Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматизації, комп'ютерно інтегрованих технологій та систем
(повна назва)

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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
(рівень вищої освіти)

Розроблення модулю п'ятої осі для 3D – принтерах за технологією FFF/FDM
(тема)

Виконав:
здобувач 4 року навчання,
групи АКТАКІТ-22-2

Павло ДОН
(прізвище, ініціали)

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

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

Освітня програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. Дмитро НІКІТІН
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри _____ Ігор НЕВЛЮДОВ
(підпис) (прізвище, ініціали)

2026 р.

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

14.07.2026 р. Павло ДОН



ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет Автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та систем
Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації, робототехніки та безпекової інженерії
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна
Освітня програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)
«___» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві Дон Павлу Дмитровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення модулю п'ятої осі для 3D – принтераз за технологією FFF/FDM
Затверджена наказом університету від 04.06.2026 р. №472 Ст
2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 17 липня 2026 р.
3. Вихідні дані до роботи
3.1 Робоча область друку – 200 мм×200 мм×200 мм;
3.2 Діаметр сопла – 0,4 мм, висота шару – 0,1–0,3 мм;
3.3 Точність позиціонування – ±0,05 мм для лінійних осей та 0,1° для поворотних осей;
3.4 Енергоживлення – 220 В, блок живлення 24 В / 350 Вт.
3.5 Матеріал друку – PLA, PETG, ABS, TPU, діаметр філаменту 1,75 мм;
3.6 Максимальна швидкість друку – 120 мм/с.
4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі:
4.1 Вступ;
4.2 Аналіз предметної області;
4.3 Розробка конструкції макету;
4.4 Розробка 3D-моделі
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 формату PowerPoint (*.ppt) 12– с. формату А4

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

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Збір матеріалів для проведення розробки	06.04.2026 – 25.04.2026	виконано
2	Розробка розділу «Аналіз предметної області»	27.04.2026 – 16.05.2026	виконано
3	Розробка розділу «Розробка макету»	19.05.2026 – 30.05.2026	виконано
4	Розробка розділу «Розробка 3D-модели макету»	03.06.2026 – 28.06.2026	виконано
5	Оформлення кваліфікаційної роботи	29.06.2026 – 06.07.2026	виконано
6	Подання роботи на перевірку Інтернетсервісом StrikePlagiarism	06.07.2026 – 08.07.2026	
7	Подання роботи на рецензію	09.07.2026 – 10.07.2026	
8	Подання роботи на підпис зав. кафедри	11.07.2026 – 12.07.2026	
9	Подання кваліфікаційної роботи в ЕК	13.07.2026 – 14.07.2026	

Дата видачі завдання 06 квітня 2026 р.

Здобувач _____ Павло ДОН
(підпис) (прізвище, ініціали)

Керівник роботи _____ доц. Дмитро НІКІТІН
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 54 с., 6 табл., 28 рис., 1 дод., 16 джерел.

3D-ПРИНТЕР, FFF/FDM, П'ЯТИОСЬОВИЙ ДРУК, COREXY, ПОВОРОТНО-НАХИЛЬНИЙ СТІЛ, ЧЕРВ'ЯЧНИЙ РЕДУКТОР, MARLIN, G-CODE, АДИТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ.

Об’єктом роботи є процес адитивного виготовлення виробів за технологією FFF/FDM із використанням багатовісних систем переміщення.

Предметом роботои є конструктивні, кінематичні та функціональні особливості модуля п’ятої осі 3D-принтера, а також його вплив на параметри процесу друку, точність формоутворення та якість готових виробів.

Метою роботи є підвищення якості друку, розширення технологічних можливостей виготовлення складних геометричних виробів та зменшення потреби у підтримуючих структурах за рахунок розроблення конструкції модуля п’ятої осі для 3D-принтера за технологією FFF/FDM.

У кваліфікаційній роботі проаналізовано сучасні адитивні технології, досліджено кінематичні схеми 3D-принтерів та обґрунтовано вибір системи CoreXY як базової платформи. Розроблено поворотно-нахильний модуль робочого столу з осями A і B, виконано вибір основних компонентів та підтверджено їх працездатність розрахунками. Запропоновано систему керування на базі контролера STM32 з модифікованою прошивкою Marlin для синхронного керування п'ятьма координатами. Результати роботи можуть бути використані під час розроблення та модернізації багатоосьових FFF/FDM 3D-принтерів і в науково-освітніх проєктах.

Отриманий результат кваліфікаційної роботи відповідає Цілі сталого розвитку № 9 «Промисловість, інновації та інфраструктура», зокрема завданню 9.5 «Посилення наукових досліджень та модернізація технологічного потенціалу промислових секторів шляхом розвитку інновацій».

ABSTRACT

Explanatory note: 54 pages, 6 tables, 28 figures, 1 appendix, 16 references.

3D PRINTER, FFF/FDM, FIVE-AXIS PRINTING, COREXY, TILT-ROTARY TABLE, WORM GEARBOX, MARLIN, G-CODE, ADDITIVE MANUFACTURING.

The object of the study is the additive manufacturing process based on FFF/FDM technology using multi-axis motion systems.

The subject of the study is the structural, kinematic, and functional features of the fifth-axis module of a 3D printer, as well as its influence on printing process parameters, dimensional accuracy, and the quality of finished parts.

The aim of the study is to improve print quality, expand the technological capabilities for manufacturing complex geometric parts, and reduce the need for support structures through the development of a fifth-axis module for an FFF/FDM 3D printer.

The qualification thesis analyzes modern additive manufacturing technologies, investigates the kinematic configurations of 3D printers, and substantiates the selection of the CoreXY system as the basic platform. A tilting and rotating build platform module with A and B axes was developed, the main components were selected, and their performance was validated through engineering calculations. A control system based on an STM32 controller with a modified Marlin firmware was proposed to provide synchronized control of five axes. The results of the study can be applied to the development and modernization of multi-axis FFF/FDM 3D printers, as well as in research and educational projects.

The results of the qualification thesis contribute to United Nations Sustainable Development Goal 9: "Industry, Innovation and Infrastructure," particularly Target 9.5, which focuses on enhancing scientific research and upgrading the technological capabilities of industrial sectors through innovation.

ЗМІСТ

Перелік скорочень 9
Вступ 10
1 Аналіз предметної області 12
1.1 Технології FFM та FDM 12
1.2 Види 3D-принтерів 13
1.2.1 Прусоподібні принтери (з рухомим столом) 14
1.2.2 CoreXY кінематика 15
1.2.3 H-bot кінематика 16
1.2.4 Delta кінематика 17
1.2.5 SCARA кінематика (Singl і Duo) 18
1.3 Аналоги 5D-принтерів 19
1.4 Аналіз технічного завдання 21
1.5 Висновки до першого розділу 22
2 Кінематична схема та вибір елементної бази 24
2.1 Кінематична схема макету 24
2.2 Елементна база макету 25
2.2.1 Механічна складова 25
2.2.2 Система керування та елементи ТАУ 27
2.3 Теорія автоматичного управління приводу осі 28
2.4 Висновки до другого розділу 32
3 Розробка 3D моделі 33
3.1 Вибір компонентів 33
3.2 Матеріал та технологія виготовлення несучого каркасу 38
3.3 Розроблення моделі 40
3.4 Збірка макету 5 осі 3D принтера 43
3.5 Висновки до третього розділу 46
4 Охорона праці 47

4.1 Опис лабораторного переміщення 45
4.2 Небезпечні та шкідливі фактори FFF/FDM-технології 47
4.3 Вентиляція та контроль повітряного середовища 47
4.4 Висновки до четвертого розділу 48
Висновки 51
Перелік джерел посилання 53
Додаток А Демонстраційний матеріал 55

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

CoreXY – картезіанська кінематика з перехресною ремінною передачею;

G-code – мова керування верстатами з ЧПК;

ТАУ – теорія автоматичного управління;

ЧПК – числове програмне керування;

ABS – Acrylonitrile Butadiene Styrene;

FDM – Fused Deposition Modeling;

FFF – Fused Filament Fabrication;

PA – Polyamide;

PC – Polycarbonate;

PETG – Polyethylene Terephthalate Glycol-modified;

PLA – Polylactic Acid;

PVA – Polyvinyl Alcohol;

TPU – Thermoplastic Polyurethane.

ВСТУП

Актуальність теми. Адитивні технології є одним із найперспективніших напрямів сучасного виробництва завдяки можливості швидкого виготовлення виробів складної геометрії з мінімальними витратами матеріалу та високим рівнем автоматизації. Найбільш поширеною серед настільних систем є технологія FFF/FDM, яка відзначається доступністю обладнання, широким вибором матеріалів і можливістю модернізації конструкції принтера.

Водночас традиційні тривісні FFF/FDM-принтери мають суттєві обмеження, пов'язані з необхідністю використання підтримуючих конструкцій під час друку складних деталей, що збільшує витрати матеріалу, тривалість друку та погіршує якість виробів.

Перспективним напрямом розвитку є впровадження п'ятиосьових систем друку, які дозволяють змінювати орієнтацію деталі під час виготовлення, зменшувати кількість підтримок і підвищувати якість та міцність готових виробів. Одним із найбільш доцільних рішень є модернізація існуючих FFF/FDM-принтерів шляхом розроблення модуля п'ятої осі на базі кінематики CoreXY та інтеграції його із сучасною системою керування.

Таким чином, розроблення модуля п'ятої осі для 3D-принтера за технологією FFF/FDM є актуальним завданням, спрямованим на розширення технологічних можливостей обладнання та підвищення якості адитивного виробництва.

Об’єктом роботи є процес адитивного виготовлення виробів за технологією FFF/FDM із використанням багатовісних систем переміщення.

Предметом роботои є конструктивні, кінематичні та функціональні особливості модуля п’ятої осі 3D-принтера, а також його вплив на параметри процесу друку, точність формоутворення та якість готових виробів.

Метою роботи є підвищення якості друку, розширення технологічних можливостей виготовлення складних геометричних виробів та зменшення

потреби у підтримуючих структурах за рахунок розроблення конструкції модуля п’ятої осі для 3D-принтера за технологією FFF/FDM.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

– провести аналіз сучасних технологій адитивного виробництва та визначити місце технології FFF/FDM серед інших способів тривимірного друку;

– виконати аналіз існуючих кінематичних схем 3D-принтерів та визначити найбільш доцільну базову конструкцію;

– провести порівняльний аналіз сучасних аналогів п'ятиосьових 3D-принтерів;

– обґрунтувати вибір конструкції модуля п'ятої осі;

– розробити кінематичну схему поворотно-нахильного столу;

– виконати розрахунок навантажень, моментів сил та визначити необхідні параметри приводів;

– обґрунтувати вибір елементної бази механічної конструкції;

– провести оцінку працездатності запропонованої конструкції та можливості її інтеграції у сучасні FFF/FDM-принтери;

– оформити звіт з практики виконано згідно з рекомендаціями, та вимогами ДСТУ 3008:2015 [1], а також з виккористанням навчально-методичних матеріалів [2, 4].

Практичне значення отриманих результатів полягає у розробленні конструкції модуля п'ятої осі для FFF/FDM-принтера, який може бути використаний для модернізації існуючих адитивних установок, створення лабораторного обладнання та навчальних стендів. Запропоновані технічні рішення можуть застосовуватися під час проєктування багатовісних систем адитивного виробництва, у навчальному процесі закладів вищої освіти, а також для подальшого вдосконалення технологій багатовісного 3D-друку.

