметрів дозволяє покращити механічні властивості та зменшити дефекти FDM-виробів.

Jensen N. J., Parker G. G., Blough J. R. в 2023 році [17] провели детальне експериментальне дослідження «Base Vibration Effects on Additive Manufactured Part Quality». У ході модального аналізу встановлено, що найбільш чутливими до коливань є нагрівальна платформа та портал друкуючої головки, які мають власні частоти близько 40 Гц. Вертикальні вібрації основи збільшували шорсткість поверхні деталей на 85 %, тоді як використання пасивної ізоляції зменшило відносний рух між головою та платформою на 93 % і покращило якість поверхні на 16 %. Це дослідження підтвердило, що саме коливання бази (зокрема, нагрівальної платформи) є основним джерелом дефектів при друці.

У роботі Джозеф Дей Россі, Озгур Келес і Вімал Вішванатан «Fused Deposition Modeling with Induced Vibrations: A Study on the Mechanical Characteristics of Printed Parts» (2022 рік) [18] показано, що індуковані вібрації можуть позитивно впливати на структуру шарів, покращуючи їх міжмолекулярне зчеплення. Дослідження на принтері FT-5 R2 довело, що додаткові вібрації не

погіршують геометричну точність, але знижують пористість і підвищують міцність PLA-зразків.

Оптимальними визнано середні частоти збудження, які забезпечують рівномірний розподіл матеріалу без перевантаження механіки принтера.

Катажина Бялас, Анджей Димарек, Томаш Дзітковський з Сілезького технологічного університету в науковій роботі «Impact of 3d printer vibration reduction on the quality of its printout» (2023 рік) [19] дослідили можливості пасивного гасіння вібрацій шляхом конструктивних змін. Автори виконали серію експериментів на принтері з акриловим корпусом і встановили, що заміна підшипників на полімерні, підсилення рами алюмінієвими профілями та використання гумових демпферів дозволяють зменшити амплітуду вібрацій на 50-70 %, що безпосередньо покращує точність друку та якість поверхні.

Кашиф Азер та інші у своєму огляді «A Review on Vibration Characteristics of Additively Manufactured Metal Alloys» (2024 рік) [20] узагальнили вплив параметрів друку (потужності лазера, швидкості, орієнтації шарів) на резонансні частоти та модальні форми металевих зразків. Хоча дослідження стосувалося металевих матеріалів, закономірності зміни власних частот і демпфування аналогічні для полімерних систем FDM, зокрема для платформи, яка виступає як частина вібраційної системи принтера.

## РОЗДІЛ 2

### АПАРАТНА ЧАСТИНА ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 2.1. Апаратна частина

Подальші дослідження спрямовані на вдосконалення методики аналізу динамічних процесів у 3D-принтері, зокрема коливань нагрівальної платформи під час роботи. Метою є створення апаратно-програмного комплексу для вимірювання, цифрової фільтрації та спектрального аналізу сигналів прискорення, що дає змогу виявляти резонансні частоти та оцінювати стабільність руху платформи. Концепція передбачає об'єднання сенсорного вузла на базі акселерометра з мікроконтролером Arduino та програмної обробки в середовищі Python з використанням методів фільтра Калмана та рядів Фур'є.

В експериментальному комплексі використано такі основні компоненти:

1. Arduino Uno - контролер збору та передавання даних;

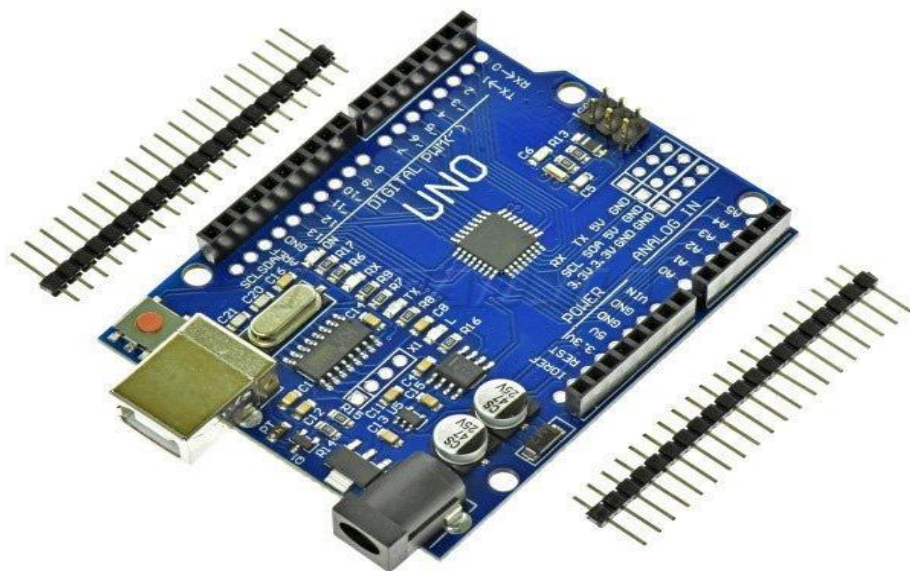


Рис. 2.1. Плата Arduino Uno

Arduino Uno - це універсальна відкрита апаратно-програмна платформа, призначена для швидкої розробки та тестування електронних систем, автоматизованих пристроїв і систем збору даних. Плата базується на 8-бітному мікроконтролері ATmega328P виробництва компанії Microchip Technology [21].

У конструкцію плати входить усе необхідне для зручної роботи з мікроконтролером:

- 14 цифрових входів/виходів, із яких 6 можуть використовуватися як ШІМ-виходи (PWM);
- 6 аналогових входів для підключення датчиків;
- кварцовий резонатор на 16 МГц, що визначає тактову частоту роботи мікроконтролера;
- USB-роз'єм для підключення до комп'ютера та обміну даними;
- роз'єм живлення (VIN/DC-jack) для підключення адаптера постійного струму;
- роз'єм ICSP (In-Circuit Serial Programming) для внутрішньо-схемного програмування;
- кнопка Reset для перезапуску програми без відключення живлення.

Для початку роботи з пристроєм достатньо подати живлення від адаптера AC/DC або акумулятора, або підключити плату до комп'ютера через USB-кабель. При цьому вона автоматично живиться та може бути запрограмована без додаткових пристроїв [22].

Додатково на платі передбачені світлодіодні індикатори живлення та передачі даних, що спрощує діагностику роботи мікроконтролера під час налаштування. Завдяки наявності стандартних роз'ємів і сумісності з більшістю сенсорних модулів Arduino, плата дозволяє швидко створювати прототипи та інтегрувати різні периферійні пристрої. Підтримка завантажувача (bootloader) забезпечує можливість запису програми напряму через USB, без необхідності використання додатково програматора [23].

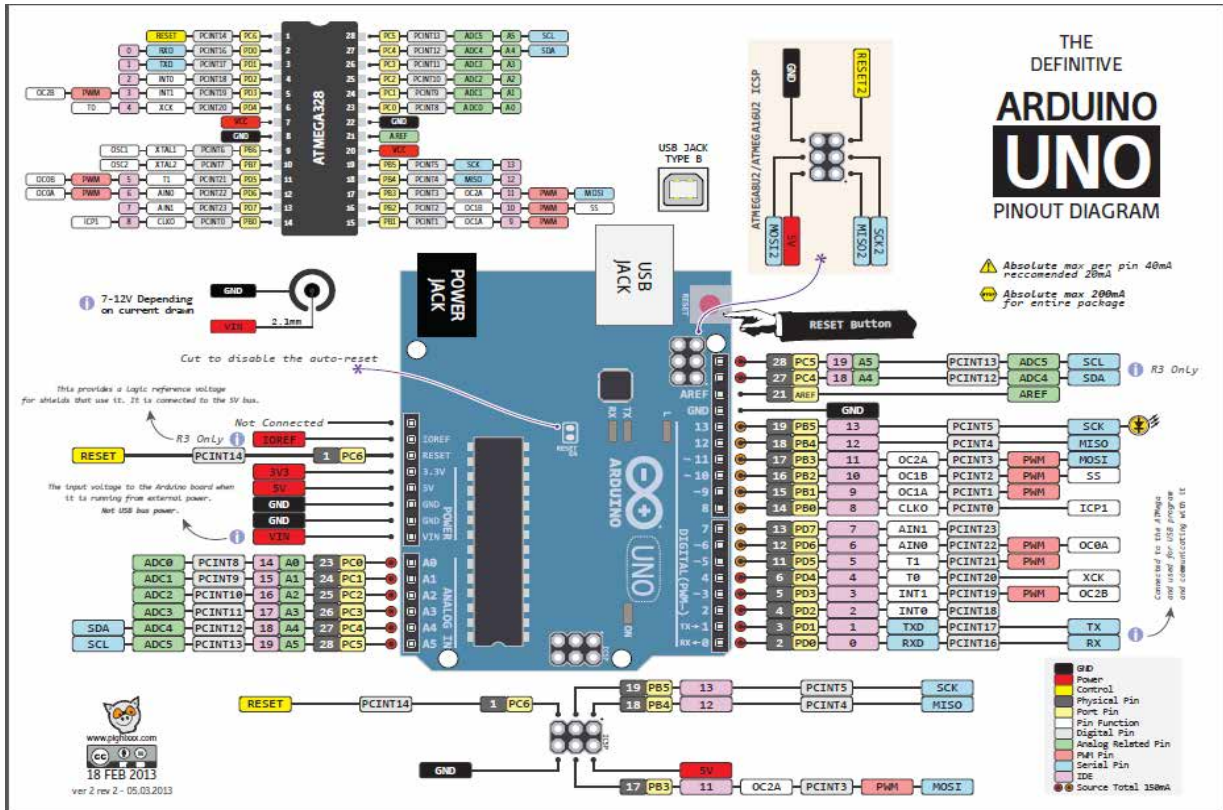


Рис. 2.1. Схема підключень Arduino Uno [24]

- Трьохосьовий акселерометр MPU-9250 - сенсор вимірювання прискорень по осях X, Y, Z.

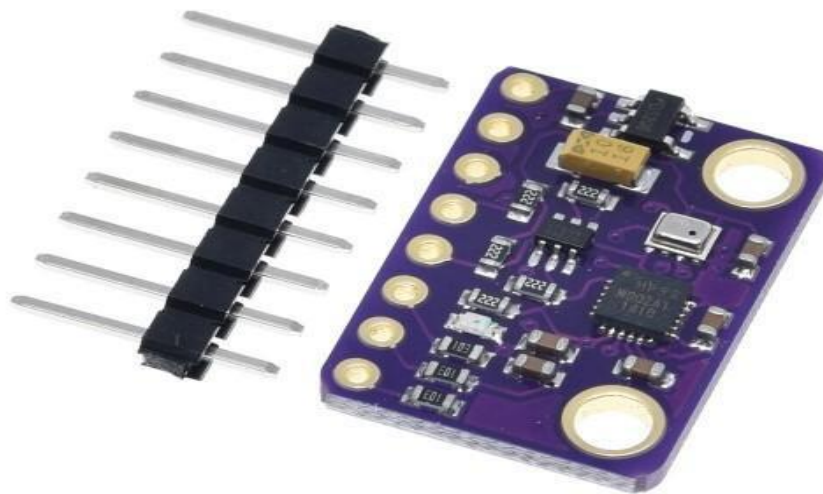


Рис. 2.2. Трьохосьовий акселерометр MPU-9250 [25]

MPU-9250 - це компактний інерційний вимірювальний модуль (IMU) з дев'ятьма ступенями свободи, що поєднує в одному корпусі три взаємодоповнюючі сенсори: акселерометр, гіроскоп і магнітометр. Виробником пристрою є компанія InvenSense (TDK). Сенсор призначений для вимірювання параметрів руху об'єктів у просторі, таких як прискорення, швидкість обертання та орієнтація відносно магнітного поля Землі.

Модуль побудований на основі мікро-електромеханічних систем (MEMS), що забезпечують високу точність вимірювань за низького енергоспоживання. Він має вбудовані аналого-цифрові перетворювачі (АЦП) із розрядністю 16 біт і підтримує цифрові інтерфейси I<sup>2</sup>C та SPI для зв'язку з мікроконтролерами.

Основні діапазони вимірювання:

- прискорення - від  $\pm 2$  g до  $\pm 16$  g;
- кутова швидкість - від  $\pm 250^\circ/\text{с}$  до  $\pm 2000^\circ/\text{с}$ ;
- магнітне поле - до  $\pm 4800$  мікро тесла.

MPU-9250 має вбудовані цифрові фільтри низьких частот (DLPF), FIFO-буфер для накопичення даних, а також термо-датчик для компенсації температурних впливів. Обмін інформацією відбувається через шину I<sup>2</sup>C (до 400 кГц) або SPI (до 1 МГц), що дозволяє використовувати сенсор у системах реального часу [26].

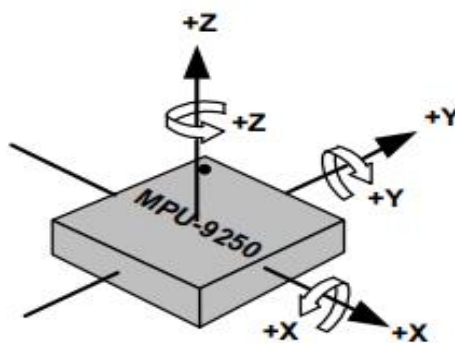


Рис. 2.3. Орієнтація осей чутливості та полярність обертання для акселерометра та гіроскопа [26]

### 3. 3D-принтер з кінематичною схемою CoreXY - об'єкт дослідження;

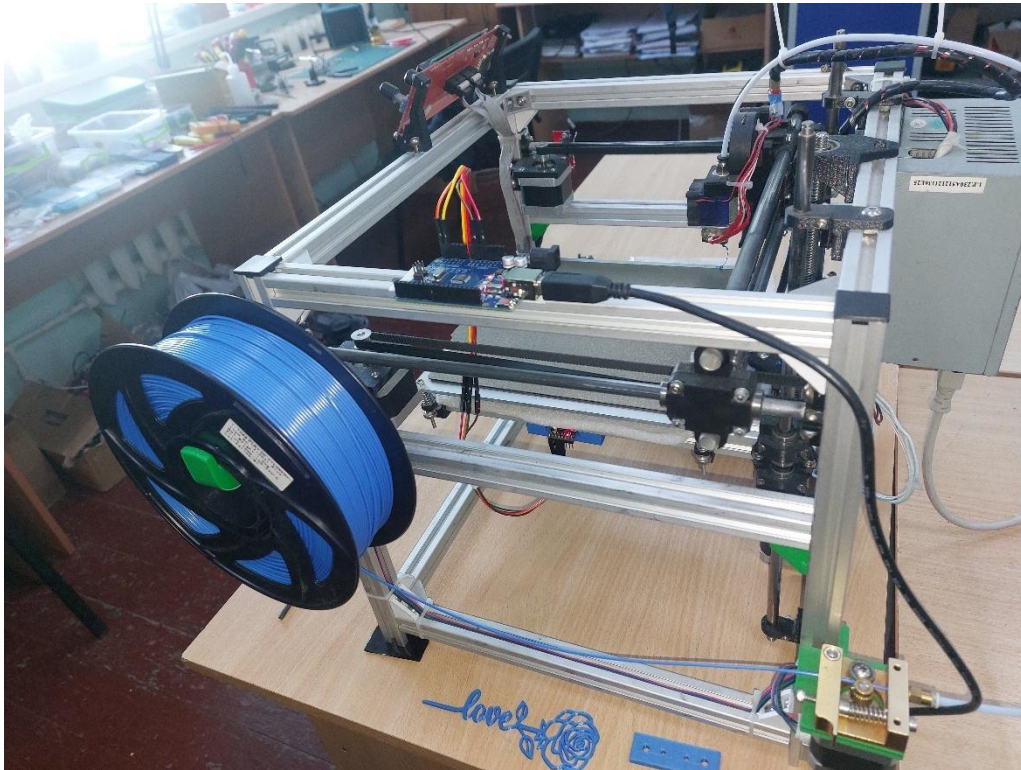


Рис. 2.4. 3D-принтер (об'єкт дослідження)

3D-принтер із кінематикою CoreXY - це пристрій адитивного виробництва, у якому переміщення друкарської головки в площині X-Y здійснюється двома синхронізованими ремінними приводами, що утворюють планарний механізм типу H-bot. У такій системі два стаціонарні крокові двигуни одночасно керують положенням екструдера: при однаковому обертанні двигунів каретка рухається по осі X, а при протилежному - по осі Y. Комбінація рухів забезпечує плавне й точне позиціонування у будь-якому напрямку площини.

Основні переваги кінематики CoreXY - висока швидкість друку, низька маса рухомих елементів, мінімальні люфти та симетричне навантаження на ремені, що зменшує вібрації. Двигуни закріплені нерухомо, рухається лише легка каретка з екструдером, а платформа переміщується незалежно по осі Z. Завдяки жорсткій алюмінієвій рамі та точним лінійним напрямним принтери з кінематикою CoreXY забезпечують високу динамічну стабільність і точність, що робить їх придатними для експериментів з дослідження коливань [27].

