конструктивно-технологічна система 3D-принтера типу PolyJet та матеріаломісткість його основних вузлів.

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)

Розроблення механічної частини 3D- принтера за технологією PolyJet.

Механічна частина
(тема)

Виконав:
здобувач 4 року навчання,
групи АКТАКІТ-22-2
Станіслав МЕЛЬНІКОВ
(власне ім'я, прізвище)

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

Тип програми освітньо-професійна

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

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

Допускається до захисту
Зав. кафедри _____ Ігор НЕВЛЮДОВ
(підпис) (власне ім'я, прізвище)

Харків 2026

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

13 липня 2026 р.  Станіслав МЕЛЬНІКОВ

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 Мельнікову Станіславу Віталійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення механічної частини 3D-принтера за технологією PolyJet. Механічна частина
Затверджена наказом університету від 04.06.2026 р. №472 Ст
2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 17.07.2026 р.
3. Вихідні дані до роботи
3.1 Тип адитивної технології – струменевий друк фотополімерними матеріалам PolyJet;
3.2 Робоча область друку – 250 × 250 × 200 мм;
3.3 Максимальна швидкість переміщення друкувальної головки – 400 мм/с;
3.4 Тип кінематичної схеми – картезіанська портальна система (XY Gantry);
3.5 Товщина шару друку – 16–30 мкм;
3.6 Розрахункова точність позиціонування – ±0,01 мм.
4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі:
4.1 Вступ;
4.2 Аналіз конструктивних рішень та кінематичних схем 3D-принтерів технології PolyJet;
4.3 Проєктування конструкції та вибір апаратного забезпечення 3D-принтера за технологією PolyJet;
4.4 Проєктування механічної частини та CAD-моделювання;
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	Аналіз предметної області	27.04.2026 – 16.05.2026	виконано
3	Апаратна частина екструзійного вузла	19.05.2026 – 30.05.2026	виконано
4	Програмна реалізація та алгоритмічне керування системою	03.06.2026 – 28.06.2026	виконано
5	Оформлення кваліфікаційної роботи	29.06.2026 – 06.07.2026	виконано
6	Подання роботи на перевірку нормоконтролю	06.07.2026 – 08.07.2026	
6	Подання роботи на перевірку Інтернетсервісом StrikePlagiarism	09.07.2026 – 10.07.2026	
7	Подання роботи на рецензію	11.07.2026 – 12.07.2026	
8	Подання роботи на підпис зав. кафедри	13.07.2026 – 14.07.2026	
9	Подання кваліфікаційної роботи в ЕК		

Дата видачі завдання 06 квітня 2026 р.

Здобувач _____ Станіслав МЕЛЬНІКОВ
(підпис) (прізвище, ініціали)

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

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 56 с., 5 табл., 22 рис., 2 дод., 20 джерел.

АДИТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ, 3D-ПРИНТЕР, POLYJET, КІНЕМАТИЧНА СХЕМА, XY-ПОРТАЛ, КУЛЬКО-ГВИНТОВА ПЕРЕДАЧА, ЛІНІЙНІ НАПРЯМНІ, AUTODESK FUSION 360, CAD/CAE-МОДЕЛЮВАННЯ, СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ.

Об’єкт дослідження – конструктивно-технологічна система 3D-принтера типу PolyJet та матеріаломісткість його основних вузлів.

Предмет дослідження – механічна конструкція 3D-принтера PolyJet, кінематична схема, приводи переміщення, лінійні напрямні та система автоматичного керування.

Мета роботи – Зниження собівартості виготовлення виробів на 3D-принтерах типу PolyJet на основі оптимізації технологічних параметрів друку та обґрунтування використання економічно вигідних витратних матеріалів.

У результаті роботи розроблено конструкцію механічної системи 3D-принтера PolyJet, обґрунтовано вибір картезіанської кінематичної схеми, виконано розрахунки та моделювання основних вузлів, підібрано оптимальні компоненти системи переміщення та автоматичного керування. Запропоновані технічні рішення дозволяють підвищити жорсткість конструкції, зменшити собівартість обладнання та забезпечити високу точність друку. Результати роботи можуть бути використані під час проєктування й виготовлення високоточних 3D-принтерів на базі технології PolyJet.

Отриманий результат кваліфікаційної роботи відноситься до цілей сталого розвитку № 9, а саме 9.4 «Підтримка досліджень: Інвестиції у науку та створення нових технологій».

ABSTRACT

The explanatory note contains: 56 p., 5 tabl., 20 fig., 2 app., 20 sources.

ADDITIVE MANUFACTURING, 3D PRINTER, POLYJET, KINEMATIC SCHEME, XY-GANTRY, BALL SCREW, LINEAR GUIDEWAYS, AUTODESK FUSION 360, CAD/CAE MODELING, AUTOMATIC CONTROL SYSTEM.

Object of study: the structural-technological system of a PolyJet-type 3D printer and the material intensity of its main components.

Subject of study: Improving the cost-efficiency of PolyJet 3D printing fabrication by optimizing process parameters and substantiating the use of affordable consumable materials.

Research methods: technical literature review, theoretical mechanics and strength of materials calculations, automatic control theory, as well as 3D computer modeling, stress simulation, and engineering analysis using CAD/CAE tools.

As a result of the study, the mechanical structure of a PolyJet 3D printer was developed, the selection of a Cartesian kinematic architecture was substantiated, the main structural components were analyzed and modeled, and the optimal motion system components and automatic control system were selected. The proposed engineering solutions improve the structural rigidity, reduce the overall manufacturing cost, and ensure high printing accuracy. The results of this work can be applied to the design and development of high-precision PolyJet-based 3D printers.

The obtained results of the qualification work relate to Sustainable Development Goal No. 9, namely 9.4 "Support for research: Investment in science and creation of new technologies".

ЗМІСТ

Перелік скорочень.....9

Вступ.....10

1 Аналіз конструктивних рішень та кінематичних схем 3D-принтерів технології PolyJet……...12

1.1 Фізико-технічні основи технології PolyJet……..12

1.2 Порівняльний аналіз PolyJet з основними технологіями 3D-друку..13

1.3 Аналіз та вибір кінематичної схеми позиціонування…….……14

1.4 Дослідження систем лінійного переміщення…….…….16

1.5 Обґрунтування вибору приводів та передач…….……..16

1.6 Аналіз матеріалів для несної конструкції (рами)…….…….…17

1.7 Вимоги до системи вирівнювання шару (Wiper unit)……18

1.8 Висновки до першого розділу…….…..…19

2 Проєктування конструкції та вибір апаратного забезпечення 3D-принтера за технологією PolyJet…….…..21

2.1 Кінематична схема та принципи руху 3D-принтера…….…....21

2.2 Вибір елементної бази……...……22

2.3 Теорія автоматичного управління приводу осі…….…..27

2.4 Висновки до другого розділу……...…31

3 Проєктування механічної частини та CAD-моделювання……32

3.1 Розробка конструкції механічної частини……...…32

3.2 Тривимірне моделювання механічної частини 3D-принтера…...….35

3.2.1 Розробка спеціалізованого кронштейна-перехідника друкувальної головки……...……...…..…36

3.2.2 Аналіз компонування моделі за основними проєкціями…….....39

3.3 Дослідження напружено-деформованого стану та жорсткості несної системи осі X……...…….…...…40

3.4 Висновки до третього розділу……...45

4 Охорона праці…….....…….……46

4.1 Опис лабораторного переміщення……...…….…....46

4.2 Небезпечні та шкідливі фактори FFF/FDM-технології……..…47
4.3 Вентиляція та контроль повітряного середовища……..48
4.4 Висновки до четвертого розділу…….……..48
Висновки…….……...…..…..……...…49
Перелік джерел посилання.....51
Додаток А Характеристики матеріалів використаних для 3D принтеру …...……54
Додаток Б Демонстраційний матеріал.…….....…...…….56

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ЕОМ – електронно-обчислювальна машина;

КГП – кулько-гвинтова передача;

САПР – системи автоматизованого проєктування;

ЧПК – числове програмне керування;

ШІМ – широтно-імпульсна модуляція;

CAD (Computer-Aided Design) – система автоматизованого проєктування;

CAE (Computer-Aided Engineering) – система автоматизованого інженерного аналізу;

CAM (Computer-Aided Manufacturing) – система автоматизованої розробки програм для верстатів;

FDM (Fused Deposition Modeling) – моделювання методом пошарового наплавлення пластику;

PolyJet (Photopolymer Jetting) – технологія струменевого друку фотополімерними смолами;

SLA (Stereolithography) – стереолітографія;

SLS (Selective Laser Sintering) – селективне лазерне спікання;

UV (Ultraviolet) – ультрафіолетове випромінювання.