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

1.1 Технології FFM та FDM

Технологія FDM (Fused Deposition Modeling) була запатентована компанією Stratasys ще в 1989 році Скоттом Крумпом, а після закінчення терміну дії ключових патентів у 2009 році з’явилася її відкрита альтернатива – FFF (Fused Filament Fabrication), яку запропонувала спільнота RepRap. Сьогодні ці терміни часто використовують як синоніми, хоча FDM передбачає використання запатентованих матеріалів і закритого ПЗ, тоді як FFF є нейтральною відкритою технологією. У цій роботі ми застосовуємо нейтральний термін FFF**.** Суть методу полягає в послідовному наплавленні розплавленої термопластичної нитки: філамент подається екструдером у гаряче сопло (хотенд), де плавиться при температурі 170–270 °C залежно від матеріалу, після чого видавлюється на платформу або попередній шар, де застигає, рис. 1.1.

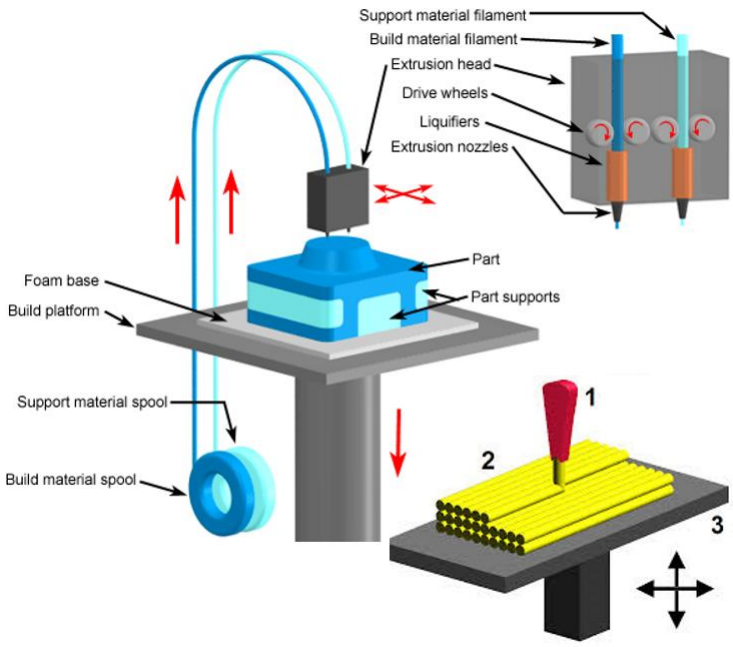


Рисунок 1.1 – Принцип роботи FFF/FDM-принтера

Рух сопла відносно столу відбувається за траєкторіями, згенерованими слайсером у вигляді G-коду. Деталь формується шар за шаром знизу вгору. Ключові фізичні явища: термопластичність (багаторазовий перехід між твердим і в’язкоплинним станом), адгезія між шарами (дифузія макромолекул при контакті розплавленого філаменту з застиглим шаром), усадка (зменшення об’єму при охолодженні, для ABS до 1 %, для нейлону до 2 %) [10].

Для якісного друку необхідно підтримувати стабільну температуру сопла (наприклад, для PLA 190–220 °C, для ABS 220–250 °C, для PETG 230–250 °C) та столу (для PLA 40–60 °C, для ABS 90–110 °C з закритою камерою). Діаметр сопла зазвичай становить 0,4 мм, висота шару – 0,1–0,3 мм, швидкість друку – 20–300 мм/с. Об’ємна витрата

$$Q = v \cdot w \cdot h \ (мм^3/с),$$

де v – швидкість;

w – ширина доріжки (≈1,2 діаметра сопла);

h – висота шару.

Перевищення максимальної витрати призводить до непроплавів (underextrusion) [10].

Серед переваг FFF – низька вартість обладнання (від 200 доларів для початкових моделей, як-от Ender 3, до 5000 доларів для професійних настільних принтерів), широка номенклатура матеріалів (PLA, ABS, PETG, нейлон, полікарбонат, композити з вуглеволокном, деревом, металом тощо), простота обслуговування (відкрита архітектура, легка заміна компонентів) та відносна безпека (відсутність лазерів і токсичних порошків, хоча ABS виділяє стирол, тому рекомендується вентиляція) [10].

За даними Wohlers Report 2025, на FFF припадає 45 % світового ринку адитивного виробництва, що становить близько 11 млрд доларів. Це зумовило широке застосування технології: швидке прототипування в машинобудуванні та дизайні (економія часу на розробку до 30–50 %), виготовлення оснастки та

шаблонів, створення анатомічних моделей у медицині (FDA схвалило понад 50 медичних виробів, надрукованих методом FFF), а також освітні та DIY-проєкти. Проте традиційна 3-осьова FFF має суттєві обмеження, головним з яких є необхідність друку підтримуючих структур для нависань понад 45°.

Це збільшує витрати матеріалу на 30–70 %, подовжує час друку в 1,5–2 рази, а після видалення підтримок на поверхні залишаються сліди, які потребують додаткової постобробки (шліфування, хімічне згладжування). Крім того, анізотропія механічних властивостей (міцність між шарами становить лише 30–50 % від поздовжньої) обмежує застосування для навантажених деталей, таких як кронштейни, шестерні, корпуси під навантаженням.

Саме тому виникає потреба в багатоосьових системах, які дозволяють орієнтувати сопло перпендикулярно до поверхні в кожній точці, що усуває потребу в підтримках та зменшує анізотропію. Таким чином, FFF є оптимальною базою для створення 5D-принтера завдяки доступності, гнучкості та широкій підтримці.

1.2 Види 3D-принтерів

1.2.1 Прусоподібні принтери (з рухомим столом)

Розглянемо основні типи кінематики, що використовуються в сучасних 3D-принтерах, оскільки від вибору базової схеми залежать швидкість, точність та можливість інтеграції додаткових обертових осей. Прусоподібні принтери (з рухомим столом по Y і портальною балкою по X) є найпростішими та найдешевшими. Класичний представник – Prusa i3 MK4.

Принцип роботи: стіл переміщується по напрямних осі Y (зазвичай за допомогою одного або двох крокових двигунів NEMA17 з ремінною передачею GT2), портальна балка з хотендом – по осі X, а вся портальна група або стіл – по осі Z (вгору-вниз). Переміщення по Z часто реалізується за допомогою трапецеїдальних гвинтів Tr8×8 або Tr8×2. Їхні переваги – легкість налаштування, велика спільнота (тисячі готових моделей, прошивок Marlin та

Klipper, модифікацій) та дешевизна компонентів (профілі 2020, вали 8 мм, підшипники LM8UU, ремені GT2). Однак через велику масу столу (до 2–5 кг) прискорення обмежені (1000–3000 мм/с²), а різкі зупинки спричиняють вібрації («кільцювання», ringing), які проявляються у вигляді повторюваних хвиль на поверхні деталі. Максимальна швидкість рідко перевищує 200–300 мм/с через ризик пропускання кроків.

Точність позиціювання становить ±0,05–0,1 мм, що достатньо для більшості хобійних задач. Недоліки також включають велику площу, яку займає принтер (через рух столу вперед-назад), та обмежену висоту при друку важких деталей (центр мас зміщується). Застосування: навчальні принтери, домашнє використання, друк великих деталей, де швидкість не критична, а простота важлива, рис. 1.2.



Рисунок 1.2 – Bambu Lab A1

1.2.2 CoreXY кінематика

Кінематика CoreXY, навпаки, використовує два нерухомі двигуни, закріплені на рамі (зазвичай ззаду), які через систему ременів з перехресними петлями переміщують легку каретку хотенда (маса 50–150 г).

Математичний зв’язок: $X = (\Delta A + \Delta B)/2$, $Y = (\Delta A - \Delta B)/2$, де ΔA, ΔB – лінійні переміщення, що відповідають кутам повороту двигунів. Це дозволяє досягати швидкостей 600 мм/с (наприклад, Voron 2.4, RatRig V-Core) і прискорень 20 000 мм/с² при точності ±0,02–0,05 мм. Стіл рухається тільки по Z, що усуває проблему інерційності, оскільки важкий стіл не рухається в горизонтальній площині. Це також ідеально підходить для інтеграції поворотно-нахильного механізму (осей A та B), оскільки додаткові двигуни та редуктори не збільшують інерцію XY-переміщень. Недоліки CoreXY – складне налаштування ременів (потрібен однаковий натяг обох петель, інакше з’являються перекоси) та потенційна розтяжність довгих ременів (до 2 м). Навіть кевларові ремені мають розтягнення <0,1 %, що при високих прискореннях (>15 000 мм/с²) може давати похибку до 0,02 мм.

Також вищі вимоги до жорсткості рами – рекомендується профіль 2040 або 4040 замість 2020. Порівняльний аналіз показує, що для розробки 5D-принтера оптимальною базовою кінематикою є CoreXY, оскільки вона забезпечує найкращий компроміс між швидкістю, точністю та простотою інтеграції додаткових обертових осей столу, рис. 1.3.



Рисунок 1.3 – Bambulab P1S з AMS

1.2.3 H-bot кінематика

H-bot є спрощеним варіантом CoreXY, але через використання одного довгого ремінного кільця (H-подібна конфігурація) виникає паразитний момент, що розвертає каретку (ефект «racking» або «виляння»). Це відбувається через асиметрію прикладання сил: при русі по X одна гілка ременя натягується, інша послаблюється, створюючи обертальний момент навколо вертикальної осі. При високих прискореннях це призводить до значного зниження точності (похибка може зростати до 0,2–0,3 мм) та появи смуг на деталях. Жорсткість системи залежить від напрямку руху. Чисельні експерименти показали, що H-bot програє CoreXY за точністю на 30–50 % при однаковій швидкості.

Тому сьогодні H-bot практично не застосовується в сучасних 3D-принтерах (за винятком деяких старих моделей, як оригінальний Ultimaker). Для нових розробок рекомендується CoreXY, рис. 1.4.

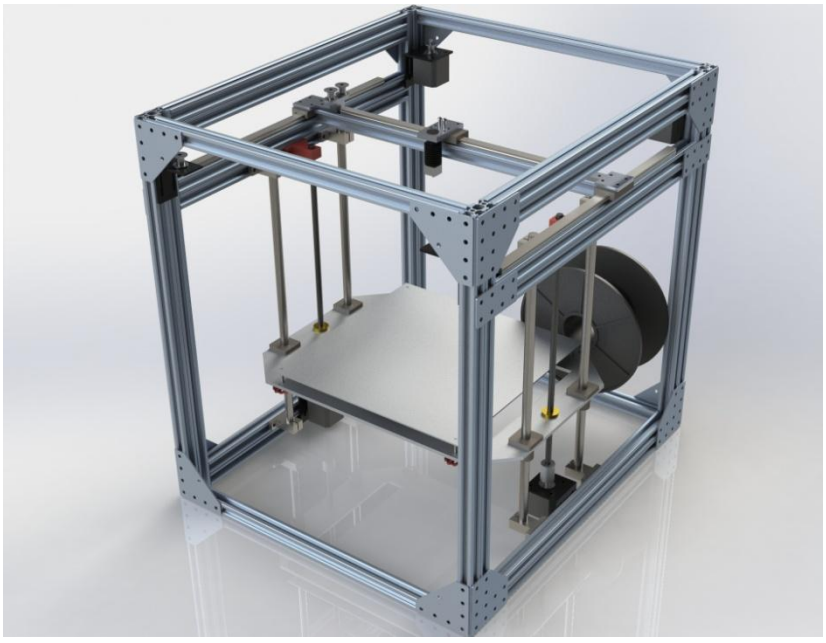


Рисунок 1.4 – H-Bot 3D принтер

1.2.4 Delta кінематика

Delta кінематика (три паралельні важелі, що керують центральним ефором) забезпечує найвищу швидкість – до 500 мм/с і прискорення до 30 000 мм/с². Принцип роботи: три вертикальні напрямні, по кожній рухається каретка

з важелем; важелі з’єднані з центральним тримачем хотенда. Пряма та обернена задачі кінематики потребують розв’язання системи тригонометричних рівнянь.