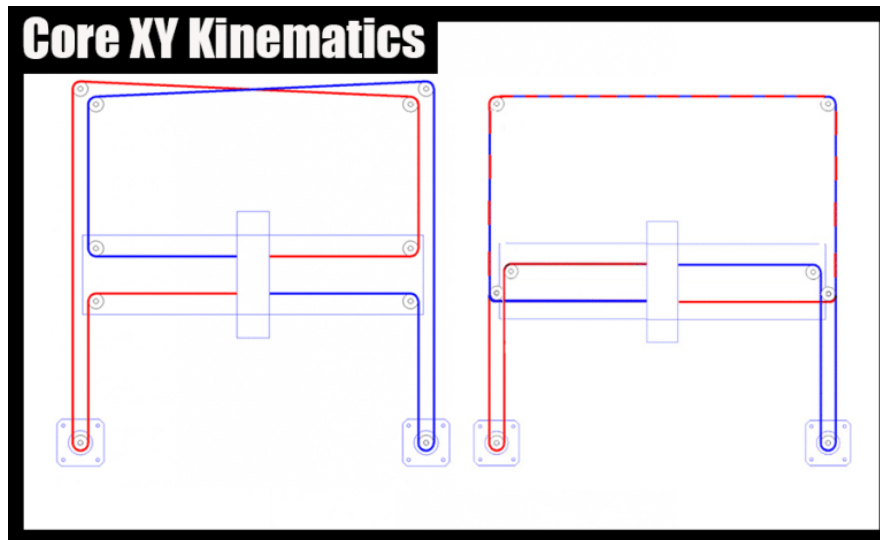


Рис. 2.5. Кінематика CoreXY [27]

4. Інтерфейс I<sup>2</sup>C (лінії SCL, SDA) для зв'язку між сенсором та контролером;

У мікроконтролері Arduino Uno, який використовувався в дослідженні, для зчитування даних із сенсора MPU-9250 задіяно інтерфейс I<sup>2</sup>C (Inter-Integrated Circuit). Це двохпровідний послідовний інтерфейс, що забезпечує синхронний обмін даними між мікроконтролером та периферійними пристроями. У схемі Arduino Uno лінії SDA (дані) та SCL (тактовий сигнал) підключені до аналогових входів A4 і A5 відповідно [28].

Інтерфейс I<sup>2</sup>C дозволяє обмінюватися інформацією з кількома пристроями одночасно, оскільки кожен із них має власну адресу. У цьому проєкті Arduino виступає у ролі ведучого пристрою, який ініціює обмін і зчитує дані з акселерометра та гіроскопа MPU-9250, працюючи з частотою до 400 кГц. Завдяки використанню I<sup>2</sup>C вдалося забезпечити стабільну передачу даних при мінімальній кількості з'єднань, що зробило схему простою, надійною та зручною для проведення експериментів [29].

Окремою перевагою I<sup>2</sup>C є можливість підключення кількох сенсорів на одну спільну шину без ускладнення монтажу, що дозволяє розширювати систему за потреби. MPU-9250 коректно працює на високих швидкостях обміну, тому Arduino без затримок отримує весь необхідний масив даних. Це особливо важливо для дослідження вібрацій, де потрібні стабільні та синхронізовані показники [30].

Такий підхід забезпечив достатню точність вимірювань і створив гнучку основу для подальшого вдосконалення експериментальної установки.

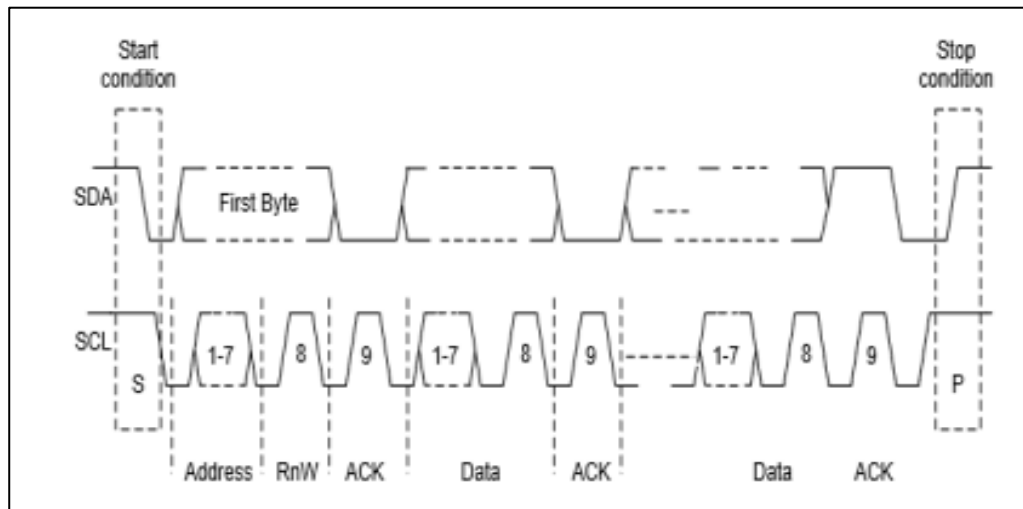


Рис. 2.6. Стан транзакцій даних інтерфейсу I<sup>2</sup>C [28]

5. USB-UART - канал передавання даних на персональний комп'ютер;

Для обміну даними між мікроконтролером Arduino Uno та персональним комп'ютером використовується інтерфейс USB-UART, який забезпечує послідовну передачу інформації у цифровому форматі. На платі Arduino Uno цей канал реалізовано за допомогою окремої мікросхеми перетворювача UART–USB (ATmega16U2 або CH340), що виконує функцію адаптації сигналів стандарту TTL-рівня (5 В) до формату USB [31].

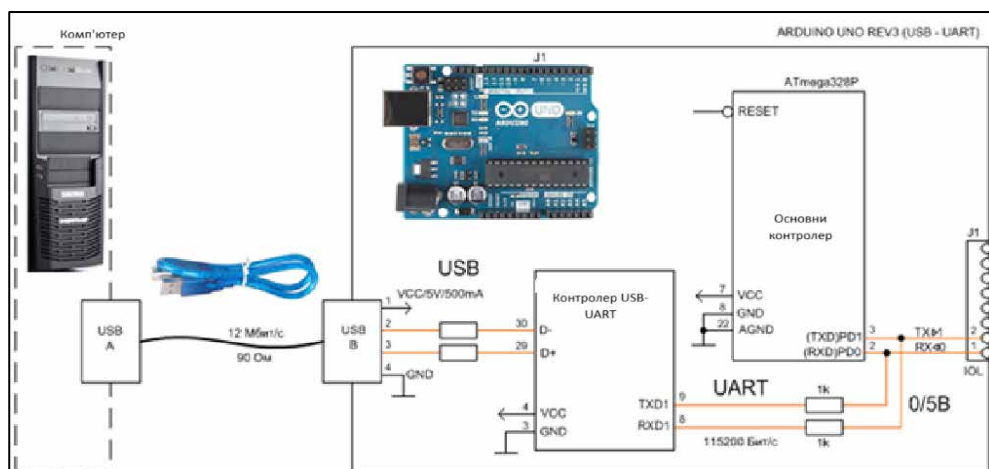


Рис. 2.7. Схема підключення контролера Arduino UNO до комп'ютера через USB порт

Інтерфейс UART забезпечує послідовну передачу даних байтами з фіксованою швидкістю, яка задається параметром baud rate. У даному дослідженні швидкість обміну становила 2 000 000 бод, що дозволило здійснювати передавання поточкових вимірювань у режимі реального часу без втрати вибірок.

Після конвертації UART-сигналів у формат USB дані надходять до комп'ютера, де приймаються програмним забезпеченням через віртуальний послідовний порт COM. Таким чином, USB–UART виступає основним каналом зв'язку між апаратною частиною системи збору даних і програмною частиною їх обробки, забезпечуючи синхронну та надійну передачу інформації від мікроконтролера до комп'ютера.

## 2.2. Програмна частина збору даних

Для організації процесу вимірювання прискорень з інерційного модуля MPU-9250 була розроблена програмна частина, що складається з двох компонентів - вбудованої програми для мікроконтролера Arduino Uno та комп'ютерного скрипта для приймання даних. Arduino-програма забезпечує ініціалізацію сенсора через інтерфейс I<sup>2</sup>C, опитування з частотою 1 кГц та передавання вимірених значень у послідовний порт у текстовому форматі [32, 33].

```

1  #include <Wire.h>
2  #include <MPU9250.h>
3
4  MPU9250 mpu;
5
6  const unsigned long interval = 1000; // 1000 мкс = 1000 Гц
7  unsigned long prevTime = 0;
8
9  void setup() {
10     Wire.begin();
11     Wire.setClock(400000); // I2C на 400 кГц для пришвидшення
12
13     Serial.begin(2000000); // Максимальна швидкість передачі
14
15     if (!mpu.setup(0x68)) {
16         Serial.println("MPU9250 не знайдено!");
17         while (1);
18     }
19
20     //delay(100); // Невелика затримка для стабілізації
21 }
22
23 void loop() {
24     unsigned long currentTime = micros();
25     if (currentTime - prevTime >= interval) {
26         prevTime = currentTime;
27
28         mpu.update(); // Оновлення всіх сенсорних даних
29
30         float accX = mpu.getAccX();
31         float accY = mpu.getAccY();
32         float accZ = mpu.getAccZ();
33
34         Serial.print("{");
35         Serial.print(accX, 2);
36         Serial.print(" ");

```

Рис. 2.8. Візуалізація розробленого коду в середовищі Arduino IDE

На комп'ютері дані приймаються спеціально створеним Python-скриптом, який виконує зчитування інформації через USB-інтерфейс, перевірку структури отриманих рядків і збереження результатів у файл для подальшої обробки [34].

```
import serial
import keyboard
import time

SERIAL_PORT = 'COM4'
BAUD_RATE = 2000000
READING_DURATION = 5 * 60 # або 1 * 60 для 1 хвилини

# Відкриваємо послідовний порт
ser = serial.Serial(SERIAL_PORT, BAUD_RATE, timeout=1)

with open("datalogAcces_тест_6_0.00_12042025_700Hz_5m.txt", "w") as f:
    start_time = time.time()
    last_time = start_time
    line_count = 0

    while time.time() - start_time < READING_DURATION:
        if keyboard.is_pressed('q'):
            print("Зчитування зупинено користувачем.")
            break

        try:
            line = ser.readline().decode('utf-8', errors='ignore').strip()
            if line and any(char in line for char in "(){}[]"):
                f.write(line + "\n")
                line_count += 1

            # Виводити FPS раз на секунду
            if time.time() - last_time >= 1.0:
                print(f"FPS: {line_count}")
                line_count = 0
                last_time = time.time()
        except UnicodeDecodeError as e:
            print(f"Помилка декодування: {e}")
```

Рис. 2.9. Візуалізація розробленого коду в середовищі Python IDLE

Такий підхід дозволяє організувати надійний збір експериментальних даних у режимі реального часу та створює основу для наступних етапів аналізу - фільтрації сигналів, визначення частотних характеристик і статистичної обробки результатів. Це значно полегшує подальшу роботу з великими обсягами вимірювань. Також у скрипті передбачена можливість оперативної візуалізації фрагментів сигналу, що дає змогу ще під час експерименту контролювати якість зчитування та за потреби коригувати умови дослідження [35, 36]. Така гнучкість робить систему збору даних зручною для ітеративних експериментів і підвищує достовірність отриманих результатів.

## РОЗДІЛ 3

### ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 3.1. Програма та методика дослідження

Експериментальне дослідження виконано з метою визначення характеру коливань нагрівальної платформи 3D-принтера під час роботи та виявлення резонансних частот, що можуть впливати на якість друку. Дослідження ґрунтується на інерційному вимірюванні прискорень платформи у трьох взаємно перпендикулярних напрямках (X, Y, Z) з подальшою цифровою обробкою сигналів.

Методика передбачає такі основні етапи:

1. Встановлення сенсора та підготовка вимірювальної системи.
2. Реєстрація експериментальних даних.
3. Передача даних до комп'ютера та їх збереження.
4. Первинна обробка сигналів та фільтрація шумів.
5. Спектральний аналіз коливань.
6. Повторне дослідження вібрацій після модернізації 3D-принтера.
7. Порівняння результатів досліджень.

#### 3.2. Встановлення сенсора та підготовка вимірювальної системи

Акселерометр закріплювався безпосередньо на рамі нагрівальної платформи через пластиковий кронштейн який був спроектований та роздрукований відповідно до розмірів модуля (Рис. 3.1), що забезпечував жорстке з'єднання та мінімізацію паразитних вібрацій. Підключення сенсора здійснювалось через шину I<sup>2</sup>C з частотою обміну 400 кГц. Потік даних передавався до комп'ютера з використанням послідовного порту на швидкості 2 Мбіт/с, що дозволяло досягти частоти вибірки близько 600–700 Гц.

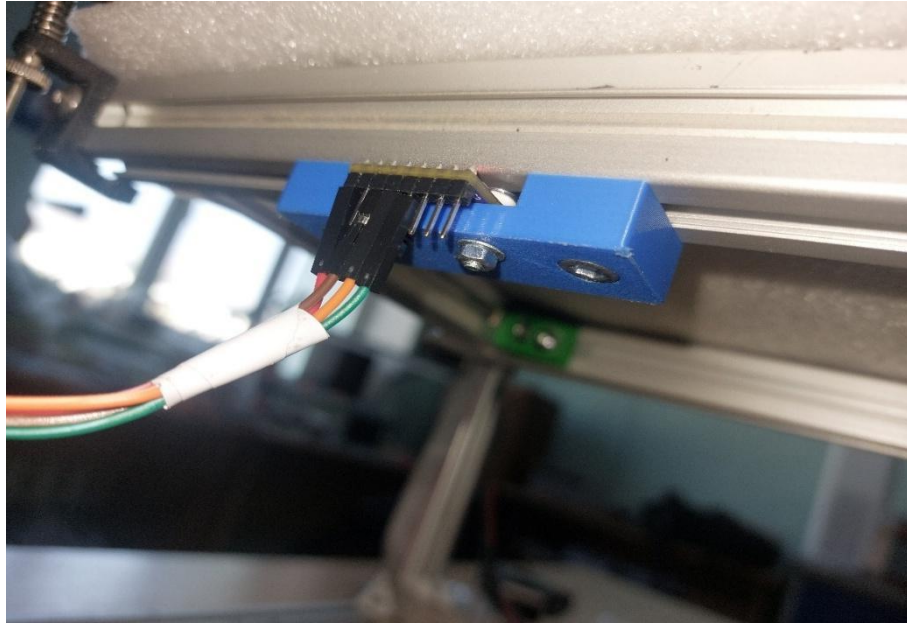


Рис. 3.1 Кріплення акселерометра на нагрівальну платформу 3D-принтера

На рисунку 3.2 зображено об'єкт дослідження – 3D-принтер. Плата Arduino закріплена безпосередньо на алюмінієвому каркасі принтера за допомогою пластикового кронштейна, виготовленого методом 3D-друку. Кронштейн розташований у передній частині конструкції (праворуч від робочої області), що забезпечує жорстке фіксування плати під час роботи принтера, зручний доступ до інтерфейсу USB для підключення до комп'ютера та коротку довжину сигнальних проводів до сенсора, що мінімізує паразитні наведення.

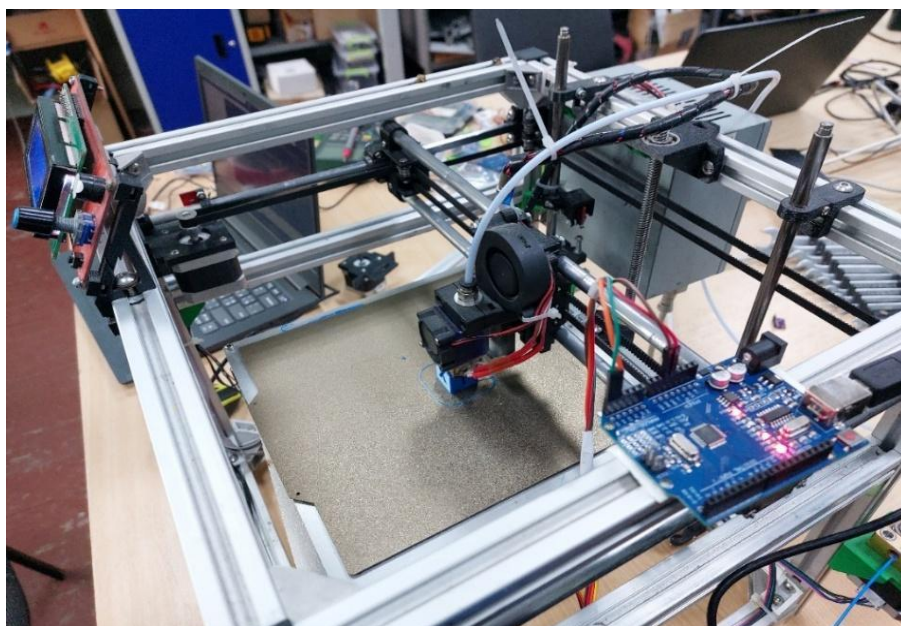


Рис. 3.2. Кріплення плати Arduino на раму 3D-принтера

### 3.3. Збір експериментальних даних

Для реалізації процесу збору даних було створено написано код на основі бібліотечного прикладу MPU9250, який постачається разом із бібліотекою <MPU9250.h> для середовища Arduino IDE [33].

Базовий приклад було суттєво модифіковано з метою підвищення частоти опитування сенсора до 1000 Гц, формування вихідного пакету даних у форматі {ax, ay, az} для подальшого парсингу у Python, стабілізації ініціалізації сенсора при старті експерименту.

```

1  #include <Wire.h>
2  #include <MPU9250.h>
3
4  MPU9250 mpu;
5  c:\РОБОТИ\РОБОТИ\ДИПЛОМНА РОБОТА\Дані Дослідження\Тези\Дослідження 09042025\Accel_test_MPU9250\Accel_test_MPU9250.ino
6  const unsigned long interval = 1000; // 1000 мкс = 1000 Гц
7  unsigned long prevTime = 0;
8
9  void setup() {
10     Wire.begin();
11     Wire.setClock(400000); // I2C на 400 кГц для пришвидшення
12
13     Serial.begin(2000000); // Максимальна швидкість передачі
14
15     if (!mpu.setup(0x68)) {
16         Serial.println("MPU9250 не знайдено!");
17         while (1);
18     }
19
20     //delay(100); // Невелика затримка для стабілізації
21 }
22
23 void loop() {
24     unsigned long currentTime = micros();
25     if (currentTime - prevTime >= interval) {
26         prevTime = currentTime;
27
28         mpu.update(); // Оновлення всіх сенсорних даних
29
30         float accX = mpu.getAccX();
31         float accY = mpu.getAccY();
32         float accZ = mpu.getAccZ();
33
34         Serial.print("{");
35         Serial.print(accX, 2);
36         Serial.print(",");
37         Serial.print(accY, 2);
38         Serial.print(",");
39         Serial.print(accZ, 2);
40         Serial.println("}");
41     }
42 }
43

```

Рис. 3.3. Скетч розроблений в середовищі Arduino IDE

Перед початком вимірювань на 3D-принтері було запущено на друк тестову модель “Тестовий куб”, під час якої розпочалась реєстрація даних (Рис. 3.4). Цей режим забезпечує циклічні переміщення друкарської головки по вісях  $X$  та  $Y$  із поступовим підйомом по осі  $Z$ , створюючи характерні динамічні навантаження на платформу, необхідні для аналізу її вібраційного стану.

