

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)

Розроблення системи автоматичної екстракції
надрукованого виробу 3D-принтера
(тема)

Виконав:

здобувач 4 року навчання,
групи АКТСІ-21-2
Богдан ЦАПЛЯ

(власне ім'я, прізвище)

Спеціальність 151 Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Системна інженерія
(повна назва освітньої програми)

Керівник ст. викл. Дмитро НІКІТІН
(посада, власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту
Зав. кафедри КІТАР

_____ (підпис)

Ігор НЕВЛЮДОВ
(власне ім'я, прізвище)

2025 р.

Я, Цапля Богдан Олексійович, як здобувач вищої освіти ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надав і не одержав 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.

Дата

10.04.25

A handwritten signature in black ink, enclosed in a hand-drawn oval. The signature appears to be 'Bogdan'.

ПІБ

Цапля Б.О.

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет _____ АКТ _____
Кафедра _____ КІТАР _____
Рівень вищої освіти _____ перший (бакалаврський) _____
Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології _____
Тип програм _____ освітньо-професійна _____
Освітня програма _____ Системна інженерія _____
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____

(підпис)

«10» червня 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові _____ Цаплі Богдану Олексійовичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення системи автоматичної екстракції надрукованого виробу 3D принтера

Затверджена наказом по університету від 19.05.2025 р. № 391 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 18.06.2025

3. Вихідні дані до роботи: _____

3.1 Бази 3D-принтерів;

3.2 Картезіанські 3D-принтери;

3.3 Методи екстракції моделей з поверхні столу;

3.4 Програмне забезпечення на базі Orange Pi Zero 3 для підготовки методики екстракції моделі з поверхні столу 3D-принтера.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі:

4.1 Вступ;

4.2 Аналіз предметної області;

4.3 Опис та перевірка програмного забезпечення;

4.4 Кінематика та механічна складова;

4.5 Охорона праці;

4.6 Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) Демонстраційний матеріал у вигляді презентації в форматі Powerpoint (*.ptx) 17 с. формату А4

6. Консультанти розділів роботи

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	Отримання завдання	27.01.2025	виконано
2	Збір матеріалів для дослідження	03.02.2025	виконано
3	Розробка розділу «Аналіз предметної області»	02.04.2025	виконано
4	Розробка розділу «Програмний підхід»	27.04.2025	виконано
5	Розробка розділу «Конструктивний підхід»	15.05.2025	виконано
6	Розробка розділу «Охорона праці і навколишнього середовища»	23.05.2025	виконано
7	Оформлення кваліфікаційної роботи	03.06.2025	виконано

Дата видачі завдання 27.01.2025

Студент _____
(підпис)

Цапля Б.О.
(прізвище, ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

ст. викл. Нікітін Д.О.
(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 96 с., 7 табл., 25 рис., 4 дод., 15 джерел.

FDM 3D-ДРУК, 3D-ПРИНТЕРИ, ЕКСТРАКЦІЯ МОДЕЛІ, ЗОВНІШНІЙ МІКРОКОМП'ЮТЕР, ВЕБ-ІНТЕРФЕЙС.

Об'єкт дослідження – процес екстракції виробів з платформи 3D-принтера.

Предмет дослідження – автоматизована система екстракції виробів 3D-принтера.

Мета роботи – розробити автоматичну систему, здатної до самостійного зняття надрукованих виробів з платформи 3D-принтера, що відкриє нові перспективи у сфері автоматизованого виробництва.

Проведено аналіз сучасних апаратно-програмних засобів для реалізації автономного циклу 3D-друку та автоматичного зняття готових виробів.

У результаті розробки було створено конструктивно-програмний комплекс на базі Orange Pi Zero 3, що керує 3D-принтером з прошивкою Klipper. Завдяки інтеграції з Moonraker та Fluidt забезпечено точну синхронізацію програмного та апаратного рівнів, включно з механізмом автоматичного зняття моделей.

Такий підхід дозволив досягти стабільної автономної роботи, розширюваності функціоналу й можливості інтеграції додаткових компонентів, як-от сенсори або модулі комп'ютерного зору для інтелектуального контролю процесу.

ABSTRACT

The explanatory note contains: 96 p., 7 tabl., 25 fig., 4 app., 15 sources.

FDM 3D PRINTING, 3D PRINTERS, MODEL EXTRACTION, EXTERNAL MICROCOMPUTER, WEB INTERFACE.

The object of research is the process of extracting models from a 3D printer's platform.

The subject of research is an automated system for extracting models from a 3D printer.

The purpose of the work is to develop an automatic system capable of independently removing printed models from a 3D printer's platform, opening new prospects in the field of automated manufacturing.

An analysis was conducted of current hardware and software tools for implementing an autonomous 3D printing cycle and automatic removal of finished products.

As a result of the development, a hardware-software system was created based on the Orange Pi Zero 3, which controls a 3D printer running Klipper firmware. Integration with Moonraker and Fluidd enabled precise synchronization between software and hardware levels, including the automatic model removal mechanism.

This approach made it possible to achieve stable autonomous operation, extendable functionality, and the potential for integrating additional components such as sensors or computer vision modules for intelligent process monitoring.

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень.....	8
Вступ.....	9
1 Аналіз предметної області	11
1.1 Бази 3D-принтерів	11
1.2 Поверхні стола для друку.....	20
1.3 Пластики.....	25
1.4 Методи екстракції моделей	29
1.5 Висновки до першого розділу	34
2 Розробка програмного забезпечення	36
2.1 Опис підходу до розробки.....	36
2.2 Характеристики Orange Pi Zero 3.....	38
2.3 Програма автоматичної екстракції виробів.....	39
2.4 Перепрошивка та конфігурування налаштувань принтера	45
2.5 Висновки до другого розділу	51
3 Розробка механічної складової.....	52
3.1 Кінематика	52
3.2 Елементна база.....	53
3.3 Конструкція.....	56
3.4 Аналіз САУ для крокового двигуна Nema14	61
3.5 Висновки до третього розділу.....	65
4 Охорона праці і навколишнього середовища	66
4.1 Виробнича санітарія	66
4.2 Висновки до четвертого розділу	71
Висновки.....	72
Перелік джерел посилання	74
Додаток А Абробація наукових результатів дослідження.....	76
Додаток Б G-code програми автоматичної екстракції виробів.....	88
Додаток В Start G-Code та End G-Code для Cura.....	93
Додаток Г Демонстраційний матеріал	95

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ОС – Операційна система;

3D – Three Dimensions;

ABS – Acrylonitrile Butadiene Styrene;

API – Application Programming Interface;

FDM – Fused Deposition Modeling;

PEI – Polyetherimide;

PETG – Polyethylene Terephthalate Glycol-modified;

PLA – Polylactic Acid;

TPU/TPE – Thermoplastic Elastomer;

UI – User Interface.

ВСТУП

У сучасному світі адитивні технології, зокрема 3D-друк, дедалі активніше проникають у різні галузі промисловості, науки та побуту. Вони дозволяють швидко й економічно виготовляти прототипи, деталі та цілі вироби з різних матеріалів.

Попри зростання швидкості, точності та зручності друку, однією з проблем, яка досі залишається актуальною, є етап екстракції надрукованого виробу з платформи. У більшості випадків цей процес виконується вручну, що не лише знижує рівень автоматизації всього виробничого циклу, а й може спричинити пошкодження виробу, втрату часу або навіть простої у серійному виробництві.

З огляду на це, розроблення автоматичної системи екстракції надрукованого виробу з платформи 3D-принтера є актуальним завданням, яке спрямоване на підвищення ефективності та автономності роботи друкарських систем. Така система має забезпечити надійне, безпечне та акуратне вилучення готового виробу без залучення оператора, що є важливим кроком до повної автоматизації циклу 3D-друку.

У рамках цього дослідження планується дослідити особливості існуючих типів баз 3D-принтерів, обрати оптимальну конструкцію для реалізації системи екстракції та розробити ефективний механізм її функціонування.

Таким чином, дана робота присвячена аналізу предметної області, обґрунтуванню вибору технічних рішень та безпосередньо розробці автоматичної конструктивно-програмного комплексу, здатного самостійно знімати надруковані моделі з платформи 3D-принтера, що відкриває нові перспективи у сфері автоматизованого виробництва.

Мета роботи – є розробка автоматичної системи, здатної самостійно знімати надруковані моделі з платформи 3D-принтера, що відкриває нові перспективи у сфері автоматизованого виробництва.

Об'єкт дослідження – процес екстракції виробів з платформи 3D-принтера.

Предмет дослідження – автоматизована система екстракції виробів 3D-принтера.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз існуючих кінематичних баз 3D-принтерів;
- проаналізувати доступні методи екстракції виробів 3D-принтера;
- розробити програмний підхід для обраного методу екстракції;
- провести підбір елементної бази, підготувати конструкцію та кінематику

механізму.

Цілі сталого розвитку – забезпечення інноваційної та сталої інфраструктури в галузі адитивного виробництва. У довгостроковій перспективі такі рішення сприяють формуванню більш сталої, інтелектуальної та екологічно відповідальної виробничої екосистеми.

Пояснювальну записку виконано згідно з ДСТУ 3008:2015 [1], а також з методичними вказівками з підготовки й оформлення кваліфікаційної роботи здобувачами першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології освітньої програми «Системна інженерія» [2].

За результатами проведених досліджень опублікована стаття в студентському збірнику [3].

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

1.1 Бази 3D-принтерів

1.1.1 Картезіанська бази 3D-принтерів

Простий у використанні та налаштуванні. Через свою простоту є одним з найпопулярніших серед інших баз 3D принтерів. Технологія, що використовується в цьому типі 3D-принтерів, ґрунтується на декартовій системі координат — одній з найпростіших і найзрозуміліших для реалізації у механіці. Вона передбачає використання трьох основних осей – X, Y та Z, які відповідають за рух у просторі. Механічні частини принтера, зокрема платформа та друкуюча головка, переміщуються вздовж цих осей відповідно до координат, що задаються спеціальним програмним забезпеченням. Це програмне забезпечення формує точну схему переміщення, яка дозволяє друкуючій головці розміщуватися у визначених точках простору відносно платформи.

Принцип роботи картезіанського 3D-принтера полягає в тому, що друкуюча платформа зазвичай рухається лише по вертикальній осі (ось Z), змінюючи висоту кожного нового шару, тоді як друкуюча головка виконує переміщення в горизонтальній площині, тобто по осях X та Y. Такий підхід забезпечує точне нанесення матеріалу шар за шаром та дозволяє досягати високої якості друку. Ця схема вважається найбільш поширеною серед усіх кінематичних конструкцій 3D-принтерів, оскільки вона є відносно простою у реалізації, стабільною та зручною для користувача.

Картезіанські 3D-принтери відомі своєю надійністю та передбачуваністю результатів. Завдяки чіткій структурі переміщення елементів та добре відпрацьованим механізмам, ці моделі забезпечують стабільну якість друку навіть при тривалому використанні. До того ж, ще однією перевагою таких принтерів є доступність витратних матеріалів – як за ціною, так і за асортиментом. На ринку представлено велику кількість матеріалів різних

кольорів і властивостей, що дозволяє реалізовувати широкий спектр проєктів – від простих побутових предметів до складних технічних деталей.

Через свою простоту, ефективність і порівняно невисоку вартість, картезіанські 3D-принтери набули великої популярності серед найрізноманітніших користувачів. Їх активно використовують як початківці, які лише роблять перші кроки у світі 3D-друку, так і професіонали, які займаються виготовленням прототипів, деталей або товарів на продаж. У багатьох випадках саме такі принтери рекомендують для навчання в школах, університетах та гуртках технічної творчості.

Варто також зазначити, що навколо картезіанських принтерів сформувалася велика спільнота користувачів. В інтернеті можна знайти безліч форумів, груп, відеоуроків та інших інформаційних ресурсів, де користувачі діляться досвідом, дають поради з обслуговування, налаштування та модернізації обладнання. Це значно спрощує процес освоєння роботи з принтером навіть для новачків.

Ще однією перевагою є доступність цих пристроїв на ринку. Багато моделей постачаються у двох варіантах: у вигляді набору для самостійного збирання або вже в повністю зібраному вигляді, готовому до роботи одразу після розпакування. Це дозволяє користувачам обрати той варіант, який найкраще відповідає їхнім навичкам і потребам – чи то захоплення збіркою, чи то бажання відразу розпочати друк.

Попри численні переваги, картезіанські 3D-принтери мають і певні недоліки, які необхідно враховувати при виборі обладнання для друку. Один з основних мінусів такої конструкції – відносно великі габарити самого пристрою. Через окрему реалізацію кожної осі переміщення (X, Y, Z), принтер потребує додаткового простору навколо друкуючої області. Це означає, що при однаковому робочому об'ємі картезіанський принтер може займати значно більше місця, ніж, наприклад, дельта-модель.

Ще одним недоліком є обмежена швидкість друку. Через конструктивну особливість та масивні елементи, що рухаються (особливо у випадку з

платформою), надто висока швидкість може призвести до вібрацій, погіршення якості друку або навіть помилок при нанесенні шару. Тому в багатьох випадках швидкість доводиться знижувати заради стабільності результату.

Крім того, конструкція передбачає наявність великої кількості рухомих елементів – направляючих, ременів, шпинделів, кареток. З часом ці компоненти можуть зношуватись, розхитуватись або потребувати заміни. Для збереження точності друку користувачеві необхідно регулярно проводити обслуговування, змазування механізмів, перевірку натягу ременів тощо.

Варто також зазначити, що картезіанські 3D-принтери не завжди найкраще підходять для друку складних моделей з великою кількістю нависань або вигнутих форм. Через рух головки по прямокутній траєкторії та особливості подачі матеріалу, такі форми можуть потребувати додаткових підтримуючих елементів, які потім необхідно знімати вручну.

Ще одним недоліком є можливий високий рівень шуму під час роботи. Це особливо характерно для бюджетних моделей, у яких відсутні елементи шумоізоляції або використано менш якісні комплектуючі. При роботі в домашніх умовах це може створювати певний дискомфорт.

Окремо варто згадати складність калібрування. У багатьох недорогих принтерах немає автоматичного вирівнювання платформи, тому користувач змушений налаштувати її вручну за допомогою гвинтів. Це потребує певного досвіду та може стати перепорою для новачків. Наявність ручного або автоматичного автоурівнювання значною мірою залежить від кінематики та мікроконтролерної частини принтера, яка також впливає на точність позиціонування і повторюваність результатів друку.

Таким чином, попри свою простоту, популярність і стабільність, картезіанські 3D-принтери (рис. 1.1) мають конструктивні та експлуатаційні особливості, які можуть стати критичними у певних умовах. Вибір саме такого типу друкувального обладнання повинен враховувати не лише переваги, а й зазначені обмеження, що впливають на якість, зручність і ефективність роботи.