Наприклад, для симетричної дельти:

$$(x - xi)^2 + (y - yi)^2 + (z - zi)^2 = L^2,$$

де L – довжина важеля.

Однак ціна цього – складна калібрування (потрібно визначати радіус, висоти кареток, коефіцієнти нелінійності; процес може займати кілька годин), нелінійна похибка на краях робочої області (точність може падати до ±0,1–0,15 мм) та обмежена висота при великому діаметрі столу (співвідношення діаметр/висота ≤ 1,5–2). Також дельта має зони сингулярності поблизу країв, важко реалізувати закриту камеру для друку ABS через складну форму [5].

Застосування: швидкісний друк дрібних деталей, харчові продукти (шоколад, тісто), медичні моделі, рис. 1.5. Для 5D-друку дельта не рекомендується через круглу форму робочої зони та складність інтеграції осей A, B.



Рисунок 1.5 – Delta 3D принтер

1.2.5 SCARA кінематика (Singl і Duo)

SCARA кінематика (Selective Compliance Articulated Robot Arm) – дві обертові ланки (плече і передпліччя) з паралельними вертикальними осями обертання. Пряма задача:

$$X = L_1 \cdot \cos(\theta_1) + L_2 \cdot \cos(\theta_1 + \theta_2),\ Y = L_1 \cdot \sin(\theta_1) + L_2 \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2),\ Z = Z_0 + Z_motor.$$

Обернена задача має два розв’язання («ліктьова конфігурація»). Singl – одна рука (проста SCARA), Duo – дві незалежні SCARA-руки для друку двома матеріалами або захоплення деталі. Переваги: велика робоча зона при малих габаритах у складеному стані, висока жорсткість у вертикальному напрямку. Недоліки: потребує розв’язання нелінійної оберненої задачі кінематики, має зони сингулярності (при θ2 = 0° або 180°), високу вартість через необхідність точних зубчастих передач (планетарних або гармонічних), складність компенсації люфту. Застосування: промислові роботи (складання, пакування), рідше – 3D-друк. Для бюджетного 5D-проєкту неоптимальна, рис. 1.6.

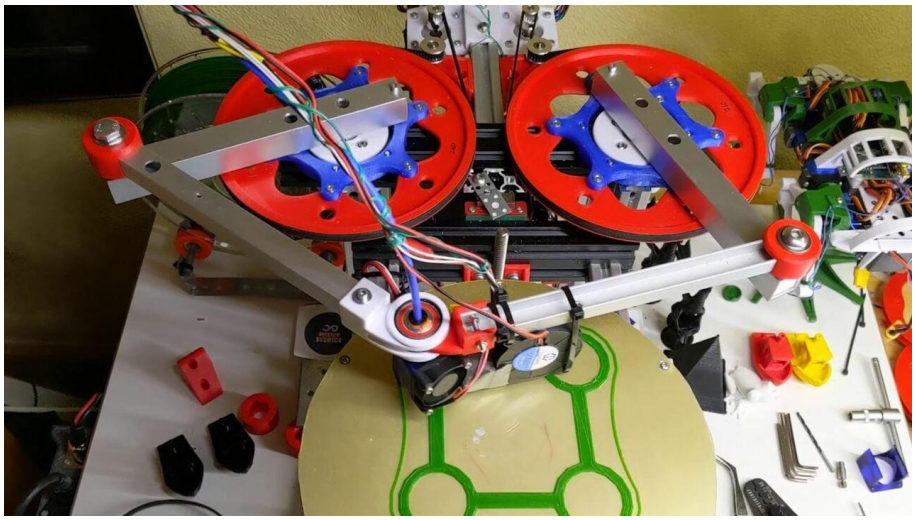


Рисунок 1.6 – SCARA кінематика

1.3 Аналоги 5D-принтерів

Переходячи до аналізу існуючих аналогів 5D-принтерів, слід зазначити, що термін «5D-друк» у технічній літературі означає наявність п’яти керованих координат: X, Y, Z, A (нахил) та B (обертання). Така система дозволяє друкувати без підтримок та зменшує анізотропію. За способом реалізації розрізняють системи з обертовим нахильним столом (екструдер має 3 ступені, стіл – 2) та системи з екструдером на 5-осьовому роботі-маніпуляторі. Промисловим прикладом першого типу є 5T42-2 (компанія 5D Print) [11].

Це модуль на базі промислового робота з сервоприводами, робочою зоною у вигляді сфери діаметром 500 мм, точністю ±0,05 мм, масою заготовки до 10 кг, швидкістю до 200 мм/с. Екструдер здатний працювати до 400 °C для PEEK. Вартість – близько 50 000 доларів. Його недоліки – висока ціна, закрита екосистема (неможливість модифікації прошивки), складне калібрування та обслуговування (потрібен навчений інженер), великі габарити та маса (понад 200 кг). Другий тип представляють гібридні системи, наприклад DMG MORI LASERTEC 65 3D (Німеччина), яка поєднує 5-осьове фрезерування з лазерним порошковим наплавленням металів (лазер 200–2000 Вт, порошки сталі, титану, інконелю) [11].

Вартість таких систем стартує від 500 000 доларів, вони потребують промислових умов експлуатації (лазер класу 4, вибухонебезпечні порошки, інертний газ) та мають велике енергоспоживання (понад 20 кВт). Не підходять для полімерів. Зовсім інший підхід реалізовано у відкритих проєктах, таких як Open5x (GitHub). Тут ентузіасти додають до звичайного 3D-принтера (наприклад, Anet A8) два крокові двигуни з черв’ячними редукторами (часто 3D-друкованими з пластику) для нахилу/обертання столу.

Однак ці рішення мають серйозні вади: програмне забезпечення не підтримує 5-осьову кінематику в реальному часі (постпроцесор на Python працює повільно, до 10 секунд на кадр для складних моделей), відсутня компенсація гравітаційного моменту для осі A (при масі деталі понад 300 г двигун пропускає кроки, оскільки пластиковий редуктор має низький ККД), а

люфт 3D-друкованих редукторів сягає 3°, що робить точне позиціювання неможливим.

Інші проєкти: Nikus – використовує промислові редуктори PBL40, але ПЗ потребує доопрацювання; Fraunhofer IPA – система на базі робота KUKA KR6 вартістю понад 100 000 євро. Отже, жодне з існуючих рішень не є готовим до використання «з коробки» в бюджетному сегменті (до 2000 USD), що підтверджує актуальність розробки власного модуля на базі стандартних компонентів (NEMA17, промислові черв'ячні редуктори, контролер STM32) з модифікацією прошивки Marlin та алгоритмами компенсації люфту і гравітації, рис. 1.7.



Рисунок 1.7 – Приклад роботи 5 осі для 3D принтера

1.4 Аналіз технічного завдання

Технічне завдання на дипломне проектування (додаток А) визначає наступні параметри: робоча область базового принтера – 200 мм×200 мм×200 мм (обмеження за X,Y,Z). При нахилі столу на кут A ефективний горизонтальний габарит деталі зменшується $L_{eff} = L \cdot \cos(A)$. A = 45°, cos(45°) ≈ 0,707, отже: L_{eff} = 141 мм, але по діагоналі можна досягти 283 мм.

Кути повороту столу – вісь A (нахил) від –45° до +45° (діапазон 90°, достатньо для звисів до 135°), вісь B (обертання) безперервне 0–360° (потребує струмознімача для підігріву столу). Максимальна маса заготовки – 1,5 кг. Тип екструдера – Bowden (для зменшення маси рухомої частини, довжина трубки ≤400 мм). Точність позиціювання за кутами – не гірше 0,1°. Інтерфейс керування – 32-бітний контролер STM32 (обрано SKR 1.4 Turbo) з прошивкою Marlin 2.1.x або RepRapFirmware.

Попередній розрахунок моменту на осі нахилу: при масі 1,5 кг і плечі 0,1 м (половина довжини столу) максимальний момент від сили тяжіння при A=45° становить

$$M_{grav} = m \cdot g \cdot R \cdot \sin 45° = 1{,}5 \cdot 9{,}81 \cdot 0{,}1 \cdot 0{,}7071 = 1{,}041 \text{ Н·м}.$$

Динамічний момент при кутовому прискоренні ε=100 рад/с² та моменті інерції деталі J≈0,0025 кг·м²: $M_{dyn} = J \cdot \varepsilon = 0{,}25$ Н·м. Сумарний момент $M_{total} = 1{,}291$ Н·м. З коефіцієнтом запасу 2 необхідний момент на виході редуктора – 2,58 Н·м. Кроковий двигун NEMA17 (0,45 Н·м) разом з черв’ячним редуктором 50:1 (ККД ≈0,5) забезпечує момент на виході 0,45·50·0,5 = 11,25 Н·м, що в 4,36 раза більше за необхідний – з надлишком перекриває вимоги. Додатково черв’ячна передача забезпечує самогальмування, що важливо для фіксації нахиленого столу при вимкненому живленні.

Точність кутів: крок двигуна з мікрокроком 1/16 – 0,1125°, після редуктора – 0,00225°, що значно краще за 0,1°. Однак люфт редуктора (0,5°) потребує алгоритмічної компенсації (див. розділ 2.2). Додаткові вимоги: струмознімач на 4 контакти (5 А), додатковий підшипник для розвантаження осі A від горизонтальних сил (~10,4 Н при нахилі 45°), модифікація прошивки Marlin (NUM_AXIS 5) та розробка постпроцесора для слайсера [8,13].

1.5 Висновки до першого розділу

Таким чином, за результатами першого розділу можна зробити наступні висновки.

По-перше, технологія FFF – найдоступніша для реалізації 5D-друку завдяки низькій вартості компонентів (200–5000 USD), широкій номенклатурі матеріалів (PLA, ABS, PETG, нейлон, композити) та відкритому ПЗ (Marlin, Klipper, RepRapFirmware).

По-друге, серед розглянутих кінематик (прусоподібна, CoreXY, H-bot, дельта, SCARA) найкращий компроміс між швидкістю (600 мм/с), точністю (±0,02–0,05 мм) та простотою налаштування забезпечує CoreXY, яка й обирається як базова, оскільки нерухомий стіл у горизонтальній площині ідеально підходить для інтеграції осей A та B. По-третє, аналіз аналогів показав, що на ринку відсутні готові та доступні (до 2000 USD) 5D-принтери для полімерів – промислові системи коштують від 50 000 доларів до 500 000 доларів (DMG MORI), а відкриті проєкти (Open5x) недороблені (повільний постпроцесор, відсутність компенсації гравітації, люфт до 3°). По-четверте, розроблено технічні вимоги до модуля: робоча область 200 мм×200 мм×200 мм, кути A: ±45°, B: 0–360°, маса заготовки 1,5 кг, точність кутів ≤0,1°.

Проведено детальний розрахунок моментів (M_total = 1,291 Н·м, з запасом 2,58 Н·м), який підтвердив достатність черв’ячних редукторів 50:1 (вихідний момент 11,25 Н·м) та двигунів NEMA17.