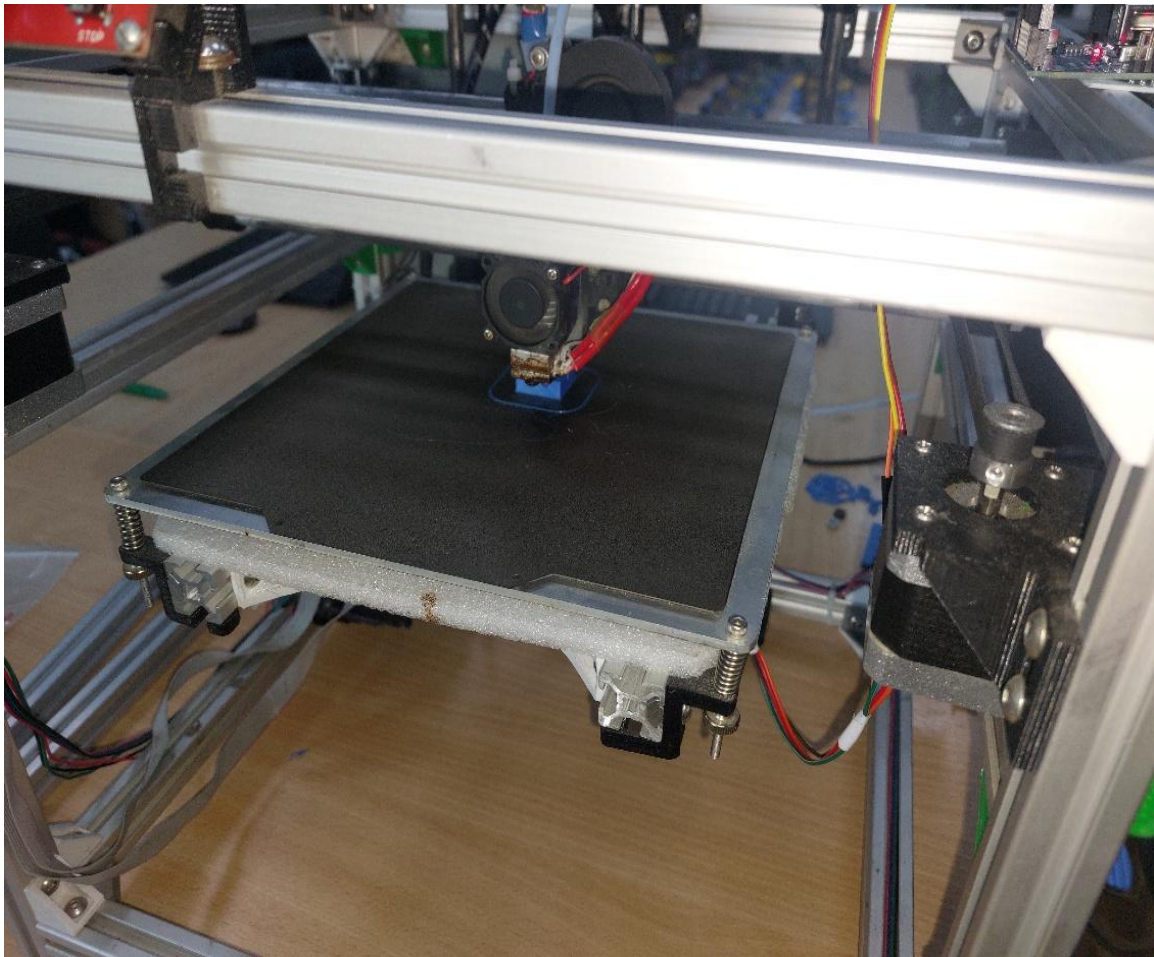


Рис. 3.4. Друк тестової моделі “Тестовий куб”

### **3.4. Передача даних до комп’ютера та їх збереження.**

Дані з акселерометра оброблялися в реальному часі мікроконтролером і передавалися через послідовний порт до персонального комп’ютера, в якому розроблений Python-скрипт (Рис. 3.5), який зчитував потік інформації, контролював тривалість експерименту і зберігав виміряні значення у файл формату \*.txt.

```

import serial
import keyboard
import time

SERIAL_PORT = 'COM4'
BAUD_RATE = 2000000
READING_DURATION = 5 * 60 # або 1 * 60 для 1 хвилини

# Відкриваємо послідовний порт
ser = serial.Serial(SERIAL_PORT, BAUD_RATE, timeout=1)

with open("datalogAcces_тест_6_0.00__12042025_700Hz_5m.txt", "w") as f:
    start_time = time.time()
    last_time = start_time
    line_count = 0

    while time.time() - start_time < READING_DURATION:
        if keyboard.is_pressed('q'):
            print("Зчитування зупинено користувачем.")
            break

        try:
            line = ser.readline().decode('utf-8', errors='ignore').strip()
            if line and any(char in line for char in "(){}[]"):
                f.write(line + "\n")
                line_count += 1

            # Виводити FPS раз на секунду
            if time.time() - last_time >= 1.0:
                print(f"FPS: {line_count}")
                line_count = 0
                last_time = time.time()
        except UnicodeDecodeError as e:
            print(f"Помилка декодування: {e}")

```

Рис. 3.5. Python-скрипт для зчитування інформації з послідовного порту

Попередньо в програмному коді Arduino було задано частоту опитування сенсора 1000 Гц, а у Python-скрипті відповідно налаштовано прийом із тією ж швидкістю. Однак під час експерименту, проаналізувавши показник FPS, встановлено, що фактична частота вибірки становила близько 570–600 Гц, тобто приблизно 60 % від заданої теоретичної величини.

Таким чином, досягнута частота 570–600 Гц є максимальною стабільною для апаратної платформи Arduino UNO при роботі з текстовими даними у форматі {ax, ay, az}.

У результаті експерименту було сформовано текстовий файл (Рис. 3.6) тривимірних вимірів обсягом 171 348 рядків, кожен із яких містив миттєві значення прискорень по трьох осях у часовій послідовності. Ці дані стали основою для подальшої цифрової обробки, фільтрації та спектрального аналізу.

```
{0.081, 1.190, 8.907}
{0.381, 0.402, 9.130}
{0.400, -0.129, 9.707}
{-0.259, 0.781, 9.697}
{-0.719, 1.142, 9.654}
{-0.716, 1.097, 9.494}
{0.048, 0.795, 9.539}
{0.575, 0.333, 8.634}
{0.089, 0.716, 8.993}
{0.115, 0.551, 8.869}
{0.206, 0.091, 8.457}
{0.125, 0.069, 9.235}
{-0.433, 0.501, 9.793}
{-0.663, 0.704, 9.918}
{-0.584, 1.142, 8.744}
{-0.014, 0.850, 8.612}
{0.184, 0.481, 9.403}
{0.177, 0.350, 8.742}
{-0.232, 0.261, 8.500}
```

Рис. 3.6 Текстовий файл з результатами вимірів акселерометра

### 3.5. Первинна обробка сигналів та фільтрація шумів

Після завершення експерименту отримані дані прискорень було піддано первинній цифровій обробці з метою усунення випадкових шумів, пов'язаних із роботою електронних компонентів, механічними мікро коливаннями та електромагнітними наводками від нагрівального елементу платформи.

Записані у форматі {ax, ay, az} дані було зчитано у середовище Python 3.12 із використанням бібліотек NumPy, re та pandas. Кожен рядок містив три числові значення, що відповідали проекціям прискорення на осі X, Y та Z. Після розбору тексту, дані були перетворені у масив, що дозволило виконувати обчислення над кожною віссю окремо [37].

Для попереднього аналізу з формату {ax, ay, az} було сформовано масив:

$$A = \begin{pmatrix} a_{x\ 1} & a_{y\ 1} & a_{z\ 1} \\ a_{x\ 2} & a_{y\ 2} & a_{z\ 2} \\ a_{x\ n} & a_{y\ n} & a_{z\ n} \end{pmatrix}, \quad (3.1)$$

де  $n$  — кількість вимірювань (171 348).

На основі тривалості експерименту  $T=300$  с визначалась фактична частота дискретизації:

$$f_s = \frac{n}{T} = 571,16 \text{ Гц.} \quad (3.2)$$

Отримане значення відповідало реальній швидкості зчитування даних із сенсора, визначеній під час тестування.

Для забезпечення достовірної оцінки реальних коливальних процесів, зафіксованих акселерометром, у роботі використано фільтр Калмана, який є класичним методом оптимальної фільтрації сигналів у динамічних системах із випадковими шумами. Метод був запропонований Рудольфом Калманом у 1960 році і донині широко застосовується в системах навігації, керування, робототехніці та обробці сенсорних даних [38].

Загальна лінійна модель системи описується рівняннями стану:

$$x_k = Fx_{k-1} + Bu_{k-1} + w_{k-1} \quad (3.3)$$

$$z_k = Hx_k + v_k \quad (3.4)$$

де  $x_k$  - вектор стану системи на кроці

$z_k$  - вектор вимірювань;

$F$  - матриця переходу стану;

$B$  - матриця керування;

$u_{k-1}$  - керуючий вплив;

$H$  - матриця спостереження;

$w_{k-1}$  і  $v_k$  - випадкові шуми процесу та вимірювання відповідно.

Передбачається, що шуми є некорельованими білими процесами з нульовим середнім значенням:

$$E[w_k] = 0, E[v_k] = 0 \quad (3.5)$$

та відомими матрицями ко-варіації:

$$E[w_k w_k^T] = Q, E[v_k v_k^T] = R \quad (3.6)$$

Алгоритм складається з двох послідовних етапів - прогнозування та корекції. На кожному кроці  $k$  обчислюються прогнозовані значення стану та похибки, після чого вони уточнюються на основі нового вимірювання.

Прогнозування:

$$\widehat{x}_k = F\widehat{x}_{k-1} + Bu_{k-1} \quad (3.7)$$

$$P_k^- = FP_{k-1}F^T + Q \quad (3.8)$$

де:  $\widehat{x}_k$  - прогнозована оцінка стану системи;

$F$  - матриця переходу стану;

$B$  - матриця керування;

$u_{k-1}$  - вхідний вплив;

$P_k^-$  - прогнозована матриця коваріації помилки оцінки;

$Q$  - матриця коваріації шуму процесу.

Корекція:

$$K_k = P_k^- H^T (HP_k^- H^T + R)^{-1} \quad (3.9)$$

$$\widehat{x}_k = \widehat{x}_k^- + K_k(z_k - H\widehat{x}_k^-) \quad (3.10)$$

$$P_k = (I - K_k H)P_k^- \quad (3.11)$$

де:  $K_k$  - коефіцієнт (підсилення) Калмана;

$H$  - матриця спостереження;

$R$  - матриця коваріації шуму вимірювання;

$I$  - одинична матриця.

Важливим етапом налаштування фільтра є вибір матриць  $Q$  і  $R$ :

$Q$  - характеризує невизначеність моделі системи, чим більша, тим фільтр швидше реагує на зміни;

$R$  - описує рівень шуму вимірювання (чим більша, тим сильніше згладжується сигнал).

У межах експерименту емпіричним шляхом для даних акселерометра підібрано параметри:

$$Q = 1 \times 1010^{-4}, \quad R = 0.005,$$

Для реалізації фільтрації сигналів на основі загальної лінійної моделі створено програмний код у середовищі Python. Програмна структура передбачає створення окремого класу KalmanFilter1D (Рис. 3.7), який реалізує базові етапи прогнозування, обчислення коефіцієнта Калмана, корекції оцінки та оновлення помилки. Алгоритм функціонує рекурсивно, тобто для кожного нового виміру сигналу використовується попередня оцінка стану, що дозволяє оперативно реагувати на зміну динаміки коливань [39, 40].

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import re

#фільтр Калмана 1D
class KalmanFilter1D:
    def __init__(self, q=1e-5, r=1e-2, initial_estimate=0.0, initial_error=1.0):
        self.q = q # Шум процесу
        self.r = r # Шум вимірювання
        self.x = initial_estimate # Початкове значення
        self.p = initial_error # Початкова помилка