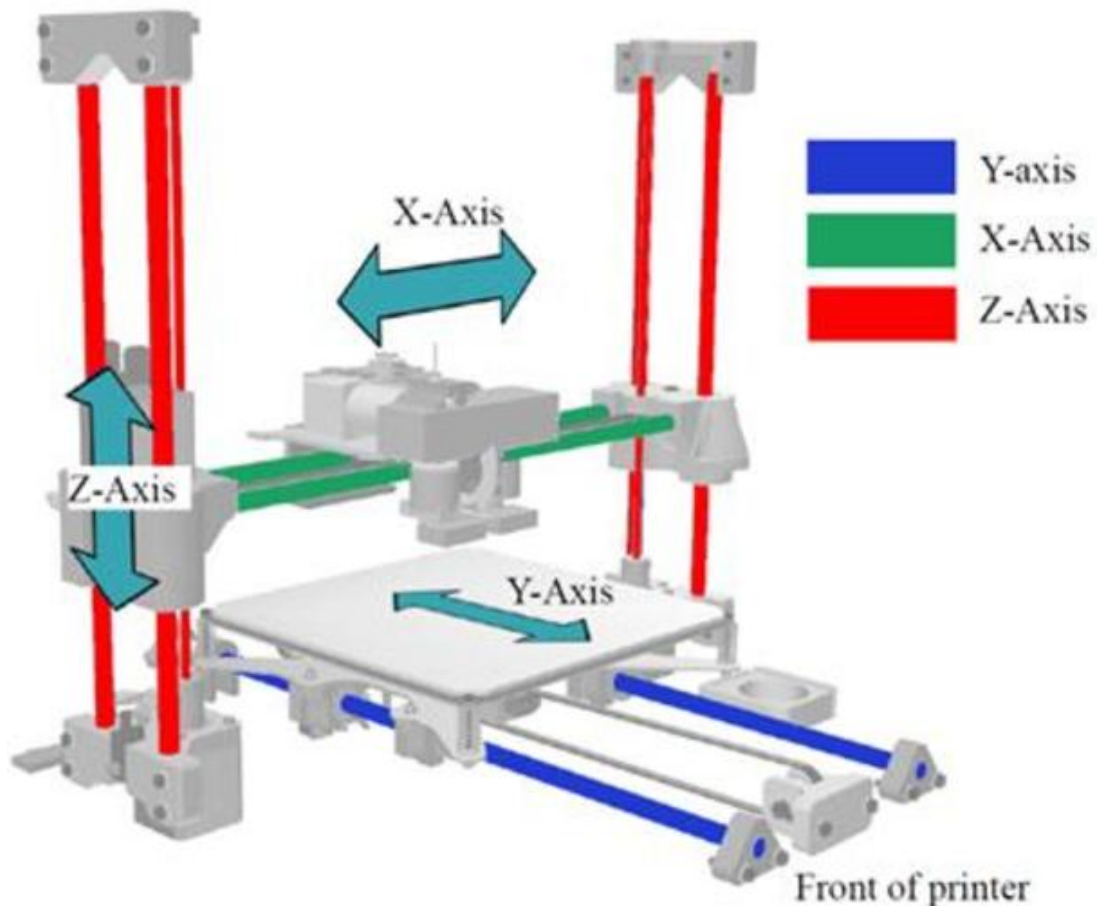


Рисунок 1.1 – Картезіанська база принтера

1.1.2 Дельта бази 3D-принтерів

За зовнішнім виглядом, а також за принципом роботи механічної частини, дельта-принтери суттєво відрізняються від картезіанських моделей. Основною особливістю, яка відрізняє дельта-принтер від картезіанського, є спосіб переміщення друкуючої головки відносно платформи. Якщо в картезіанській схемі головка рухається по прямолінійних осях, то в дельта-принтері переміщення відбувається завдяки синхронній роботі трьох вертикальних направляючих, на яких закріплені каретки, що приводять у рух екструдер.

Конструктивно дельта-принтер (рис. 1.2) має фіксовану, нерухому платформу, а сам екструдер утримується у повітрі за допомогою трьох кінематичних «рук», які з'єднані з каретками на напрямних. Така система забезпечує високу маневреність головки та дозволяє досягати значної швидкості переміщення. Це є однією з головних переваг дельта-принтерів: швидкість друку значно вища порівняно з картезіанськими аналогами. Проте за високу швидкість

доводиться розплачуватися точністю. Через те, що всі три двигуни працюють одночасно і координують рух головки разом, іноді можуть виникати помилки у визначенні точного положення. Це призводить до зниження якості друку, особливо при створенні дрібних або складних деталей.

Серед інших переваг дельта-принтерів слід відзначити їх компактність у плані займаної площі. Конструкція має вузький, вертикально витягнутий корпус, що дозволяє зекономити простір, особливо в умовах обмеженого робочого місця. До того ж, завдяки вертикальній компоновці механіки, такі принтери мають змогу друкувати досить високі об'єкти, що є важливою перевагою для створення великогабаритних моделей у висоту. Виступаючі частини практично відсутні, що додає ергономічності й зручності у розміщенні обладнання.

Водночас, як і будь-яка техніка, дельта-принтери мають свої недоліки. По-перше, такі моделі часто мають вищу вартість у порівнянні з картезіанськими. Це обумовлено складнішою кінематикою – дельта-механізмом, у якому три однакові приводи рухають каретку по вертикальних напрямних, що дозволяє досягти високої швидкості переміщення, але вимагає високої точності виготовлення всіх компонентів. Через специфіку руху складніше забезпечити стабільну якість друку по всій площі платформи. По-друге, процес складання дельта-принтера є більш складним для новачків. Успішна збірка вимагає розуміння принципів роботи механіки, правильного розташування підшипників, ременів, калібрування довжини тяг та налаштування прошивки.

Отже, дельта-принтери мають цілу низку конструктивних особливостей, які визначають їх переваги й недоліки. Висока швидкість друку та можливість створення високих моделей роблять їх привабливими для певних завдань, однак потенційні обмеження в точності та складність у використанні слід обов'язково враховувати при виборі.



Рисунок 1.2 – Дельта база 3D-принтера

1.1.3 CoreXY бази 3D-принтерів

Серед сучасних типів 3D-принтерів, які використовуються як у професійній, так і в аматорській практиці, особливе місце займають моделі з кінематикою CoreXY. Цей тип механіки був розроблений як спроба усунути деякі недоліки традиційної картезіанської схеми та забезпечити вищу швидкість, точність і стабільність під час друку. Сама ідея CoreXY з'явилася на основі поєднання ефективності руху та зменшення інерційних навантажень на конструкцію.

Основна відмінність механіки CoreXY полягає в організації руху друкуючої головки. На відміну від картезіанських систем, де кожна вісь відповідає окремому мотору, в CoreXY два крокові двигуни одночасно керують переміщенням головки по осях X і Y. Завдяки особливій конфігурації ременів, рух відбувається за допомогою комбінації обертання обох двигунів – це дозволяє досягти високої точності та плавності при переміщенні екструдера.

З конструктивної точки зору, у CoreXY (рис. 1.3) механіка друкуючий стіл найчастіше рухається лише по осі Z (вгору-вниз), тоді як екструдер здійснює переміщення в горизонтальній площині. Така схема дозволяє значно зменшити масу рухомих елементів, оскільки на осі X та Y не потрібно розміщувати важкі мотори. Зниження інерції позитивно впливає на якість друку при високих швидкостях і дозволяє досягти точного нанесення матеріалу без вібрацій.

Однією з ключових переваг CoreXY є здатність до дуже швидкого друку без втрати точності. Завдяки ефективному розподілу навантаження на двигуни та зменшенню маси рухомих частин, такі принтери добре підходять для задач, де необхідна висока продуктивність. Ще одним плюсом є відносна компактність механізму: навіть у корпусах середнього розміру можна реалізувати доволі велику область друку.

Проте, кінематична схема CoreXY також має свої недоліки. Система передачі руху за допомогою перехресних ременів потребує точного налаштування геометрії та синхронізації обох осей. Невірний натяг або несиметричне розміщення ременів може спричинити перекося рухомої платформи, що призводить до похибок позиціонування та втрати точності при друці. Сам процес складання принтера з такою схемою потребує розуміння принципів роботи механіки та акуратності, тому CoreXY не завжди рекомендують як перший принтер для новачків.

Крім того, висока швидкість друку, яка є перевагою CoreXY, ставить підвищені вимоги до жорсткості конструкції. Для забезпечення стабільності та зменшення вібрацій необхідно використовувати міцний каркас, високоякісні напрямні та підшипники, а це впливає на загальну вартість пристрою. Бюджетні моделі зі слабкою рамою не здатні повноцінно реалізувати потенціал цієї кінематики, тому при виборі принтера на базі CoreXY важливо звертати увагу на якість конструктивних рішень.

Узагальнюючи, можна сказати, що CoreXY – це кінематична схема, орієнтована на високу ефективність, точність і швидкість. Вона знаходить широке застосування у напівпрофесійному та професійному середовищі, а також серед досвідчених користувачів, які шукають баланс між якістю та продуктивністю. При належному налаштуванні такі принтери здатні забезпечити високий рівень деталізації та надійності навіть при тривалому друці.

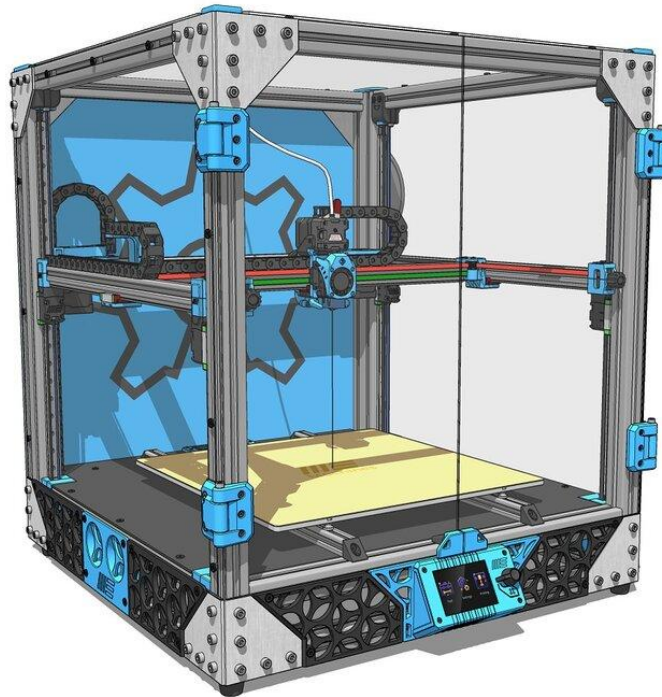


Рисунок 1.3 – CoreXY база 3D-принтера

1.1.4 Полярні бази 3D-принтерів

Полярні бази є відносно новим явищем на ринку адитивних технологій. Їх кінематична схема була представлена нещодавно компанією Polar і суттєво відрізняється від традиційних підходів. Як випливає з назви, такі принтери працюють на основі полярної системи координат. Якщо в більшості попередніх моделей застосовувалась класична прямокутна система XYZ, то тут позиціонування екструдера здійснюється з урахуванням радіусу та кута.

Конструктивно полярний принтер (рис. 1.4) має круглу платформу, яка обертається навколо центральної осі. Таким чином, рух платформи відбувається лише в горизонтальній площині за колом, тоді як екструдер може переміщуватися виключно по вертикалі. Така компоновка віддалено нагадує

роботу вінілового програвача, однак на відміну від нього, платформа не просто обертається, а бере безпосередню участь у формуванні моделі, тоді як друкуюча головка залишається обмеженою у своїх рухах.

Однією з ключових переваг полярних принтерів є можливість створення великих об'єктів при збереженні компактності самої конструкції. Крім того, така кінематична схема дозволяє досягати вищої енергоефективності у порівнянні з класичними рішеннями. Проте наразі ці принтери демонструють нижчу точність друку, що пов'язано з новизною технології. Існує ймовірність, що з розвитком інженерних рішень цей недолік буде усунуто в майбутньому.

Що стосується матеріалів, то полярні принтери зазвичай працюють з PLA-пластиком. Їх платформа, як правило, не оснащена підігрівом, тому використання таких матеріалів, як ABS, ускладнюється або взагалі стає неможливим без додаткового доопрацювання. Виробники часто позиціонують ці пристрої як інструмент для ознайомлення з технологією 3D-друку, зокрема для навчальних або демонстраційних цілей.

Таким чином, полярні 3D-принтери являють собою перспективний напрямок розвитку технологій, який наразі перебуває на ранній стадії впровадження. Незважаючи на певні обмеження, вони мають потенціал для подальшого вдосконалення та розширення сфери застосування.



Рисунок 1.4 – Полярна база 3D принтера

1.2 Поверхні стола для друку

1.2.1 Скляні поверхні стола

Скляні поверхні (рис. 1.5) користуються популярністю серед прихильників 3D-друку, передусім завдяки своїй рівній та гладкій поверхні. Це забезпечує хорошу адгезію більшості матеріалів для друку. Найчастіше вони виготовляються з загартованого скла, що гарантує високу міцність і термостійкість. Скло також забезпечує гладке та блискуче покриття нижнього шару виробу. Ці платформи сумісні з такими матеріалами, як PLA, ABS та PETG.

Окрему увагу варто приділити мікропористому склу – новішому типу скляної поверхні, який має дрібнопористу структуру. Така структура покращує зчеплення першого шару без необхідності використання додаткових клеїв або адгезивних засобів. Мікропористе скло дозволяє деталям надійно триматися під час друку, а після охолодження – легко зніматися. Воно поєднує в собі естетичність класичного скла та покращені функціональні властивості.

Переваги скляних поверхонь:

- рівна поверхня: забезпечує рівномірне нанесення шарів, що знижує ризик деформацій та покращує якість друку;
- гладкість: перший шар має глянцекий вигляд, що покращує естетичність готового виробу;
- простота очищення: поверхню легко чистити за допомогою звичайних засобів, що сприяє стабільному результату друку.

Недоліки скляних поверхонь:

- крихкість: скло може легко тріснути при необережному використанні або падінні;
- час нагрівання: скляні платформи потребують більше часу для досягнення робочої температури, що збільшує час підготовки до друку.



Рисунок 1.5 – Скляна поверхня

1.2.2 Алюмінієві поверхні стола

Алюмінієві поверхні (рис. 1.6) відзначаються високою міцністю та відмінною теплопровідністю. Вони забезпечують стабільну поверхню для друку та швидке нагрівання, що зменшує ризик викривлень та покращує якість моделі. Алюміній також є легким матеріалом, завдяки чому принтер з такою платформою легше транспортувати й монтувати.

Переваги алюмінієвих поверхонь:

- міцність: стійкі до викривлень і механічних пошкоджень, забезпечують довготривалий термін експлуатації;
- рівномірне нагрівання: швидко та рівномірно прогрівається, що забезпечує стабільні умови для друку;
- легкість: невелика вага полегшує встановлення та обслуговування принтера.

Недоліки алюмінієвих поверхонь:

- якість поверхні: для деяких матеріалів може знадобитися додаткове покриття (наприклад, Karton стрічка або 3Dlac) для покращення адгезії;
- схильність до подряпин: з часом на поверхні можуть з'являтися подряпини, що впливає на якість друку і потребує заміни або полірування.