По-п’яте, визначено необхідність модифікації прошивки Marlin для підтримки додаткових осей (NUM_AXIS 5), використання струмознімача для осі B, додаткового підшипника для розвантаження осі A, а також розробки постпроцесора для генерації 5-осьового G-коду (наприклад, на Python з аналізом нормалей до поверхні). Отримані результати є основою для подальшої розробки кінематичної схеми, вибору елементної бази та синтезу системи автоматичного керування в другому розділі.

2 КІНЕМАТИЧНА СХЕМА ТА ВИБІР ЕЛЕМЕНТНОЇ БАЗИ

2.1 Кінематична схема макету

Кінематична схема розроблюваного макету 5D-принтера базується на класичній тривісній портальній системі типу CoreXY та додаткового поворотно - нахильного модуля робочого столу, що реалізує дві обертальні координати.

Загальна структура системи включає п’ять керованих координат:

– лінійні осі X, Y, Z;

– обертальні осі A (нахил) та B (обертання).

Базова кінематика CoreXY забезпечує переміщення екструдера у горизонтальній площині. Два нерухомі крокові двигуни, розташовані на задній частині рами, через систему перехресних ременів GT2 здійснюють переміщення каретки хотенда. Така схема дозволяє мінімізувати рухому масу та забезпечити високі прискорення.

Переміщення по осі Z реалізується за допомогою трапецеїдального гвинта Tr8×2 та двох напрямних валів діаметром 12 мм, що забезпечують стабільність вертикального руху та запобігають перекосам.

До каретки осі Z жорстко закріплено поворотно-нахильний стіл, який є ключовим елементом 5-осьової системи. Його кінематична структура включає дві обертальні пари:

– вісь B (обертання) – реалізована через черв’ячний редуктор, який забезпечує безперервне обертання платформи на 360°;

– вісь A (нахил) – реалізована через шарнірний вузол з приводом від черв’ячного редуктора, що забезпечує зміну кута нахилу в межах ±45°.

Кінематичний ланцюг системи має послідовну структуру:

– двигун;

– редуктор;

– обертальна пара;

– платформа.

Використання черв’ячних передач дозволяє отримати значне передаточне число, що підвищує точність позиціонування та забезпечує ефект самогальмування, рис. 2.1.

Таким чином, розроблена кінематична схема відповідає концепції, визначеній у першому розділі, та забезпечує можливість зміни орієнтації деталі під час друку, що дозволяє мінімізувати використання підтримок і покращити механічні властивості виробів.

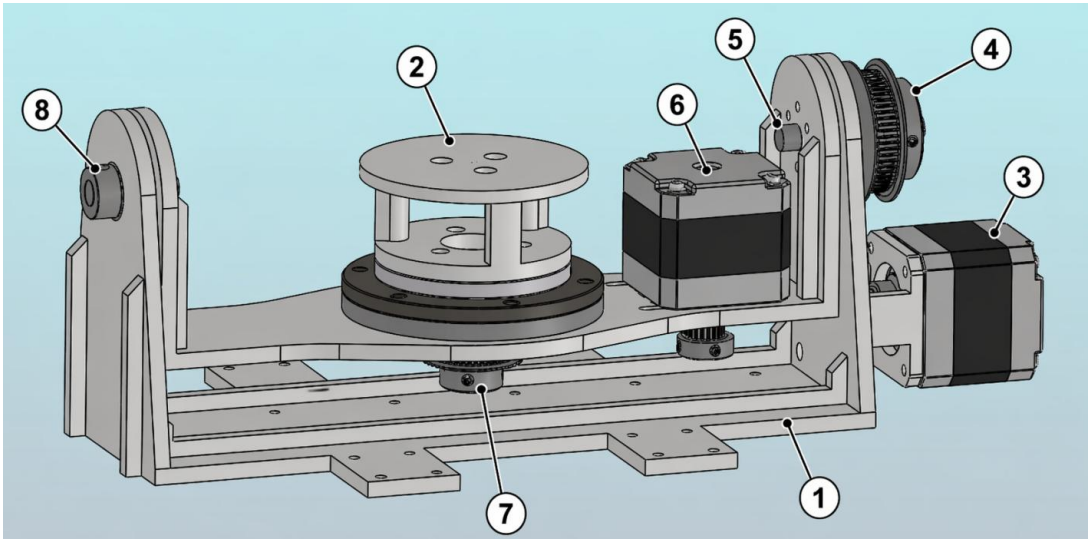


Рисунок 2.1 – 3D макет 5D-стола для проєкту

2.2 Елементна база макету

2.2.1 Механічна складова

Конструкція макету реалізована у вигляді жорсткої просторової рами з алюмінієвого профілю типу 2040 розміром 500 мм×500 мм×550 мм. Така рама забезпечує необхідну жорсткість конструкції, стійкість до вібрацій і можливість точної установки всіх вузлів.

У верхній частині рами розташована система CoreXY, що включає два крокові двигуни типу NEMA17, закріплені нерухомо. Передача руху здійснюється за допомогою зубчастих ременів GT2 шириною 6 мм з перехресною конфігурацією. Для направлення ременів використовуються

натяжні ролики з підшипниками типу 625ZZ або 608ZZ, що зменшують втрати на тертя та забезпечують стабільність руху.

Каретка екструдера має малу масу (~100 г) і переміщується по напрямних валах діаметром 8 мм із застосуванням лінійних підшипників LM8LUU. Така конструкція дозволяє досягти високих прискорень і мінімізувати інерційні навантаження.

Вертикальна вісь Z реалізована за допомогою двох напрямних валів діаметром 12 мм та трапецеїдального гвинта Tr8×2. Гвинтова передача забезпечує високу точність позиціонування, а використання двох направляючих виключає перекіс платформи. Привід здійснюється кроковим двигуном NEMA17 через жорстке муфтове з’єднання.

До Z-каретки кріпиться алюмінієва монтажна плита товщиною 10 мм, яка виконує роль бази для встановлення поворотно-нахильного столу. Висока товщина плити забезпечує рівномірний розподіл навантажень і зменшує деформації.

Модуль осі B (обертання) реалізований на базі черв’ячного редуктора типу PBL40 з передаточним числом 50:1. Черв’ячна передача складається з черв’яка (гвинта) та черв’ячного колеса, що дозволяє отримати значний крутний момент і забезпечує самогальмування. Вихідний вал редуктора встановлений на підшипниковому вузлі, що включає радіально-упорні підшипники, здатні сприймати як осьові, так і радіальні навантаження.

На обертальній платформі встановлено додатковий підшипниковий вузол (опорний поворотний підшипник або комбінація підшипників), який сприймає навантаження від маси деталі та забезпечує плавність обертання.

Модуль осі A (нахил) реалізований за допомогою другого черв’ячного редуктора з передаточним числом 50:1. Він приводить у рух шарнірний вузол, розташований у бокових опорах. Вісь нахилу виконана у вигляді валу, встановленого в підшипниках ковзання або кочення, що забезпечують точність і мінімальний люфт.

Верхня робоча платформа виготовлена з алюмінію розміром 200мм ×200мм ×6мм і оснащена силіконовим нагрівачем потужністю 220 Вт. Для передачі живлення та сигналу термістора при обертанні використовується струмознімач (slip ring) на 4 контакти.

Кріплення всіх елементів здійснюється за допомогою стандартних різьбових з’єднань, дистанційних втулок і монтажних пластин, що забезпечує ремонтопридатність і можливість модернізації конструкції.

Таким чином, механічна складова макету побудована з використанням доступних стандартних компонентів і забезпечує необхідні характеристики точності, жорсткості та надійності.

2.2.2 Система керування та елементи ТАУ

Система керування макетом базується на використанні мікроконтролерної платформи STM32 з прошивкою Marlin, модифікованою для підтримки п’яти координат.

Об’єктом керування є багатовісна електромеханічна система, що включає крокові двигуни, редуктори та робочий стіл. Основним керуючим впливом є послідовність імпульсів, які подаються на обмотки двигунів і визначають їх кутове переміщення.

Система керування реалізована за розімкненим принципом, що характерно для більшості FDM-принтерів. При цьому точність забезпечується високою дискретністю крокових двигунів та використанням мікрокрокового режиму.

Динаміка осі нахилу описується рівнянням руху:

$$J\theta + B\theta + M_n = M_{\text{ДВ}}, \tag{2.1}$$

де J – момент інерції системи. Це міра «ліні» тіла: наскільки важко змусити його обертатися або зупинити;

$\ddot{\theta}$ (Тета з двома крапками) – кутове прискорення. Швидкість зміни швидкості обертання;

B – коефіцієнт в'язкого тертя (або демпфування). Описує опір, який зростає разом із швидкістю;

$\dot{\theta}$ – кутова швидкість. Як швидко обертається вал у цей момент;

M_n – момент навантаження. Зовнішній супротив (наприклад, вага вантажу, який ви піднімаєте);

Мдв – крутний момент, який генерує двигун. Сила, що «штовхає» систему.

Де враховуються інерційні та гравітаційні навантаження. Особливістю є наявність гравітаційного моменту, що змінюється залежно від кута нахилу платформи.

Для підвищення точності позиціонування використовується програмна компенсація:

– компенсація люфту редуктора;

– врахування гравітаційного моменту;

– корекція траєкторії руху.

Черв’ячні редуктори додатково забезпечують стабільність положення за рахунок самогальмування, що особливо важливо для осі нахилу.

Синхронізація рухів усіх п’яти осей здійснюється на рівні G-коду та планувальника руху прошивки, що дозволяє реалізувати складні просторові траєкторії.

2.3 Теорія автоматичного управління приводу осі

Згідно із технічним завданням заносимо початкові дані до таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Значення параметрів САК тягового приводу

Найменування	Позначення	Значення
Коефіцієнт підсилення контролера	$К_{ПП}$	100
Коефіцієнт підсилення драйвера	$К_{Д}$	20
Стала часу драйвера	$Т_{Д}$	0,005 с
Коефіцієнт моменту планетарного редуктора двигуна	$К_{М}$	0,8 Н·м/А
Електрична стала часу двигуна	$Т_{е}$	0,002 с
Зведений момент інерції (шнека)	J	≈ 0,4 кг·м²
Стала часу датчика зворотного зв'язку	$Т_{дат}$	0,02 с

Для розрахунку коефіцієнту двигуна використовують таку формулу:

$$K_M = \frac{M}{I}, \tag{2.2}$$

де K_M – коефіцієнт моменту двигуна (Н·м/А);

М – електромагнітний (крутний) момент двигуна (Н·м);

I – струм двигуна (номінальний або струм якоря (А).

$К_М$ обчислено з номінального моменту при номінальному струм, формула (2.2):

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

До табл. 2.2 заносимо вимоги, яким повинна задовольняти вихідна САУ.

Таблиця 2.2 – Вимоги щодо якості процесу управління

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

На рис. 2.2, наведена функціональна схема САУ.

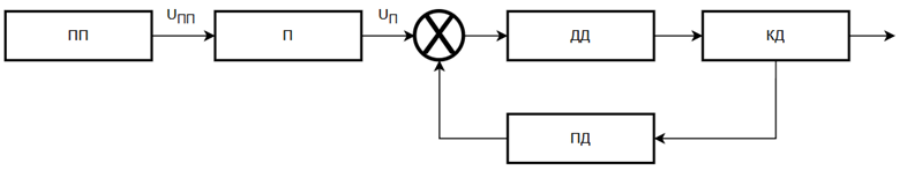


Рисунок 2.2 – Функціональна блок-схема САК

Лінійна неперервна САУ позиціонування крокового двигуна NEMA14 містить: кроковий двигун 36HM2004A4 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:

$$e(t) = \theta\text{зад}(t) - \theta\text{вих}(t)\ , \qquad (2.3)$$

де $e(t)$ – сигнал помилки (різниця між заданою і фактичною швидкістю двигуна);

$\theta зад(t)$ – задане значення швтдкості;

$\theta вих(t)$ – фактичне значення швидкості.