    def filter(self, data):
        result = []
        for z in data:
            self.p = self.p + self.q # Прогноз помилки
            k = self.p / (self.p + self.r) # Коефіцієнт Калмана
            self.x = self.x + k * (z - self.x) # Оновлення оцінки
            self.p = (1 - k) * self.p # Оновлення помилки
            result.append(self.x)
        return np.array(result)
```

Рис. 3.7. Реалізація фільтра Калмана в середовищі Python

Після завершення фільтрації отримані результати були візуалізовані у вигляді трьох графіків - для кожної осі окремо (Рис. 3.8). На кожному з них синім

або зеленим кольором позначено сирі дані, а червоним - відфільтровані значення після обробки фільтром Калмана.

Дані акселерометра MPU9250 з фільтрацією Калмана

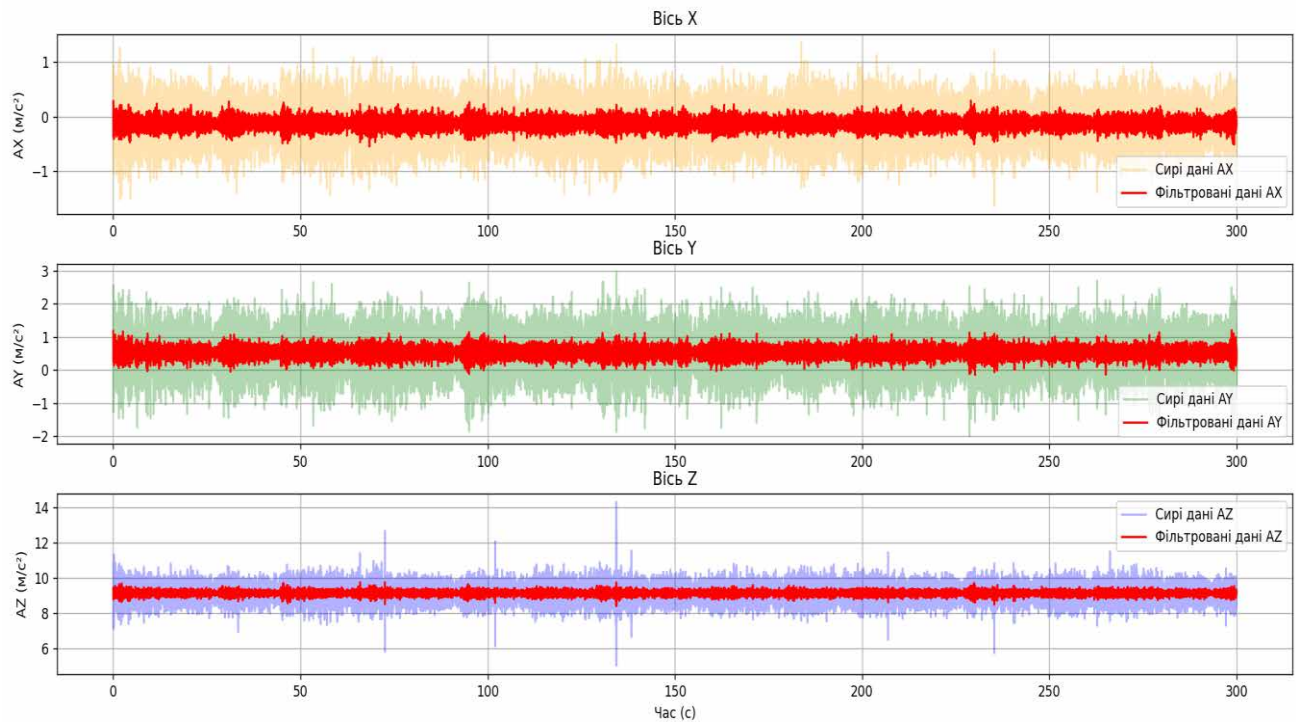


Рис. 3.8. Графіки фільтрації вхідних даних

Розглянемо графіки детальніше, шляхом приближення інтервалу дослідження з 300 секунд до 2-х секунд. На графіках чітко спостерігається зменшення амплітуди високочастотних шумів і виділення основної періодичної компоненти коливань, що відповідає реальному руху платформи. Після фільтрації сигналів забезпечується рівномірна зміна прискорення без імпульсних стрибків, характерних для цифрових перешкод сенсора. Таке локальне масштабування графіків дозволяє точніше оцінити структуру сигналу та переконатися, що фільтр Калмана не спотворює фізичну поведінку системи, а лише приглушує шум. Добре помітно, що відфільтрована крива повторює загальну форму вихідного сигналу, але водночас є значно плавнішою та стабільнішою. Це підтверджує коректність налаштування параметрів фільтра та його ефективність при аналізі швидкоплинних коливальних процесів.

## Дані акселерометра MPU9250 з фільтрацією Калмана

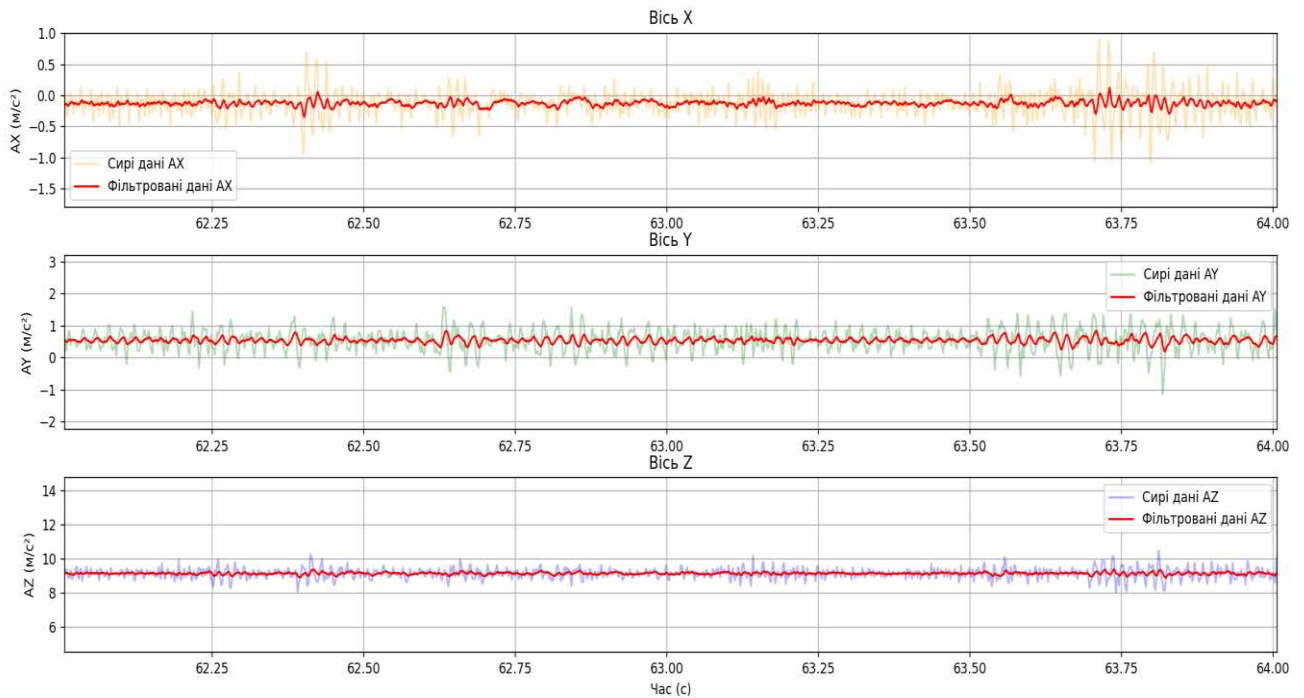


Рис. 3.9. Фрагмент експериментальних даних прискорень від 62 до 64 секунд експерименту по осях X, Y, Z

На верхньому графіку по осі X (Рис. 3.10), видно, що “сирій” сигнал має значну кількість дрібних коливань і випадкових викидів амплітуди до  $\pm 0.5$  м/с<sup>2</sup>. Після фільтрації червоною лінією видно стабільний тренд із плавними змінами прискорення, що свідчить про ефективне пригнічення високочастотного шуму. Основна динаміка коливань платформи по осі X має малу амплітуду, що вказує на високу жорсткість напрямку руху рами.

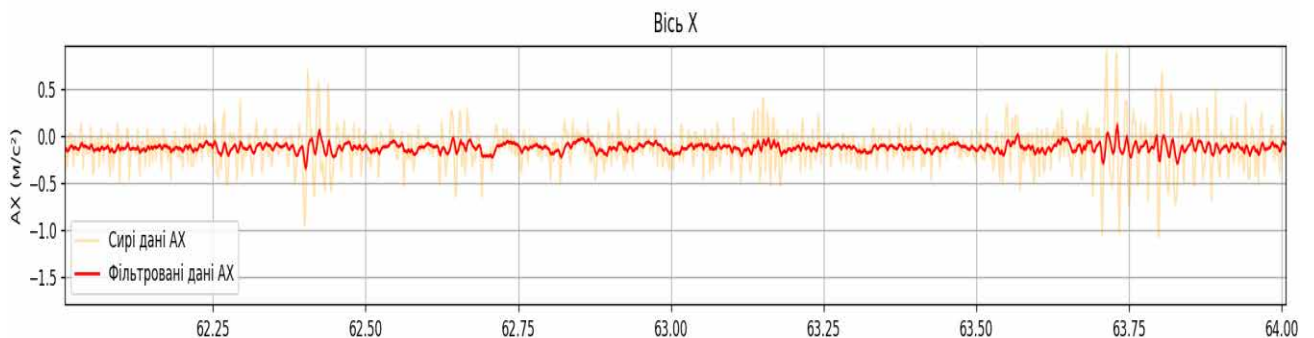


Рис. 3.10. Графік по осі X

На середньому графіку (вісь Y) спостерігаються більш виражені періодичні коливання (Рис. 3.11.), пов'язані з рухом друкарської головки вздовж осі Y під час формування шару. Сирий сигнал містить хаотичні високочастотні компоненти, але після фільтрації залишаються чітко виражені періодичні зміни із середньою амплітудою близько  $1 \text{ м/с}^2$ . Фільтр Калмана забезпечив збереження основної форми сигналу при одночасному згладжуванні випадкових коливань, що дозволяє точно визначати циклічну поведінку платформи.

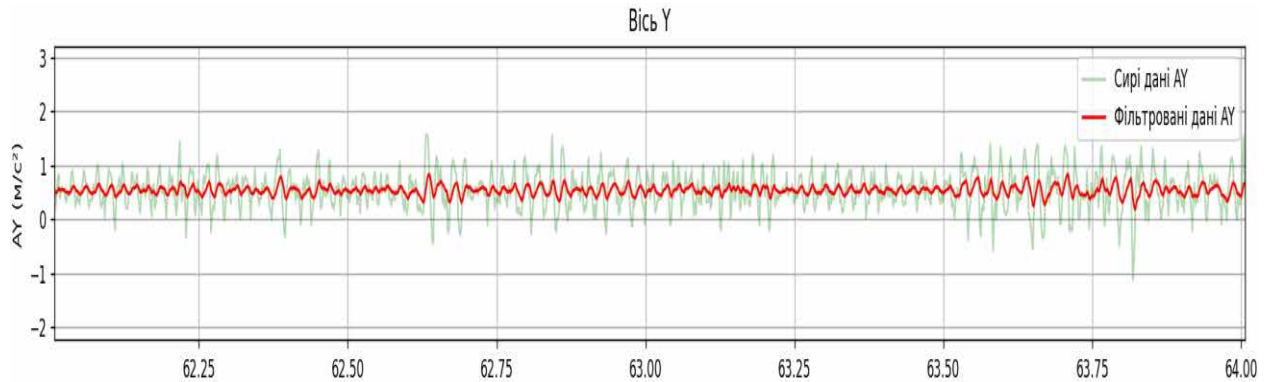


Рис. 3.11. Графік по осі Y

На нижньому графіку (вісь Z) видно сталу компоненту прискорення близько  $9,8 \text{ м/с}^2$ , яка відповідає впливу сили тяжіння (Рис. 3.12). Невеликі флуктуації навколо цієї величини ( $\pm 0.5 \text{ м/с}^2$ ) свідчать про незначні вертикальні коливання нагрівальної платформи, що не перевищують допустимого рівня. Після фільтрації шумові складові значно зменшуються і графік набуває плавного вигляду з незначними відхиленнями, що є характерним для стабільного механічного стану.

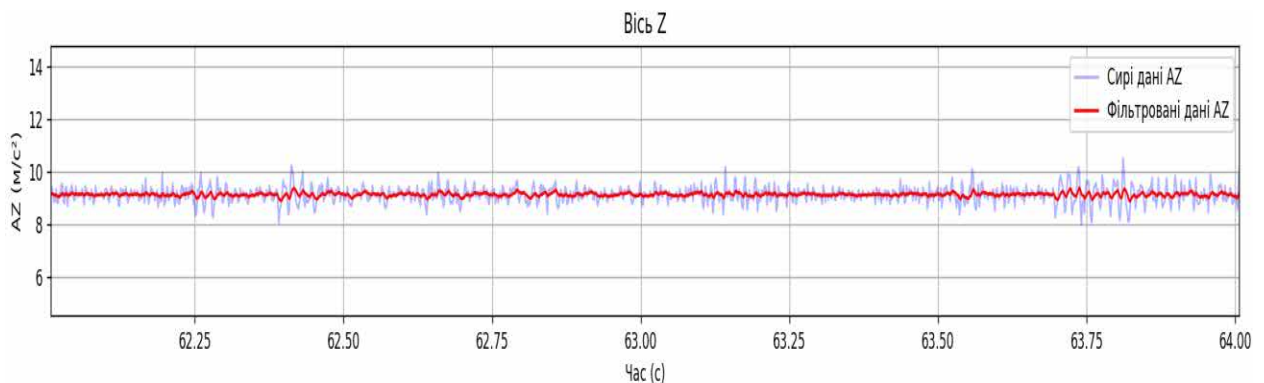


Рис. 3.12. Графік по осі Z

У межах 2-секундного інтервалу (Рис. 3.9) чітко видно, що фільтр Калмана ефективно пригнічує випадкові високочастотні коливання на всіх трьох осях та зберігає реальну форму корисного сигналу. Таким чином, застосування фільтра дозволяє отримати якісний сигнал, придатний для подальшого спектрального аналізу.

### 3.6. Спектральний аналіз коливань

Після фільтрації сигналів фільтром Калмана наступним етапом дослідження було виконано спектральний аналіз для визначення частотних характеристик коливань нагрівальної платформи 3D-принтера.

Метою аналізу є виявлення домінуючих частот, що відповідають періодичним коливанням механічних елементів, та оцінка амплітудного спектра у кожному напрямку простору.

Для дослідження динамічних процесів такого типу зручно перейти від часової області до частотної, де кожна гармонійна складова сигналу характеризує окремий режим вібрації системи. Основою спектрального аналізу є інтегральне перетворення Фур'є [41], яке дозволяє перейти від функції часу до її спектрального представлення:

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt \quad (3.12)$$

Зворотне перетворення дає можливість відновити сигнал з його частотного спектра:

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega)e^{j\omega t} d \quad (3.13)$$

Таким чином, будь-який сигнал можна подати як суму гармонійних коливань різних частот, амплітуд і фаз.

В експерименті дані акселерометра отримуються у вигляді дискретних відліків з частотою дискретизації. Згідно з теоремою Найквіста–Шеннона, щоб

сигнал відтворювався без спотворень, частота дискретизації повинна бути щонайменше удвічі більшою за максимальну частоту коливань [42]:

$$f_s \geq 2f_{max} \quad (3.14)$$

Половина частоти дискретизації називається частотою Найквіста:

$$f_N = \frac{f_s}{2} \quad (3.15)$$

Це гранична частота, до якої можливо достовірно аналізувати спектр сигналу.

Для обробки експериментальних даних застосовується швидке перетворення Фур'є, яке математично описується алгоритмом Кулі-Тьюкі [43]:

$$X[k] = E[k] + W_N^k \times O[k], \quad (3.16)$$

$$k = 0, 1, \dots, \frac{N}{2} - 1, \quad (3.17)$$

$$X\left[k + \frac{N}{2}\right] = E[k] - W_N^k \times O[k], \quad (3.18)$$

де:  $N$  - загальна кількість дискретних відліків сигналу;

$k$  - індекс спектральної (частотної) складової,  $k = 0, 1, \dots, \frac{N}{2} - 1$ ;

$X[k]$  - комплексні спектральні коефіцієнти на частоті  $k$ ;

$E[k]$  - значення ДПФ, обчислені для підпоследовності парних відліків сигналу;

$O[k]$  - значення ДПФ, обчислені для підпоследовності непарних відліків сигналу;

У ході експерименту прискорення, виміряні акселерометром MPU9250, було попередньо відфільтровано фільтром Калмана для зменшення шуму. Після

цього до фільтрованих даних застосовано швидке перетворення Фур'є (FFT) [44], а саме алгоритм Кулі-Тьюкі [45], подальші розрахунки проводились у Python з використанням бібліотеки NumPy, функції `np.fft.fft` [46] (Рис. 3.13.).