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний розвиток адитивних технологій сприяє їх широкому застосуванню у машинобудуванні, медицині, авіаційній та автомобільній промисловості, а також у науково-дослідній діяльності. Серед існуючих технологій тривимірного друку особливе місце займає технологія PolyJet, яка забезпечує виготовлення виробів із надзвичайно високою точністю, малою товщиною шару та високою якістю поверхні. Завдяки можливості одночасного використання декількох фотополімерних матеріалів технологія PolyJet широко застосовується для створення функціональних прототипів, медичних моделей, стоматологічних виробів та деталей складної геометрії.

Досягнення високої точності друку за технологією PolyJet значною мірою залежить від конструкції механічної частини принтера. Несна система, кінематична схема, приводи переміщення, лінійні напрямні та елементи передачі руху повинні забезпечувати високу жорсткість конструкції, мінімальний рівень вібрацій, точне позиціонування друкувальної головки та стабільність роботи під час друку. Недостатня жорсткість або наявність люфтів призводять до погіршення точності нанесення фотополімеру, появи дефектів поверхні та зниження якості готових виробів.

Незважаючи на широке поширення промислових PolyJet-принтерів, їх висока вартість значно обмежує використання цієї технології у навчальних закладах, невеликих підприємствах та наукових лабораторіях. Тому розроблення механічної частини високоточного 3D-принтера за технологією PolyJet із використанням сучасних конструктивних рішень, доступної елементної бази та CAD/CAE-моделювання є актуальним науково-практичним завданням.

Об'єкт дослідження – конструктивно-технологічна система 3D-принтера типу PolyJet та матеріаломісткість його основних вузлів.

Предмет дослідження – механічна конструкція 3D-принтера PolyJet, кінематична схема, приводи переміщення, лінійні напрямні, передавальні механізми та система автоматичного керування.

Мета роботи – Зниження собівартості виготовлення виробів на 3D-принтерах типу PolyJet на основі оптимізації технологічних параметрів друку та обґрунтування використання економічно вигідних витратних матеріалів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

– провести аналіз сучасних технологій адитивного виробництва та визначити особливості технології PolyJet;

– виконати порівняльний аналіз існуючих кінематичних схем 3D-принтерів та обґрунтувати вибір оптимальної конструкції;

– дослідити системи лінійного переміщення, приводи та механічні передачі;

– виконати вибір елементної бази механічної частини принтера;

– розробити конструкцію механічної системи 3D-принтера засобами CAD-моделювання;

– провести аналіз жорсткості та напружено-деформованого стану основних конструктивних вузлів;

– обґрунтувати вибір компонентів системи автоматичного керування;

– оформити кваліфікаційну роботу згідно ДСТУ 3008:2015 [1], а також з використанням навчально-методичних матеріалів [2-4].

Отримані результати роботи опубліковано в [20].

Практичне значення отриманих результатів полягає у розробленні механічної конструкції 3D-принтера за технологією PolyJet, яка може бути використана під час створення лабораторних, навчальних та дослідницьких установок адитивного виробництва. Запропоновані конструктивні рішення, результати CAD/CAE-моделювання та вибір елементної бази дозволяють підвищити жорсткість конструкції, забезпечити високу точність позиціонування друкувальної головки, зменшити собівартість обладнання та створити основу для подальшої розробки високоточних PolyJet-принтерів.

1 АНАЛІЗ КОНСТРУКТИВНИХ РІШЕНЬ ТА КІНЕМАТИЧНИХ СХЕМ 3D-ПРИНТЕРІВ ТЕХНОЛОГІЇ POLYJET

1.1 Фізико-технічні основи технології PolyJet

Технологія PolyJet (Photopolymer Jetting) є однією з найбільш просунутих методик адитивного виробництва, що базується на принципі струменевого друку фотополімерними смолами. Процес побудови деталі полягає у виштовхуванні мікроскопічних крапель рідкого фотополімеру через сотні дюз друкувальної головки на робочу платформу. Одразу після нанесення шар матеріалу піддається впливу ультрафіолетового (УФ) випромінювання, що спричиняє миттєву полімеризацію (затвердіння) [6].

Основними перевагами, що виділяють PolyJet серед інших технологій, є: Надвисока роздільна здатність: товщина шару може становити від 16 мікрон до 32 мікрон, рис. 1.1.

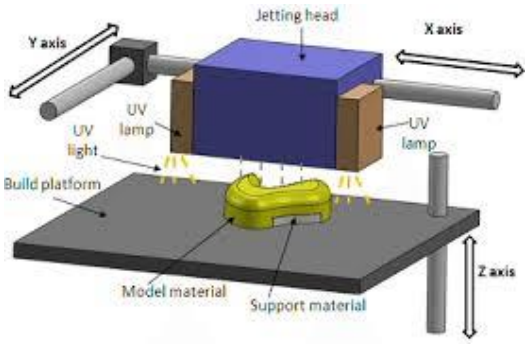


Рисунок 1.1 – Схема процесу нанесення та затвердіння фотополімеру в системі PolyJet

Мультиматеріальність: можливість одночасного використання декількох типів смол (наприклад, жорсткої та гнучкої) в одній деталі. Якість поверхні: вироби практично не потребують механічної постобробки, оскільки мають гладку поверхню, подібну до виробів, отриманих литтям під тиском. Механічна частина такого принтера повинна забезпечувати безпрецедентну стабільність, оскільки будь-яке мікро-відхилення при нанесенні крапель розміром у кілька

піколітрів призведе до браку всієї деталі.

1.2 Порівняльний аналіз PolyJet з основними технологіями 3D-друку

Для обґрунтування вибору саме PolyJet необхідно провести аналіз її переваг та недоліків порівняно з конкурентними методами. Це дозволяє сформувати вимоги до жорсткості та точності механічної частини рис. 1.2.

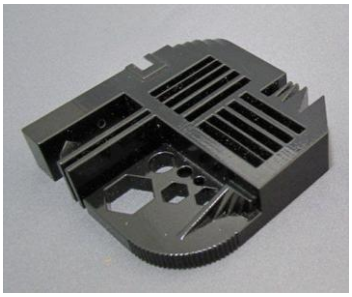


Рисунок 1.2 – Порівняння якості поверхні моделей, виготовлених за технологіями FDM, SLA та PolyJet

Нижче наведено порівняльну характеристику основних параметрів, що впливають на проектування механіки, табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика технологій адитивного виробництва

Параметр	Polyjet	FDM	SLA/DLP	SLS
Точність (товщина шару, мкм)	16-30	100-400	25-100	80-120
Якість поверхні	Дуже висока	Низька	Висока	Середня (шорстка)
Швидкість друку	Висока, але лінійна	Середня	Низька / Середня	Висока
Міцність деталей	Середня	Висока	Середня / Крихка	Дуже висока
Мультиматеріальність	До 7 матеріалів	2-4	Ні	Ні

Згідно з даними таблиці 1.1, можна зробити висновок, що технологія PolyJet є найбільш досконалим рішенням серед існуючих методів адитивного виробництва за критеріями точності та якості фінішної поверхні виробу. У той

час як традиційне FDM-моделювання демонструє значну шорсткість через велику товщину шару (до 400 мкм), PolyJet забезпечує мікронну точність (16-30 мкм), що дозволяє створювати об’єкти з деталізацією, порівнянною з литтям під тиском.