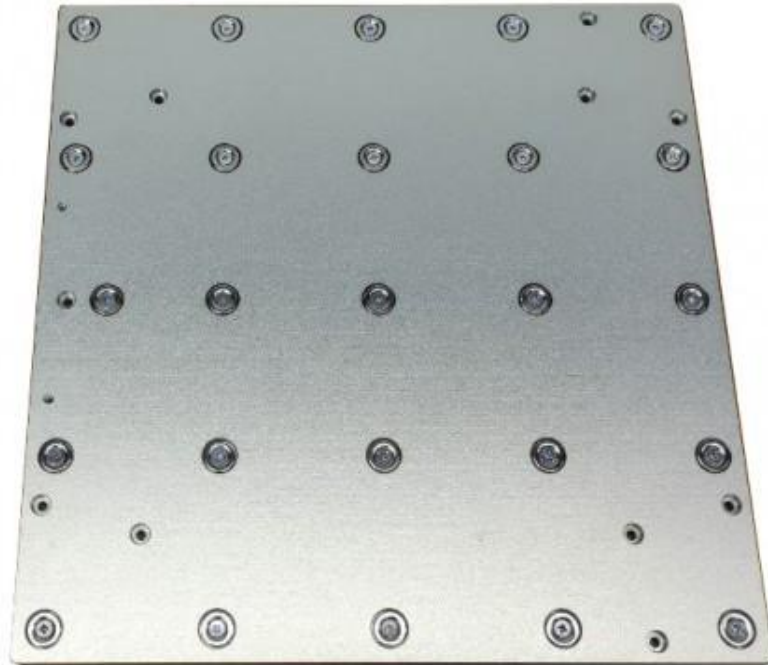


Рисунок 1.6 – Алюмінієва поверхня стола

1.2.3 Поверхні з PEI покриттям

Поверхні, покриті PEI (рис. 1.7), відомі своєю відмінною адгезією та легкістю у видаленні надрукованих моделей. Виготовляються з термостійкого пластику, який витримує багаторазове використання. Такий тип поверхні не потребує додаткових клейких засобів, що значно спрощує процес підготовки до друку. Після охолодження модель легко знімається, що зменшує ризик її пошкодження. Переваги поверхонь з PEI покриттям:

- сильна адгезія: забезпечує надійне приклеювання моделі без додаткових засобів;
- багаторазове використання: платформа може слугувати тривалий час без суттєвого зносу;

– легке зняття моделей: після охолодження виріб легко знімається без пошкоджень.

Недоліки поверхонь з PEI покриттям:

– вартість: цей тип платформ дорожчий за інші варіанти, що може підвищити загальну вартість обладнання;

– догляд: необхідне регулярне очищення для збереження властивостей поверхні.



Рисунок 1.7 – Поверхня стола з PEI покриттям

1.2.4 Магнітні поверхні

Магнітні платформи (рис. 1.8) забезпечують гнучку друкуючу поверхню, що особливо приваблює користувачів завдяки зручності експлуатації. Конструктивно складаються з магнітної основи та знімного верхнього шару. Такі платформи дозволяють легко встановлювати й знімати поверхню, що спрощує

обслуговування. Еластичність поверхні дає змогу знімати готову модель, просто зігнувши платформу – це мінімізує ризик пошкодження виробу.

Останнім часом у сфері FDM-друку особливої популярності набули магнітні платформи з верхнім шаром із PEI-покриттям. Така комбінація поєднує гнучкість основи з чудовими адгезійними властивостями поверхні, що забезпечує зручність у щоденному використанні та стабільність процесу друку. Завдяки PEI-покриттю філамент щільно прилягає до платформи під час друку, що знижує ризик відшаровування першого шару та підвищує якість готової моделі. Після завершення друку та охолодження платформи модель легко знімається без додаткових інструментів, іноді достатньо лише злегка зігнути гнучку пластину.

Такі платформи також мають високу сумісність із різними матеріалами, включаючи PLA, PETG, TPU, ABS та інші популярні філаменти. Це робить їх універсальним рішенням як для побутового, так і для напівпрофесійного використання. Крім того, модульна конструкція дозволяє легко знімати й очищувати поверхню або замінювати її у разі зносу. Завдяки своїм експлуатаційним властивостям магнітна гнучка платформа з PEI стала однією з найбільш зручних та ефективних серед сучасних систем адгезії в 3D-друці.

Переваги магнітних поверхонь:

- гнучкість: зняття моделі шляхом згинання платформи знижує ризик пошкоджень;
- зручність: можливість легко знімати та встановлювати поверхню значно полегшує догляд за принтером;
- різноманіття покриттів: доступні у різних варіантах поверхонь, що дозволяє працювати з різними матеріалами.

Недоліки магнітних поверхонь:

- температурні обмеження: тривалий вплив високих температур (понад 100–110 °C) може ослабити магнітні властивості основи, що знижує надійність кріплення;

- знос поверхні: з часом PEI покриття може втрачати свої властивості – потрібне періодичне чищення або заміна;
- обмежена жорсткість: через свою гнучку структуру, магнітні пластини не забезпечують таку ідеальну рівність, як скляні платформи.



Рисунок 1.8 – Магнітна поверхня стола

1.3 Пластики

1.3.1 ABS (акрилонітрил-бутадієн-стирол)

ABS є одним із найстаріших і найпоширеніших матеріалів у світі 3D-друку. Цей пластик почали використовувати ще в перших промислових 3D-принтерах, і з того часу він не втратив своєї популярності. Завдяки низькій вартості та хорошим механічним властивостям, ABS залишається одним із найкращих варіантів для створення міцних і функціональних виробів.

Матеріал відомий своєю ударостійкістю та витривалістю до зносу. Це робить його придатним для виготовлення елементів, які мають витримувати

фізичне навантаження або часте використання. Як приклад – популярні конструктори LEGO виготовляються саме з ABS.

Ще однією важливою перевагою є висока температура склування – тобто температура, при якій матеріал починає деформуватися. Це робить ABS добрим вибором для виробів, що будуть експлуатуватись на відкритому повітрі або в умовах підвищених температур.

1.3.2 PLA (полілактид)

PLA, або полілактид, є одним із найпопулярніших матеріалів у сфері настільного 3D-друку. Він часто використовується як основний філамент для більшості FDM/FFF-принтерів, оскільки потребує невисокої температури екструзії та не вимагає підігрітої платформи. Це робить PLA ідеальним варіантом для новачків, які лише починають ознайомлюватися з 3D-друком.

Матеріал дуже простий у використанні, не вимагає складних налаштувань і забезпечує стабільний результат. PLA залишається одним із найдоступніших філаментів на ринку та придатний для виготовлення широкого спектра виробів – від декоративних моделей до прототипів і функціональних елементів з помірним навантаженням.

Окремою перевагою PLA є його екологічність. Пластик виготовляється з поновлюваних джерел, зокрема з кукурудзяного крохмалю або цукрової тростини, що робить його біорозкладним і менш шкідливим для навколишнього середовища. Під час друку матеріал може мати легкий солодкуватий запах, що також вважається приємною особливістю.

1.3.3 PETG (поліетилентерефталат з гліколем)

PETG – це модифікований гліколем різновид поліетилентерефталату (PET), матеріалу, що широко використовується у виробництві пластикових пляшок для води. Завдяки своїм властивостям, PETG став популярним філаментом для 3D-друку, поєднуючи в собі міцність, гнучкість і простоту використання.

Цей матеріал є напівжорстким і має гарну стійкість до ударів, що робить його придатним для виготовлення як декоративних, так і функціональних деталей. Хоча його поверхня є дещо м'якшою, ніж в ABS, що робить її вразливою до подряпин та зношування, загальні механічні характеристики PETG залишаються на високому рівні.

Однією з ключових переваг PETG є його термічна стабільність. Пластик має здатність до ефективного охолодження з мінімальною деформацією після друку. Це значно знижує ризик викривлення моделі при охолодженні, навіть без використання закритої камери.

На ринку також доступні інші варіації цього полімеру, зокрема PETE та PETT, однак більшість порад і технічних характеристик застосовні до всієї групи PET-філаментів.

1.3.4 Гнучкі філаменти (TPU/TPE)

Гнучкі філаменти виготовляються на основі термопластичних еластомерів (TPE) – це полімери, що поєднують властивості жорсткого пластику та гуми. Як видно з назви, цей матеріал є еластичним: його можна згинати, скручувати або розтягувати без пошкодження.

Одним з найпопулярніших різновидів є термопластичний поліуретан (TPU), який широко застосовується у сфері 3D-друку завдяки своїй стабільності, зносостійкості та простоті у використанні порівняно з іншими типами TPE. В багатьох джерелах TPE і TPU вживаються як синоніми, також поширеними є торгові назви типу Ninjaflex.

1.3.5 Нейлон

Нейлон, або поліамід, є популярним матеріалом у пластмасовій промисловості завдяки поєднанню міцності та гнучкості. У сфері 3D-друку нейлон часто використовують для виготовлення функціональних деталей, які повинні витримувати навантаження, удари або повторювані вигини.

Температура друку нейлону зазвичай становить близько 250 °С, однак деякі виробники пропонують модифіковані філаменти, які дозволяють друк при нижчих температурах – до 220 °С. Це робить нейлон доступнішим для принтерів із менш потужними хотендами, яким складно досягати високих температур, та дозволяє уникнути їх модернізації.

Одна з основних складностей при використанні нейлону полягає в його гігроскопічності – здатності активно поглинати вологу з повітря. Навіть незначна кількість вологи в нитці призводить до погіршення якості друку: з'являються бульбашки, шармування, розшарування і тріщини. Тому зберігання філаменту відіграє вирішальну роль – матеріал повинен зберігатися в герметичних контейнерах із осушувачами або у спеціальних сушарках.

1.4 Методи екстракції моделей

Автоматизація процесу екстракції 3D-надрукованих моделей є важливим напрямом у розвитку сучасних 3D-принтерів, особливо в промислових і комерційних середовищах. Вона дозволяє зменшити потребу в ручній праці, підвищити ефективність і точність процесу друку, а також забезпечити безперервність виробництва. Автоматизація екстракції (рис. 1.9) часто є складовою частиною автоматизованих виробничих ліній і принтерів, що використовуються в таких галузях, як автомобільна промисловість, медицина, промислові деталі, прототипування та серійне виробництво.



Рисунок 1.9 – 3D ферма з автоматизованою екстракцією

1.4.1 Гнучкі та знімні поверхні

Цей метод передбачає використання гнучкої магнітної пластини, зазвичай покритої шаром PEI або подібним матеріалом, яка кріпиться до основної платформи за допомогою магнітів. Після завершення друку користувач (або механізм) може просто зняти верхню частину платформи, злегка її зігнути, і модель відпаде сама.

Перевагою є простота реалізації і відсутність потреби в складному механізмі. Такі рішення зараз дуже популярні у виробників типу Creality, Prusa та Anycubic. Цей метод також дуже ефективний у середовищах з високою інтенсивністю друку, де важлива швидка підготовка платформи до наступного завдання.

1.4.2 Механічні системи виштовхування

Підхід до автоматизації екстракції 3D-моделей, що поєднує гнучку магнітну платформу з активними механічними елементами, є одним із найефективніших рішень для забезпечення безперервного циклу друку. Цей метод заснований на інтеграції декількох добре відомих технологій в єдину систему, яка може працювати без участі оператора протягом тривалого часу.

Основою конструкції є гнучка металева пластина, зазвичай зі сталевого листа з покриттям з PEI або іншого адгезивного матеріалу, що забезпечує надійне

зчеплення з моделлю під час друку. Пластина кріпиться до нагрівального столу за допомогою сильних вбудованих магнітів, що гарантує стабільність під час друку та дозволяє легко зняти її після завершення процесу.

Після охолодження платформи запускається активна фаза екстракції. Тут у гру вступає механізм, який виконує часткове згинання або нахил пластини, наприклад:

- штовхач, який механічно виштовхує модель;
- обертовий валик або лопать, що проходить уздовж поверхні;
- підйомна платформа, яка змінює кут нахилу основи.

У момент деформації пластини або її руху модель відривається від поверхні і скочується або зсувається в спеціальний приймальний лоток, після чого платформа повертається у початкове положення і готова до наступного завдання. Цей процес може синхронізуватися з G-кодом або управлятися зовнішнім контролером.

Головна перевага цього методу – його адаптивність та надійність. Він не лише дозволяє уникнути ручного втручання, а й забезпечує стабільне відокремлення моделей, незалежно від їх геометрії чи площі прилягання до платформи. Це особливо важливо у великих фермах 3D-друку, де щодня виготовляються сотні однакових або схожих моделей, і де навіть кількасекундна затримка може вплинути на загальну продуктивність.

У реальних умовах цей підхід уже реалізований у фермах, зібраних на базі Prusa MK3/S та MK4, де подібна система дозволяє друкувати цілодобово без участі людини (рис. 1.10). Аналогічні модифікації створюються також для принтерів Creality Ender та інших, що робить цей метод доступним не лише для великих компаній, а й для малого бізнесу та ентузіастів, які прагнуть автоматизувати свою роботу.

Таким чином, це рішення успішно поєднує гнучкість, доступність і надійність, що робить його одним із найперспективніших напрямків розвитку автоматизації екстракції в сучасному 3D-друці.



Рисунок 1.10 – Автоматизована ферма на базі принтерів Prusa

1.4.3 Конвеєрні стрічки

У принтерах з такою архітектурою друк виконується безпосередньо на рухомій стрічці, яка одночасно виконує функції платформи для друку та механізму автоматичної екстракції моделі. Після завершення формування деталі, стрічка автоматично просувається вперед, і надрукована модель скочується під власною вагою або під невеликим кутом нахилу у спеціальний приймальний лоток або кошик.

Цей підхід має низку переваг. Насамперед – це повна автоматизація процесу друку й екстракції, що дозволяє створювати безперервні виробничі лінії, які можуть працювати цілодобово. Такі принтери ідеально підходять для масового виробництва однотипних компонентів, особливо коли йдеться про великі обсяги замовлень або серійне виготовлення.

Яскравим прикладом такої технології є Creality CR-30 (рис. 1.11), який став відомим завдяки своїй здатності безупинно друкувати однакові об'єкти протягом тривалого періоду часу без зупинок на зняття моделей. Подібні системи активно використовуються у невеликих виробництвах, 3D-фермах та навіть у логістичних стартапах, де необхідна швидка та стабільна генерація продукції.



Рисунок 1.11 – Creality CR-30 («3DPrintMill»)

1.4.4 Пасивна екстракція після охолодження

Деякі типи пластиків (наприклад, PLA) та друкарських поверхонь (скло, PEI) мають властивість втрачати адгезію після охолодження. Цей ефект дозволяє реалізувати пасивну автоматизацію: після завершення друку і вимкнення нагріву модель злегка відшаровується від платформи. Якщо додати легкий нахил або вібрацію, модель просто з'їжджає з поверхні.

Хоча пасивна екстракція на основі втрати адгезії після охолодження здається простою та економічною, на практиці цей метод має низку серйозних обмежень, які знижують його ефективність.

Насамперед, він сильно залежить від комбінації матеріалу та друкарської поверхні. Наприклад, PLA дійсно може втратити зчеплення після охолодження, але інші філаменти, як-от PETG, TPU або ABS, навпаки, зберігають високу адгезію навіть після повного остигання, що робить метод малоефективним або зовсім непридатним для них. Так само не всі поверхні – наприклад, текстуроване PEI чи деякі типи скла – гарантують однакову поведінку в різних температурних режимах.

Крім того, геометрія моделі має величезне значення. Якщо деталь має велику площу прилягання до платформи або складну форму з численними виступами, вона може залишатися приклеєною до поверхні навіть після охолодження. У таких випадках навіть легка вібрація або нахил не допоможуть – потрібне фізичне втручання для зняття деталі.

Ще одним мінусом є нестабільність результату. В різних кліматичних умовах або при зміні вологості поведінка матеріалів може змінюватися. Це ускладнює прогнозованість процесу і не дозволяє використовувати метод у високонавантажених середовищах, де потрібна 100% надійність.