```

85
86 #Реалізація FFT
87 def calculate_fft(signal, sampling_rate):
88     n = len(signal)
89     fft_result = np.fft.fft(signal)
90     fft_amplitude = 2.0 / n * np.abs(fft_result) # Нормалізація амплітуди
91     frequencies = np.fft.fftfreq(n, d=1/sampling_rate)
92     mask = frequencies > 0 # Показуємо тільки додатні частоти
93     return frequencies[mask], fft_amplitude[mask]
94
95 #FFT для фільтрованих даних
96 freq_x, fft_x = calculate_fft(filtered_x, sampling_rate)
97 freq_y, fft_y = calculate_fft(filtered_y, sampling_rate)
98 freq_z, fft_z = calculate_fft(filtered_z, sampling_rate)
99
100 #Побудова спектру FFT
101 plt.figure(figsize=(14, 8))
102
103 plt.plot(freq_x, fft_x, label='X-вісь')
104 plt.plot(freq_y, fft_y, label='Y-вісь')
105 plt.plot(freq_z, fft_z, label='Z-вісь')
106
107 plt.xlabel('Частота [Гц]')
108 plt.ylabel('Амплітуда [м/с²]')
109 plt.title('Частотний спектр коливань по осях X, Y, Z після фільтра Калмана')
110 plt.legend()
111 plt.grid(True)
112 plt.xlim(0, sampling_rate/2) # До половини частоти дискретизації
113 plt.show()
114

```

Рис. 3.13. Реалізація перетворення Фур'є в середовищі Python

Застосування FFT дозволило визначити частоти, на яких зосереджена основна енергія коливань платформи, а також виявити можливі резонансні піки. Такий підхід дає змогу побачити структуру сигналу не лише у часовій, а й у частотній області, що особливо важливо для подальшого аналізу впливу механічних вібрацій на якість 3D-друку. Завдяки фільтрації Калмана отримані частотні характеристики не містять зайвих високочастотних спотворень, що забезпечує більш точну інтерпретацію спектру та надійність подальших висновків.

Отриманий спектр дозволив визначити резонансні частоти платформи як пікові значення амплітуди у частотній області.

На основі відфільтрованих даних було побудовано амплітудно-частотний спектр коливань (Рис. 3.14.).

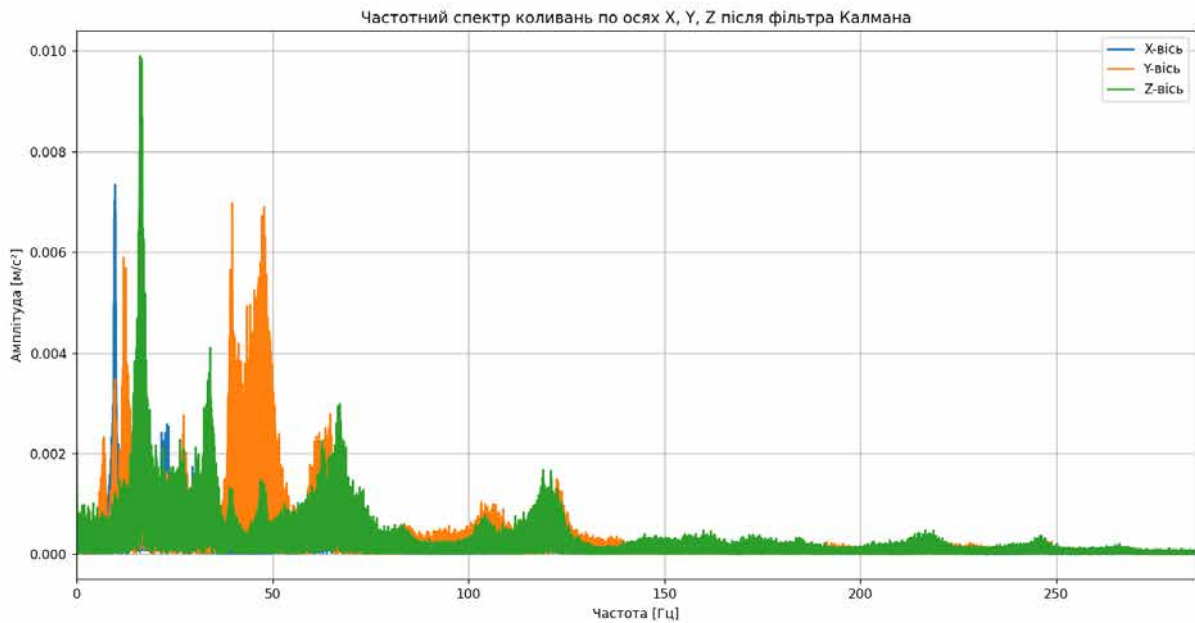


Рис. 3.14. Графік амплітудно-частотного спектру, частота 0-300 Гц

Як видно з графіка, амплітудно-частотні характеристики по осях X, Y, Z мають виражені піки у низькочастотній області. Якщо масштабувати графік (Рис. 3.15.), можна детальніше розглянути структуру резонансних зон, а також точні частоти, на яких спостерігаються максимальні значення амплітуди. Це дозволяє ідентифікувати основні гармонійні компоненти коливань і визначити їхній внесок у загальну вібраційну картину системи.

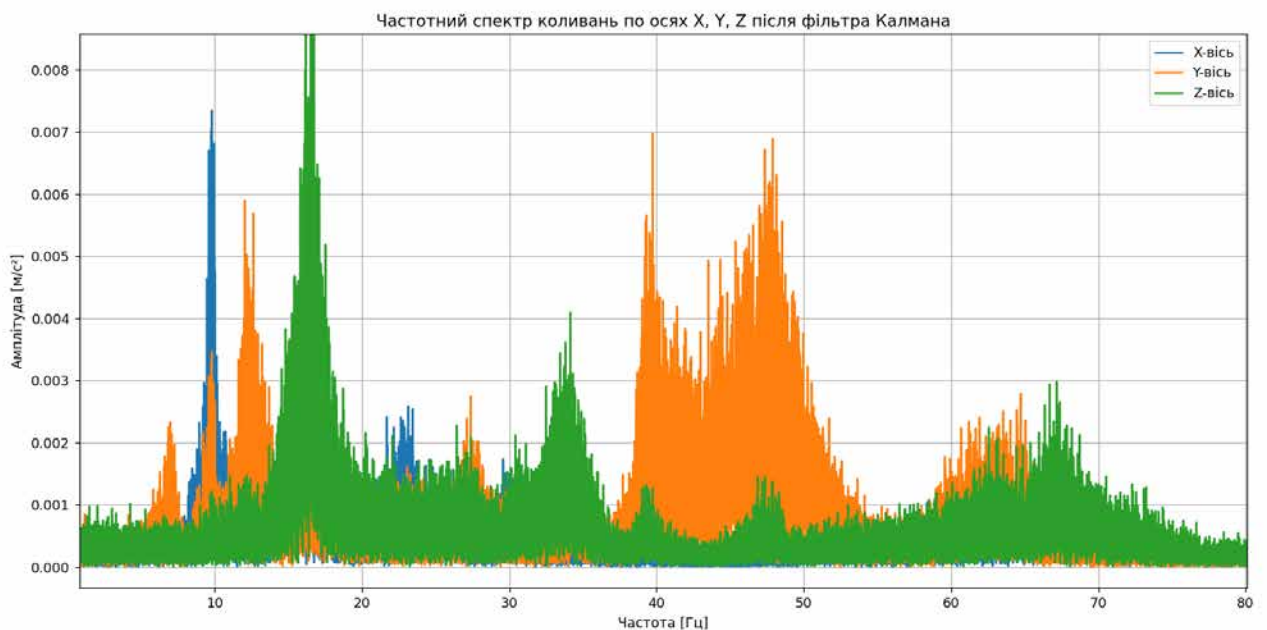


Рис. 3.15. Масштабований графік амплітудно-частотного спектру (частота 0-80 Гц)

Такий підхід дозволив детально розглянути структуру резонансних піків і точніше визначити частоти, на яких спостерігається максимальна амплітуда вібрацій.

Усі три осі демонструють підвищену активність у низькочастотній області від 10 до 55 Гц, де відбуваються основні резонансні коливання системи.

По осі X спостерігається головний пік на частоті 13-15 Гц з амплітудою близько  $0.006 \text{ м/с}^2$ . Після 20 Гц інтенсивність коливань різко зменшується, що свідчить про високу жорсткість у поперечному напрямку.

По осі Y видно два виражені резонансні піки – перший при 17-18 Гц з амплітудою  $0.006 \text{ м/с}^2$ , а другий - у діапазоні 40-45 Гц з амплітудою  $0.007 \text{ м/с}^2$ . Це найактивніший напрямок коливань, оскільки саме вздовж осі Y здійснюється основний рух платформи.

По осі Z спостерігається пік при 17-18 Гц з амплітудою до  $0.010 \text{ м/с}^2$ , а також менш виражений максимум близько 35-37 Гц з амплітудою  $0.004\text{-}0.005 \text{ м/с}^2$ . Це вказує, що частина вертикальних коливань синхронізована з рухом по осі Y.

Вищі частоти понад 60 Гц характеризуються малими амплітудами - до  $0.002 \text{ м/с}^2$ , що свідчить про відсутність високочастотних резонансів.

### **3.7. Дослідження вібрацій після вдосконалення 3D-принтера**

Після отримання та аналізу первинних результатів експерименту було доопрацьовано конструкцію 3D-принтера (Рис. 3.16.) з метою зниження рівня вібрацій і підвищення жорсткості рухомих елементів. Для перевірки впливу внесених змін виконано повторне експериментальне дослідження за тією ж методикою, що дало змогу порівняти динамічні характеристики системи до та після модернізації й оцінити зміну амплітудних і частотних параметрів коливань.

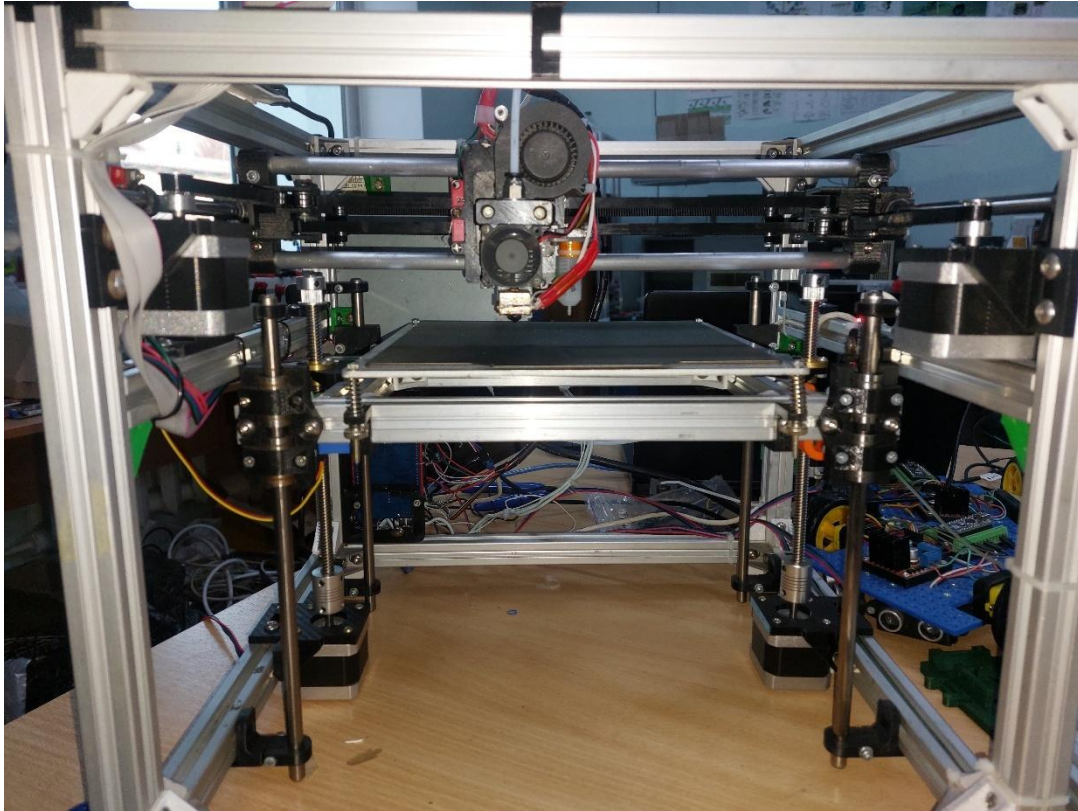


Рис. 3.16. Доопрацьована конструкція 3D-принтера

Для підвищення жорсткості та стабільності руху нагрівальної платформи 3D-принтера було проведено модернізацію вузла переміщення по осі Z. Конструктивні зміни включали встановлення таких елементів:

- Напрямні діаметром 8 мм – для забезпечення кращого напрямного ковзання та зменшення згинальних деформацій.
- Гвинт діаметром 8 мм з латунною гайкою і чотирьох заходною різьбою підвищує плавність переміщення та зменшує люфти у передачі.
- Чотири підшипники ковзання LM8UU – для забезпечення рівномірний розподіл навантаження та зменшують вібрації при переміщенні платформи.
- Видрукувані корпуси підшипників - виконують функцію утримувачів та дозволяють точно позиціонувати підшипники відносно напрямних.
- Видрукуваний кронштейн двигуна для монтажу на верстатний профіль 20×20 - покращує узгодження осі двигуна з ходовим гвинтом і зменшує перекося.

- Двигун 17HS4401 використаний як додатковий привід осі Z, забезпечує підвищений крутний момент і стабільність переміщення порівняно зі штатним мотором.

Встановлення сенсора та підготовка системи вимірювання:

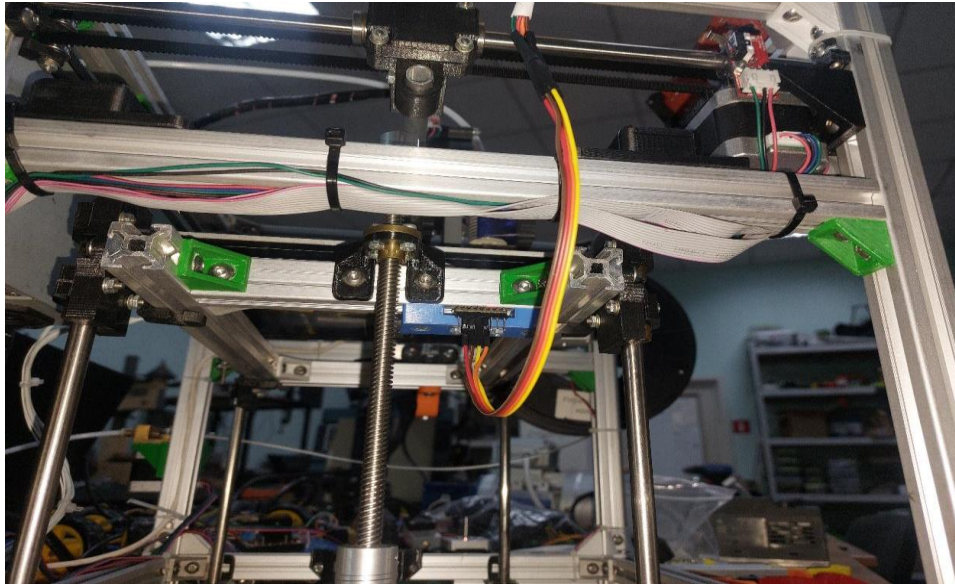


Рис. 3.17. Встановлення акселерометра MPU9250

Реєстрація експериментальних даних:

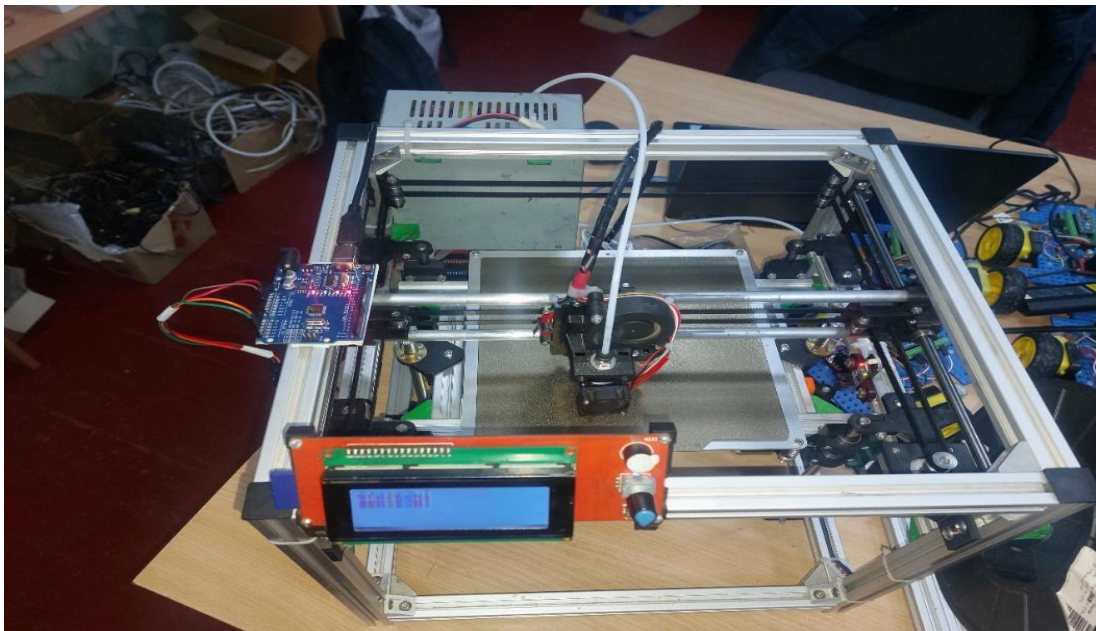


Рис. 3.18. Встановлення та підключення плати Arduino UNO

Отримані дані прискорень знову були піддані фільтрації методом Калмана (Рис. 3.19.). Це забезпечило можливість коректного порівняння результатів фільтрації до і після модернізації конструкції. Як і раніше, було усунуто

висоочастотні шумові складові, а сигнал набув чіткої періодичної форми з видимими основними коливаннями.

Дані акселерометра MPU9250 з фільтрацією Калмана

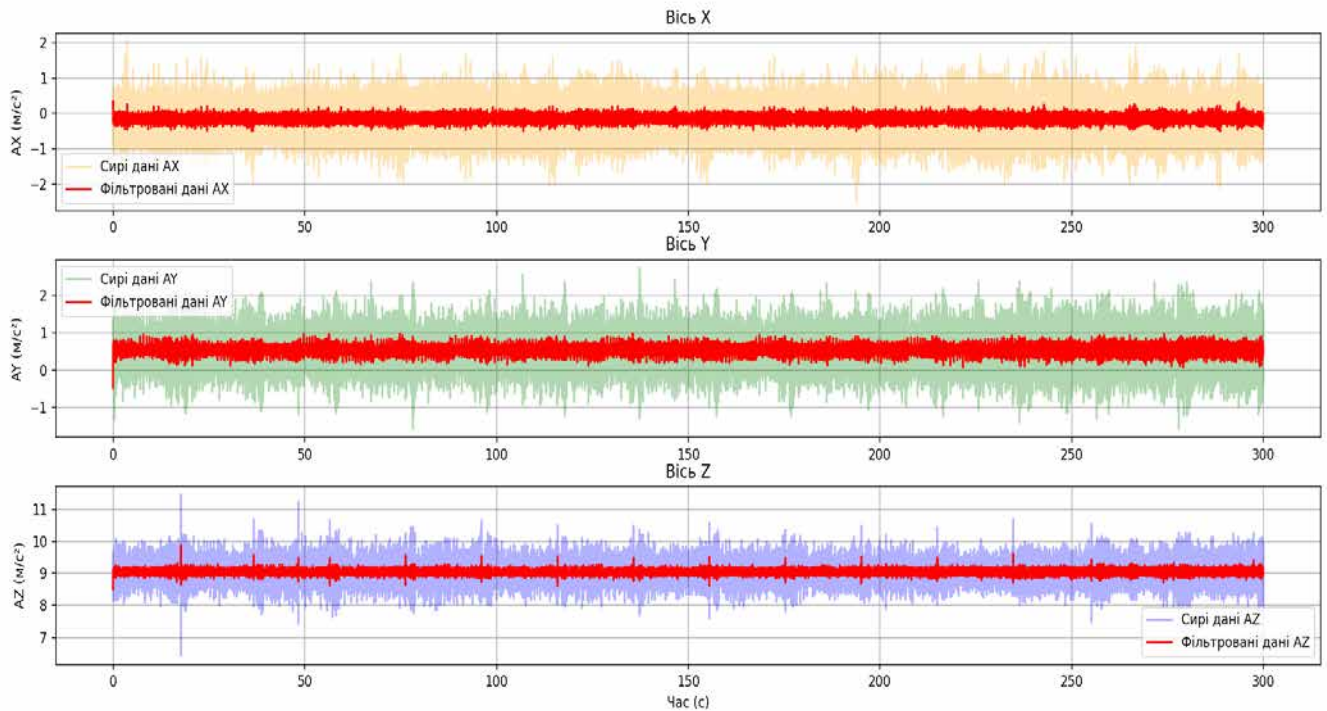


Рис. 3.19. Графіки фільтрації вхідних даних

Для кращої деталізації графіку вибрано період дослідження між 62 та 64 с. та розглянемо кожну вісь окремо.

Дані акселерометра MPU9250 з фільтрацією Калмана

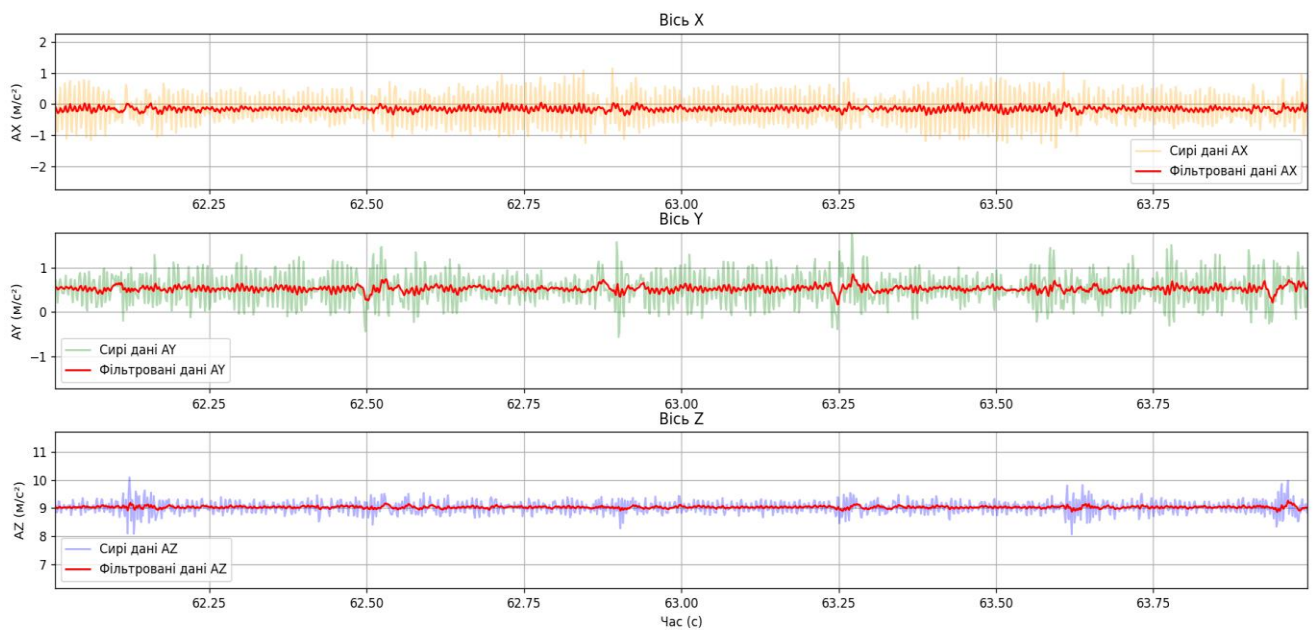


Рис. 3.20. Графіки фільтрації вхідних даних, вибірка між 62-64 с

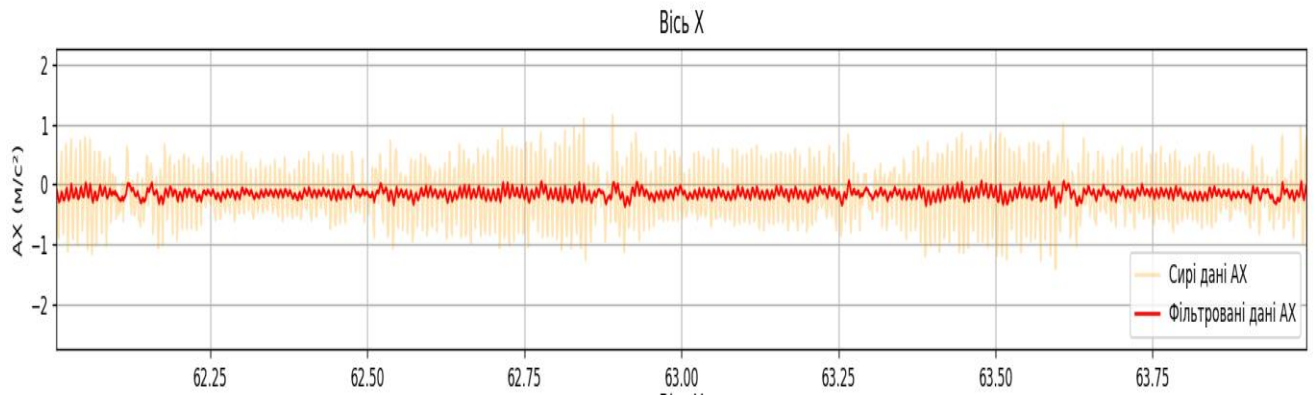


Рис. 3.21. Графік фільтрації вхідних даних, вісь X

Сигнал без фільтрації (жовта лінія) характеризується високочастотними коливаннями з амплітудою близько  $\pm 1,5$  м/с<sup>2</sup>. Після фільтрації (червона лінія) спостерігається суттєве згладжування сигналу й збереження лише основної низькочастотної компоненти. Це свідчить про ефективне пригнічення випадкових шумів і про стабільність платформи в поперечному напрямку.

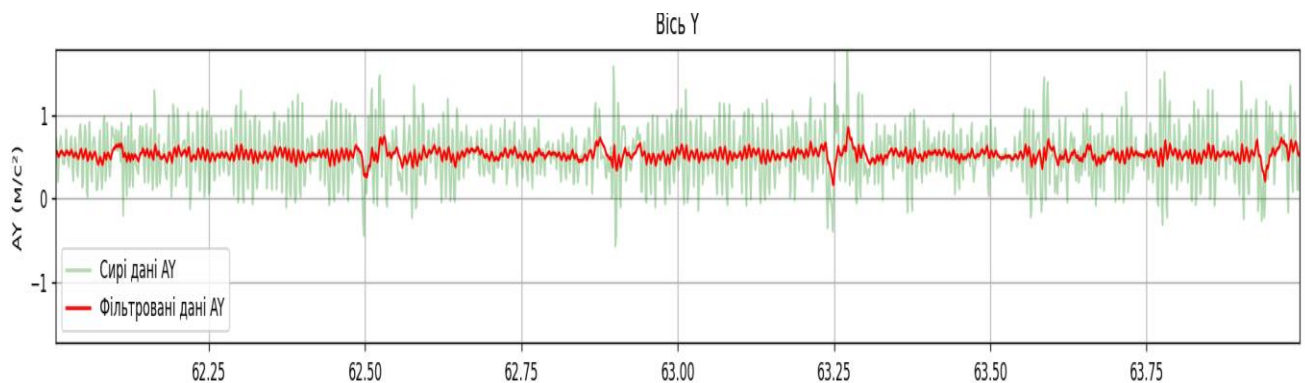


Рис. 3.22. Графік фільтрації вхідних даних, вісь Y

На даних без фільтрації (зелена лінія) чітко видно періодичні коливання, що відповідають руху друкарської головки під час формування шару. Їх амплітуда досягає 2 м/с<sup>2</sup>. Після фільтрації сигнал став більш рівномірним, зберігши основну форму коливань, але без високочастотних складових. Це свідчить про те, що фільтр Калмана зумів зберегти реальну динаміку руху при одночасному зниженні шумового фону.

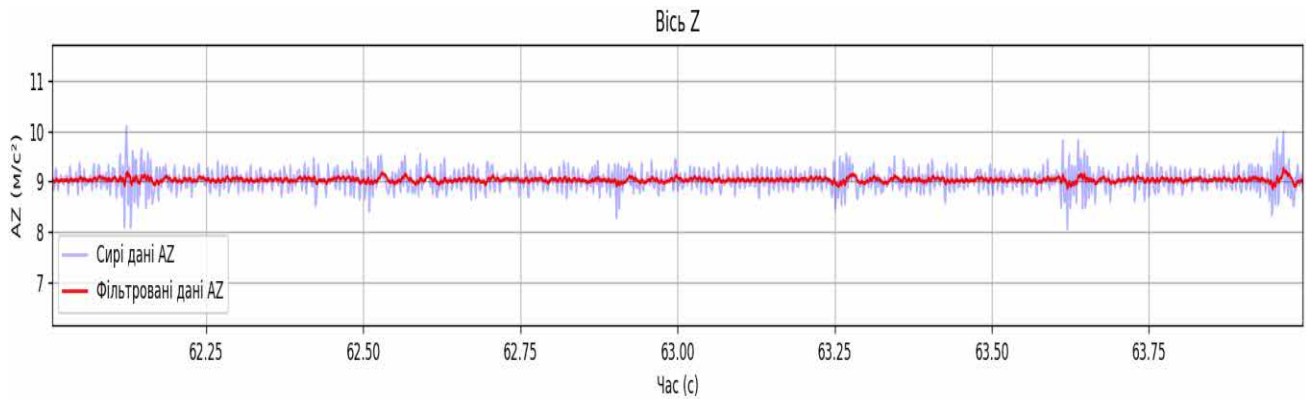


Рис. 3.23. Графік фільтрації вхідних даних, вісь Z

Сигнал по осі Z (синя лінія) містить сталий компонент  $9,8 \text{ м/с}^2$ , який відповідає дії сили тяжіння. На графіку спостерігаються невеликі стрибки  $\pm 0,5 \text{ м/с}^2$ , однак після фільтрації вони практично зникають, залишаючи рівну лінію з мінімальними відхиленнями. Це означає, що вертикальні коливання платформи є незначними та не впливають на стабільність друку.

Після фільтрації даних було проведено спектральний аналіз відфільтрованих сигналів (Рис. 3.24) для визначення частотних характеристик коливань нагрівальної платформи після модернізації. Перетворення Фур'є застосовано до даних по всіх трьох осях - X, Y, Z, що дозволило оцінити розподіл амплітуд у частотній області та виявити домінуючі частоти резонансних коливань системи.

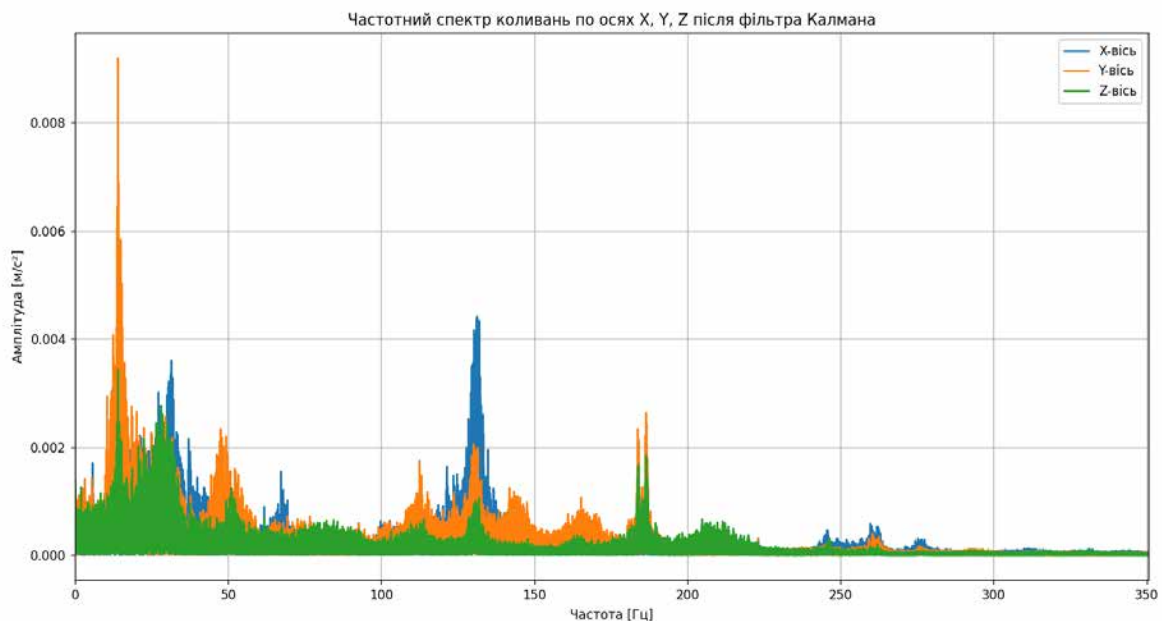


Рис. 3.24. Графік амплітудно-частотного спектру, частота 0-350 Гц

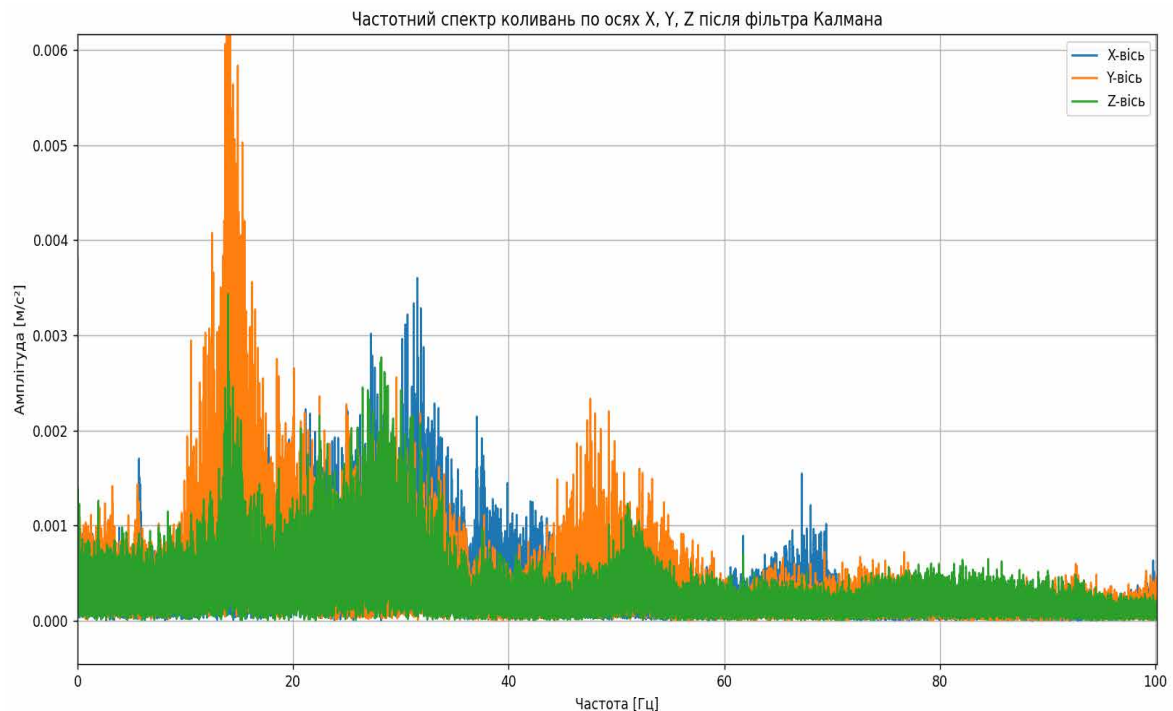


Рис. 3.25. Масштабований графік амплітудно-частотного спектру (частота 0-80 Гц)

По осі X у спектрі спостерігається кілька виражених піків у діапазоні 25-35 Гц з максимальною амплітудою близько 0.003-0.0035 м/с<sup>2</sup>. Це може відповідати власним коливанням горизонтальних елементів рами. Інтенсивність піків нижча, ніж у попередньому експерименті, що свідчить про зростання жорсткості у поперечному напрямку.

По осі Y домінуючий пік спостерігається при 13-15 Гц з амплітудою близько 0.005-0.006 м/с<sup>2</sup>, що відповідає основній частоті робочих коливань під час руху друкарської головки. Другий менш виражений максимум розташований у зоні 35-40 Гц, що може бути гармонікою основного резонансу або наслідком періодичного навантаження приводу. Загалом рівень енергії по осі Y суттєво зменшився порівняно з початковим станом, однак напрямок Y залишається найбільш активним за вібраційною енергією.

По осі Z амплітуди коливань у вертикальному напрямку не перевищують 0.0015-0.002 м/с<sup>2</sup>, що в межах фонового рівня. Основна активність спостерігається у зоні 15-25 Гц, синхронній із рухами по осі Y, що свідчить про кінематичний

зв'язок між вертикальною платформою і рухом друкарської головки. Вище 40 Гц амплітуди зникають, тобто високочастотні резонанси відсутні.

### 3.8. Порівняння результатів досліджень

Для оцінки впливу проведеної модернізації було виконано порівняння спектральних характеристик коливань нагрівальної платформи до та після внесення конструктивних змін. Порівняння спектрів дозволило визначити, наскільки ефективно оновлення механічних елементів зменшило інтенсивність основних резонансних піків та змістило частотну структуру сигналу. Особливу увагу приділено аналізу діапазонів, у яких раніше спостерігалися найбільш виражені коливання, що впливали на якість друку. Після модернізації амплітуда резонансних частот суттєво знизилася, а деякі локальні піки повністю зникли, що свідчить про підвищення жорсткості системи та покращення її динамічної стабільності. Такі результати підтверджують доцільність проведених змін і демонструють позитивний вплив модернізації на поведінку платформи під час роботи.

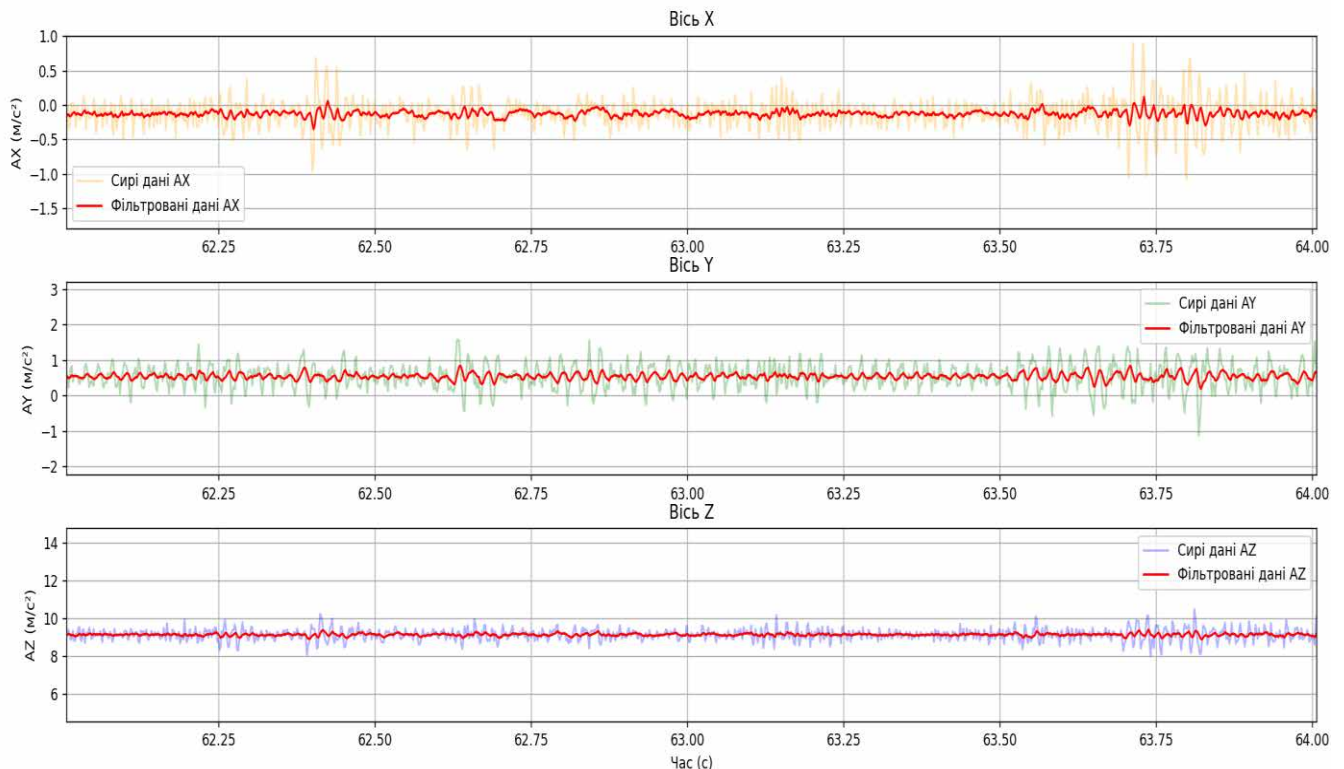


Рис. 3.26. Фільтровані сигнали акселерометра MPU9250 до вдосконалення конструкції

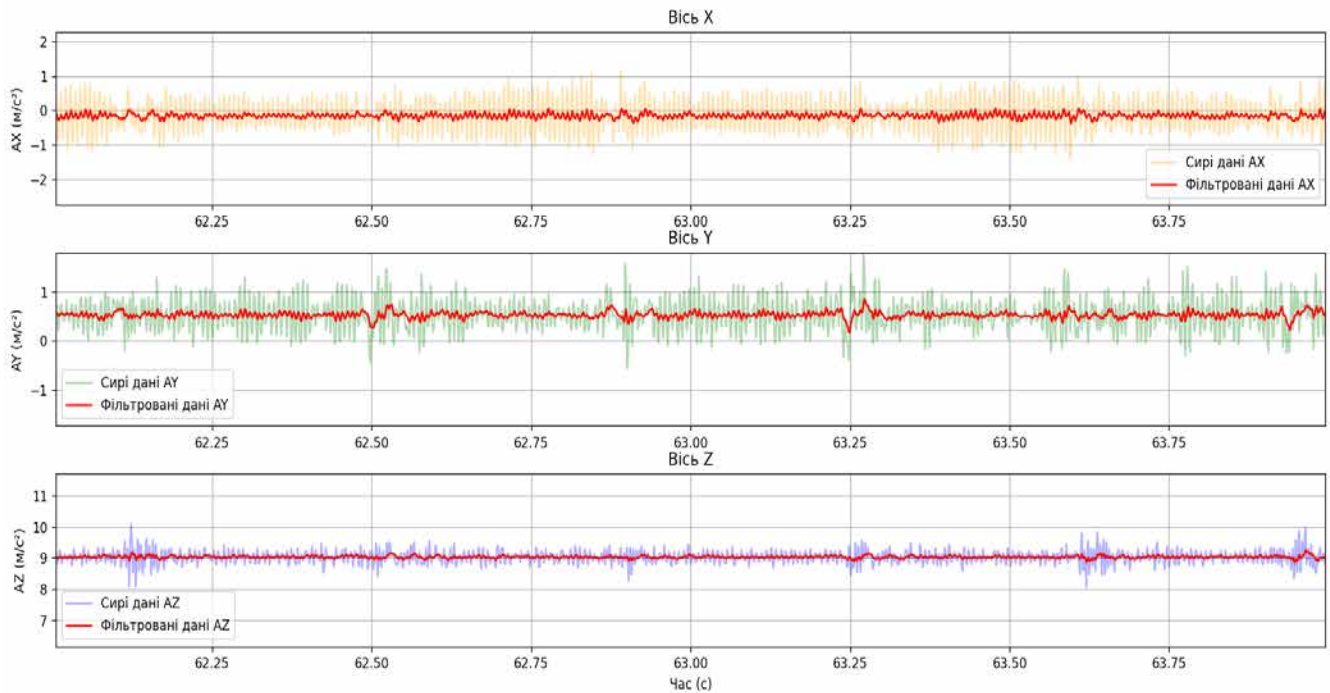


Рис. 3.27. Фільтровані сигнали акселерометра MPU9250 після вдосконалення конструкції

Вісь X. До модернізації фільтрований сигнал мав амплітуду коливань близько  $0.4-0.5 \text{ м/с}^2$ , із незначними залишковими шумами на високих частотах. Після модернізації амплітуда зменшилась майже вдвічі до  $0.25 \text{ м/с}^2$ , а коливання стали більш рівномірними без різких стрибків. Це свідчить про підвищення жорсткості рами у поперечному напрямку та зменшення паразитних вібрацій.

Вісь Y. До модернізації спостерігалися найбільші коливання з амплітудою до  $1.0 \text{ м/с}^2$ , що відповідало руху друкарської головки. Після вдосконалення конструкції їх амплітуда зменшилася до  $0.6-0.7 \text{ м/с}^2$ , а шумова складова значно знизилася. Залишилася чітка періодична компонента, характерна для робочого руху, однак з помітно меншою варіацією та енергією.

Вісь Z. До модернізації сигнал по вертикальній осі мав флуктуації навколо  $9.8 \text{ м/с}^2$  у межах  $0.5 \text{ м/с}^2$ . Після модернізації діапазон звузився до  $0.25 \text{ м/с}^2$ , що свідчить про практичне усунення вертикальних коливань і стабільну роботу нагрівальної платформи. Лінія після фільтрації стала більш плавною, без імпульсних відхилень.

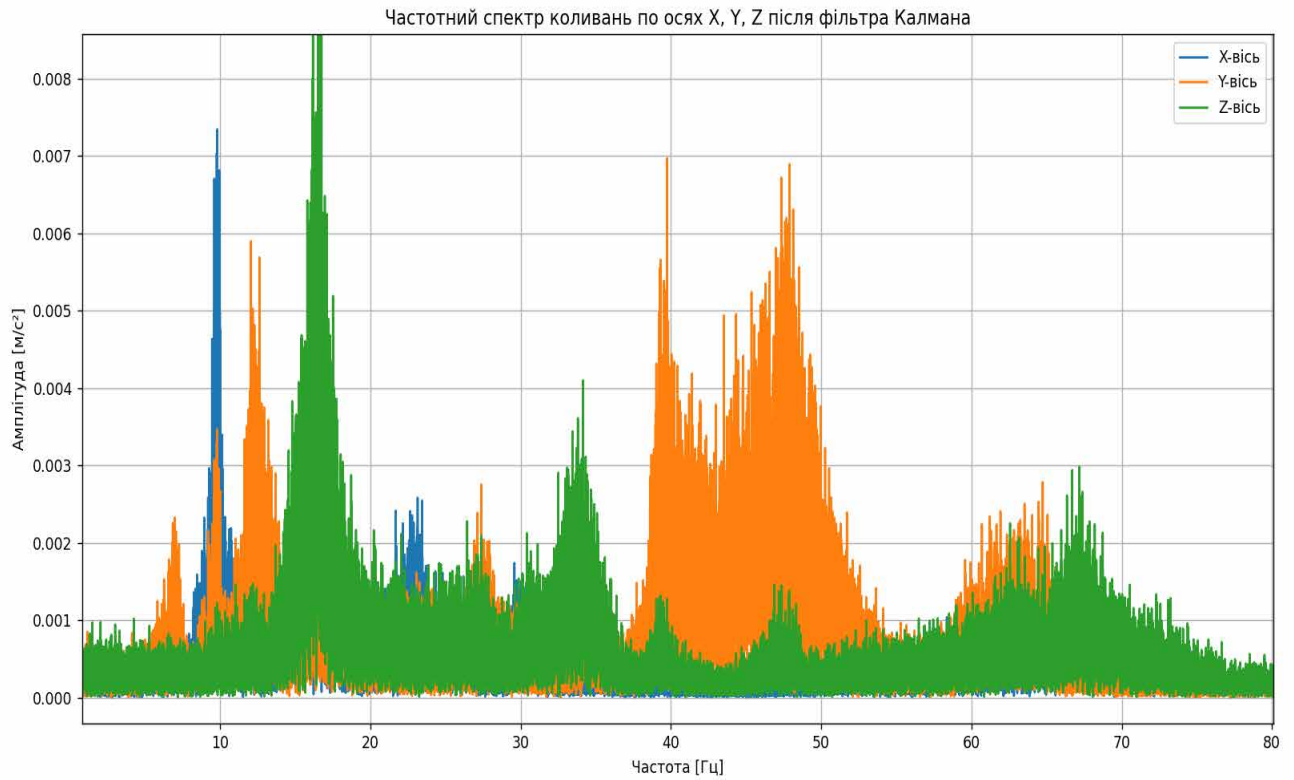


Рис. 3.28. Амплітудно-частотні спектри коливань нагрівальної платформи до вдосконалення конструкції

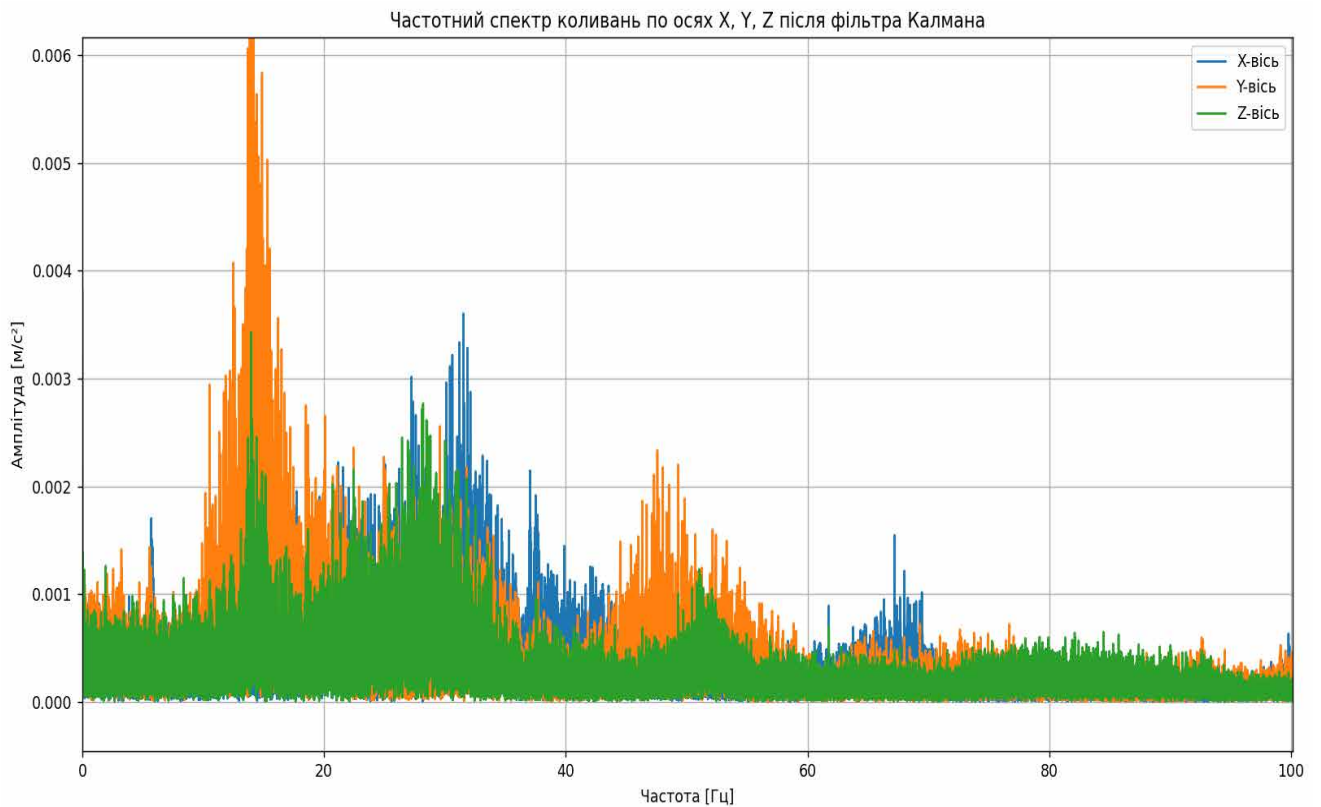


Рис. 3.29. Амплітудно-частотні спектри коливань нагрівальної платформи після вдосконалення конструкції

За результатами вимірювань, у початковому стані (Рис. 3.28) система демонструвала підвищену активність у діапазоні 10-55 Гц, де спостерігались основні резонансні коливання. Найвищі значення прискорення зафіксовано по осі Y - напрямку руху друкарської каретки. Виражені піки на 17-18 Гц та 40-45 Гц (амплітуди до  $0.008 \text{ м/с}^2$ ) свідчать про наявність двох резонансних зон, що впливали на стабільність платформи.

Після модернізації (Рис. 3.29), коли було додано направляючу вісь і другий кроковий двигун, спектр коливань став більш рівномірним. По осі X амплітуди зменшились удвічі - з  $0.006$  до  $0.003-0.0035 \text{ м/с}^2$ , що вказує на підвищення жорсткості. По осі Y резонанс змістився в область 13-15 Гц, а амплітуда знизилась до  $0.005-0.006 \text{ м/с}^2$ .

Вертикальні коливання по осі Z не перевищують  $0.002 \text{ м/с}^2$  - фактично фоновий рівень. Це означає ефективне гасіння вібрацій та відсутність паразитних резонансів.

Таким чином, проведена модернізація дозволила знизити амплітуди коливань на 30-50 %, зменшити резонансну енергію та підвищити загальну стабільність системи. Також поява зміщення резонансної частоти в нижчу область говорить про зміну власних динамічних параметрів вузла, що підтверджує ефективність додаткових напрямних і приводу. Загалом результати спектрального аналізу демонструють, що модернізація покращила поведінку платформи під навантаженням і створила кращі умови для стабільного та якісного друку.

## РОЗДІЛ 4

### ОХОРОНА ПРАЦІ

Під час експлуатації 3D-принтера оператор має дотримуватись вимог безпеки, які забезпечують захист від електричного струму, механічних травм, опіків та дії шкідливих випарів. 3D-принтери поєднують у собі електронні, механічні й теплові елементи, тому робота з ними потребує підвищеної уваги до охорони праці. Основна мета створення безпечних умов для користувача та навколишнього середовища, запобігання аварійним ситуаціям і мінімізація ризиків під час друку.

Під час роботи 3D-принтера можуть виникати такі небезпеки:

1. Електричний струм - ризик ураження при пошкодженні ізоляції або неправильному підключенні.
2. Висока температура - екструдер і нагрівальний стіл розігріваються до 250 °С.
3. Рухомі вузли - можливе защемлення або травмування.
4. Випари полімерів - при плавленні ABS, PETG чи нейлону виділяються леткі органічні сполуки, що можуть подразнювати дихальні шляхи.