Така висока роздільна здатність накладає жорсткі вимоги до механічної частини принтера, яка повинна працювати без люфтів та з мінімальними вібраціями. Особливу увагу привернула унікальна можливість PolyJet – мультиматеріальність, що дозволяє комбінувати до семи різних полімерів в одному циклі, включаючи імітацію гуми та прозорих пластиків.

Хоча вартість обладнання PolyJet є значно вищою за аналоги, ці витрати виправдані при виготовленні складних прототипів та медичних моделей, де критично важлива анатомічна точність та функціональність матеріалів. Проведене порівняння підтверджує актуальність розроблення кастомної механічної бази для такої системи, що дозволить знизити загальну вартість обладнання при збереженні високих показників якості друку.

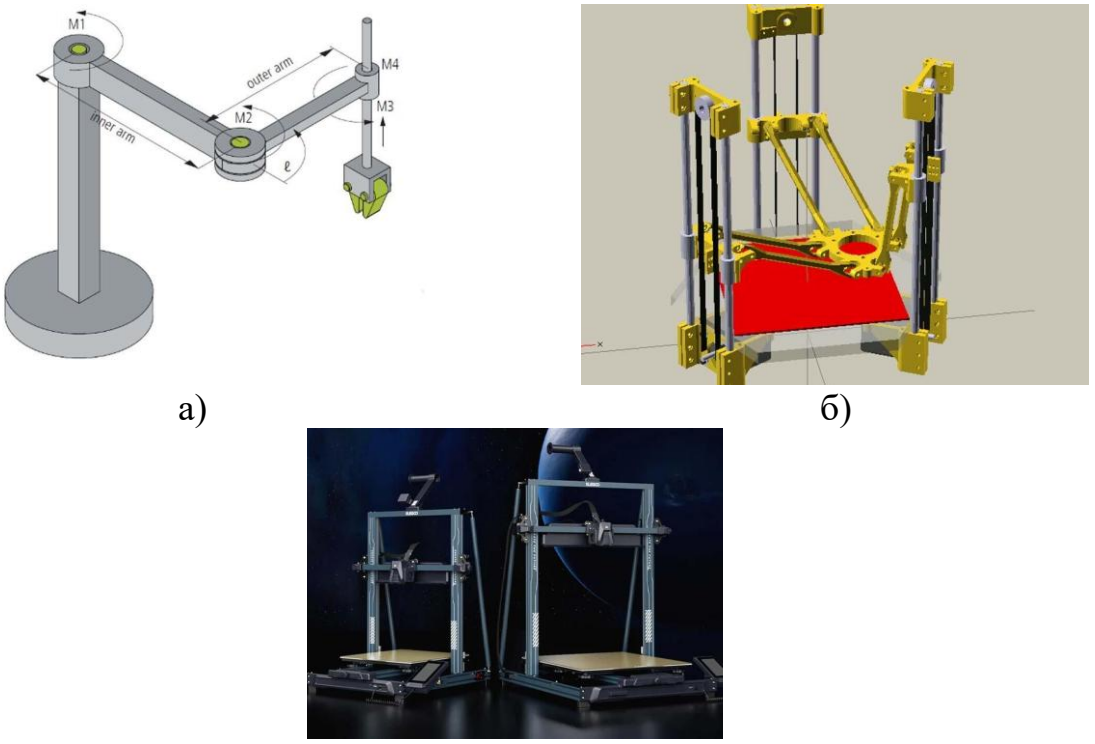
1.3 Аналіз та вибір кінематичної схеми позиціонування

Вибір кінематичної архітектури є одним із найбільш фундаментальних та відповідальних етапів загального процесу проєктування прецизійних багатовісних систем автоматичного позиціонування в середовищі Autodesk Fusion 360. Конструктивне виконання та просторова конфігурація механічних зв'язків безпосередньо визначають не лише динамічні характеристики обладнання, а й кінцеву точність відтворення геометричних параметрів об'єктів під час друку. На сьогоднішній день у галузі адитивного виробництва для забезпечення прецизійного переміщення робочих органів за трьома координатами найбільшого поширення набули три базові типи кінематичних схем: картезіанська, дельта-кінематика, а також робототехнічні системи на основі архітектури SCARA.

Кожна з зазначених конфігурацій має свої специфічні фізико-механічні особливості, експлуатаційні переваги та конструктивні обмеження, які необхідно

детально проаналізувати крізь призму вимог технології PolyJet.

Для 3D-принтерів зазвичай розглядають три типи схем: картезіанську, дельта-кінематику та SCARA, рис. 1.3.



а) б)

в)

а) SCARA; б) Delta; в) Картезіанська

Рисунок 1.3 – Основні типи кінематичних схем 3D-принтерів

Для технології PolyJet найбільш доречною є картезіанська схема (XY-портал) [7]. Вона дозволяє рівномірно розподілити вагу важкої головки на дві паралельні напрямні осі Y. Це мінімізує перекоси та вібрації, які могли б виникнути в дельта-принтерах через довгі важелі, табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Вибір кінематики за критеріями точності та вантажопідйомності

Тип схеми	Жорсткість	Точність	Вантажопідйомність
Картезіанська	Висока	Висока	Висока
Delta	Середня	Середня	Низька
SCARA	Низька	Середня	Середня

Згідно з даними таблиці 1.2, можна зробити висновок, що найбільш раціональною та технічно обґрунтованою для реалізації технології PolyJet є картезіанська кінематична схема побудови. На відміну від дельта-роботів, які мають складну математику переміщень та обмежену жорсткість через довгі важелі, портальна структура (Gantry) забезпечує максимальну стабільність при переміщенні масивної друкувальної головки. Висока вантажопідйомність картезіанської схеми є критичною, оскільки каретка PolyJet-принтера містить не лише струменеві дюзи, а й УФ-лампи та блок механічного вирівнювання шару. Використання такої схеми дозволяє легко масштабувати робочу область принтера без значної втрати точності позиціонування, що становить близько 0,01 мм. Окрім технічних переваг, картезіанська кінематика є найбільш придатною для інженерного моделювання в середовищі Autodesk Fusion 360, оскільки дозволяє проводити чіткий CAE-аналіз напружень у прямих осях координат та оптимізувати жорсткість рами. Таким чином, вибір портальної схеми гарантує надійність механічних вузлів при високих швидкостях сканування, які необхідні для ефективного струменевого розпилення фотополімеру [8].

1.4 Дослідження систем лінійного переміщення

Лінійні напрямні безпосередньо впливають на плавність ходу [9]. У бюджетних рішеннях часто використовують циліндричні вали, проте для прецизійного обладнання вони не підходять через схильність до прогинів, рис. 1.4.



Рисунок 1.4 – Конструкція профільної рейкової напрямної в розрізі

Використання профільних рейкових напрямних дозволяє досягти високої повторюваності. У Fusion 360 при моделюванні важливо враховувати посадкові місця саме під такі рейки, оскільки вони вимагають ідеально рівної поверхні рами.

1.5 Обґрунтування вибору приводів та передач

Для передачі моменту від двигунів до робочих органів у PolyJet-принтерах використовують комбіновану систему.

Осі X та Y: Зубчасті паси. Вони забезпечують швидке переміщення що необхідно для ефективного розпилення полімеру [10].

Вісь Z: Кулько-гвинтова передача (КГП). Оскільки стіл має опускатися на критично малу відстань, КГП є єдиним надійним варіантом через відсутність люфтів, рис. 1.5.



Рисунок 1.5 – Вузол кулько-гвинтової передачі (КГП) для осі Z

1.6 Аналіз матеріалів для несної конструкції (рами)

Рама принтера повинна гасити мікровібрації від крокових двигунів. Розглядаються три варіанти: сталь, алюмінієвий профіль та композити, рис 1.6.