Формула плати керування (ПП):

$$U_{\text{ПП}}(s) = \text{К}_{\text{ПП}} \cdot E(s)\,, \tag{2.4}$$

де $U_{ПП}(s)$ – вихідна напруга/ШІМ контролера;

$K_{ПП}$ – коефіцієнт підсилення;

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

Передавальна функція силового драйвера:

$$W_{\text{Д}}(s) = \frac{\text{К}_{\text{Д}}}{\text{Т}_{\text{Д}}s + 1}\,, \tag{2.5}$$

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

$K_Д$ – коефіцієнт підсилення драйвера;

$T_Д$ – стала часу драйвера.

Передавальна функція виконавчого колекторного двигуна:

$$W_{\text{двиг}}(s) = \frac{\text{К}_{\text{М}}}{J_{S^2} + T_e s + \text{К}_{\text{М}}}\,, \tag{2.6}$$

де K_M – коефіцієнт моменту двигуна;

J – зведений момент інерції платформи;

T_e – електрична стала часу;

s – комплексна змінна Лапласа.

Формула датчика зворотного зв'язку:

$$W_{\text{дат}}(s) = \frac{1}{\text{Т}_{\text{дат}}s + 1}\,. \tag{2.7}$$

Передавальна функція всієї замкненої системи керування бортом:

$$W_{\text{САУ}}(s) = \frac{\text{К}_{\text{ПП}} \cdot \text{К}_{\text{Д}} \cdot \text{К}_{\text{М}}}{(\text{Т}_{\text{Д}}s + 1)(J_{S^2} + T_e s + \text{К}_{\text{М}})(\text{Т}_{\text{дат}}s + 1)}\,, \tag{2.8}$$

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

$\text{К}_{\text{ПП}}$ – коефіцієнт підсилення ПП;

$К_Д$ – коефіцієнт підсилення драйвера;

$К_М$ – коефіцієнт моменту двигуна;

J – зведений момент інерції платформи;

T_e – електрична стала часу;

s – комплексна змінна Лапласа.

Підставимо реальні розрахункові параметри нашої системи (при $K_{ПП}$ = 100, $K_Д$ = 20):

$$W_{CAK}(s) = \frac{100 \cdot 20 \cdot 0.8}{(0{,}005s + 1)(0{,}4s^2 + 0{,}002s + 0{,}8)(0{,}02s + 1)},$$

$$W_{CAK}(s) = \frac{1600}{(0{,}005s + 1)(0{,}4s^2 + 0{,}002s + 0{,}8)(0{,}02s + 1)}.$$

Дана математична модель дозволяє на етапі програмного налаштування драйверу оптимізувати коефіцієнти для уникнення автоколивань шнеку під час подачі матеріалу [9, 10].

2.4 Висновки до другого розділу

У другому розділі було розроблено конструкцію макету 5D-принтера, що базується на поєднанні кінематики CoreXY та поворотно-нахильного столу.

Побудована кінематична схема забезпечує п’ять ступенів свободи та відповідає вимогам технічного завдання. Обґрунтовано вибір механічної елементної бази, включаючи використання алюмінієвої рами, крокових двигунів, лінійних напрямних і черв’ячних редукторів.

Застосування редукторів з великим передаточним числом дозволило забезпечити необхідний крутний момент і точність позиціонування, а також реалізувати ефект самогальмування.

Розглянуто систему керування з позицій теорії автоматичного управління та визначено основні методи компенсації похибок.

Отримані результати підтверджують доцільність обраної конструкції та створюють основу для подальшого 3D-моделювання і виготовлення макету.

3 РОЗРОБКА 3D МОДЕЛІ

3.1 Вибір компонентів

Для реалізації конструкції були обрані такі шківи, рис 3.1:

– шків BF GT2-10мм Z40 D5;

– шків Зубчатий шків 20, вал 5 мм, GT2-10 мм;

– шків BF GT2-6мм Z60 D5.



а) б) в)

Рисунок 3.1 – Шківи: а – шків BF GT2-10мм Z40 D5; б – шків GT2-10 мм Z20 D5; в – шків BF GT2-6мм Z60 D5

В табл. 3.1 наведені характеристики цих комплектуючих.

Таблиця 3.1 – Характеристики шківів

Характеристики BF GT2-10 мм Z40 D5	
Кількість зубців	40
Ремінь	GT2 10 мм
Ширина ременя	10 мм
Діаметр валу	5 мм
Зовнішній діаметр	28 мм (фланець), 18 мм (виступ)
Висота	21 мм (загальна), 7 мм (виступ)
Характеристики шків зубчатий шків 20	
Кількість зубців	20
Ремінь	GT2 10 мм
Ширина ременя	10 мм
Діаметр валу	5 мм
Зовнішній діаметр	16 мм (фланець), 12 мм (по щубцям)
Висота	19 мм (загальна), 10,7 мм (висота зубців)

Продовження таблиці 3.1

Характеристики шків BF GT2-6 мм Z60 D5	
Кількість зубців	60
Ремінь	GT2
Ширина ременя	6 мм
Діаметр валу	5 мм
Зовнішній діаметр	44 мм (фланець), 25 мм (виступ)
Висота	17 мм (загальна), 7 мм (виступ)

Для передачі обертів між шківами та кроковими двигунами використовується обрані ремені, табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Ремінь зубчастий замкнутий GT2-6 мм

Характеристики	
Ремінь	кільцевої (замкнутий)
Тип ременя	GT2 (2GT);
Крок зубів	2 мм;
Ширина ременя	6 мм;
Матеріал	неопрен;
Корд	скловолокно.
Довжина ременів	280 мм (для столу), 200 мм (для порталу)

Обґрунтування вибору ширини паса, рис. 3.2. У конструкції застосовано зубчасті паси типу GT2 шириною 6 мм. Такий вибір зумовлений наступними факторами:

– економічністю – вартість 6-мм пасів та відповідних шківів є нижчою порівняно з 10-мм, що важливо для прототипу або одиничного виробу;

– легкістю заміни – паси шириною 6 мм є стандартним елементом більшості 3d-принтерів і верстатів з ЧПК, тому їх завжди можна придбати або оперативно замінити без переробки вузлів кріплення;

– уніфікація – використання однакової ширини для обертання столика та порталу спрощує складську номенклатуру та зменшує ризик помилок під час монтажу.



Рисунок 3.2 – Ремінь GT2 6 мм

Розрахункова тягова здатність паса GT2-6 мм достатня для передачі крутного моменту від сервоприводів (NEMA17/23) з урахуванням маси рухомих частин (оцінне навантаження до 5-7 Н). У разі потреби підвищення жорсткості передачі або збільшення навантаження, конструкція передбачає можливість заміни паса на GT2-10 мм (для двох провідних шківів) без зміни геометрії шківів, оскільки посадкові місця виконано з запасом ширини. Така модернізація дозволить покращити щільність контакту зубців і зменшити пружне просковзання, рис. 3.3.

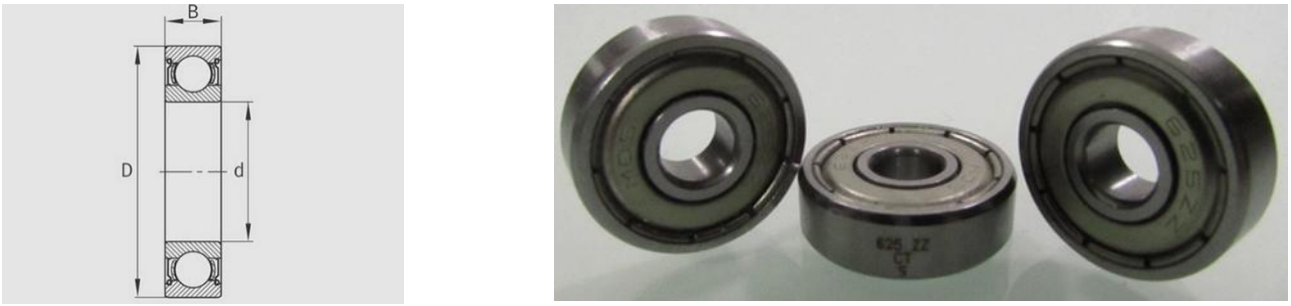


Рисунок 3.3 – Зовнішній вигляд підшипників 5×16×5 625 ZZ 80025

Обрані підшипники відповідно до параметрів шківів, табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Підшипник 5×16×5 625 ZZ 80025

Характеристики	
Внутрішній діаметр підшипника d	5 мм
Зовнішній діаметр підшипника D	16 мм
Висота (ширина) підшипника B	5 мм
Вантажопідйомність підшипника динамічна C	1,11 кН
Вантажопідйомність підшипника статична Co	0,38 кН
Гранична частота обертання при пластичному мастилі	37000 об/хв
Гранична частота обертання при рідкому мастилі	44000 об/хв
Маса	0,005 кг
Кількість підшипників	3 шт

Для фіксації рухомих частин розробки та забезпечення обертів конструкції використовуються з'єднувальні вали 5 мм довжиною 20 мм, рис. 3.4.



Рисунок 3.4 – Вал 5 мм на 20 мм

В табл. 3.4, наведені параметри валів.

Таблиця 3.4 – Сталевий вал

Параметр	Значення	Примітка
Матеріал	Сталь 45 (аналог AISI 1045)	Конструкційна легована сталь
Діаметр, мм	5 (h6)	Допуск h6 забезпечує щільну посадку в підшипник 625 ZZ та шків D5
Довжина, мм	20	

Продовження таблиці 3.4

Параметр	Значення	Примітка
Твердість (без термообробки), HRC	~15–25	Достатня для опору зношуванню
Межа міцності на розтяг, МПа	≥ 500	Забезпечує міцність на кручення при динамічних навантаженнях
Межа текучості, МПа	≥ 355	
Кількість, шт.	2	Для з'єднання шківа з підшипниковою опорою

В якості крокові двигуни для макету буде використовуватися два крокових двигуна Nema17 моделі 17hs4023, рис. 3.5.



Рисунок 3.5 – Крокoвий двигун Nema17, модель 17hs4023

В табл. 3.5, наведені характеристики крокових двигунів Nema17 моделі 17hs4023.

Таблиця 3.5 – Крокoвий двигун Nema17, модель 17hs4023

Характеристики	
Модель:	17HS4023
Крок	1,8° ±5% (200 на оберт)
Номінальний струм	0,7 А
Напруга	12 В
Опір фази	4,0 ±10% Ом
Індуктивність фази	3,2 мГн ±20%
Обертовий момент (момент утримання)	14 Н·см
Виводи мотору	4 дроти
Діаметр вала	5 мм

Продовження таблиці 3.5

Характеристики	
Довжинана вала	22 мм
Макс. підвищення температур	80 °C
Температура експлуатації	-20~+50 °C
Розмір корпусу	42 мм ×42 мм×23 мм
Вага мотору	135 г
Кількість	2 шт

3.2 Матеріал та технологія виготовлення несучого каркасу

Всі елементи базової конструкції – опори сервоприводів, кронштейни кріплення шківів, плита для підшипникових вузлів, стійки та сам столик – виготовлені з алюмінієвого листа товщиною 6 мм методом фрезерування на верстаті з ЧПК. Нижче наведено порівняльний аналіз альтернативного варіанту – виготовлення цих же деталей методом 3D-друку з пластику (ABS або PETG), який був відхилений на користь алюмінію.