5. Шум і вібрації - впливають на самопочуття та знижують концентрацію уваги.

Перед початком роботи необхідно :

- перевірити справність кабелю живлення та наявність заземлення (відповідно до ПУЕ «Правила улаштування електроустановок», п. 1.7) [47];
- упевнитися, що корпус принтера не має пошкоджень і нагрівальні елементи не оголені;
- підключити принтер через стабілізатор або джерело безперебійного живлення;
- забезпечити витяжну вентиляцію або природне провітрювання приміщення.

Під час роботи заборонено торкатись рухомих вузлів, проводити ремонт або змінювати параметри живлення без відключення від мережі.

Після завершення друку необхідно вимкнути живлення, дочекатися охолодження екструдера й робочого столу, очистити робочу поверхню від залишків пластику.

Робота 3D-принтера супроводжується нагрівом електричних елементів, тому необхідно дотримуватись НАПБ А.01.001-2014 [48]:

- зберігати горючі матеріали на відстані не менше 0,5 м від принтера;
- мати справний порошковий вогнегасник типу ВП-5 або ВП-9;
- не використовувати пошкоджені подовжувачі або розгалужувачі;
- забезпечити доступ до вимикача аварійного знеструмлення.

У разі появи диму або запаху гару роботу необхідно негайно припинити, вимкнути живлення й від'єднати обладнання від мережі.

Мікроклімат лабораторії має відповідати ДСН 3.3.6.042-99 [49]:

- температура - 18-24 °С,
- відносна вологість - 40-60 %,
- швидкість руху повітря - не більше 0,2 м/с.

Освітленість робочого місця має становити не менше 300 лк згідно з ДБН В.2.5-28:2018 “Природне і штучне освітлення” [50]. Робоча поверхня повинна бути рівною, неслизькою, а принтер розміщено на стійкій підставці, що виключає вібрацію корпусу.

Для безпечної експлуатації 3D-принтера застосовуються:

- рукавички з термостійкого матеріалу — при знятті деталей і заміні сопла;
- захисні окуляри під час механічного очищення;
- респіратор класу FFP2 або FFP3 при роботі з ABS і нейлоном;
- антистатичний браслет під час обслуговування електронних модулів.

Дотримання вимог охорони праці під час експлуатації 3D-принтера гарантує безпечну роботу обладнання, запобігає нещасним випадкам і знижує вплив шкідливих факторів. Регулярна перевірка стану електромережі, вентиляції та засобів пожежогасіння, а також виконання норм ПУЕ, НАПБ, ДСН і ДБН забезпечує надійність і довговічність експлуатації принтера в навчально-виробничих умовах.

## ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі досліджено коливання нагрівальної платформи 3D-принтера і порівняно її роботу до та після проведеної модернізації. Основною метою було зрозуміти, на яких частотах виникають найбільші вібрації, та як конструкційні зміни впливають на стабільність платформи під час друку. Спочатку було проведено вимірювання в початковому стані. Аналіз показав, що платформа мала досить сильні коливання в діапазоні 10-55 Гц, особливо по осі Y, тобто в напрямку руху друкарської каретки. Найбільші піки були на частотах 17-18 Гц і 40-45 Гц, а амплітуда досягала приблизно  $0.008 \text{ м/с}^2$ . Це означало, що система мала декілька резонансних зон, які могли негативно впливати на якість друку.

Після модернізації, коли було додано додаткову направляючу та другий кроковий двигун, ситуація помітно змінилась. Спектр коливань став більш рівним, а амплітуди по осі X зменшилися майже вдвічі - з  $0.006$  до приблизно  $0.003 \text{ м/с}^2$ . По осі Y головний резонанс змістився в менший діапазон (13–15 Гц), а амплітуда впала до  $0.005$ - $0.006 \text{ м/с}^2$ . Вертикальні коливання по осі Z взагалі були дуже низькими, не більше  $0.002 \text{ м/с}^2$ , тобто фактично на рівні шуму сенсора.

Загалом модернізація дала помітний результат: коливання зменшилися приблизно на 30-50 %, резонансні піки знизились, а сама система стала значно стабільнішою. Це підтверджує, що конструкційні зміни були доречними і реально вплинули на поведінку платформи. Такі результати важливі, тому що стабільніша платформа означає меншу кількість дефектів, вищу точність друку та більш передбачувану роботу принтера.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. The First 3D Printing Technology. The American Society of Mechanical Engineers - ASME. URL: <https://www.asme.org/wwwasmeorg/media/resourcefiles/aboutasme/who%20we%20are/engineering%20history/landmarks/261-stereolithography.pdf>.
2. The complete history of 3D printing. ultimaker.com. URL: <https://ultimaker.com/learn/the-complete-history-of-3d-printing/>.
3. The Types of FDM 3D Printers: Cartesian, CoreXY & More. ALL3DP. URL: <https://all3dp.com/2/cartesian-3d-printer-delta-scara-belt-corexy-polar/.Stereolithography>.
4. Кінематика 3D-принтера: переваги та недоліки всіх варіантів. Статті компанії «3Dplast – виробник пластику для 3D друку». «3Dplast» - производитель пластика для 3D принтера и 3Д ручки. URL: <https://3dplast.biz/ua/a398991-kinematika-printera-preimuschestva.html>.
5. CoreXY | Cartesian Motion Platform. CoreXY | Cartesian Motion Platform. URL: <https://corexy.com/theory.html>.
6. 3D Printer kinematic types. Digital Manufacturing Store Top 3D Shop. URL: <https://top3dshop.com/blog/3d-printer-kinematics-explained>.
7. Modeling and Analysis of Delta Kinematics FDM Printer. ResearchGate. URL: [https://www.researchgate.net/publication/359421732\\_Modeling\\_and\\_Analysis\\_of\\_Delta\\_Kinematics\\_FDM\\_Printer](https://www.researchgate.net/publication/359421732_Modeling_and_Analysis_of_Delta_Kinematics_FDM_Printer).
8. Instructables. Make a Polar 3D Printer (Spinning Bed). Instructables. URL: <https://www.instructables.com/Make-a-Polar-3D-Printer-Spinning-Bed/>.
9. 3D принтер Creality CR-30. 3DTrade. URL: <https://3dtrade.net/uk-ua/fdm-printers/p17856.html?srsltid=AfmBOop3FoLGuTY6zoRxgy5SltYBJqjpClvTzEHjs31K8Dyg9lB0YZ3>.
10. jbrazio. What is Marlin?. Marlin Firmware. URL: <https://marlinfw.org/docs/basics/introduction.html>.

11. Stepper Motor Basics. Oriental Motor U.S.A. Corp. URL: <https://www.orientalmotor.com/stepper-motors/technology/stepper-motor-basics.html>.
12. Anatomy of a 3D Printer: How Does a 3D Printer Work? | MatterHackers. MatterHackers. URL: <https://www.matterhackers.com/articles/anatomy-of-a-3d-printer?srsltid=AfmBOopdApWczHQWsb3HomeIEAwF58VNofj1cH9DovRtvnm-UoqFcNif>.
13. Нагрівальна пластина для 3D принтера K1 (4001040054) комп'ютерний магазин Artline. URL: <https://artline.ua/uk/product/nagrevatel'naya-plastina-dlya-3d-printera-k1-4001040054>.
14. Resonance Compensation - Klipper documentation. Welcome - Klipper documentation. URL: [https://www.klipper3d.org/Resonance\\_Compensation.html](https://www.klipper3d.org/Resonance_Compensation.html).
15. Agarwal V. Vibrational analysis of 3D printed components. International Journal of Scientific Research and Engineering Development. 2021. URL: [https://www.researchgate.net/profile/Venkesh-Agarwal/publication/356786981\\_Vibrational\\_Analysis\\_of\\_3D\\_Printed\\_Components/links/61acc713aade5b1bf507b72e/Vibrational-Analysis-of-3D-Printed-Components.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Venkesh-Agarwal/publication/356786981_Vibrational_Analysis_of_3D_Printed_Components/links/61acc713aade5b1bf507b72e/Vibrational-Analysis-of-3D-Printed-Components.pdf).
16. KAM M., SARUHAN H., İpekçi A. INVESTIGATION THE EFFECT OF 3D PRINTER SYSTEM VIBRATIONS ON SURFACE ROUGHNESS OF THE PRINTED PRODUCTS. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi. 2019. T. 7, № 2. С. 109–119. URL: <https://doi.org/10.29130/dubited.441221>.
17. Jensen N. J., Parker G. G., Blough J. R. Base Vibration Effects on Additive Manufactured Part Quality. Experimental Techniques. 2023. URL: <https://doi.org/10.1007/s40799-023-00629-1>. – с. 163-167.
18. Dei Rossi J., Keles O., Viswanathan V. Fused Deposition Modeling with Induced Vibrations: A Study on the Mechanical Characteristics of Printed Parts. Applied Sciences. 2022. Vol. 12, no. 18. P. 9327. URL: <https://doi.org/10.3390/app12189327>. – с. 5 -20.
19. Białas K., Dymarek A., Dzitkowski T. IMPACT OF 3D PRINTER VIBRATION REDUCTION ON THE QUALITY OF ITS PRINTOUT. International

Journal of Modern Manufacturing Technologies. 2023. Т. 15, № 2. С. 79–90. URL: <https://doi.org/10.54684/ijmmt.2023.15.2.79>. – с. 79-88.

20. Influence of steel fiber (SF) addition on the enhancement compressive strength of pure gypsum / S. K. Ibrahim та ін. Materials Today: Proceedings. 2023. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.11.119>.

21. UNO R3. docs.arduino.cc. URL: <https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3/>.

22. User Manual. <https://docs.arduino.cc/>. URL: <https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/ABX00080-datasheet.pdf>.

23. Home / Hardware / UNO Q. Arduinodocs. URL: <https://docs.arduino.cc/hardware/uno-q/#features>.

24. Форум любителів електронних саморобок Arduino - Головна. URL: <https://forum.arduinka.biz.ua/download/file.php?id=19&mode=view>.

25. 10 DOF ступенів свободи MPU-9250 GY-91. uAmper. URL: [https://uamper.com/index.php?route=product/product&path=165&product\\_id=654&gad\\_source=1&gad\\_campaignid=20839106384&gbraid=0AAAADk5dvqGNP-MR5tCeAzNI7-bgC99f&gclid=Cj0KCQiAo4TKBhDRARIsAGW29bfzLw4\\_O-Oh2r0a-M4x-hmufoTQRr4XYfS2RZu0y1gaD1Vb64o8qWMaAoHOEALw\\_wcB](https://uamper.com/index.php?route=product/product&path=165&product_id=654&gad_source=1&gad_campaignid=20839106384&gbraid=0AAAADk5dvqGNP-MR5tCeAzNI7-bgC99f&gclid=Cj0KCQiAo4TKBhDRARIsAGW29bfzLw4_O-Oh2r0a-M4x-hmufoTQRr4XYfS2RZu0y1gaD1Vb64o8qWMaAoHOEALw_wcB).

26. MPU-9250 Product Specification Revision 1.1. Home | TDK InvenSense | MEMS Sensor Solutions. URL: <https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/PS-MPU-9250A-01-v1.1.pdf>.

27. CoreXY Kinematics. 3D Distributed. URL: <https://3ddistributed.com/corexy-3d-printer/corexy-kinematics/>.

28. A Review Paper on I2C Communication Protocol. International Journal Publication | Research Paper Publication and Submission - IJARIIT. URL: <https://www.ijariit.com/manuscripts/v4i2/V4I2-1286.pdf>.

29. I 2C-bus specification and user manual. nxp. URL: <https://www.nxp.com/docs/en/user-guide/UM10204.pdf>.

30. MPU-9250 Hookup Guide. SparkFun Electronics. URL: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/mpu-9250-hookup-guide>.

31. Universal Asynchronous Receiver-Transmitter (UART). docs.arduino. URL: <https://docs.arduino.cc/learn/communication/uart/>.
32. GitHub - bolderflight/invensense-imu: Arduino and CMake library for communicating with the InvenSense MPU-6500, MPU-9250 and MPU-9255 nine-axis IMUs. GitHub. URL: <http://github.com/bolderflight/invensense-imu>.
33. GitHub - hideakitai/MPU9250: Arduino library for MPU9250 Nine-Axis (Gyro + Accelerometer + Compass) MEMS MotionTracking™ Device. GitHub. URL: <https://github.com/hideakitai/MPU9250> .
34. Short introduction – pySerial 3.0 documentation. PyPI Package and Documentation Storage. URL: <https://pythonhosted.org/pyserial/shortintro.html#opening-serial-ports>.
35. io Core tools for working with streams. Python documentation. URL: <https://docs.python.org/3/library/io.html>.
36. Interactive figures – Matplotlib 3.10.8 documentation. Matplotlib – Visualization with Python. URL: <https://matplotlib.org/stable/users/explain/figure/interactive.html>.
37. 7. Input and Output. Python documentation. URL: <https://docs.python.org/3/tutorial/inputoutput.html>.
38. Lecture 8 The Kalman filter. Stanford University. URL: <https://web.stanford.edu/class/ee363/lectures/kf.pdf>.
39. Object Tracking: Simple Implementation of Kalman Filter in Python. Machine Learning Space. URL: <https://machinelearning.space.com/object-tracking-python/>.
40. GitHub - akshaychawla/1D-Kalman-Filter: This is a simple 1 dimensional Kalman Filter. The Aim of this project was to understand the basics of the Kalman Filter so I could move on to the Extended Kalman Filter. GitHub. URL: <https://github.com/akshaychawla/1D-Kalman-Filter>.
41. Теорія сигналів та електричних кіл. Теорія сигналів : конспект лекцій / укладачі : О. М. Кобяков, О. В. Д'яченко, І. Є. Бражник, Т. О. Протасова. – Суми : Сумський державний університет, 2022. – 125с. URL:

[https://ekt.elit.sumdu.edu.ua/wp-content/uploads/2022/12/rio\\_2022\\_Kobiakov\\_konsp\\_signals.pdf](https://ekt.elit.sumdu.edu.ua/wp-content/uploads/2022/12/rio_2022_Kobiakov_konsp_signals.pdf).

42. Sampling of analog signals | Webdemo | Institute of Telecommunications, University of Stuttgart. Webdemo. URL: [https://webdemo.inue.uni-stuttgart.de/webdemos/02\\_lectures/uebertragungstechnik\\_1/sampling\\_theorem/index.php?id=1](https://webdemo.inue.uni-stuttgart.de/webdemos/02_lectures/uebertragungstechnik_1/sampling_theorem/index.php?id=1).

43. By James W. Cooley and John W. Tukey, An Algorithm for the Machine Calculation of Complex Fourier Series, Stanford University. URL: <https://web.stanford.edu/class/cme324/classics/cooley-tukey.pdf>.

44. Hovagim G. Fast Fourier Transform (FFT). Access Denied. URL: <https://www.mathworks.com/discovery/fft.html>.

45. By James W. Cooley and John W. Tukey. An Algorithm for the Machine Calculation of Complex Fourier Series. American Mathematical Society :: Homepage. URL: <https://www.ams.org/journals/mcom/1965-19-090/S0025-5718-1965-0178586-1/S0025-5718-1965-0178586-1.pdf>.

46. Discrete Fourier Transform – NumPy v2.3 Manual. NumPy. URL: <https://numpy.org/doc/stable/reference/routines.fft.html>.

47. ПУЕ Правила улаштування електроустановок (перше переглянуте, перероблене, доповнене та адаптоване до умов України видання). БУДСТАНДАРТ Online - нормативні документи будівельної галузі України. URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=72758](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=72758).

48. НАПБ А.01.001-2014 Правила пожежної безпеки в Україні. БУДСТАНДАРТ Online - нормативні документи будівельної галузі України. URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=60541](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=60541).

49. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. БУДСТАНДАРТ Online - нормативні документи будівельної галузі України. URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=14283](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=14283).

50. ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення. БУДСТАНДАРТ Online - нормативні документи будівельної галузі України. URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=79885](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=79885).

# ДОДАТКИ

## Додаток А

На рисунку наведено програмний код в середовищі Arduino IDE для зчитування даних з акселерометра MPU9250.