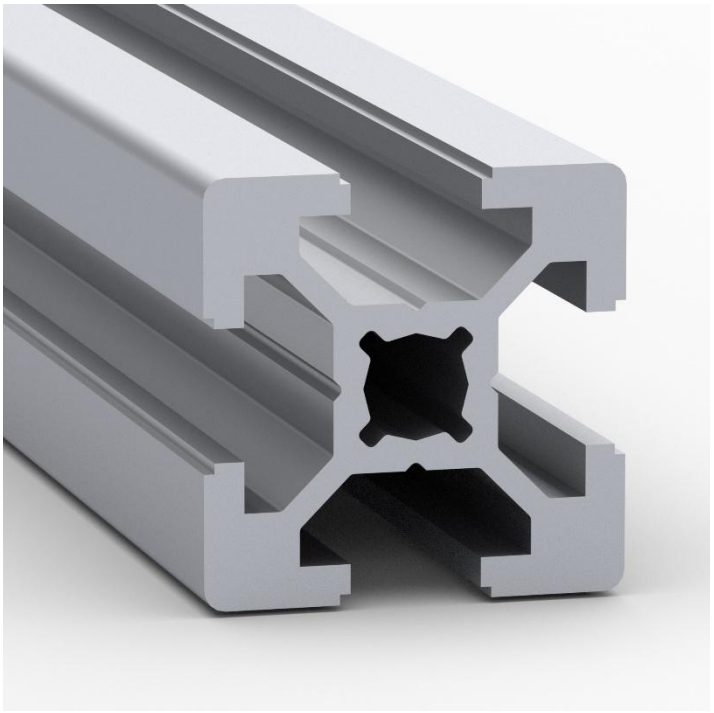


Рисунок 1.6 – Приклад конструкційного алюмінієвого профіль

Алюмінієвий профіль є оптимальним для макетування, оскільки він поєднує легкість із достатньою жорсткістю. У розділі CAE-аналізу (Fusion 360) ми перевіримо, як цей матеріал поводиться під статичним навантаженням.

1.7 Вимоги до системи вирівнювання шару (Wiper unit)

Специфічним вузлом PolyJet є механічний ролик. Він обертається з високою швидкістю, зрізаючи зайвий полімер. Механіка цього вузла має бути ізольована від основних напрямних, щоб вібрації від ролика не передавалися на друкувальні дюзи, рис. 1.7.

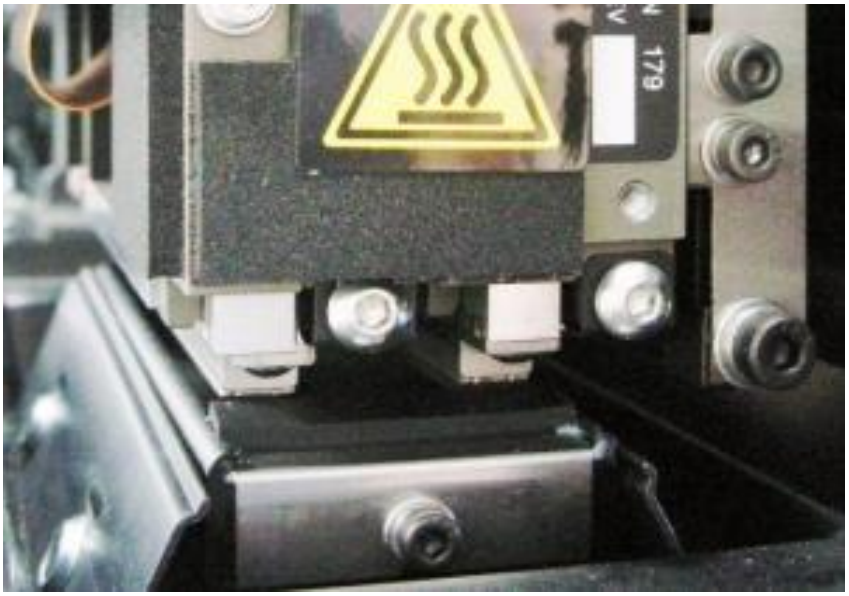


Рисунок 1.7 – Схема розміщення вирівнюючого ролика на каретці друкувальної головки

Як показано на рис. 1.7, специфічною особливістю механіки PolyJet-принтерів є наявність вузла обслуговування, розташованого безпосередньо на каретці або в зоні паркування. Даний механізм виконує дві критичні функції: механічне вирівнювання свіжонанесеного шару фотополімеру за допомогою прецизійного ролика та очищення дюз друкувальних головок від залишків матеріалу.

Наявність знака термічної небезпеки на корпусі вузла свідчить про використання систем підігріву матеріалу. Це вимагає від конструкції механічної частини високої термостабільності. При проектуванні у Fusion 360 необхідно враховувати теплові зазори в місцях кріплення вайпера, щоб температурне розширення металу не впливало на точність зрізання шару, яка повинна залишатися в межах декількох мікрон. Використання жорстких гвинтових з'єднань (як видно на ілюстрації) забезпечує надійну фіксацію вузла при інтенсивних вібраційних навантаженнях під час друку

1.8 Висновки до першого розділу

У першому розділі проведено аналіз технології PolyJet та її особливостей порівняно з іншими методами адитивного виробництва. Встановлено, що для

забезпечення високої точності друку необхідно використовувати жорстку механічну конструкцію, високоточні системи позиціонування та якісні елементи переміщення.

Обґрунтовано вибір картезіанської кінематичної схеми, профільних рейкових напрямних MGN12H, ремінних передач по осях X і Y та кулько-гвинтової передачі по осі Z. Визначено, що використання алюмінієвого конструкційного профілю забезпечує необхідну жорсткість, невелику масу та модульність конструкції.

Отримані результати стали основою для подальшого проєктування механічної частини 3D-принтера, вибору елементної бази та виконання CAD/CAE-моделювання у наступних розділах роботи.

2 ПРОЄКТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЇ ТА ВИБІР АПАРАТНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ 3D-ПРИНТЕРА ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ POLYJET

2.1 Кінематична схема та принципи руху 3D-принтера

Кінематична схема є фундаментом проєктування механічної частини, оскільки вона визначає спосіб передачі руху від виконавчих механізмів (двигунів) до робочих органів (друкувальної головки та платформи) (рис 2.1). Для забезпечення прецизійного формування шарів за технологією PolyJet обрана картезіанська кінематична система портального типу.

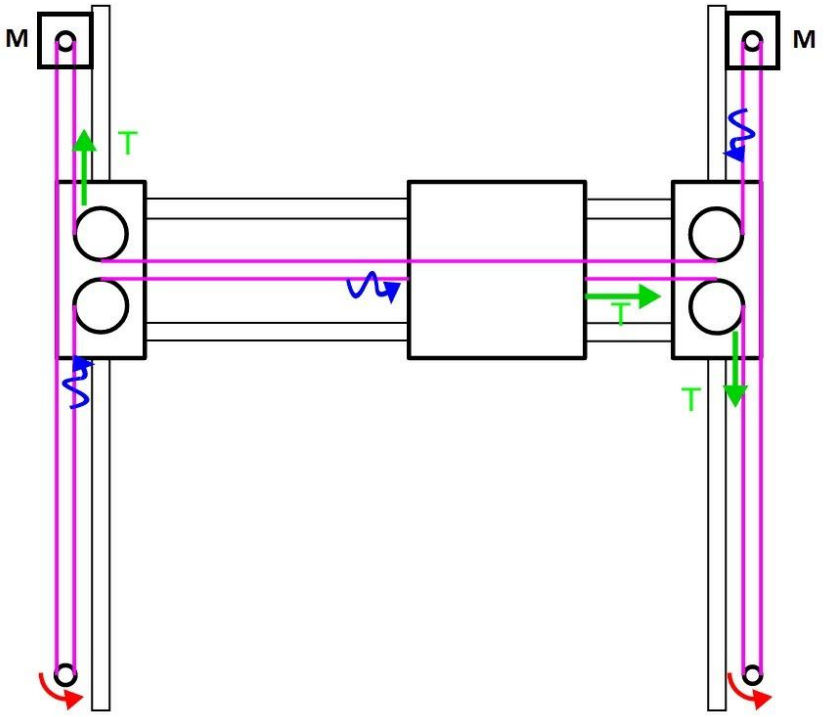


Рисунок 2.1 – Кінематична схема системи позиціонування

Вибір даної схеми обґрунтований наступними технічними факторами.