Недостатня жорсткість та модуль пружності. Алюміній має модуль пружності ≈ 70 ГПа, тоді як ABS/PETG – лише ≈ 1,5–2,5 ГПа (у 30–40 разів нижче). При навантаженнях від натягу ременів (типове зусилля 20–50 Н) пластикові деталі будуть помітно деформуватися, що призведе до розсинхронізації руху порталу та столика. Навіть при товщині 10–12 мм пластик не забезпечить необхідної жорсткості, тоді як алюміній 6 мм залишається практично недеформованим.

Повзучість під постійним навантаженням. ABS та PETG з часом пластично деформуються під статичними навантаженнями (наприклад, від натягу ременів або ваги сервопривода). Через кілька тижнів/місяців експлуатації кріплення можуть «попливти», з’являться люфти, які неможливо усунути без заміни деталей. Алюміній працює в пружній області необмежено довго.

Температурна стабільність. Пластик має значно вищий коефіцієнт теплового розширення (≈ 70–80·10⁻⁶ К⁻¹ для ABS проти ≈ 23·10⁻⁶ К⁻¹ для алюмінію). При нагріванні від сервоприводів або сонячного світла пластикові деталі змінюють геометрію, що порушує співвісність шківів та натяг ременів. Алюміній набагато стабільніший.

Точність посадкових місць під підшипники. Для встановлення підшипників 625 ZZ (Ø16 мм) потрібна посадка з допуском H7 (≈ +0,018/0 мм). 3D-друк навіть на каліброваному принтері дає точність не краще ±0,2–0,3 мм через усадку та вібрації. Це призводить або до неможливості запресувати підшипник, або до люфту. Фрезерування на ЧПК забезпечує допуски ±0,05 мм, що цілком достатньо для надійної фіксації підшипника з легким натягом.

Міцність кріплень (різьбових з'єднань). У пластику різьбу нарізають безпосередньо або використовують теплові вставки. При динамічних навантаженнях (особливо під час стартів/стопів сервоприводів) пластикова різьба швидко зношується або зривається. В алюмінії можна нарізати сталеву різьбу М3/М4, яка витримує багаторазове затягування.

Вібропоглинання та резонанси. Пластикові деталі мають нижчу власну частоту та вище внутрішнє тертя, що здавалося б корисним, але на практиці призводить до неконтрольованих вібрацій на робочих швидкостях (ерезонанс), що погіршує якість роботи платформи. Алюміній завдяки жорсткості зміщує резонансні частоти в безпечну зону.

Довговічність в умовах експлуатації. ABS та PETG чутливі до ультрафіолету (ABS особливо) та вбирають вологу, що з часом знижує механічні властивості. Алюміній не старіє і не деградує в виробничих умовах, табл. 3.6.

Таблиця 3.6 – Матеріали для розробки модуля

Характеристика	Алюміній 6 мм (ЧПК-фрезер)	ABS/PETG (3D-друк)
Жорсткість на згин	Висока (E=70 ГПа)	Низька (E≈2 ГПа)
Повзучість під навантаженням	Відсутня	Присутня, критична
Точність посадкових отворів	±0,05 мм	±0,2–0,3 мм

Продовження таблиці 3.6

Характеристика	Алюміній 6 мм (ЧПК-фрезер)	ABS/PETG (3D-друк)
Довговічність різьбових з'єднань	Висока	Низька (потребує вставок)
Температурна стабільність	Висока	Низька
Стійкість до УФ та вологи	Висока	Середня/низька
Термін служби (при щоденній роботі)	>10 років	0,5–2 роки

Таким чином, хоча 3D-друк з ABS або PETG є доступним та швидким методом для прототипування, для серійної або тривалої експлуатації 5D-платформи він непридатний через недостатню жорсткість, низьку точність, схильність до повзучості та температурних деформацій. Тільки алюмінієва конструкція, виготовлена фрезеруванням, забезпечує необхідну точність позиціювання, вібраційну стійкість та довговічність. Тому **обрано** алюміній 6 мм, фрезерування на ЧПК.

3.3 Розроблення моделі

Виходячи з прозробленої консепції та елементої бази, була розроблена наступна конструкція макету 5 осі 3D принтера, рис. 3.6.

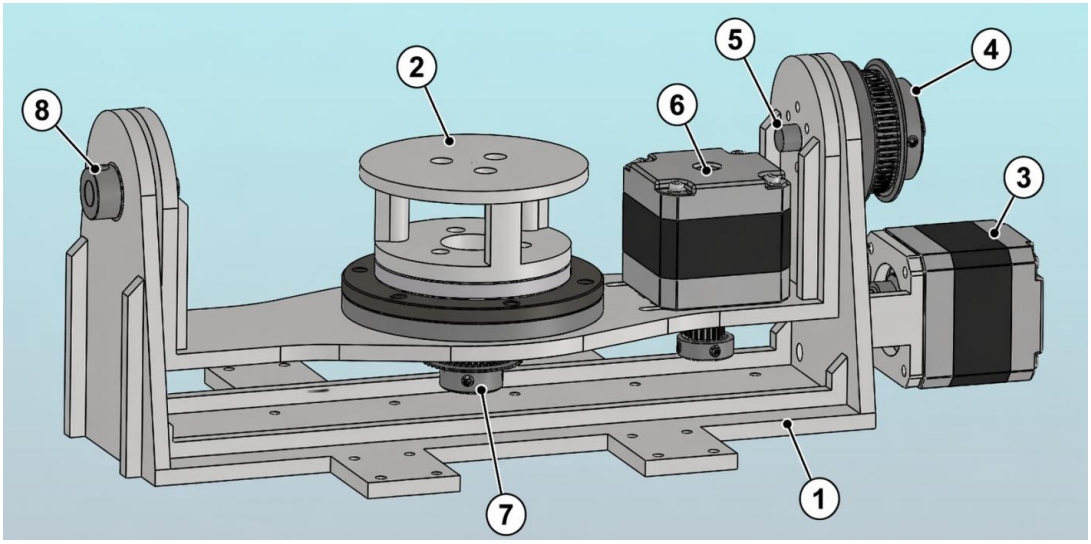


Рисунок 3.5 – Механізм обертального столу в зборі

Всю конструкцію 5 осі 3D принтера, можна поділити на вісім частин, а саме:

1 – основа (рама). Несуча конструкція 5D-столу, на якій закріплюються всі вузли механізму. Забезпечує жорсткість конструкції, точність позиціонування та зменшення вібрацій під час роботи;

2 – платформа (робочий стіл) Елемент для встановлення та фіксації деталі або виробу. Забезпечує можливість обертання та позиціонування об’єкта під час друку або обробки;

3 – кроковий двигун. Привід системи, що забезпечує точне дискретне переміщення або обертання механізму. Використовується для керування положенням осі;

4 – шків. Елемент пасової передачі, який передає обертальний рух від крокового двигуна до механізму столу через ремінь;

5 – опорна стійка. Вертикальний елемент конструкції, призначений для кріплення валів, шківів та підтримки рухомих вузлів механізму;

6 – кроковий двигун. Додатковий привід для керування другою віссю обертання або нахилу платформи;

7 – шків нижній. Ведений шків механізму обертання платформи. Забезпечує передачу крутного моменту та плавність руху;

8 – вал 5×20 мм. Металевий вал діаметром 5 мм та довжиною 20 мм, який використовується для кріплення та передачі обертального руху між елементами конструкції.

Загальний вигляд поворотної осі наведено на рис. 3.6.

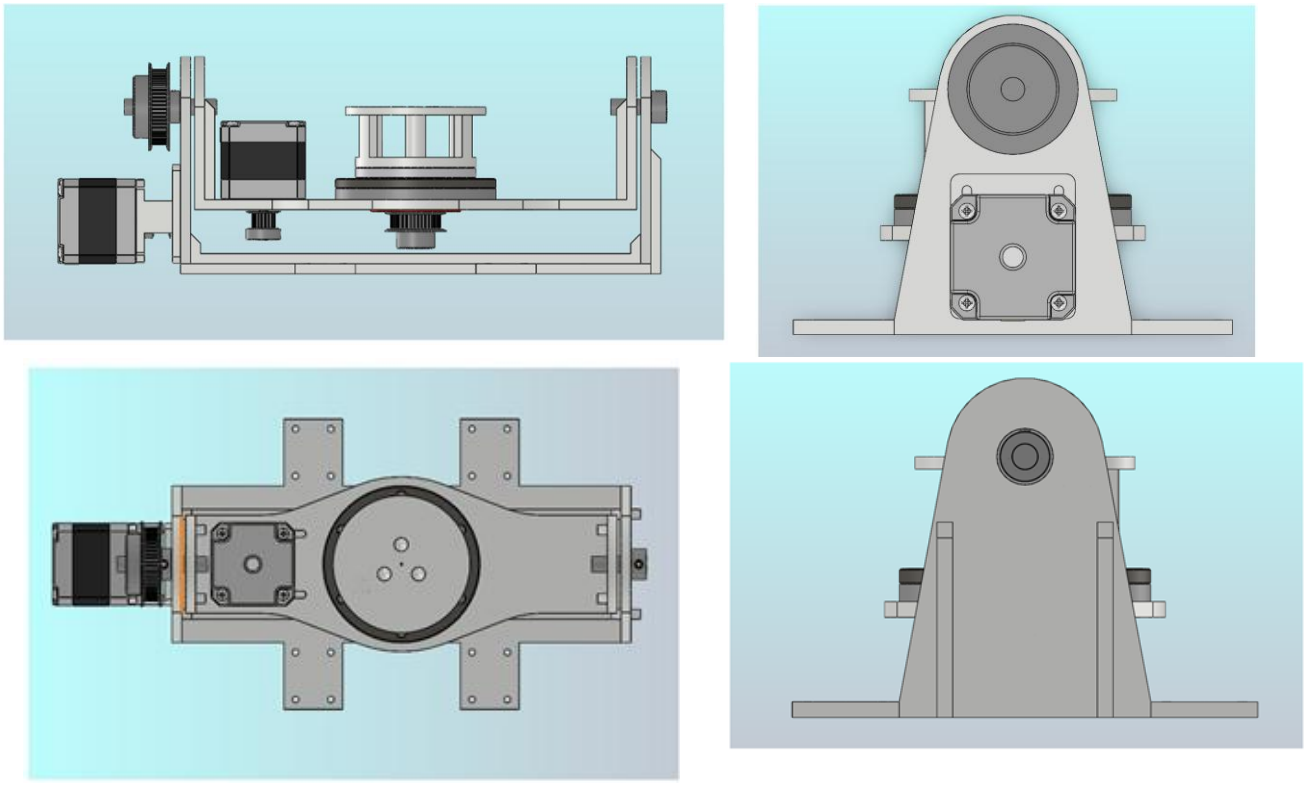


Рисунок 3.6 – Загальний вигляд макету

Вигляд основи макету для кріплення осі до робочої зони 3D принтера наведено на рис. 3.7.