Загалом, пасивна екстракція на основі втрати адгезії – це скоріше тимчасове рішення для простих завдань або домашнього використання, ніж метод для серйозної автоматизації у виробництві. Вона може бути корисною для одиночних, малих моделей, але не забезпечує масштабованості та стабільності, необхідної для безперервного або комерційного 3D-друку.

1.4.5 Роботизовані маніпулятори

Цей метод є найбільш технологічно просунутим серед усіх підходів до автоматизації екстракції 3D-моделей і водночас найгнучкішим у плані можливостей. Робот-маніпулятор, зазвичай промислового класу (з 3, 4, 6 або навіть більше ступенями свободи), встановлюється поруч із одним або кількома 3D-принтерами та виконує завдання, які раніше вимагали людської участі. Після завершення друку робот під'їжджає до платформи, обережно знімає модель за допомогою вакуумної присоски, пальцевого захоплення або спеціального інструмента, після чого переносить її у визначене місце – контейнер, лінію постобробки, зону охолодження чи пакування.

Цей тип систем часто включає інтегровані камери та візуальні сенсори, які дають змогу ідентифікувати точне розташування моделі на столі, навіть якщо вона зміщена або частково приклеєна. Інтелектуальні алгоритми обробки зображення допомагають визначити оптимальний кут підходу до об'єкта, силу захоплення, оцінити ризики пошкодження та за потреби скоригувати дії в реальному часі.

Однією з ключових переваг такого підходу є його масштабованість. Один маніпулятор може обслуговувати декілька 3D-принтерів, переміщаючись між ними по лінії або маючи доступ через систему конвеєрів чи поворотних столів.

Однак варто зазначити, що така система є найдорожчою у реалізації. Вона вимагає складного налаштування, точного калібрування та інтеграції з програмним забезпеченням, яке координує роботу принтерів, камер і самого маніпулятора. Незважаючи на це, інвестиції часто окупаються завдяки високій продуктивності, мінімізації браку й відсутності потреби в ручній праці.

Подібні системи вже використовуються в автоматизованих виробничих лініях, включаючи ті, що створені великими сервісами 3D-друку, виробниками автомобільних деталей, медичного обладнання та електроніки. Це один із напрямів, що набуває особливої актуальності в контексті впровадження «фабрик майбутнього» (рис. 1.12) та індустрії 4.0.



Рисунок 1.12 – Фабрика майбутнього (Smart Factory)

1.5 Висновки до першого розділу

Успішне впровадження 3D-друку в сучасні виробничі процеси залежить від комплексного підходу до побудови системи – від вибору конструкції бази принтера до впровадження сучасних засобів автоматизації. Бази 3D-принтерів формують фундаментальні характеристики всієї системи, визначаючи точність, стабільність і можливості модифікації. Конструкція та особливості друкувального столу напряму впливають на якість адгезії, температурну стабільність і зручність у роботі з різними матеріалами.

Розглянуті матеріали для друку, зокрема термопласти (PLA, ABS, PETG) та спеціалізовані композити, визначають механічні, термічні та естетичні властивості готових виробів. Точний вибір пластику згідно з вимогами до міцності, гнучкості, стійкості до температури чи впливу зовнішніх факторів є критично важливим на етапі проєктування.

Окрему роль відіграють методи автоматизації процесів у 3D-друці. Впровадження автоматичних систем вирівнювання платформи, подачі філамента, моніторингу температури, виявлення збоїв та інші інтелектуальні рішення значно підвищують надійність, швидкість і повторюваність друку. Автоматизація також сприяє безперервній роботі обладнання, зменшенню впливу людського фактора та загальному підвищенню продуктивності.

Лише гармонійне поєднання технічної основи принтера, правильно обраних матеріалів для друку та сучасних методів автоматизації дає змогу максимально ефективно реалізувати потенціал адитивних технологій як у побутовому, так і в промисловому використанні.

2 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

2.1 Опис підходу до розробки

Реалізація автоматичної екстракції 3D надрукованої моделі передбачає інтеграцію апаратного та програмного забезпечення, які працюють у зв'язці для забезпечення стабільного й автономного процесу. Ця система складається з двох ключових компонентів.

1. Налаштований мікрокомп'ютер Orange Pi Zero 3.

Orange Pi Zero 3 – це компактний та енергоефективний мікрокомп'ютер, обраний для керування 3D-принтером та виконання допоміжних завдань (наприклад, моніторингу, обробки команд або взаємодії з зовнішніми сенсорами).

На нього встановлена легка версія ОС Debian, оптимізована для стабільної безперервної роботи в умовах виробництва. Після встановлення ОС Debian на Orange Pi Zero 3 проводиться:

- налаштування мережевого з'єднання (локального або Wi-Fi);
- оновлення всіх пакетів ОС, за допомогою команд «`sudo apt update`»; «`sudo apt upgrade`»;
- встановлення «`kiauh`» (Klipper Installation And Update Helper);
- інсталяція серверного середовища (наприклад, Moonraker для Klipper);
- налаштування служби автоматичного запуску системного контролера принтера з графічним інтерфейсом (`fluidd`);
- підключення до 3D-принтера через USB або UART для передавання команд і зчитування телеметрії;
- додатково можна підключити окремі пакети та репозиторії для більшої кількості функціоналу, наприклад швидку зйомку (`timelapse`).

2. Перепрошитий та відкалібрований FDM 3D-принтер із програмною базою Klipper, наприклад Ender-3 V3 SE (рис. 2.1).



Рисунок 2.1 – 3D-принтер Ender-3 V3 SE

Принтер оснащується альтернативною прошивкою Klipper, яка забезпечує:

- точнішу й плавнішу роботу завдяки високошвидкісній обробці команд через зовнішній контролер;
- можливість віддаленого керування та налаштування через вебінтерфейс (наприклад, Fluidd або Mainsail);
- збирання детальної телеметрії у реальному часі;
- сумісність із зовнішніми модулями, що відповідають за механізми екстракції.

Перед початком роботи принтер:

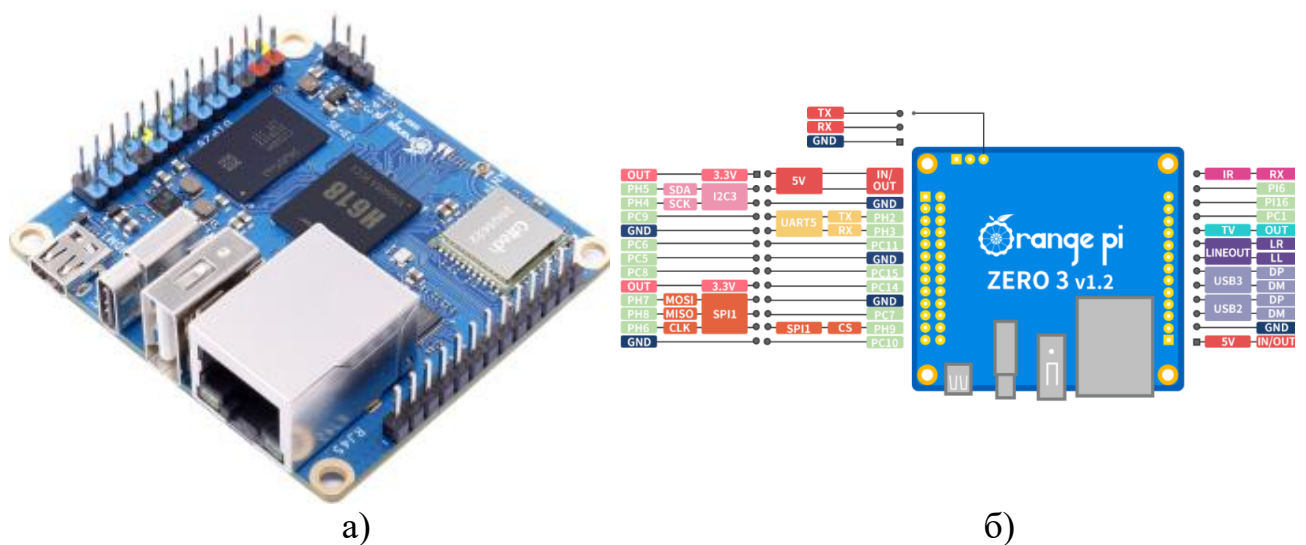
- проходить процедуру перепрошивки з використанням конфігураційного файлу, адаптованого під конкретну модель;
- відкалібровується (рівень платформи, PID-нагріву, компенсування зміщення осей, налаштування z-offset, компенсування вібраційних резонансів);

– тестується на типових сценаріях друку, щоб гарантувати сумісність із механізмами автоматичного зняття моделі.

У поєднанні ці два компоненти утворюють базову інфраструктуру для реалізації автоматичного зняття моделі з друкарської платформи, з можливістю розширення за рахунок додавання елементів штучного інтелекту, сенсорики або роботизованих маніпуляторів.

2.2 Характеристики Orange Pi Zero 3

Orange Pi Zero 3 – це компактний і доступний одноплатний комп'ютер (SBC), який пропонує потужні характеристики для своєї ціни (рис. 2.2). Завдяки поєднанню сучасних компонентів (табл. 2.1), ця плата чудово підходить для найрізноманітніших задач. Вона є ідеальним вибором для проєктів у сфері Інтернету речей (IoT), побудови мініатюрних медіацентрів, розробки емуляторів ретро-консолей, розгортання домашніх серверів, систем автоматизації, а також інших вбудованих або спеціалізованих застосувань, де важливі компактність, енергоефективність і доступність.



а – візуальний вигляд; б – призначення пінів

Рисунок 2.2 – Одноплатний мікрокомп'ютер Orange Pi Zero 3

Таблиця 2.1 – Короткі характеристики Orange Pi Zero 3

CPU	Allwinner H616 64-bit високо-продуктивний 4-ядерний Cortex-A53 процесор
GPU	<ul style="list-style-type: none"> • Mali G31 MP2 • Підтримує OpenGL ES 1.0/2.0/3.2, OpenCL 2.0, Vulkan 1.1
Пам'ять (SDRAM)	4 ГБ LPDDR4 RAM
Мережа	Підтримує 1000M/100M/10M Ethernet
Живлення	5 В 3 А (Type-C)
USB порти	USB 2.0x3 шт (один порт на платі, два на контактах GPIO)
GPIO	<ul style="list-style-type: none"> • 26Pin GPIO • 13Pin GPIO
Розміри	50 мм × 55 мм

Через обмежену кількість USB портів можна використовувати додатково плату розширення.

2.3 Програма автоматичної екстракції виробів

Після налаштування керуючого мікрокомп'ютера та приведення 3D-принтера до робочого стану постає задача автоматизації безперервного друку з подальшим зняттям виробу. Такий підхід дозволяє оптимізувати процес серійного виробництва та мінімізувати необхідність ручного втручання. Програмна частина цієї системи забезпечує логіку циклічного друку одного й того самого виробу з проміжним очищенням платформи та охолодженням, зберігаючи при цьому підтримку стандартного друку з слайсера.

Ключова логіка реалізована шляхом використання макросів у середовищі Klipper, інтегрованих із веб-інтерфейсом Fluidt через API Moonraker. Програма дозволяє зациклити друк одного .gcode-файлу на задану кількість повторень. Після кожної ітерації система виконує очистку платформи, охолодження до вказаної температури, а потім переходить до наступного запуску [10].

Klipper – це високопродуктивна альтернативна прошивка для 3D-принтерів, яка поєднує можливості мікроконтролера (наприклад, STM32 на платі принтера) із потужністю зовнішнього комп'ютера (наприклад, Orange Pi або Raspberry Pi).

Основна ідея Klipper полягає у винесенні обробки складних обчислень (кінематика, планування руху, інтерпретація G-code) на більш потужний процесор, що працює під керуванням Linux. Мікроконтролер при цьому відповідає лише за виконання низькорівневих команд руху, які він отримує вже у готовому вигляді.

Переваги Klipper:

- вища швидкість друку при збереженні якості;
- гнучке налаштування в текстовому конфігураційному файлі (printer.cfg);
- підтримка сучасних функцій: Input Shaping (зменшення вібрацій), Pressure Advance.

Можливість оновлення та зміни прошивки без компіляції – усе змінюється на рівні конфігурації. Moonraker – це веб-сервер і REST API, який працює разом із Klipper і забезпечує взаємодію між користувачем та принтером через зручні веб-інтерфейси, такі як Fluidd або Mainsail.

Moonraker виступає посередником між веб-інтерфейсом і Klipper, надаючи API для моніторингу стану принтера, запуску/зупинки друку, перегляду логів, завантаження файлів G-code та керування макросами. Основні функції Moonraker:

- подає дані про стан принтера (температури, положення осей, статуси);
- працює з файлами: завантаження, видалення, черга друку;
- керує макросами Klipper (наприклад, очищення платформи або автокалібрування);
- підтримує плагіни: журналювання, телеграм-боти, моніторинг камери, статистику друку тощо;
- має інтеграцію з слайсерами (наприклад, Cura) для прямої відправки файлів на принтер.

Це рішення є повністю сумісним із базовим функціоналом слайсера Cura, дозволяючи як звичайний друк, так і циклічний – через відповідний макрос у Fluidd (рис. 2.3)

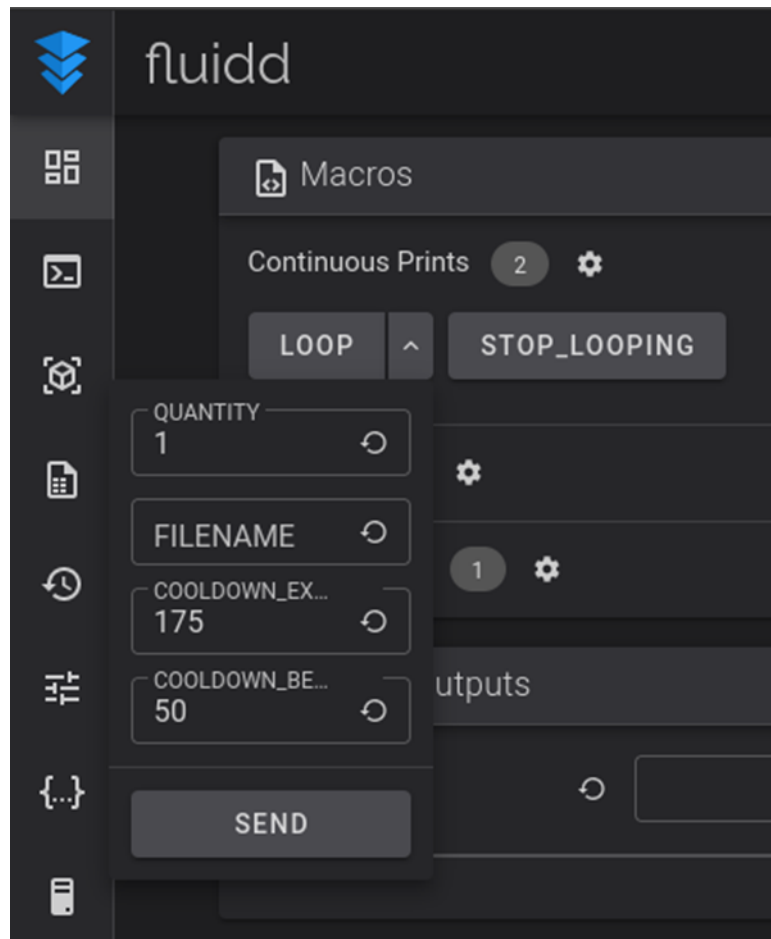


Рисунок 2.3 – Інтерфейс макросу циклічного друку в Fluidd

Компоненти реалізації:

- прошивка принтера: Klipper;
- веб-інтерфейс: Fluidd;
- API: Moonraker;
- слайсер: Cura;
- макроси та логіка циклу: через файл printer.cfg та інтеграцію з Fluidd

UI.