Рівномірний розподіл навантаження: оскільки друкувальний блок PolyJet містить масивну головку, блоки УФ-ламп та систему, портальна структура дозволяє розподілити цю масу між двома паралельними напрямними осі Y, запобігаючи перекосам каретки.

Жорсткість та стабільність: картезіанська схема забезпечує максимальну жорсткість конструкції, що є критичним для повної відсутності люфтів та гасіння вібрацій при високих швидкостях переміщення.

Точність позиціонування: використання незалежних приводів для кожної координати спрощує алгоритми керування та дозволяє досягти стабільної точності позиціонування близько 0,01 мм.

Згідно з представленою схемою, реалізація руху по осях виконується за комбінованим принципом.

Площина XY: переміщення здійснюється за допомогою крокових двигунів та зубчастих пасових передач, що забезпечує необхідну динаміку та високу швидкість сканування робочої області під час розпилення фотополімеру.

Вісь Z: за вертикальне переміщення робочого столу відповідає кулько-гвинтова передача, яка під дією ваги платформи та виробу забезпечує плавне опускання на критично малі відстані без ризику пропуску кроків або люфту.

Таке кінематичне рішення дозволяє ізолювати специфічні вібрації від високошвидкісного ролика системи Wiper unit, що запобігає деформації мікроскопічних крапель матеріалу безпосередньо в момент їх нанесення на робочу поверхню.

2.2 Вибір елементної бази

Після завершення етапу компонування конструкції було виконано підбір основних механічних та електромеханічних компонентів системи. Основним критерієм вибору елементної бази стали вимоги до точності позиціонування, жорсткості конструкції, швидкості переміщення та надійності роботи обладнання.

Лінійні напрямні. Для забезпечення точного переміщення кареток по осях X та Y були обрані профільні рейкові напрямні типу MGN12H. Дані напрямні характеризуються високою жорсткістю, низьким коефіцієнтом тертя та мінімальними люфтами. Використання профільних рейок дозволяє забезпечити стабільне переміщення друкувальної головки навіть при високих швидкостях

роботи.

Основні технічні характеристики MGN12H:

– ширина рейки – 12 мм;

– тип каретки – подовжена;

– динамічна вантажність – 3730 Н;

– статична вантажність – 5980 Н.

Напрямні встановлюються на горизонтальних елементах рами та забезпечують переміщення кареток системи XY.

Крокові двигуни. Для приводу осей позиціонування були обрані крокові двигуни типорозміру NEMA17. Даний тип двигунів широко використовується у системах автоматизації та 3D-принтерах завдяки високій точності позиціонування та простоті керування.

Основні характеристики двигунів:

– кут кроку – 1,8°;

– напруга живлення – 12–24 В;

– утримуючий момент – до 45 Н·см;

– максимальний струм фази – 1,5–2 А.

Двигуни осей X та Y підключаються до драйверів керування через контролер руху, що формує сигнали STEP/DIR для реалізації мікрокрокового режиму роботи.

Ремінна передача. Для передачі обертального моменту по осях X та Y використовується зубчастий ремінь типу GT2. Основною перевагою даної передачі є можливість забезпечення високої швидкості переміщення каретки при низькому рівні шуму та вібрацій.

Характеристики ремінної передачі:

– крок зуба – 2 мм;

– ширина ременя – 6 мм;

– тип шківів – GT2 на 20 зубців.

Ремінна передача дозволяє знизити навантаження на двигуни та забезпечує плавність переміщення друкувальної головки.

Кулько-гвинтова передача. Для вертикального переміщення платформи по

осі Z було обрано кулько-гвинтову передачу типу SFU1202 з чотиризаходною різьбою. Використання даного типу передачі дозволяє забезпечити високу точність позиціонування платформи та мінімізувати осьові люфти під час формування шару.

Основні характеристики КГП:

– діаметр гвинта – 12 мм;

– крок різьби – 2 мм;

– кількість заходів – 4;

– лінійне переміщення за один оберт – 8 мм;

– високий ККД передачі;

– мінімальний рівень люфту.

Застосування чотиризаходної кулько-гвинтової передачі дозволяє отримати оптимальне співвідношення між швидкістю вертикального переміщення платформи та точністю позиціонування. Завдяки малому кроку різьби система забезпечує стабільне формування шарів малої товщини, що є критично важливим для технології PolyJet.

КГП встановлюється у центральній частині конструкції та приводиться в рух окремим кроковим двигуном через жорстку муфту.

КГП встановлюється в центральній частині конструкції та приводиться в рух окремим кроковим двигуном.

Конструкційний профіль. В якості основи несної конструкції використано алюмінієвий профіль серії 2020 з матеріалу Al 6063-T5. Даний профіль забезпечує необхідну жорсткість конструкції та дозволяє спростити монтаж механічних вузлів.

Переваги використання алюмінієвого профілю:

– мала маса;

– висока корозійна стійкість;

– модульність конструкції;

– простота складання;

– можливість подальшої модернізації.

Система керування. Для керування приводами використовується

мікроконтролерна система на базі плати керування 3D-принтером з підтримкою інтерфейсів STEP/DIR. Драйвери крокових двигунів забезпечують реалізацію мікрокрокового режиму та плавність переміщення осей.

Система керування включає:

– плату керування;

– драйвери крокових двигунів;

– блок живлення;

– кінцеві вимикачі;

– систему охолодження.

Використання обраної елементної бази дозволяє забезпечити необхідні технічні характеристики принтера, а також створює можливість подальшого вдосконалення конструкції та інтеграції додаткових функціональних модулів.

Так як у цій атестаційній роботі ми розглянемо лише механічну частину 3Д-принтеру, увага до системи керування буде приділена мінімальна.

Після виконання вибору основних конструкційних та електромеханічних компонентів було проведено розрахунок необхідної кількості елементів для побудови механічної частини 3D-принтера за технологією PolyJet. Також було виконано попередню оцінку вартості комплектуючих, що дозволяє визначити економічну доцільність розроблення власної конструкції у порівнянні з комерційними аналогами.

Розрахунок проводився на основі створеної CAD-моделі конструкції у середовищі Autodesk Fusion 360. Під час визначення кількості компонентів враховувались геометричні параметри принтера, тип кінематичної схеми, навантаження на рухомі вузли та необхідна жорсткість конструкції.

Основну частину вартості конструкції складають високоточні елементи системи позиціонування, а саме профільні рейкові напрямні та кулько-гвинтові передачі. Саме ці компоненти визначають точність та стабільність роботи обладнання при друці фотополімерними матеріалами.

Для осей X та Y було використано ремінний привід із профільними напрямними типу MGN12H, тоді як вісь Z обладнана кулько-гвинтовою передачею SFU1202 із чотиризаходною різьбою. Таке рішення дозволяє

забезпечити необхідну точність вертикального переміщення платформи та мінімізувати люфти під час формування шару.