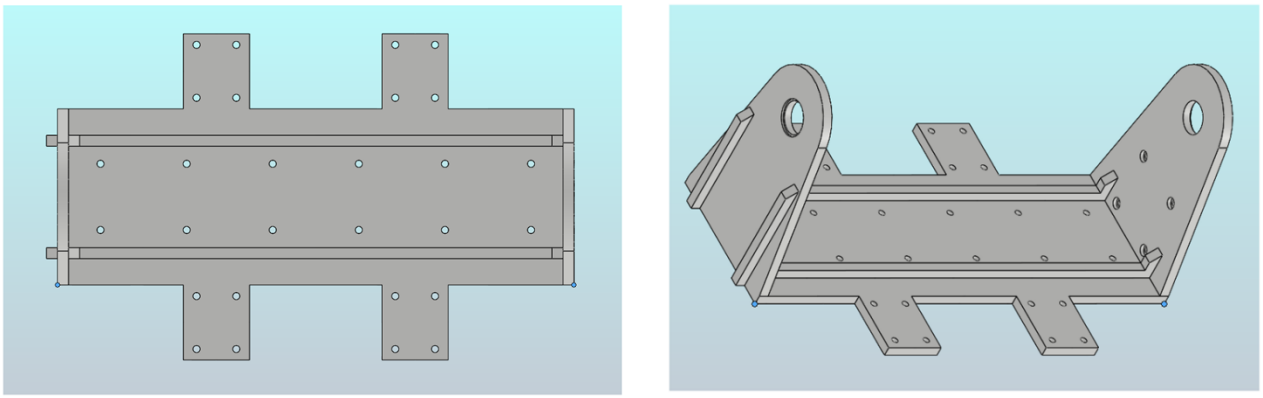


Рисунок 3.7 – Основа макету

На рис. 3.8 наведено рухомий портал макету.

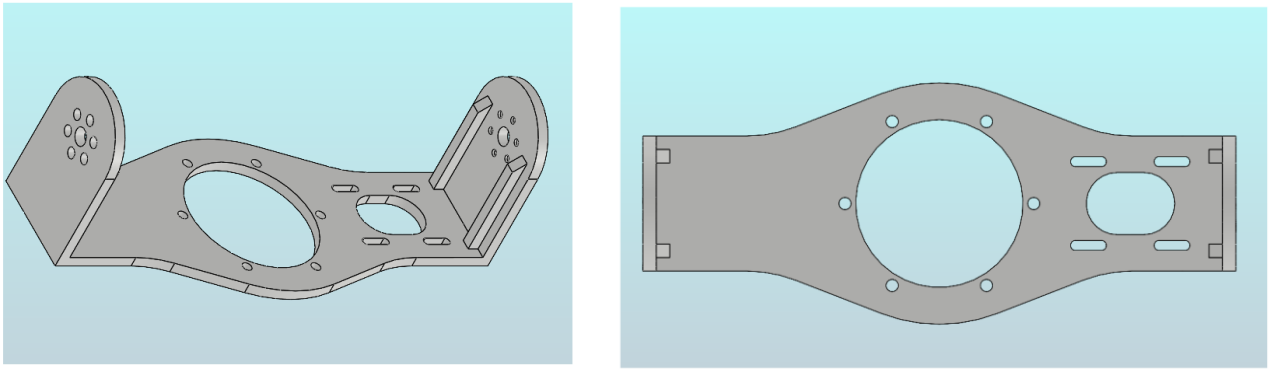


Рисунок 3.8 – Вигляд рухомого порталу макету 5 осі 3D принтера

На рис. 3.9 наведені елементи обертальної платформи для моделі.

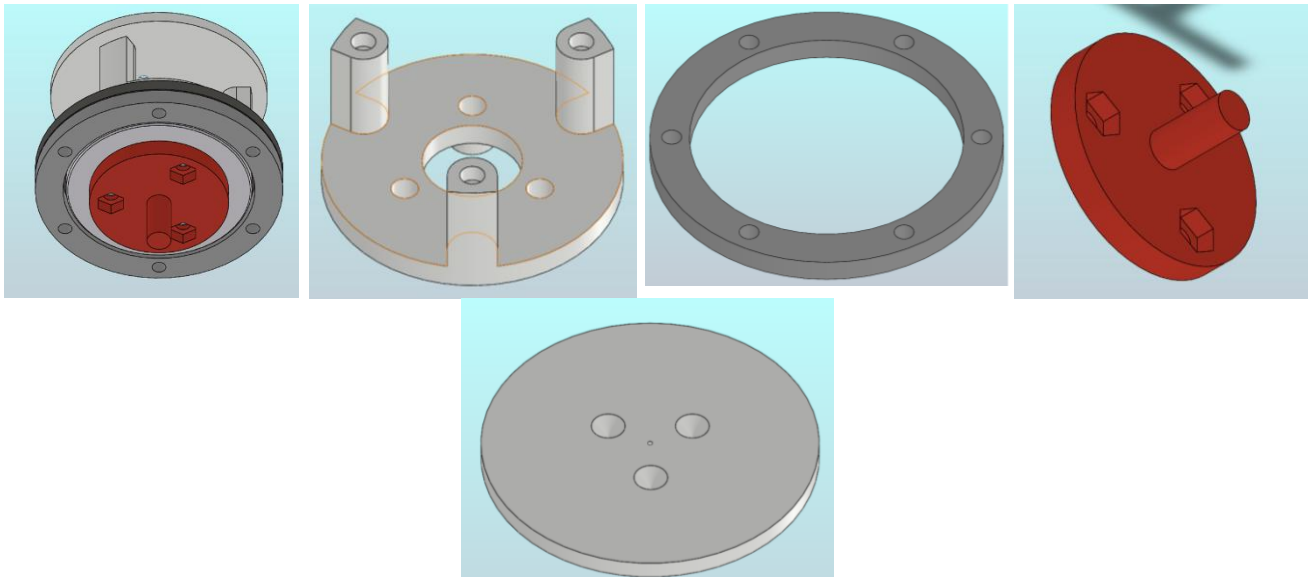


Рисунок 3.9 – Елементи обертальної платформи

3.4 Збірка макету 5-осьового 3D принтера

На даному етапі роботи було виконано чорнову збірку макету 5-осьового 3D-принтера (рис. 3.10). Метою цього етапу була попередня перевірка геометричних співвідношень основних вузлів, а також коректності кріплень перед остаточним монтажем. Насамперед було змонтовано базову платформу (робочий стіл) принтера, яка є основою для позиціонування заготовок у процесі друку.



Рисунок 3.10 – Почергова збірка макету

Для забезпечення руху виконавчих механізмів та передачі крутного моменту від двигунів до ходових елементів було обрано два крокові двигуни серії Nema 17, на вали яких встановлено відповідні шківи. Всі використані шківи належать до стандарту GT2 (зубчасті пасові шківи з профілем для синхронних пасів) і мають посадковий отвір D = 5 мм, що забезпечує їхню повну сумісність із валами вибраних двигунів.

На рисунку 3.11 представлено зовнішній вигляд та типи шківів, що використовувалися у збірці. Вони відрізняються шириною робочої поверхні та кількістю зубців, що дозволяє гнучко налаштовувати передавальні відношення для різних осей принтера. Перелік і характеристики застосованих шківів наведено нижче.

Шків №1 (у кількості 1 шт.) – ширина 10 мм**,** кількість зубців Z = 40, внутрішній діаметр D = 5 мм**.** Шків

№2 (у кількості 2 шт.) – ширина 10 мм, кількість зубців Z = 20, внутрішній діаметр D = 5 мм**.**

Шків №3 (у кількості 1 шт.) – ширина 6 мм, кількість зубців Z = 60, внутрішній діаметр D = 5 мм.

Таким чином, у процесі чорнової збірки було перевірено сумісність компонентів приводу, виконано монтаж столу та попереднє встановлення двигунів зі шківами, що у подальшому дозволить перейти до чистового складання, натягу пасів та калібрування кінематичної схеми.

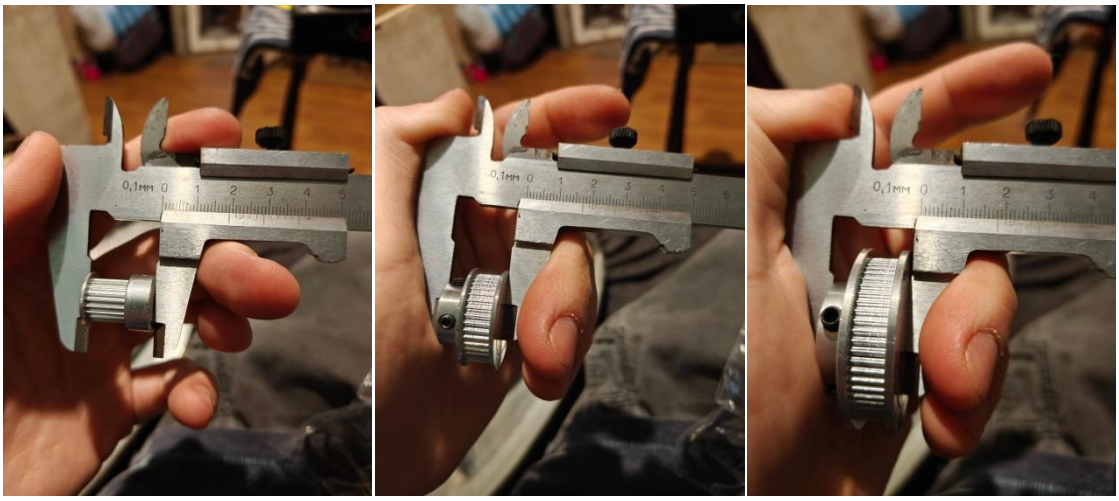


Рисунок 3.11 – Шківи що використовувалися

3.5 Висновки до третього розділу

У третьому розділі виконано розробку тривимірної моделі модуля п'ятої осі для FFF/FDM 3D-принтера та здійснено вибір основних конструктивних компонентів.

На основі проведеного аналізу обрано елементи механічної передачі, зокрема зубчасті шківи, ремені GT2, підшипники, напрямні та інші стандартні комплектуючі, які забезпечують необхідні характеристики точності, жорсткості та надійності конструкції. Виконано обґрунтування вибору ширини зубчастого ременя та типорозмірів підшипників відповідно до умов експлуатації розроблюваного модуля.

Створено тривимірну модель конструкції, яка дозволяє оцінити взаємне розташування вузлів, перевірити можливість монтажу елементів, відсутність взаємних перешкод та відповідність конструкції вимогам технічного завдання. Розроблена модель забезпечує можливість подальшого виготовлення деталей, складання макета та внесення конструктивних змін на етапі проєктування без додаткових матеріальних витрат.

Отримані результати підтверджують працездатність запропонованої конструкції та доцільність використання сучасних CAD-засобів під час проєктування багатовісних систем адитивного виробництва. Розроблена тривимірна модель може бути використана як основа для виготовлення експериментального зразка, проведення подальших досліджень і вдосконалення конструкції модуля п'ятої осі.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Опис лабораторного переміщення

Лабораторний простір оснащений вхідними дверима, вікнами та штучним освітленням, яке забезпечує комфортні умови для роботи. У приміщенні розташовано 9 розеток із напругою 220 В та 2 розетки із напругою 380 В. Дотримані вимоги пожежної безпеки – в приміщенні встановлені вогнегасник, пісок та пожежна ковдра [19].

Схема лабораторного приміщення 3D прототипування зображена на рис. 4.1.