Принцип роботи (рис. 2.4):

- користувач вказує кількість повторень і назву файлу для циклічного друку через веб-інтерфейс Fluidd;
- після завершення кожного друку виконується макрос очищення платформи (механічне зняття, переміщення сопла, зміна температури тощо);
- після очищення – охолодження до заданої температури;
- лічильник повторень зменшується, після чого наступна ітерація запускається автоматично;
- по завершенні циклу – принтер переходить у режим очікування або виконує фінальні команди (наприклад, повне охолодження, паркування осей тощо).

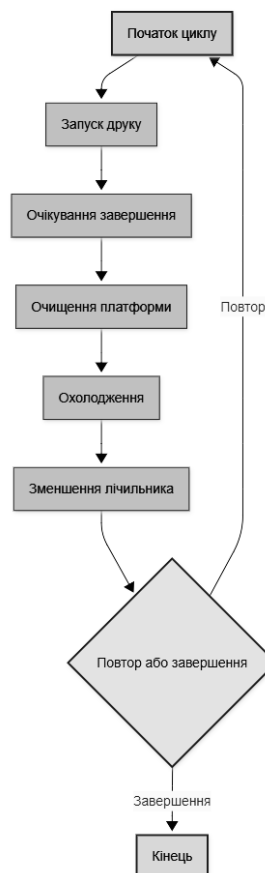


Рисунок 2.4 – UML-діаграма принципу роботи алгоритму

У процесі автоматизації старту друку важливу роль відіграє макрос `START_PRINT`, який ініціює базові дії підготовки 3D-принтера. Зокрема, для обнулення значення подачі філаменту застосовується команда: `G92 E0`.

Щоб виконати паркування усіх координатних осей, використовується інструкція: G28.

У разі наявності функції автокалібрування площини друку виконується завантаження профілю сітки: BED_MESH_PROFILE LOAD=default.

Далі здійснюється попередній нагрів екструдера до температури очікування за допомогою команди: M104 S{ params.STANDBY_TEMP } та нагрів платформи до робочої температури з очікуванням її досягнення: M190 S{ params.BED_TEMP }.

Після цього завершується розігрів головки до цільової температури командою: M109 S{ params.EXTRUDER_TEMP }.

Для уникнення механічного контакту з поверхнею робочої платформи головка піднімається вгору: G1 Z2.0 F3000.

Завершення друку керується макросом END_PRINT. Зокрема, кулер вимикається командою: M106 S0, нагрів екструдера зупиняється за допомогою: M104 S0, а нагрів платформи вимикається інструкцією: M140 S0.

На завершення, для деактивації крокових двигунів використовується команда: M84 X Y E.

Для автоматичного виведення готової моделі вперед після друку застосовується макрос WIPE_OUT.

Перехід у відносну систему координат задається командою: G91, а подача моделі вперед для зручності зняття виконується через: G1 X0 Y225.

Охолодження робочих елементів контролюється макросом COOLDOWN, у якому, зокрема, встановлюється температура охолодження: SET_HEATER_TEMPERATURE та проводиться очікування до досягнення заданих параметрів: TEMPERATURE_WAIT.

Після кожного завершеного друку викликається макрос PRINT_FINISHED, який оновлює лічильник надрукованих виробів командою: SET_GCODE_VARIABLE та виконує очищення поверхні друку через: CLEAR_BED.

Щоб організувати друк кількох копій поспіль, застосовується макрос LOOP. Запуск друку з SD-карти реалізується командою: SDCARD_PRINT_FILE FILENAME={ FILENAME }.

Циклічне повторення вказаної кількості копій ініціюється макросом START_LOOP, зокрема інструкцією: SDCARD_LOOP_BEGIN COUNT={ ... }.

Для завершення друкувального циклу використовується макрос STOP_LOOPING, який припиняє послідовність за допомогою команди: SDCARD_LOOP_DESIST.

Повний G-code програми, яка відповідає за безперервне виконання циклів друку з автоматичним очищенням платформи, наведений у Додатку Б.

Для коректної роботи циклічного друку при використанні слайсера Ultimaker Cura необхідно додатково внести зміни до початкових і завершальних сценаріїв друку:

Start G-code – повинен містити виклик макросів для підготовки принтера до роботи, наприклад:

- нагрів сопла та столу;
- калібрування площини;
- очищення поверхні;
- виклик SDCARD_LOOP (за потреби).

End G-code – має відповідати за:

- охолодження принтера до безпечної температури;
- переміщення головки у зону очікування;
- очищення платформи або активацію механізму екстракції;
- збереження стану для наступного циклу друку.

У фінальній частині скрипта Cura викликається макрос PRINT_FINISHED, який фіксує завершення друку, виконує прибирання моделі з платформи та оновлює лічильник надрукованих копій: PRINT_FINISHED.

Для завершення поточного циклу багаторазового друку (у разі використання циклічного режиму LOOP) використовується команда: SDCARD_LOOP_END.

Після чого викликається макрос `END_PRINT`, що зупиняє всі активні компоненти принтера, зокрема вимикає нагрівальні елементи та вентилятори: `END_PRINT`.

У стартовій частині скрипта Cura спочатку ініціюється макрос `START_LOOP`, який готує принтер до багаторазового (або одиничного) друку за попередньо заданими параметрами: `START_LOOP`.

Далі, для налаштування робочих температур платформи та екструдера, а також для виконання базової підготовки, викликається макрос `START_PRINT`, у який передаються необхідні температурні значення: `START_PRINT STANDBY_TEMP`.

Приклади Start G-code та End G-code наведені в Додатку В. Ці скрипти забезпечують коректну інтеграцію з механізмом автоматичної екстракції виробів та дають змогу реалізувати безперервне виробництво без втручання оператора.

2.4 Перепрошивка та конфігурування налаштувань принтера

2.4.1 Створення мікропрограми для принтера та перепрошивка

Одним із важливих етапів налаштування сучасного 3D-принтера є компіляція та завантаження мікропрограми (прошивки), яка забезпечує взаємодію апаратного забезпечення з програмним середовищем. Одним із популярних рішень у цій сфері є використання мікропрограми Klipper – високопродуктивного програмного забезпечення з відкритим кодом, що оптимізує процес друку та дозволяє досягти більшої точності та швидкості.

Процес компіляції прошивки Klipper відбувається у кілька послідовних етапів. Спершу необхідно перейти до каталогу з вихідними файлами прошивки. Для цього в середовищі командного рядка використовується команда: `cd klipper`.

Ця команда змінює поточний робочий каталог на той, у якому зберігаються вихідні файли Klipper.

Після цього запускається утиліта налаштування конфігурації (рис. 2.5) за допомогою команди: `make menuconfig`.

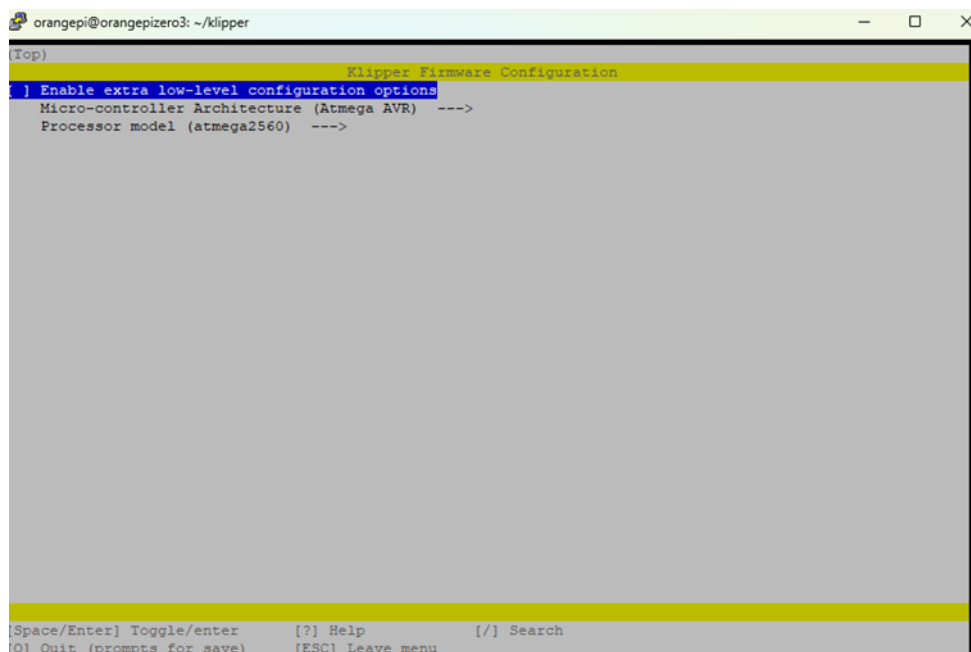


Рисунок 2.5 – Інтерфейс утиліти

На цьому етапі користувач має змогу обрати параметри (табл. 2.2), що відповідають архітектурі та специфікаціям конкретної моделі 3D-принтера. У випадку використання моделі Ender 3 V3 SE, необхідно встановити наступні параметри.

Таблиця 2.2 – Параметри мікропрограми принтера

Процесорна архітектура	STMicroelectronics STM32
Модель процесору	STM32F103
Bootloader offset	28 KiB
Комунікаційний інтерфейс	Serial PA10/PA9

Ці параметри забезпечують правильне формування мікропрограми відповідно до апаратної платформи принтера.

Після завершення налаштування конфігурації слід зберегти внесені зміни та вийти з меню. Далі необхідно виконати компіляцію прошивки, що здійснюється командою: `make`.

У результаті успішної компіляції у каталозі out буде створено файл з розширенням .bin. Цей файл є готовим до завантаження у 3D-принтер.

Наступним кроком є передача прошивки до принтера. Для цього:

- скомпільований .bin файл копіюється на SD-картку;
- SD-картка вставляється у вимкнений принтер;
- після вставлення картки пристрій вмикається, після чого автоматично відбувається процес перепрошивки.

Цей процес, як правило, триває кілька хвилин. По його завершенню принтер готовий до подальшої роботи під керуванням нової версії прошивки Klipper.

Слід зазначити, що дотримання вищенаведених інструкцій є критично важливим, адже будь-які помилки на етапі конфігурації або компіляції можуть призвести до нестабільної роботи пристрою або його повної непрацездатності. З цієї причини рекомендується ретельно перевіряти параметри перед початком компіляції, а також ознайомлюватися з офіційною документацією, яку надає спільнота Klipper.

2.4.2 Налаштування 3D-принтера

Після успішної прошивки мікроконтролера необхідно забезпечити коректне з'єднання між 3D-принтером та обчислювальним модулем, на якому працює прошивка Klipper. Для цього потрібно налаштувати спеціальний конфігураційний файл під назвою printer.cfg, який відповідає за опис апаратної конфігурації пристрою, включно з параметрами кінематики, температурними датчиками, моторами, а також шляхом до серійного порту, через який здійснюється зв'язок із платою принтера.

Доступ до файлу printer.cfg можна отримати через веб-інтерфейс керування прошивкою, який реалізується за допомогою систем на зразок Fluidd або Mainsail. Ці веб-інтерфейси працюють у браузері та дозволяють швидко змінювати конфігураційні параметри, без потреби підключення до пристрою по SSH або фізичного доступу до носія.

У середині файлу `printer.cfg` необхідно знайти розділ, який відповідає за вказання серійного порту. Він зазвичай виглядає так: `[mcu] serial: /dev/ttyUSBx`.

Значення параметра `serial` вказує на той пристрій, через який комп'ютер (наприклад, Orange Pi або Raspberry Pi) взаємодіє з платою 3D-принтера. У випадку, якщо порт було визначено неправильно або він змінився (наприклад, після перепрошивки чи підключення до іншого USB-роз'єму), необхідно оновити це значення.

Щоб дізнатися актуальний шлях до серійного пристрою, рекомендується скористатися командою: `dmesg`.

Ця команда дозволяє переглянути журнал системних повідомлень ядра ОС. У виведенні журналу потрібно знайти рядки, що стосуються підключення USB-пристроїв. Як правило, система повідомляє про підключення плати у вигляді, подібному до: `ttyUSB0: USB ACM device`.

Відповідно, у конфігураційному файлі значення параметра `serial` має бути оновлено до актуального, наприклад: `serial: /dev/ttyUSB0`.

Після внесення змін до `printer.cfg` їх необхідно зберегти, а потім перезапустити прошивку Klipper через інтерфейс або перезавантаження системи. Це забезпечить коректне з'єднання з мікроконтролером і подальшу можливість керування принтером.

Такий підхід дозволяє швидко адаптувати систему до змін у підключенні та забезпечує стабільну роботу 3D-принтера у середовищі Linux-подібних операційних систем, що використовуються на вбудованих платах.

2.4.3 Калібрування 3D-принтера

Після завершення налаштування конфігураційного файлу та встановлення з'єднання з 3D-принтером необхідно провести низку калібрувальних процедур, що забезпечують точність, стабільність та якість друку. Серед основних етапів калібрування – налаштування PID-регуляторів для екструдера та нагрівального столу, калібрування висоти сопла (`z-offset`), а також, за необхідності, – корекція тиску подачі філаменту (`pressure advance`).

1. Калібрування PID-регулятора. Для забезпечення стабільної температури нагрівальних елементів (екструдер і стіл) використовується алгоритм PID-регулювання. Його параметри можна автоматично визначити за допомогою відповідних макросів у Klipper. Для калібрування стола слід виконати команду: `PID_BED`.

Ця команда ініціює процес вимірювання динаміки нагріву та охолодження стола і на основі отриманих даних обчислює оптимальні значення коефіцієнтів пропорційної, інтегральної та диференційної складових регулятора. Аналогічно, для екструдера використовується команда: `PID_EXTRUDER`.

Після завершення кожного з цих процесів отримані значення автоматично або вручну записуються у файл `printer.cfg`. Надалі вони використовуватимуться для підтримання заданої температури з високою точністю.

2. Вимірювання сітки столу. Наступним важливим етапом є побудова висотної сітки для нагрівального столу. Для цього необхідно нагріти поверхню стола до температури, що відповідає реальним умовам друку. Найчастіше для друку PLA використовується температура 60 °C, тому перед вимірюванням сітки рекомендовано нагріти стіл саме до цього значення.

Після досягнення необхідної температури запускається процедура вимірювання сітки, яка автоматично визначає висоту в декількох точках робочої поверхні. Результати цієї операції дозволяють компенсувати нерівності стола під час друку, забезпечуючи стабільне прилягання першого шару.

3. Калібрування висоти сопла (z-offset). Однією з ключових операцій у налаштуванні 3D-принтера є правильне визначення відстані між соплом та поверхнею стола. Для цього використовується вбудована команда: `PROBE_CALIBRATE`.

Процедура ініціюється через графічний інтерфейс керування (Fluidd або Mainsail) і передбачає використання стандартного листа паперу формату A4, який підкладається під сопло. За допомогою керування у графічному інтерфейсі користувач поступово зменшує відстань між соплом і столом до моменту, коли папір починає з невеликим зусиллям рухатися між ними. Такий підхід дозволяє

досягти максимально точної відстані, необхідної для надійного першого шару під час друку.