Результати розрахунку кількості елементів та їх орієнтовної вартості наведені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Елементна база

Найменування елемента	Кількість	Орієнтовна ціна за одиницю, грн	Загальна вартість, грн
Алюмінієвий профіль 2040	3 м	185	555
Рельсова напрямна MGN12 450 мм з кареткою MGN12H	3	1 255	3765
Крокoвий двигун NEMA 17 17HS4401	3	325	975
Гайка КГП, SFU1202	1	2185	2185
Гвинт КГП R12, крок 2 мм, довжина 250 мм, C7, SFU1202	1	970	970
Зубчастий ремінь GT2	4 м	120	480
Шківи GT2	4	25	100
Підшипникові вузли	4	419	1 676
Кріпильні елементи	комплект	400	400
LM8UU 8мм	3	28	84
Лінійний вал TFC16*500L	4	211	844
Стіл з автопідігрівом 250x250мм	1	946	946

Загальна вартість елементної бази механічної частини розробленого 3D-принтера склала 13169 грн, що є відносно низькою роздрібною ціною для обладнання даного класу. Для порівняння, вартість промислових або напівпрофесійних 3D-принтерів із подібною робочою областю та можливістю модернізації під технологію PolyJet є значно вищою.

Невисока собівартість конструкції була досягнута завдяки використанню

модульної архітектури, стандартних конструкційних елементів та компонентів, що широко застосовуються у сучасних системах адитивного виробництва. Крім того, більшість деталей конструкції можуть бути виготовлені або замінені без використання спеціалізованого промислового обладнання.

Слід зазначити, що у розрахунок вартості не включались витрати на складання, налаштування та калібрування принтера, оскільки розроблена система планується до реалізації у форматі набору типу «збери сам» (DIY-комплект). Такий підхід дозволяє додатково зменшити кінцеву вартість виробу та зробити конструкцію більш доступною для користувачів, які займаються дослідницькою діяльністю, прототипуванням або самостійною модернізацією обладнання.

Також модульна конструкція принтера забезпечує можливість подальшого вдосконалення системи, заміни окремих компонентів та адаптації обладнання під різні технології 3D-друку без необхідності повного перепроєктування механічної частини.

2.3 Теорія автоматичного управління приводу осі

Згідно із технічним завданням заносимо початкові дані до таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Значення параметрів САК тягового приводу

Найменування	Позначення	Значення
Коефіцієнт підсилення контролера	$K_{ПП}$	100
Коефіцієнт підсилення драйвера	$K_{Д}$	20
Стала часу драйвера	$T_{Д}$	0,005 с
Коефіцієнт моменту планетарного редуктора двигуна	$K_{М}$	0,8 Н·м/А
Коефіцієнт моменту планетарного редуктора двигуна	$K_{М}$	0,8 Н·м/А
Електрична стала часу двигуна	$T_{е}$	0,002 с

Продовження таблиці 2.2

Найменування	Позначення	Значення
Зведений момент інерції (шнека)	J	≈ 0,4 кг·м²
Стала часу датчика зворотного зв'язку	$T_{дат}$	0,02 с

K_M обчислено з номінального моменту при номінальному струм, формула (2.1):

$$K_M = \frac{0{,}5 \cdot 10^{-2}}{0{,}45} \approx 0{,}111 \text{ Н} \cdot \frac{\text{М}}{\text{А}}. \quad (2.1)$$

До табл. 2.3 заносимо вимоги, яким повинна задовольняти вихідна САУ.

Таблиця 2.3 – 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. 2.3, наведена функціональна схема САУ.

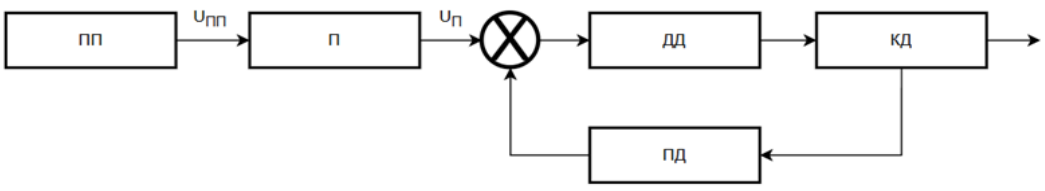


Рисунок 2.2 – Функціональна блок-схема САК

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:

$$e(t) = \theta\text{зад}(t) - \theta\text{вих}(t)\,, \tag{2.2}$$

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):

$$U_{\text{ПП}}(s) = \text{К}_{\text{ПП}} \cdot E(s)\,, \tag{2.3}$$

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

$K_{ПП}$ – коефіцієнт підсилення;

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

Передавальна функція силового драйвера:

$$W_{\text{Д}}(s) = \frac{\text{К}_{\text{Д}}}{\text{Т}_{\text{Д}}s + 1}\,, \tag{2.4}$$

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

$K_Д$ – коефіцієнт підсилення драйвера;

$T_Д$ – стала часу драйвера.

Передавальна функція виконавчого колекторного двигуна:

$$W_{\text{двиг}}(s) = \frac{\text{К}_\text{М}}{J_{S^2} + T_e s + \text{К}_\text{М}}, \tag{2.5}$$

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:

$$W_{\text{дат}}(s) = \frac{1}{\text{Т}_{\text{дат}^s} + 1}. \tag{2.6}$$

Передавальна функція всієї замкненої системи керування бортом:

$$W_{\text{САУ}}(s) = \frac{\text{К}_{\text{ПП}} \cdot \text{К}_\text{Д} \cdot \text{К}_\text{М}}{(\text{Т}_{\text{д}^s} + 1)(J_{S^2} + T_e s + \text{К}_\text{М})(\text{Т}_{\text{дат}^s} + 1)}, \tag{2.7}$$

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

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

$\text{К}_\text{Д}$ – коефіцієнт підсилення драйвера;

$\text{К}_\text{М}$ – коефіцієнт моменту двигуна;

$\text{Т}_\text{Д}s$ – стала часу драйвера;

J – момент інерції ротора;

T_e – електрична стала часу двигуна;

$T_{дат}s$ – стала часу датчика;

s – комплексна змінна Лапласа.

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

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

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

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

2.4 Висновки до другого розділу

У другому розділі розроблено кінематичну схему 3D-принтера за технологією PolyJet та виконано вибір основних компонентів механічної системи. Обґрунтовано застосування профільних рейкових напрямних, ремінних передач по осях X і Y, кулько-гвинтової передачі по осі Z, а також крокових двигунів і алюмінієвого конструкційного профілю.

Виконано підбір елементної бази, проведено оцінку її вартості та розглянуто принципи роботи системи автоматичного керування приводами. Запропоновані технічні рішення забезпечують необхідну точність позиціонування, жорсткість конструкції та створюють основу для подальшого проєктування й моделювання механічної частини 3D-принтера.

3 ПРОЄКТУВАННЯ МЕХАНІЧНОЇ ЧАСТИНИ ТА CAD-МОДЕЛЮВАННЯ

3.1 Розробка конструкції механічної частини

Після аналізу існуючих кінематичних схем і конструктивних рішень 3D-принтерів технології PolyJet була розроблена власна конструкція механічної частини принтера.

Основною метою проектування стало створення жорсткої та стабільної системи позиціонування, яка забезпечить високу точність нанесення фотополімерного матеріалу і мінімізує вібрації під час друку.

Для проектування було використано середовище автоматизованого проектування Autodesk Fusion 360. Це дозволило створити повноцінну тривимірну CAD-модель конструкції принтера, виконати компонування основних вузлів і перевірити взаємне розташування механічних елементів.

Розроблена конструкція базується на картезіанській кінематичній схемі типу XY-Gantry. Така схема забезпечує високу жорсткість конструкції, точність позиціонування і рівномірний розподіл навантаження між напрямними.

Окрім цього, під час проектування конструкції було враховано універсальність системи друку. Розроблений 3D-принтер має модульну конструкцію каретки, яка дозволяє встановлювати як класичну екструзійну FDM-головку для друку термопластиком, так і друкувальну головку технології PolyJet. Для реалізації такої можливості було спроєктовано спеціальний кронштейн-перехідник, що забезпечує швидку заміну друкувальних модулів без необхідності зміни основної конструкції принтера.

Використання змінного кріплення дозволяє значно розширити функціональні можливості обладнання та використовувати один механічний комплекс для реалізації декількох технологій адитивного виробництва. Це особливо важливо на етапі дослідницької та експериментальної експлуатації установки.