```
1 #include <Wire.h>
2 #include <MPU9250.h>
3
4 MPU9250 mpu;
5 c:\РОБОТИ\РОБОТИ\ДИПЛОМНА РОБОТА\Дані Дослідження\Тези\Дослідження 09042025\Accel_test_MPU9250\Accel_test_MPU9250.ino
6 const unsigned long interval = 1000; // 1000 мкс = 1000 Гц
7 unsigned long prevTime = 0;
8
9 void setup() {
10     Wire.begin();
11     Wire.setClock(400000); // I2C на 400 кГц для пришвидшення
12
13     Serial.begin(2000000); // Максимальна швидкість передачі
14
15     if (!mpu.setup(0x68)) {
16         Serial.println("MPU9250 не знайдено!");
17         while (1);
18     }
19
20     //delay(100); // Невелика затримка для стабілізації
21 }
22
23 void loop() {
24     unsigned long currentTime = micros();
25     if (currentTime - prevTime >= interval) {
26         prevTime = currentTime;
27
28         mpu.update(); // Оновлення всіх сенсорних даних
29
30         float accX = mpu.getAccX();
31         float accY = mpu.getAccY();
32         float accZ = mpu.getAccZ();
33
34         Serial.print("{");
35         Serial.print(accX, 2);
36         Serial.print(",");
37         Serial.print(accY, 2);
38         Serial.print(",");
39         Serial.print(accZ, 2);
40         Serial.println("}");
41     }
42 }
43
```

## Додаток Б

На рисунку зображено код в середовищі Python для зчитування інформації з серійного порту та збереження експериментальних даних в файл.