4. Опційне калібрування параметра Pressure Advance Окрім базових налаштувань, користувач може також провести додаткову оптимізацію параметрів подачі філаменту. Один із таких параметрів – Pressure Advance. Він дозволяє компенсувати інерційні затримки подачі матеріалу, які виникають при зміні напрямку руху або швидкості екструдера.

Калібрування цього параметра здійснюється за окремою інструкцією, доступною в офіційній документації Klipper. Для цього необхідно надрукувати спеціальний тестовий зразок із градієнтом швидкості і, проаналізувавши результат, обрати значення, яке забезпечує найбільш чітке та рівномірне заповнення.

2.5 Висновки до другого розділу

У цьому розділі було детально розглянуто розробку програмного забезпечення для реалізації системи автоматичної екстракції виробів із 3D-принтера на базі мікрокомп'ютера Orange Pi Zero 3 та прошивки Klipper. Запропоноване рішення забезпечує ефективну взаємодію між апаратними компонентами та програмним забезпеченням, що дозволяє автоматизувати процес серійного друку без участі оператора.

Завдяки встановленню легкого Linux-дистрибутиву на Orange Pi та налаштуванню таких інструментів, як Klipper, Moonraker і Fluidt, створюється потужна програмна інфраструктура для високошвидкісного друку з підтримкою циклічних макросів, моніторингу та дистанційного керування. Це дозволяє не лише підвищити продуктивність, а й зменшити ймовірність помилок, пов'язаних із ручним втручанням.

Описані етапи перепрошивки принтера та створення конфігураційного файлу printer.cfg забезпечують гнучке налаштування під конкретну модель обладнання, що робить систему масштабованою та адаптивною до майбутніх

змін. Отже, запропонований підхід є надійним і перспективним рішенням для реалізації автоматизованого, безперервного 3D-друку з функцією самоочищення, яке може бути доповнене модулями ШІ, сенсорами або роботизованими механізмами у наступних версіях.

3 РОЗРОБКА МЕХАНІЧНОЇ СКЛАДОВОЇ

3.1 Кінематика

Застосування гнучких друкарських платформ відкриває можливості для вдосконалення процесу автоматичної екстракції моделей без залучення складних зовнішніх механізмів. У більшості стандартних сценаріїв, після завершення друку, модель може бути виштовхнута за допомогою руху екструдера або друкарської головки. Такий підхід працює для малогабаритних моделей із відносно невеликою площею контакту з поверхнею.

Однак у випадках, коли друкуються великі або середньогабаритні вироби, виштовхування може бути недостатнім. Наприклад, 3D-принтер Ender 3 V3 SE має зону друку 220 мм × 220 мм × 250 мм, що дозволяє виготовляти об'єкти зі значною площею прилипання до столу. У таких ситуаціях механізм, який базується виключно на зусиллях екструдера, часто не здатен ефективно зняти модель без пошкодження виробу чи самої поверхні.

Для вирішення цієї проблеми пропонується використання гнучкої друкарської платформи з можливістю керованої деформації. Принцип роботи полягає у зміні форми платформи (наприклад, згинанні або локальному піднятті ділянки), що призводить до механічного розриву зони прилипання між моделлю та поверхнею. Такий підхід:

- зменшує адгезію без додаткових зусиль;
- дозволяє зняти навіть великі моделі без пошкодження;
- не вимагає складних маніпуляторів або інструментів;
- підвищує надійність та повторюваність процесу екстракції.

Таким чином, інтеграція гнучкої платформи в автоматизовану систему екстракції є доцільним інженерним рішенням для підвищення ефективності серійного друку.

3.2 Елементна база

Для реалізації функціональної гнучкої платформи з можливістю керованої деформації, яка забезпечує ефективне від'єднання надрукованої моделі після завершення друку, необхідно використати три основні елементи конструкції.

3.2.1 Механізм фіксації платформи

В якості кріплення друкарської поверхні до базової конструкції столу використовуються неодимові магніти (рис. 3.1) Обрані магніти 15 мм x 2,8 мм з отвором 4 мм.



Рисунок 3.1 – Неодимові магніти

Вони мають високу силу притягання при мінімальних габаритах, що особливо важливо для збереження компактності та зниження інерційності рухомих частин столу.

Електромагніти, хоча й мають переваги в окремих сценаріях (наприклад, можливість дистанційного перемикавання стану фіксації за командою), у цьому випадку поступаються неодимовим магнітам. На відміну від електромагнітів, неодимові магніти:

- не потребують живлення;
- не створюють додаткового тепла;

- мають тривалий термін служби без втрати магнітних властивостей;
- забезпечують надійну фіксацію навіть при вертикальних або похилих навантаженнях.

3.2.2 Механізм керованої деформації

Деформація гнучкої друкарської платформи реалізується за допомогою крокового двигуна стандарту NEMA 14 (рис. 3.2). Цей двигун було обрано завдяки його компактним розмірам, низькому енергоспоживанню та здатності забезпечити високу точність позиціонування при відносно простій схемі керування. Незважаючи на невеликі габарити, NEMA 14 має достатній крутний момент, щоб здійснити механічну деформацію платформи, виготовленої з гнучкого магнітного листа (табл. 3.1).

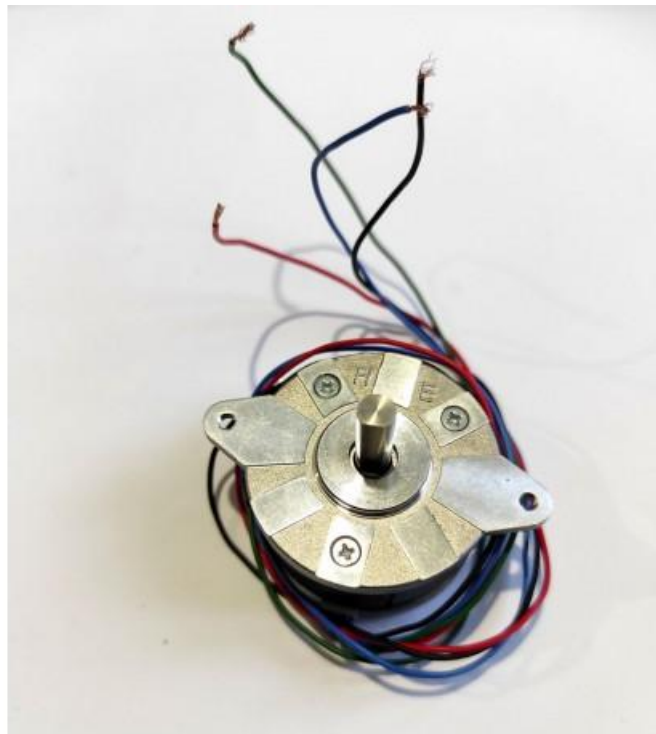


Рисунок 3.2 – Кроковий двигун NEMA 14

До основних переваг двигуна належать малі розміри та вага, що критично важливо для збереження компактності всієї системи. Крім того, він забезпечує необхідну силу для створення натиску на платформу, не перевантажуючи механічну структуру. Завдяки широкій підтримці з боку виробників драйверів,

двигун легко інтегрується з мікроконтролерами через такі драйвери, як A4988 або більш сучасні безшумні модулі типу TMC2208.

Таблиця 3.1 – Параметри крокового двигуна NEMA 14

Модель	36HM2004A4
Номінальний струм	0,45 А
Крутний момент	0,5 Н·см
Утримувальний момент	8,8 Н·см
Індуктивність фази	8,5 мГн/фаза
Опір фази	15 Ом/фаза
Вага двигуна	95 г
Довжина	20 мм
Діаметр вала	4,5 мм

У конструкції системи деформації двигун з'єднаний з рухомим елементом – спеціальною лопаткою, яка закріплена в основі платформи. При подачі команди на деформацію, кроковий двигун обертається на певний кут, що змушує лопатку тиснути на нижню частину гнучкої поверхні. Такий контрольований натиск спричиняє локальне викривлення платформи – утворюється опуклість або хвиля, яка зменшує площу прилягання моделі до поверхні та порушує зчеплення між друкованою деталлю й столом.

Цей механізм дозволяє ефективно знімати навіть великогабаритні моделі без необхідності ручного втручання чи використання додаткових інструментів. У поєднанні з точною роботою крокового двигуна, система демонструє високу надійність, стабільність і придатність для подальшої автоматизації виробничих процесів.

3.2.3 Датчик початкового положення

Кінцевий мікроперемикач KW11-3Z (рис. 3.3) з важелем виконує критично важливу функцію у системі деформації гнучкої друкарської платформи.



Рисунок 3.3 – Мікроперемикач KW11-3Z

Його основне призначення полягає у фіксації моменту, коли механізм із лопаткою повертається у своє початкове положення після завершення циклу деформації. У цей момент перемикач спрацьовує й передає сигнал до контролера, який, у свою чергу, зупиняє роботу крокового двигуна. Завдяки цьому вдається уникнути перевантаження електроприводу, а також знижується ризик механічного пошкодження або зсуву елементів платформи.

Таким чином, мікроперемикач виконує як роль датчика зворотного зв'язку, так і запобіжника в системі механічної екстракції моделей.

3.3 Конструкція

Конструкція гнучкої друкарської платформи була спеціально розроблена з урахуванням особливостей макету 3D-принтера Ender 3 V3 SE, зокрема його геометричних розмірів, кріплень та розташування елементів стола.

Для моделювання конструкції платформи з керованою деформацією, використано сучасний програмний комплекс САПР SolidWorks.

Закладені інженерні рішення мають модульний характер, що відкриває можливість масштабування та адаптації системи під інші моделі FDM-принтерів. За необхідності платформа може бути допрацьована з урахуванням відмінностей

у розмірах робочої області, типах кріплення чи форм-факторі платформи. Універсальність конструкції забезпечується за рахунок використання стандартних компонентів (таких як неодимові магніти, крокові двигуни NEMA 14 та уніфіковані кріплення), а також можливістю переналаштування програмного забезпечення та параметрів керування.

3.3.1 Нагрівальний стіл

Найбільшим за розмірами елементом конструкції є адаптований нагрівальний стіл (рис. 3.4) спеціально змінений під геометричні параметри 3D-принтера Ender 3 V3 SE. Його форма та розміщення отворів для кріплення враховують просторові обмеження корпусу принтера та дозволяють забезпечити точну й стабільну фіксацію всієї конструкції.

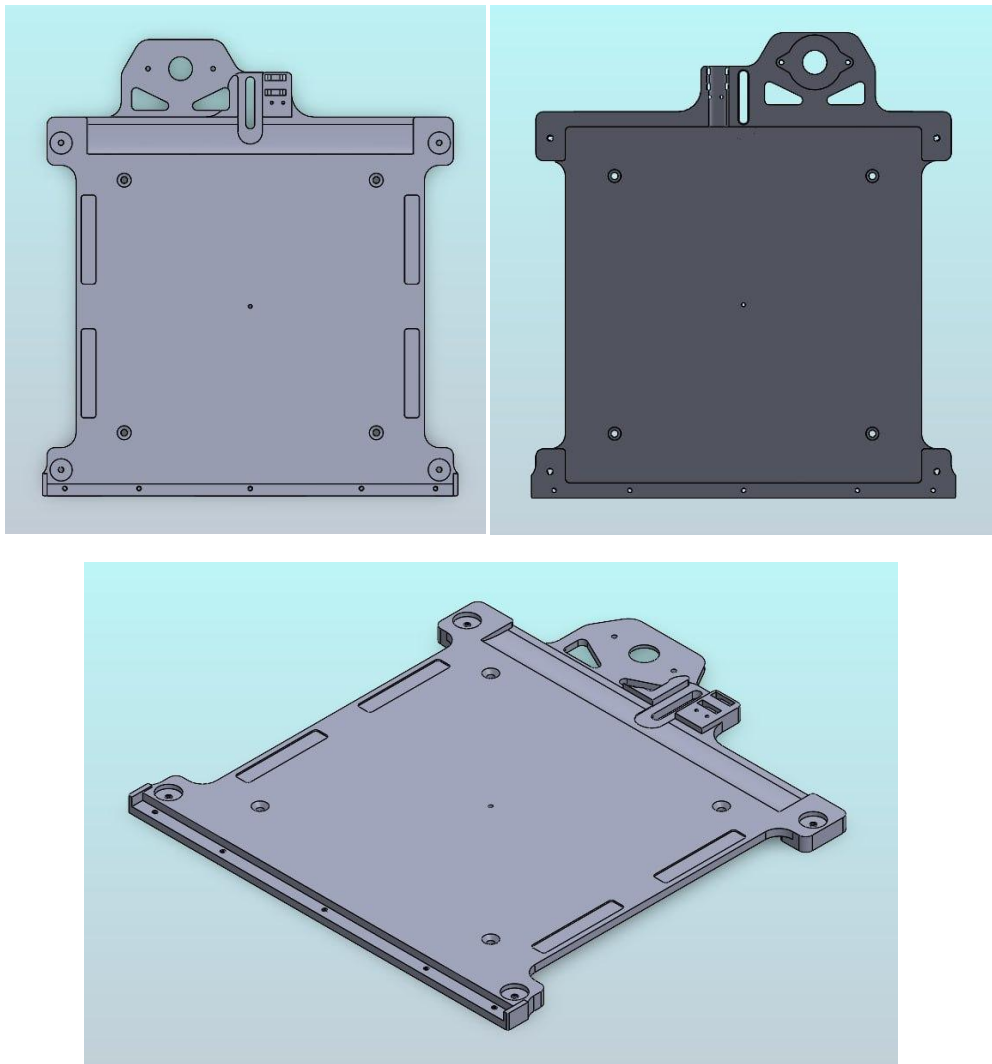


Рисунок 3.4 – 3D-модель адаптованого нагрівального столу

Конструкція платформи передбачає чотири точки кріплення знизу, що гарантує надійне утримання платформи під час друку та деформації. Також передбачено спеціальні місця для встановлення крокового двигуна типу NEMA 14, який є відповідальним за створення деформаційного зусилля, та для монтажу рухомої лопатки, яка безпосередньо контактує з гнучким листом платформи.

Завдяки такій конфігурації основна частина механізму є несучою та служить опорною базою для всіх функціональних елементів системи керованої деформації. Це дозволяє забезпечити не лише механічну стабільність, але й спрощує збірку та подальше обслуговування системи.

3.3.2 Кривошипно-штанний механізм

Іншою важливою деталлю конструкції є елемент кривошипно-штанного механізму (рис. 3.5), до якого приєднана спеціальна лопатка. Цей механізм виконує ключову роль у процесі контрольованої деформації гнучкої друкарської платформи.