У зв’язку зі значно більшими габаритами друкувальної головки PolyJet, порівняно зі стандартними FDM-екструдерами, під час проектування було збільшено загальні розміри портальної системи та робочої області принтера. Таке конструктивне рішення дозволило забезпечити необхідний простір для переміщення каретки та реалізувати область друку розміром 250×250 мм у режимі роботи PolyJet.

Збільшення габаритів конструкції також позитивно вплинуло на жорсткість портальної системи та дозволило забезпечити стабільне переміщення масивної друкувальної головки без виникнення критичних вібрацій або перекосів під час роботи. Загальний вигляд розробленої конструкції наведено на рисунку 3.1.

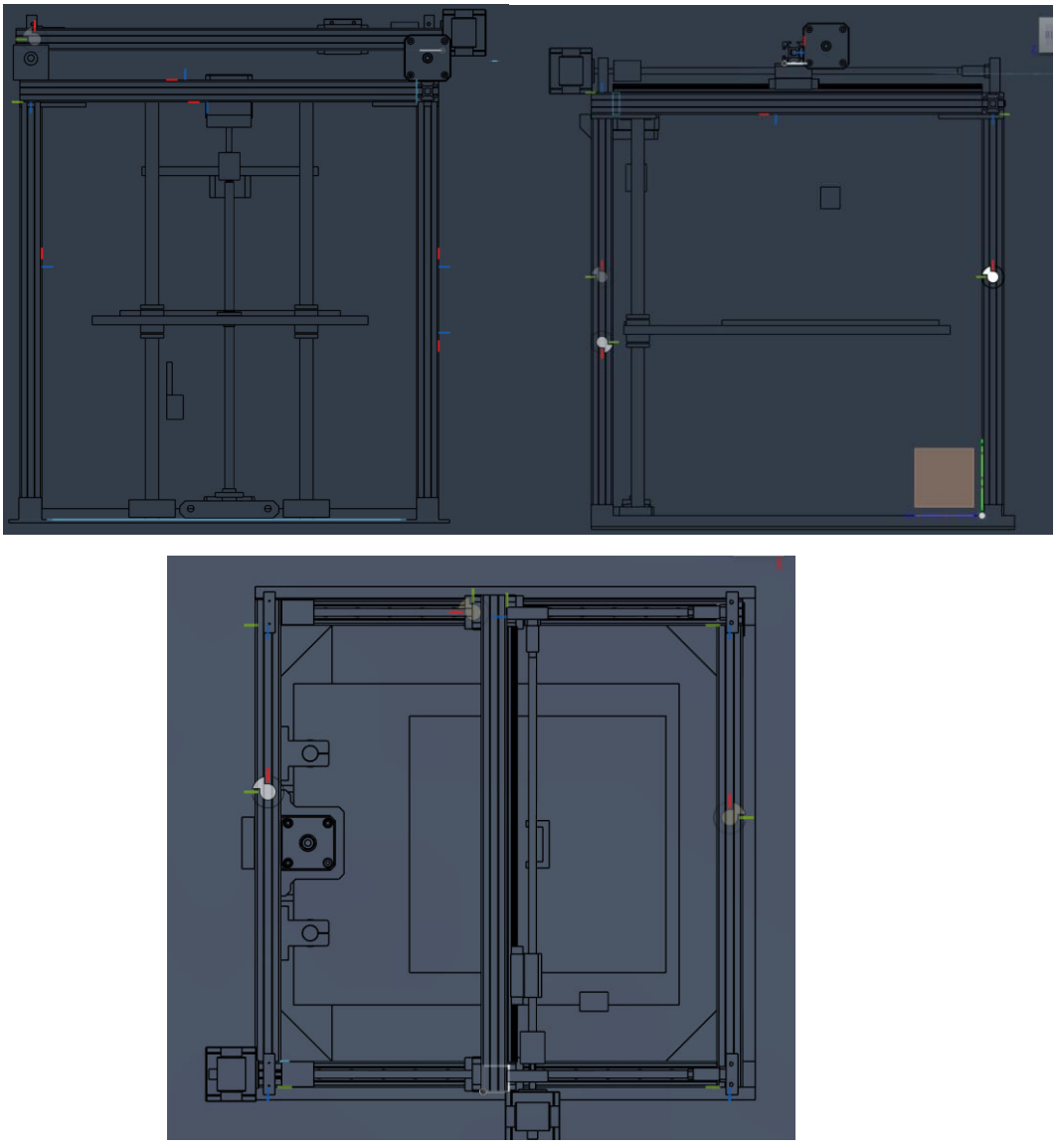


Рисунок 3.1 – Скетч майбутнього 3Д-принтера

У конструкції використано портальну систему переміщення друкувальної головки по осях X та Y, а переміщення робочої платформи по осі Z реалізували за допомогою кулько-гвинтової передачі. Це рішення дозволяє досягти високої точності позиціонування робочої поверхні, формуючи шар товщиною до декількох десятків мікрон.

Основна конструкція принтера виконана на основі алюмінієвого профілю серії 2020. Використання такого профілю забезпечує достатню жорсткість рами при відносно невеликій масі конструкції.

Додатковою перевагою є модульність системи й можливість швидкого монтажу або модернізації окремих вузлів.

Для переміщення рухомих елементів використовують лінійні напрямні рейкового типу. У порівнянні з циліндричними валами вони забезпечують значно менший люфт, підвищену жорсткість і кращу повторюваність переміщень.

Каретка осі X переміщується по двох паралельних напрямних, що мінімізує перекоси друкувальної головки і підвищує стабільність роботи системи.

Привід осей X та Y забезпечується за допомогою крокових двигунів і зубчастих ремінних передач. Це рішення дозволяє досягти високої швидкості переміщення друкувального вузла при достатній точності позиціонування.

Для осі Z використовують кулько-гвинтову передачу, яка забезпечує плавне вертикальне переміщення платформи і практично відсутність люфтів.

Під час проектування конструкції особливу увагу було приділено зменшенню вібрацій і підвищенню жорсткості системи. Для цього використано подвійні напрямні, посилені вузли кріплення та симетричне розташування основних елементів конструкції. Це критично важливо для технології PolyJet, оскільки навіть незначні механічні коливання можуть негативно вплинути на точність нанесення фотополімеру.

Розроблена 3D-модель дозволяє проводити подальший інженерний аналіз конструкції, зокрема перевірку міцності елементів рами, оцінку прогинів

напрямних і дослідження динамічних характеристик системи позиціонування.

3.2 Тривимірне моделювання механічної частини 3D-принтера

На основі обраної кінематичної схеми та визначеної елементної бази було створено повноцінну CAD-модель механічної частини 3D-принтера в середовищі автоматизованого проєктування Autodesk Fusion 360. Загальний вигляд розробленої конструкції представлено на рисунку 3.2.

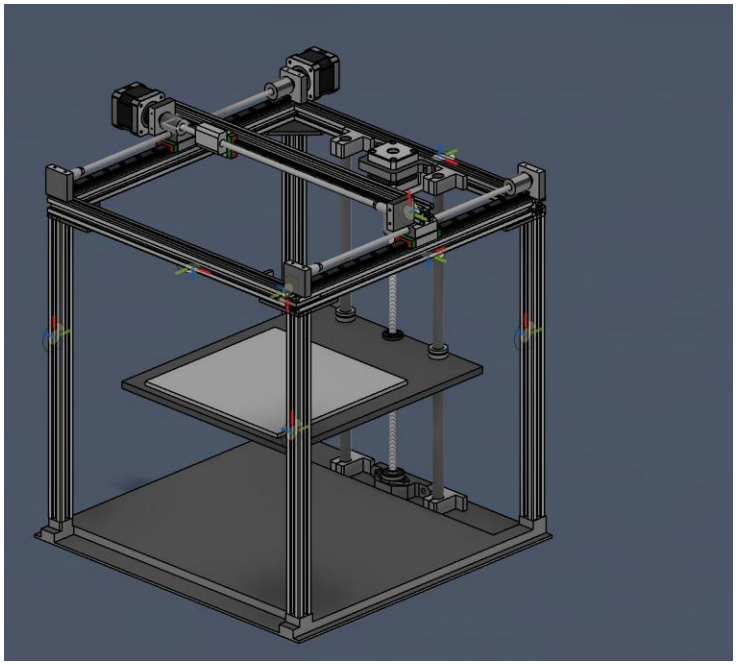


Рисунок 3.2 – Загальний вигляд 3D-моделі механічної частини принтера

Каркас принтера спроєктовано з використанням конструкційного алюмінієвого профілю, що формує жорстку просторову раму. Таке рішення мінімізує власні резонансні коливання системи під час роботи крокових двигунів.