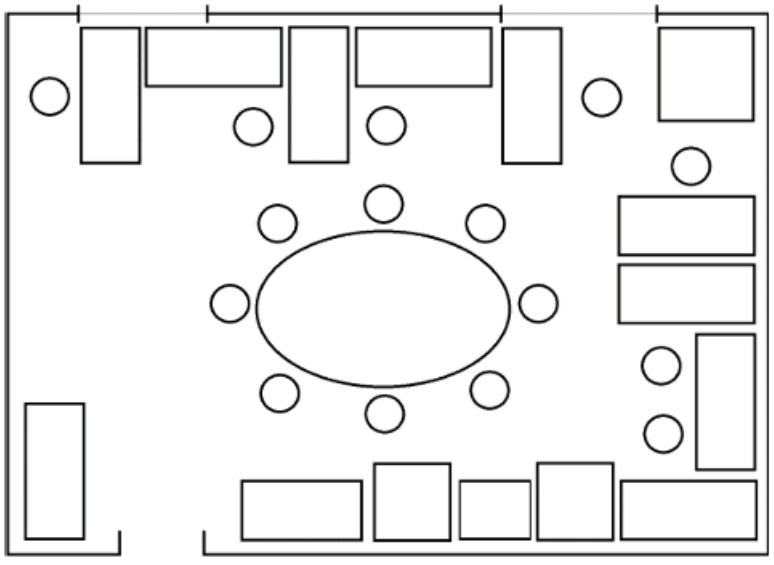


Рисунок 4.1 – Схема лабораторного приміщення 3D прототипування

Виконаємо розрахунок параметрів вентиляції, які є обов'язковими для вказаного приміщення. У механічній майстерні, де проводиться опалення, вентиляція та кондиціонування, необхідна швидкість повітрообміну становить 3-5 $м^3$/ч. Скористаємося формулою для визначення мінімально необхідного повітрообміну для механічної майстерні, враховуючи коефіцієнт – 3, об’єм приміщення 130 $м^3$.

$$L = n \cdot V, \tag{4.1}$$

де L – необхідний обіг повітря у приміщенні;

V – об’єм приміщення;

n – кратність обігу повітря у приміщенні.

У результаті отримуємо розрахунок:

$$L = 130 \cdot 3 = 390 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Для людини, яка постійно перебуває у приміщенні достатній норматив – 60 м^3/ч. За отриманими результатами розрахунків можна зробити висновок, що у лабораторії на постійній основі можуть перебувати до 6 осіб.

4.2 Небезпечні та шкідливі фактори FFF/FDM-технології

Під час роботи з принтерами оператор може зіткнутися з різними небезпечними та шкідливими факторами, пов'язаними з нагрівальними елементами, рухомими частинами та випарами філаменту. Найбільший шкідливий фактор полягає у високій температурі нагрівального блоку, яка під час експлуатації може досягати від 200 °C до 300 °C. Якщо доторкнутися до сопла або нагрівача, це може призвести до миттєвих опіків другого ступеня. Також існує ризик загоряння філаменту або проводки, якщо система теплового захисту вийде з ладу.

Також небезпекою під час роботи з полімерами, є викид летких органічних сполук і ультрадрібних частинок, які виникають під час плавлення полімерів. Найвищі рівні викидів спостерігаються у ABS, Nylon та PC. Ці речовини можуть викликати подразнення дихальних шляхів, головний біль та алергічні реакції, особливо в умовах поганої вентиляції приміщення.

Рухомі елементи принтера, такі як каретки осей X та Y, екструдер, ремені й вали, можуть бути також факторами небезпеки. Вони здатні спричинити

затягування або механічні травми під час роботи чи обслуговування верстата, оскільки більшість приводів є відкритого типу. Щодо електричних ризиків, то до них відносяться блок живлення, нагрівачі та термістори, які підключені до мережі 220 В.

Зважаючи на всі ці фактори, робота з 3D-принтером вимагає дотримання електробезпеки, забезпечення належної вентиляції та суворого виконання інструкцій щодо обслуговування нагрівальних і механічних компонентів.

4.3 Вентиляція та контроль повітряного середовища

У процесі екструзії термопластів виділяються леткі сполуки, мікрочастинки та продукти термічного розкладання полімерів. Інтенсивність цього процесу залежить від типу матеріалу та температури друку. Найбільше потенційно шкідливих речовин виділяють ABS, Nylon і PC, оскільки вони можуть частково розкладатися при високих температурах. Навіть PLA, який вважається екологічно безпечним, під час екструзії утворює дрібнодисперсний аерозоль.

Щоб забезпечити безпечний рівень вмісту шкідливих речовин у повітрі, важливо використовувати системи примусової вентиляції, витяжні шафи або локальні фільтрувальні модулі, які фільтрами активованого вугілля. Робоче місце слід облаштовувати в приміщенні з кратністю повітрообміну не менше двох, трьох циклів на годину. Тривала експлуатація принтера в приміщеннях без вентиляції або поруч з людьми, які довго перебувають у кімнаті, зокрема в освітніх закладах, заборонена.

4.4 Висновки до четвертого розділу

Роботи за FFF/FDM 3D-принтерами пов'язана з рядом небезпечних та шкідливих факторів. Серед них особливої уваги заслуговують високі температури нагрівальних елементів, виділення летких органічних сполук і функціонування електромеханічних вузлів. Для забезпечення безпечних умов експлуатації необхідний комплексний підхід, що включає технічні, організаційні та санітарно-гігієнічні заходи.

Дотримання вимог електробезпеки, регулярний технічний огляд обладнання, використання систем вентиляції та фільтрації повітря, а також правильне облаштування робочого місця значно знижують ризики виникнення аварійних ситуацій і негативного впливу на здоров’я. Впровадження заходів охорони праці гарантує безпечне проведення експериментальних досліджень і сприяє підвищенню надійності обладнання, а також стабільності технологічного процесу FFF/FDM-друку.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі вирішено актуальне інженерне завдання, що полягає у розробленні модуля п'ятої осі для FFF/FDM 3D-принтера з метою розширення технологічних можливостей адитивного виробництва та підвищення якості виготовлення виробів складної геометричної форми.

У процесі виконання роботи проведено аналіз сучасних технологій адитивного виробництва, особливостей технології FFF/FDM, а також існуючих кінематичних схем 3D-принтерів. За результатами аналізу встановлено, що найбільш доцільною базою для реалізації багатоосьового друку є кінематика CoreXY, яка забезпечує високу швидкодію, достатню точність позиціювання та зручність інтеграції додаткових обертальних координат.

Виконано аналіз існуючих аналогів багатоосьових систем друку та сформовано технічні вимоги до розроблюваного модуля. Встановлено, що доступні промислові рішення мають високу вартість, а відкриті проєкти потребують суттєвого доопрацювання, що підтверджує доцільність створення власної конструкції.

Розроблено кінематичну схему модуля п'ятої осі, що поєднує тривісну систему CoreXY з поворотно-нахильним робочим столом, який реалізує дві додаткові координати. Обґрунтовано вибір елементної бази, виконано підбір механічних компонентів, приводів та елементів системи керування, що забезпечують необхідні характеристики точності, жорсткості та надійності.

Розроблено тривимірну модель конструкції модуля із застосуванням сучасних засобів автоматизованого проєктування. Проведене моделювання підтвердило можливість складання конструкції, правильність взаємного розташування вузлів та відповідність прийнятих конструктивних рішень вимогам технічного завдання.

Практичне значення роботи полягає у створенні конструкції модуля п'ятої осі, який може бути використаний для модернізації існуючих FFF/FDM

3D-принтерів, проведення наукових досліджень у галузі багатоосьового адитивного виробництва, а також у навчальному процесі під час підготовки фахівців зі спеціальностей, пов'язаних із мехатронікою, автоматизацією та адитивними технологіями.

Отримані результати можуть бути використані як основа для подальшого виготовлення дослідного зразка, проведення експериментальних досліджень, інтеграції системи керування та вдосконалення програмного забезпечення для підтримки багатоосьового друку.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ 3008:2015. Документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлення. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2017. 31 с.

2. Невлюдов І. Ш. та ін. Методичні вказівки з підготовки та захисту кваліфікаційної роботи. Харків : ХНУРЕ, 2024. 57 с.

3. Положення про організацію проведення практики здобувачів вищої освіти Харківського національного університету радіоелектроніки : наказ ХНУРЕ від 03.05.2019 № 222. URL: https://nure.ua/wp-content/uploads/222-vid-03.05.2019-pro-vvedennja-v-diju-rishennja-vchenoi-radi-universitetu.pdf (дата звернення: 14.07.2026).

4. Положення про академічну доброчесність : наказ ХНУРЕ від 02.02.2021 № 50. URL: https://nure.ua/wp-content/uploads/Main_Docs_NURE/polozhennja-pro-akademichnu-dobrochesnist.pdf (дата звернення: 14.07.2026).

5. Виробництво & мехатронні системи – 2025 : матеріали IX Міжнар. наук.-техн. конф. Харків, 2025. 115 с.

6. Sysyuk V. G., Granchak V. M. Optical and polymerization characteristics of the materials for 3D printing depending on the nature of their composite component // Publishing House "Akademperiodyka" NAS of Ukraine. 2017. P. 226–237.

DOI: 10.15407/akademperiodyka.444.226.

7. Jacobsen A., Jorgensen T., Tafjord Ø., Kirkhorn E. Concepts for 3D print productivity systems with advanced DLP photoheads // Proceedings of SPIE. 2015. Vol. 9376. Art. 937605.

DOI: 10.1117/12.2084962

8. Redwood B., Garratt B., Fonder P. 3D Printing: A Practical Guide. Moscow : DMK Press, 2020. 220 p.

DOI: 0.1002/cctc.201701619

9. Rossi S., Puglisi A., Benaglia M. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing in Organic Synthesis // ChemCatChem. 2018. Vol. 10. P. 1512–1525.

DOI: 10.1002/cctc.201701619.

10. Manapat J., Chen Q., Ye P., Advincula R. 3D Printing of Polymer Nanocomposites via Stereolithography // Macromolecular Materials and Engineering. 2017. Vol. 302. Article 1600553.

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.335706

11. Kuznietsov Y., Solntsev O. Structural Morphological Synthesis of Parallel Kinematics Based Hybrid 3D-Printer and Connection with the Challenges of Industry 4.0 // Journal of the Technical University of Gabrovo. 2022. Vol. 65. P. 1–6.

DOI: 10.30857/2786-5371.2023.5.3

12. Johnson G. A., French J. J. Evaluation of Infill Effect on Mechanical Properties of Consumer 3D Printing Materials // Advances in Technology Innovation. 2018. Vol. 3, No. 4. P. 179–184. DOI: 10.1007/978-981-10-5696-3

13. Нікітін Д. О., Невлюдов І. Ш., Жарікова І. В., Бронніков А. І., Стрілець Р. Є. Розробка методу контролю виробів під час фотополімерного 3D-друку // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2025. Т. 4, № 1 (136). С. 42–54. DOI: 10.15587/1729-4061.2025.335706.

14. Поліщук А. О. Development of a 3D Printer Screw Extruder That Uses Granules or Crushed Polymer Particles as Raw Materials // Technologies and Engineering. 2024. № 5. С. 33–49. DOI: 10.30857/2786-5371.2023.5.3.

15. Yi X.-S., Du S., Zhang L. Composite Materials Engineering. Fundamentals of Composite Materials. Singapore : Springer, 2018. Vol. 1.

DOI: 10.1007/978-981-10-5696-3

16. Комплекс навчально-методичного забезпечення навчальної дисципліни "Безпека праці в індустрії ІТ- технологій" підготовки освітнього рівня бакалавр усіх спеціальностей та усіх напрямів університету [Електронний ресурс] / ХНУРЕ; розроб.: Т. Є. Стиценко, Г. В. Пронюк, І. І. Хондак. – Харків, 2024. – 171 с.