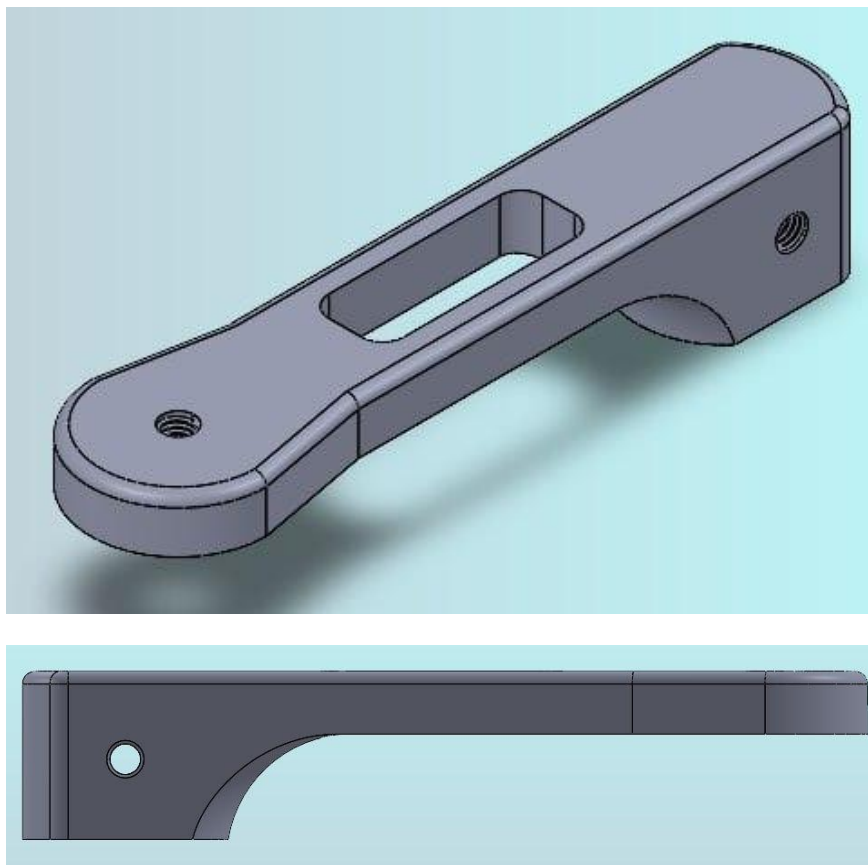


Рисунок 3.5 – 3D-модель плеча кривошипного механізму

Принцип роботи полягає в наступному: кроковий двигун обертає кривошип – коротке плече, яке з'єднане з повзуном (лінійно рухомим елементом). При обертанні кривошипа виникає поступальний рух повзуна, який передається на лопатку. Лопатка, у свою чергу, здійснює натискання на нижню частину гнучкої платформи знизу вгору, викликаючи її локальне викривлення.

Завдяки цій конструкції можна отримати точний і повторюваний деформаційний рух при мінімальному навантаженні на двигун. Такий підхід дозволяє розділити площину прилягання моделі до платформи, що значно полегшує процес її автоматичного зняття без потреби у зовнішньому втручанні або додаткових інструментах.

Це рішення поєднує простоту механіки, енергоефективність та ефективність у виконанні задачі, зберігаючи сумісність із конструкцією стандартного 3D-принтера.

3.3.3 Лопатка

Лопатка (рис. 3.6) в конструкції механізму автоматичного зняття моделі є ключовим елементом, що безпосередньо взаємодіє з гнучкою друкарською платформою. Вона виконує роль виконавчого інструмента, який передає зусилля від кривошипно-шатунного механізму на платформу, забезпечуючи необхідне локальне викривлення для зниження адгезії моделі до поверхні.

Конструктивно лопатка виготовляється з жорсткого, але легкого матеріалу (наприклад, PLA+ або PETG), що дозволяє їй витримувати багаторазові механічні навантаження без деформацій. Її форма адаптована таким чином, щоб забезпечити рівномірний розподіл зусилля на платформу, не пошкоджуючи при цьому ні саму платформу, ні модель.

Кріплення лопатки до шатунного механізму здійснюється через шарнірне з'єднання, яке забезпечує невеликий ступінь вільного ходу і дозволяє елементу самовирівнюватись при русі. Це підвищує адаптивність конструкції до нерівностей платформи та зменшує зношення системи в цілому. Таким чином, лопатка є важливою частиною автоматичного механізму зняття, забезпечуючи

делікатний, але ефективний вплив на платформу й покращуючи стабільність процесу експлуатації принтера.

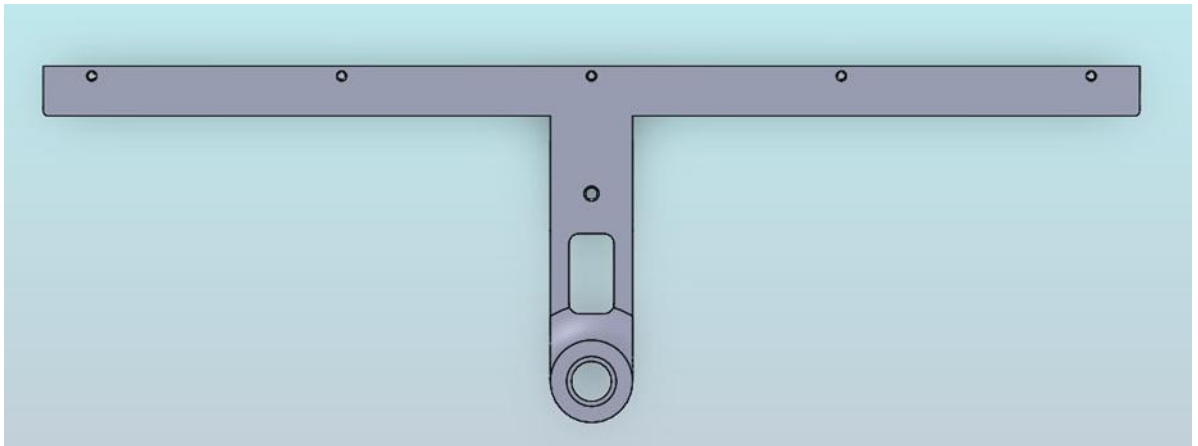


Рисунок 3.6 – 3D-модель лопатки

Під час активації крокового двигуна лопатка рухається вгору, натискаючи на нижню частину друкарського столу. Завдяки гнучкості друкарської поверхні, це натискання викликає помітне викривлення, якого достатньо для відриву моделі навіть із великою площею прилягання. Після завершення процесу, лопатка повертається у вихідне положення, а кроковий двигун зупиняється – цю дію контролює кінцевий мікроперемикач.

Фінальна спроектована модель конструкції нагрівальної платформи представлена на рис. 3.7.

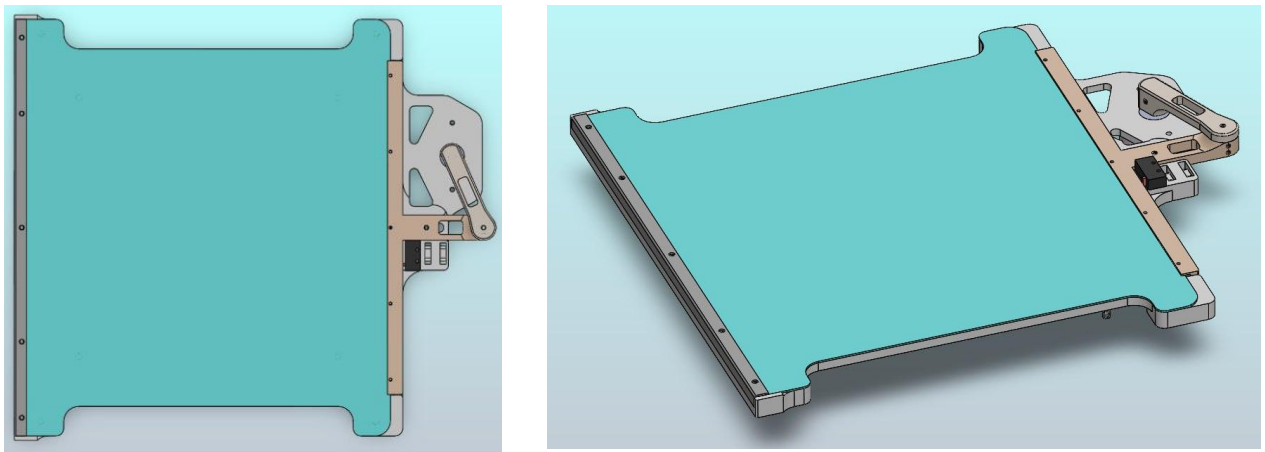


Рисунок 3.7 – Фінальна 3D модель конструкції

3.4 Аналіз САУ для крокового двигуна Nema14

Згідно із технічним завданням заносимо початкові дані до таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Значення параметрів САУ

Найменування	Позначення	Значення
Коефіцієнт підсилення ПП	$K_{ПП}$	500
Коефіцієнт підсилення драйвера	K_D	2,0
Стала часу драйвера	T_D	0,005 с
Коефіцієнт моменту двигуна	K_M	$0,0111 \text{ Н} \cdot \frac{\text{М}}{\text{А}}$
Стала електромеханічної системи	$T_e = \frac{L}{R}$	0,000567 с
Момент інерції ротора (оцінено)	J	$\approx 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$
Стала часу позиційного датчика	$T_{дат}$	0,02 с
Крок двигуна (без мікрошагу)	θ_k	$1,8^\circ$

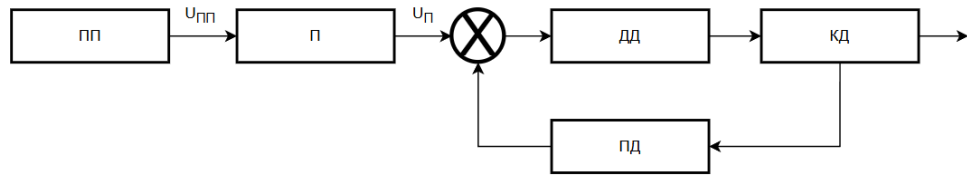
K_M обчислено з номінального моменту при номінальному струмі:

$$K_M = \frac{0,5 \cdot 10^{-2}}{0,45} \approx 0,111 \text{ Н} \cdot \frac{\text{М}}{\text{А}}$$

До табл. 3.3 заносимо вимоги, яким повинна задовольняти вихідна САУ.

Таблиця 3.3 – Вимоги, щодо якості процесу управління

Найменування	Позначення	Значення
Максимальний час встановлення	t_c	0,5 с
Допустиме перерегулювання	σ	$\leq 10 \%$
Статична похибка	$\varepsilon_{ст}$	$\leq 1 \%$



Лінійна неперервна САУ позиціонування крокового двигуна (КД) містить: КД як об'єкт регулювання, плата керування (ПП), підсилювач (П), позиційний датчик (ПД) і драйвер двигуна (ДД)

Рисунок 3.8 – Функціональна схема САУ

Лінійна неперервна САУ позиціонування крокового двигуна NEMA14 містить: кроковий двигун 36NM2004A4 як об'єкт регулювання, позиційний датчик (енкодер) у ланцюзі негативного зворотного зв'язку, елемент порівняння, підсилювач керування (П), драйвер двигуна (ДД) і плату керування як задавальний пристрій.

Формула елемента порівняння:

$$e(t) = \theta_{\text{зад}}(t) - \theta_{\text{вих}}(t), \quad (3.1)$$

де $e(t)$ – сигнал помилки (різниця між бажаним і фактичним положенням двигуна);

$\theta_{\text{зад}}(t)$ – задане значення кута повороту двигуна;

$\theta_{\text{вих}}(t)$ – фактичне значення кута повороту двигуна.

Формула підсилювача ПП:

$$U_{\text{ПП}}(s) = K_{\text{ПП}} \cdot E(s), \quad (3.2)$$

де $U_{\text{ПП}}(s)$ – вихідна напруга плати керування;

$K_{\text{ПП}}$ – коефіцієнт підсилення ПП;

$E(s)$ – сигнал помилки в образі Лапласа.

Передавальна функція драйвера:

$$W_D(s) = \frac{K_D}{T_D s + 1}, \quad (3.3)$$

де $W_D(s)$ – передавальна функція драйвера;

K_D – коефіцієнт підсилення драйвера;

T_D – стала часу драйвера.

Передавальна функція крокового двигуна:

$$W_{\text{двиг}}(s) = \frac{K_M}{J s^2 + T_e s + K_M}, \quad (3.4)$$

де $W_{\text{двиг}}(s)$ – передавальна функція виконавчого двигуна;

K_M – коефіцієнт моменту двигуна;

J – момент інерції ротора;

T_e – електрична стала часу двигуна;

s – комплексна змінна Лапласа.

Формула позиційного датчика:

$$W_{\text{дат}}(s) = \frac{1}{T_{\text{дат}} s + 1}, \quad (3.5)$$

де $W_{\text{дат}}(s)$ – передавальна функція позиційного датчика;

$T_{\text{дат}}$ – стала часу датчика;

s – комплексна змінна Лапласа.

Передавальна функція всієї замкненої системи:

$$W_{CAU}(s) = \frac{K_{ПП} \cdot K_D \cdot K_M}{(T_D s + 1)(J s^2 + T_e s + K_M)(T_{дат} s + 1)}, \quad (3.6)$$

де $W_{CAU}(s)$ – передавальна функція всієї системи автоматичного керування;

$K_{ПП}$ – коефіцієнт підсилення ПП;

K_D – коефіцієнт підсилення драйвера;

K_M – коефіцієнт моменту двигуна;

$T_D s$ – стала часу драйвера;

J – момент інерції ротора;

T_e – електрична стала часу двигуна;

$T_{дат}$ – стала часу датчика;

s – комплексна змінна Лапласа.

$$\begin{aligned} W_{CAU}(s) &= \frac{K_{ПП} \cdot K_D \cdot K_M}{(T_D s + 1)(J s^2 + T_e s + K_M)(T_{дат} s + 1)} \\ &= \frac{K_{ПП} \cdot K_D \cdot 0.0111}{1,0 \cdot 10^{-7} s^2 + 5,66 \cdot 10^{-4} s + 0,0111} \end{aligned}$$

При $K_{ПП} = 100$,

$K_D = 2$.

Маємо:

$$W_{CAU}(s) = \frac{2,22}{1,0 \cdot 10^{-7} s^2 + 5,66 \cdot 10^{-4} s + 0,0111}$$

3.5 Висновки до третього розділу

У результаті аналізу способів автоматичного зняття моделей після завершення 3D-друку було обґрунтовано доцільність використання гнучкої друкарської платформи з керованою деформацією. Такий підхід забезпечує ефективне порушення зони прилипання між моделлю та поверхнею без необхідності застосування зовнішніх інструментів або складних маніпуляторів.

Запропонована конструкція включає низку функціональних елементів: кроковий двигун NEMA 14, кривошипно-шатунний механізм із лопаткою, мікроперемикач для контролю початкового положення, а також гнучку платформу, закріплену за допомогою неодимових магнітів. Кожен компонент було обрано з урахуванням критеріїв компактності, енергоефективності та сумісності з конструкцією принтера Ender 3 V3 SE.

Завдяки використанню стандартних вузлів та модульній будові система може бути адаптована до інших моделей FDM-принтерів. Вона демонструє високу надійність, простоту в обслуговуванні та готовність до подальшої автоматизації серійного 3D-друку.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ І НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

4.1 Виробнича санітарія

При роботі за комп'ютером на користувача впливає ряд небезпечних та шкідливих факторів відповідно ДСТУ 12.0.003-74, які занесені в таблицю 4.1.