```
1 import serial
2 import keyboard
3 import time
4
5 SERIAL_PORT = 'COM7'
6 BAUD_RATE = 2000000
7 READING_DURATION = 5 * 60 # або 1 * 60 для 1 хвилини
8
9 # Відкриваємо послідовний порт
10 ser = serial.Serial(SERIAL_PORT, BAUD_RATE, timeout=1)
11
12 with open("datalogAcces_тест_4_куб__03_11_2025_700Hz_5m.txt", "w") as f:
13     start_time = time.time()
14     last_time = start_time
15     line_count = 0
16
17     while time.time() - start_time < READING_DURATION:
18         if keyboard.is_pressed('q'):
19             print("Зчитування зупинено користувачем.")
20             break
21
22         try:
23             line = ser.readline().decode('utf-8', errors='ignore').strip()
24             if line and any(char in line for char in "(){}[]"):
25                 f.write(line + "\n")
26                 line_count += 1
27
28             # Виводити FPS раз на секунду
29             if time.time() - last_time >= 1.0:
30                 print(f"FPS: {line_count}")
31                 line_count = 0
32                 last_time = time.time()
33         except UnicodeDecodeError as e:
34             print(f"Помилка декодування: {e}")
35
```

## Додаток В

На рисунку зображено реалізацію фільтра Калмана та швидкі перетворення Фур'є в середовищі Python.

```

1 import numpy as np
2 import matplotlib.pyplot as plt
3 import re
4
5 #фільтр Калмана 1D
6 class KalmanFilter1D:
7     def __init__(self, q=1e-5, r=1e-2, initial_estimate=0.0, initial_error=1.0):
8         self.q = q # Шум процесу
9         self.r = r # Шум вимірювання
10        self.x = initial_estimate # Початкове значення
11        self.p = initial_error # Початкова помилка
12
13    def filter(self, data):
14        result = []
15        for z in data:
16            self.p = self.p + self.q # Прогноз помилки
17            k = self.p / (self.p + self.r) # Коефіцієнт Калмана
18            self.x = self.x + k * (z - self.x) # Оновлення оцінки
19            self.p = (1 - k) * self.p # Оновлення помилки
20            result.append(self.x)
21        return np.array(result)
22
23 #Зчитування даних
24 file_path = "datalogAcces_тест_1__12042025_600Hz_5m.txt" # файл!
25
26 with open(file_path, "r", encoding="utf-8") as file:
27     raw_data = file.read()
28
29 # Парсинг даних
30 pattern = r"\{([-\\d.]+),\\s*([-\\d.]+),\\s*([-\\d.]+)\\}"
31 matches = re.findall(pattern, raw_data)
32
33 if not matches:
34     print("Дані не знайдено або формат неправильний.")
35     exit()
36
37 data = np.array(matches, dtype=float)
38
39 # Перевірка структури даних
40 if data.ndim == 1 or data.shape[1] != 3:
41     print("Помилка формату даних!")
42     exit()
43
44 # Витягуємо осі
45 accel_x, accel_y, accel_z = data[:, 0], data[:, 1], data[:, 2]
46 num_samples = len(accel_x)
47
48 # Часова шкала
49 duration_sec = 300 # тривалість запису в секундах
50 sampling_rate = num_samples / duration_sec
51 time_axis = np.linspace(0, duration_sec, num_samples)

```

```

52
53 #Фільтрація фільтром Калмана
54 kf_x = KalmanFilter1D(q=1e-4, r=0.005)
55 kf_y = KalmanFilter1D(q=1e-4, r=0.005)
56 kf_z = KalmanFilter1D(q=1e-4, r=0.005)
57
58 filtered_x = kf_x.filter(accel_x)
59 filtered_y = kf_y.filter(accel_y)
60 filtered_z = kf_z.filter(accel_z)
61
62 #Візуалізація фільтрації у часі
63 fig, axs = plt.subplots(3, 1, figsize=(14, 10), sharex=True)
64
65 axes_info = [('X', accel_x, filtered_x, 'orange'),
66             ('Y', accel_y, filtered_y, 'green'),
67             ('Z', accel_z, filtered_z, 'blue')]
68
69 for ax, (label, raw_data, filtered_data, color) in zip(axs, axes_info):
70     ax.plot(time_axis, raw_data, label=f"Сирі дані A[{label}]", color=color, alpha=0.3)
71     ax.plot(time_axis, filtered_data, label=f"Фільтровані дані A[{label}]", color="red", linewidth=1.5)
72     ax.set_ylabel(f"A[{label}] (м/с²)")
73     ax.set_title(f"Вісь {label}")
74     ax.grid(True)
75     ax.legend()
76
77 for ax in axs:
78     ax.set_xlabel("Час (с)")
79     ax.label_outer()
80     ax.xaxis.set_tick_params(labelbottom=True)
81
82 fig.suptitle("Дані акселерометра MPU9250 з фільтрацією Калмана", fontsize=16)
83 plt.tight_layout(rect=[0, 0.03, 1, 0.95])
84 plt.show()
85
86 #Реалізація FFT
87 def calculate_fft(signal, sampling_rate):
88     n = len(signal)
89     fft_result = np.fft.fft(signal)
90     fft_amplitude = 2.0 / n * np.abs(fft_result) # Нормалізація амплітуди
91     frequencies = np.fft.fftfreq(n, d=1/sampling_rate)
92     mask = frequencies > 0 # Показуємо тільки додатні частоти
93     return frequencies[mask], fft_amplitude[mask]
94
95 #FFT для фільтрованих даних
96 freq_x, fft_x = calculate_fft(filtered_x, sampling_rate)
97 freq_y, fft_y = calculate_fft(filtered_y, sampling_rate)
98 freq_z, fft_z = calculate_fft(filtered_z, sampling_rate)
99
100 #Побудова спектру FFT
101 plt.figure(figsize=(14, 8))
102
103 plt.plot(freq_x, fft_x, label='X-вісь')
104 plt.plot(freq_y, fft_y, label='Y-вісь')
105 plt.plot(freq_z, fft_z, label='Z-вісь')
106
107 plt.xlabel('Частота [Гц]')
108 plt.ylabel('Амплітуда [м/с²]')
109 plt.title('Частотний спектр коливань по осях X, Y, Z після фільтра Калмана')
110 plt.legend()
111 plt.grid(True)
112 plt.xlim(0, sampling_rate/2) # До половини частоти дискретизації
113 plt.show()
114

```