Таблиця 4.1 – Перелік небезпечних і шкідливих виробничих факторів у приміщенні лабораторії з обчислювальною технікою

Найменування факторів	Джерело виникнення шкідливого фактора	Нормований параметр і нормативне значення	Характер впливу на людину	Засоби зниження впливу на людину
1	2	3	4	5
Підвищений рівень шуму	Освітлювальна і вентиляційна система	$L_p = 50$ дБА	Загальне стомлення	Шумопоглинальні покриття, облицювання звукобірними плитами, підвісні звукобірні стелі
Підвищена іонізація повітря	Комп'ютер	Кількість іонів в 1 см^3 $n^+ = 1500 - 3000$ $n^- = 3000 - 5000$	Опромінення	Захисні екрани, вдосконалена техніка
Напруга в електромережі	Проводка, штучне освітлення	$U_{пр} = 12 \text{ В} - 24 \text{ В}$	Поразка електричним струмом	Занулення корпусів ПЕОМ, заземлення корпусів блоків живлення, природнотанення плавких запобіжників та електричних рознімачів

Продовження табл. 4.1

1	2	3	4	5
Підвищений потенціал статичної електрики	Діелектрична поверхня	$E = 20 \text{ кВ/м}$	Вплив на нервову і серцево-судинну системи	Плівкові і скляні фільтри
Напруженість електромагнітного поля	Компоненти ЕОМ	По електричній складовій $E = 5 \text{ В / м}$	Порушення фізико-хімічних процесів організму	Скляні фільтри
Рентгеновське випромінювання	Монітор ЕОМ	Декс==100 мкР/год.	Променева хвороба, захворювання зору	Захисний екран на дисплеї монітора

Метеорологічні умови згідно ДСТУ 12.1.005-88 категорія робіт оператора з ПЕОМ по енерговитратах легка – 1а. В приміщенні лабораторії з ПЕОМ передбачені оптимальні параметри мікроклімату, приведені в таблиці 4.2 відповідно ДСТУ 12.1.005-88.

Таблиця 4.2 – Оптимальні норми температури, відносної вологості, швидкості руху повітря в приміщенні з ПЕОМ

Період року	Категорія робіт	Температура повітря, °С	Відносна вологість повітря, %	Швидкість руху повітря, м/с, не більш
Холодний	Легка – 1а	22...24	40...60	0,1
Теплий	Легка – 1а	23...25	40...60	0,1

Необхідні умови підтримуються в теплий час року за допомогою системи кондиціонування повітря, а в холодний час року – водяним опаленням згідно СНиП 2.04.05-91.

При роботі на ПЕОМ шкідливий вплив на людину роблять випромінювання, що супроводжують роботу монітора. Спектр цього випромінювання досить широкий: це і м'яке рентгеновське випромінювання, і

інфрачервоне, і радіовипромінювання, а також електростатичні поля.

М'яке рентгенівське випромінювання згідно з НРБУ–97/Д2000 повинно мати не більше 100 мкР/годину на відстані 5 см від екрана апарата. Для забезпечення нормованих параметрів не вище допустимих розташовується захисний екран на дисплеї монітора.

Згідно ДСТУ 12.1.045-84 для захисту від статичного електроструму використовується заземлення металевих частин ПЕОМ та іншої електронної техніки.

На робочих місцях електромагнітне поле не повинне перевищувати допустимих рівнів, наведених у ДСТУ 12.1.006-84. Для забезпечення нормованих параметрів не вище допустимих використовується захисний екран на дисплеї монітора.

Незадовільне освітлення кількісно чи якісно стомлює не тільки зір, але і викликає стомлення організму в цілому, впливає на продуктивність праці.

Освітлення робочого місця при налагодженні програмного та апаратного забезпечення здійснюється суміщеним освітленням. Природне освітлення бокове, штучне освітлення загальне рівномірне та комбіноване.

Проведені операції по апарату для відбору конденсату з повітря, що видихається людиною відносяться до зорової роботи високої точності III - розряду, підрозряду «в», фон середній найменший, розмір об'єкта розрізнення 0,3 мм – 0,5 мм згідно ДБН В.2.5.-28-2006.

Всі виробничі приміщення, з постійним знаходженням у них людей, відповідно до санітарних норм і правил мають природне освітлення. У нашому випадку застосовується природне суміщене освітлення, бокове.

Природне освітлення нормується коефіцієнтом природної освітленості (КПО) ДБН В.2.5–28–2006.

Нормативне КПО для III розряду зорових робіт при боковому суміщеному освітленні становить $e_N=1,2\%$ згідно ДБН В.2.5–28–2006. Для приміщень розташованих в інших місцях України КПО визначається за формулою:

$$e_N = e_j \cdot m_N, \quad (4.1)$$

де e_N – КПО для III розряду зорових робіт ($e_N = 1,2 \%$);
 m_N – коефіцієнт світлового клімату (для м. Харкова – $m_N=0,9$);
 N – номер групи забезпеченості суміщеним світлом ($N=2$, вікна на північ)

$$e_N = 1,2 \cdot 0,9 = 1,08\%.$$

Необхідну сумарну площу світлопройомів в залежності від площі приміщення, що забезпечує нормоване значення КПО, приблизно визначають за формулою:

$$S_O = \frac{e_N \cdot \eta_{OK} \cdot k_3 \cdot S_n}{\tau_{OK} \cdot r_1 \cdot 100} \cdot K_{зд}, \quad (4.2)$$

де η_{OK} – світлова характеристика вікна ($\eta_{OK}=15$);
 k_3 – коефіцієнт запасу, що враховує зниження освітленості в процесі експлуатації остіклення ($k_3=1,2$);
 S_n – площа полу, приміщення 6 м x 6 м;
 $K_{зд}$ – коефіцієнт, що враховує затінювання вікон протилежними будівлями ($K_{зд}=1,1$);
 τ_{OK} – загальний коефіцієнт світло пропускання, що складається з ряду коефіцієнтів:

$$\tau_{OK} = \tau_1 \cdot \tau_2 \cdot \tau_3 \cdot \tau_4, \quad (4.3)$$

де τ_1 – коефіцієнт, що враховує вид світлопропускаючого матеріалу. Для подвійного спареного листового скла коефіцієнт $\tau_1=0,8$;
 τ_2 – коефіцієнт, що враховує вид рами вікна. Для дерев'яних спарених рам, що відкриваються $\tau_2=0,75$;

τ_3 – коефіцієнт, що враховує вид несущих конструкцій, рівний $\tau_3=0,8$;

τ_4 – коефіцієнт, що враховує втрати світла в сонцезахисних пристроях рівний $\tau_4 = 1$;

$$\tau_{OK} = 0,8 \cdot 0,75 \cdot 0,8 \cdot 1 = 1,4,$$

де r_l – коефіцієнт, що враховує вплив відбитого світла при бічному освітленні, рівний 1,05 при коефіцієнті віддзеркалення стелі, стін і підлоги $p_{cp} = 0,5$.

Площа приміщення вчислюється наступним чином:

$$S = A \cdot B, \quad (4.4)$$

де A – довжина приміщення, рівна 6 м;

B – глибина приміщення, рівна 6 м.

$$S = 6 \cdot 6 = 36 \text{ м}^2.$$

Підставляючи складові у формулу (6.2) визначаємо сумарну площу світлопройомів:

$$S_O = \frac{1,08 \cdot 15 \cdot 1,2 \cdot 36}{1,4 \cdot 1,05 \cdot 100} \cdot 1,1 = 5,24 \text{ м}^2.$$

При розмірі вікон 2 м x 1,5 м потрібно 2 вікна. Фактично у приміщенні 2 вікна загальною площиною 6 м². Таким чином, природне освітлення відповідає нормам.

Штучне освітлення – загальне рівномірне. Нормованою величиною штучного освітлення є мінімальне значення освітленості $E_{загал}=300$ лк, комбінована освітленість $E_{комб}=750$ лк. Мінімумально допустима освітленість E_{min}

в приміщенні досягнута правильним розрахунком штучного освітлення (кількості і розміщенням світильників, вибором типу та потужності ламп) відповідно до ДБН В.2.5-28-2006. Забезпечення величини нормованої освітленості в приміщенні ОЦ досягнуто використанням світильників типу ПВЛМ-Р з лампами типу ЛБ 40-2. Блискість пряма й відбита повинні бути відсутніми в полі зору.

В приміщенні ОЦ з ПЕОМ можливі наступні джерела шуму: вентилятори, витяжки, трансформатори. Відповідно ДСТУ 12.1.003-83 у приміщенні рівень звуку L_p не повинний перевищувати 50 дБА.

Для забезпечення нормованого рівня шуму в приміщенні ОЦ використані відповідно ДСТУ 12.1.029-80 шумопоглинальні засоби (перфоровані плити, панелі), перегородки, раціональне розміщення устаткування, конструктивна безшумна апаратура.

4.2 Висновки до четвертого розділу

У результаті проведених розрахунків штучного освітлення встановлено, що в приміщенні ОЦ забезпечено нормовану освітленість відповідно до ДБН В.2.5-28-2006. Досягнуто це шляхом правильного вибору типу світильників (ПВЛМ-Р) і ламп (ЛБ 40-2), а також їхнього розміщення, що дозволило уникнути прямих і відбитих блисків у полі зору користувачів.

Щодо акустичних умов, рівень шуму в приміщенні не перевищує допустиме значення 50 дБА згідно з ДСТУ 12.1.003-83. Це забезпечено використанням шумопоглинальних конструктивних засобів, раціональним розміщенням обладнання та застосуванням малошумної апаратури, що відповідає вимогам ДСТУ 12.1.029-80.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі розглянуто розробку системи автоматичного зняття 3D-моделей із друкарської платформи FDM-принтера. Для досягнення мети дослідження реалізовано інтеграцію апаратного та програмного забезпечення, зокрема використання мікрокомп'ютера Orange Pi Zero 3 з операційною системою Debian і прошивки Klipper для принтера Ender-3 V3 SE. Забезпечено стабільну взаємодію між елементами системи, з урахуванням можливості розширення функціональності за допомогою сенсорів та автоматизованих виконавчих механізмів.

Конструктивна частина автоматизованого пристрою включає шарнірно-зчленований механізм з кроковим двигуном типу NEMA14, що забезпечує деформацію гнучкої платформи для механічного відокремлення моделі після завершення друку. Кінематична схема пристрою розрахована таким чином, щоб забезпечити надійне відхилення платформи без пошкодження виробу чи принтера. Проведено калібрування механізмів, тестування сценаріїв зняття моделі та узгодження рухів крокового двигуна із завершенням друку в системі Klipper, що забезпечує автономність та надійність процесу.

В цій роботі досліджено ряд сучасних апаратно-програмних засобів для реалізації автономного циклу 3D-друку та автоматичного зняття готових виробів. Також, під час імплементації конструктивно-програмного підходу були виконані наступні етапи:

- проаналізовано можливості використання мікрокомп'ютера Orange Pi Zero 3 як керуючого пристрою для 3D-принтера;
- розгорнуто оптимізовану ОС Debian для стабільної роботи у виробничому середовищі;
- налаштовано мережеву взаємодію, оновлення пакетів і базове середовище для встановлення Klipper;
- встановлено серверні компоненти (Moonraker, Fluidd) та налагоджено

автоматичний запуск служби контролю принтера;

- виконано перепрошивку та калібрування 3D-принтера під керування Klipper, з урахуванням особливостей моделі (Ender-3 V3 SE);

- реалізовано базову програмну логіку циклічного друку одного виробу з проміжним очищенням платформи;

- протестовано механізм інтеграції макросів у веб-інтерфейс керування (Fluidd UI);

- забезпечено підтримку як стандартного друку з слайсера (Cura), так і автоматизованого багатократного друку;

- підібрано елементну базу для адаптованого нагрівального столу;

- підготовлена конструкція нагрівального столу.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ 3008-15. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. структура та правила оформлення. Введ. 2015-06-22. К. Держстандарт України, 2017. – 29 с.
2. Методичні вказівки з підготовки кваліфікаційної роботи бакалавра для студентів усіх форм навчання спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» освітньої програми «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / Упоряд.: І.Ш. Невлюдов, А.О. Андрусевич, О.В. Токарева, С.П. Новоселов, О.В Сичова. Харків: ХНУРЕ, 2022. – 55 с.
3. Цапля Б. О. Дослідження методів автоматичної екстракції виробів 3D-принтерів. 2025. Автоматизація та Приладобудування (ADED-2025) [Електронний ресурс]: збірник студентських наукових статей / Харківський національний університет радіоелектроніки;. – Харків : ХНУРЕ, 2025. – Вип. 1. – 262с.
4. Невлюдов І. Ш. Виробничі процеси та обладнання об'єктів автоматизації: Підручник для студентів вищих навчальних закладів / І. Ш. Невлюдов та інш. Кривий Ріг: Криворізький коледж НАУ, 2017 р. – 444 с.
5. Разумов-Фризюк Є. А., Гурін Д. В., Нікітін Д. О., Близнюк Д. С., Стрілець Р. Є. Моделювання шнекового екструдера для FFF 3D друку // Radiotekhnika, 2(209), 206–214. <https://doi.org/10.30837/rt.2022.2.209.21>.
6. Невлюдов, І. Ш.; Андрусевич, А. О.; Євсєєв, В. В. Проектування мобільних роботів на базі одноплатних комп'ютерів (Raspberry Pi и мови Python 3.6). 2020. – 254 с.
7. What is 3D printing [Електронний ресурс] – Режим доступу: [www / URL: https://formlabs.com/3d-printers/](http://www.formlabs.com/3d-printers/)
8. The Types of FDM 3D Printers: Cartesian, CoreXY & More [Електронний ресурс] – Режим доступу: [www / URL: https://all3dp.com/2/cartesian-3d-printer-](http://www.all3dp.com/2/cartesian-3d-printer-)

delta-scara-belt-corexy-polar/

9. NEVLIUDOV, Igor, et al. Internet of things for robotic projects. Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості, 2020, 3 (13): 58-64.

10. 3D Printers with Different Kinematics: Comparison, Advantages and Disadvantages [Електронний ресурс] – Режим доступу: [www / URL: https://top3dshop.com/blog/3d-printer-kinematics-explained](http://www.top3dshop.com/blog/3d-printer-kinematics-explained)

11. Types of 3D printers or 3D printing technologies overview. printing [Електронний ресурс] – Режим доступу: [www / URL: http://3dprintingfromscratch.com/common/types-of-3d-printers-or-3d-printing-technologies-overview/](http://3dprintingfromscratch.com/common/types-of-3d-printers-or-3d-printing-technologies-overview/)

12. Continuous prints on klipper [Електронний ресурс] – Режим доступу: [www / URL: https://github.com/hessfab/continuous-prints-klipper](https://github.com/hessfab/continuous-prints-klipper)

13. Chala, O., Yevsieiev, V., Maksymova, S., & Abu-Jassar, A. (2025). Mathematical model based on multi-agent reinforcement learning (MARL) and partially observable markov decision process (POMDP) for modeling cargo movement for a mobile robots group. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 5(4), 480-489.

14. Abu-Jassar AT, Attar H, Amer A, et al. Remote Monitoring System of Patient Status in Social IoT Environments Using Amazon Web Services (AWS) Technologies and Smart Health Care. *International Journal of Crowd Science*, 2024, <https://doi.org/10.26599/IJCS.2023.9100019>

15. Yevsieiev V., Bronnikov A. Analysis of the cyber-physical production systems implementation impact to achieve the goals of lean production. The IIth International scientific and practical conference «Development of scientific and practical approaches in the era of globalization» (USA, Boston, 28–30 September. 2020). P.221–226. DOI:10.46299/ISG.2020.II.II.