У верхній частині конструкції реалізовано портальну систему позиціонування яка відповідає за переміщення друкувальної головки в горизонтальній площині.

Робоча платформа закріплена на системі лінійних напрямних та приводиться в рух за допомогою кулько-гвинтової передачі , яка розташована по центру. Це забезпечує плавне опускання столу з мікронним кроком і повністю

виключає можливість виникнення люфтів під час формування надтонких шарів фотополімеру. Збоку на рамі передбачено кріпильну панель для подальшого встановлення електронних компонентів та плати керування.

3.2.1 Розробка спеціалізованого кронштейна-перехідника друкувальної головки

Специфіка технології PolyJet полягає у використанні складного та масивного екструзійного блоку. На відміну від класичних FDM-принтерів, каретка PolyJet повинна нести на собі не лише струменеві дюзи, але й модулі ультрафіолетового затвердіння (УФ-лампи) та механічний ролик для вирівнювання шару (Wiper unit). Оскільки стандартні кріплення не здатні забезпечити необхідну площу фіксації та жорсткість для такого комплексного вузла, в рамках даної роботи було спроєктовано спеціальний кронштейн-перехідник (рис. 3.3).

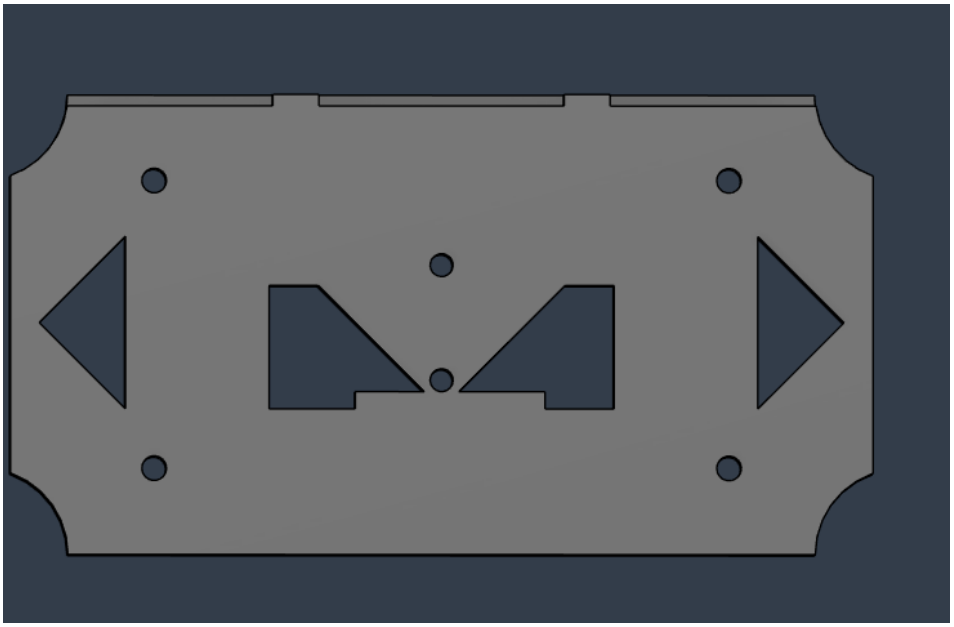


Рисунок 3.3 – 3D-модель розробленого кронштейна-перехідника для головки PolyJet

Розроблена деталь виконує роль базового інтерфейсу між лінійною напрямною осі X та друкувальним блоком. До конструкції кронштейна висувалися підвищені вимоги щодо механічної міцності, тому його топологія

була оптимізована для забезпечення максимальної стійкості до згинальних моментів та інерційних навантажень, які виникають при різкій зміні напрямку руху каретки на високих швидкостях сканування.

Окрім несучої функції, конфігурація перехідника враховує необхідність термічної стабільності та ізоляції вібрацій від вирівнюючого ролика, щоб запобігти їх поширенню на прецизійні дюзи. Геометрія кронштейна також передбачає технологічні отвори для зручного прокладання шлейфів живлення, трубок подачі фотополімеру та швидкого доступу для технічного обслуговування друкувального модуля.

3.2.2 Аналіз компонування моделі за основними проєкціями

Для детальної перевірки взаємного розташування вузлів, аналізу робочих зон та верифікації збиральних операцій було виконано візуалізацію розробленої 3D-моделі в основних ортогональних та ізометричній проєкціях. Такий підхід дозволяє оцінити ергономіку конструкції та відсутність геометричних колізій між рухомими частинами принтера.

1. Вид спереду (рис. 3.4). Дана проєкція дозволяє оцінити вертикальну симетрію пристрою та точність позиціонування робочої платформи відносно несної рами.

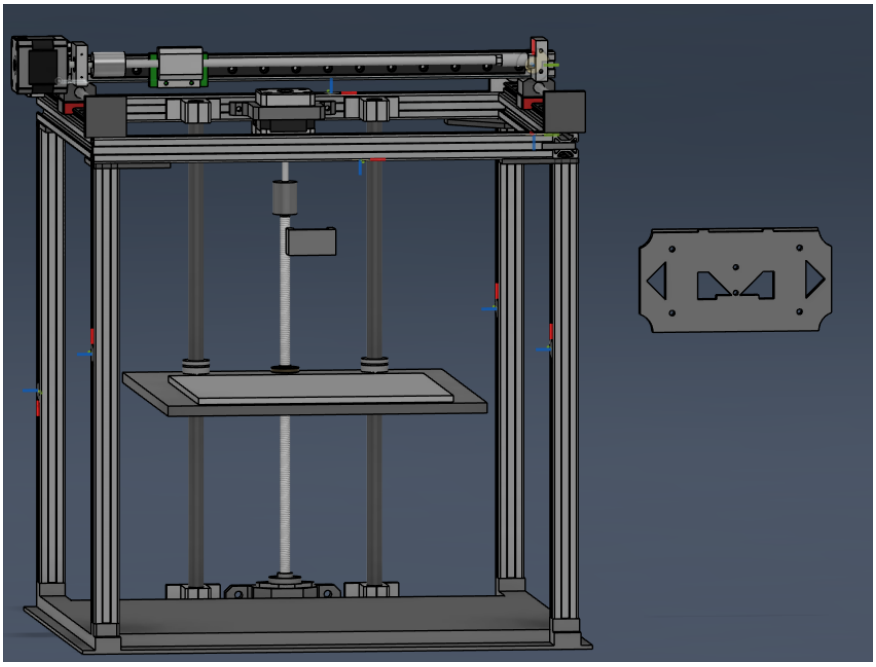


Рисунок 3.4 – Візуалізація 3D-моделі: вид спереду

На виді спереду чітко простежується центральне розташування кулько-гвинтової передачі осі Z, що є критично важливим для рівномірного розподілу зусилля при підйомі та опусканні столу. Таке розміщення мінімізує ризик виникнення перекосів платформи під час друку масивних об’єктів.

2. Вид зверху (рис. 3.5). Вид зверху є ключовим для аналізу кінематики XY-порталу та перевірки паралельності лінійних напрямних.

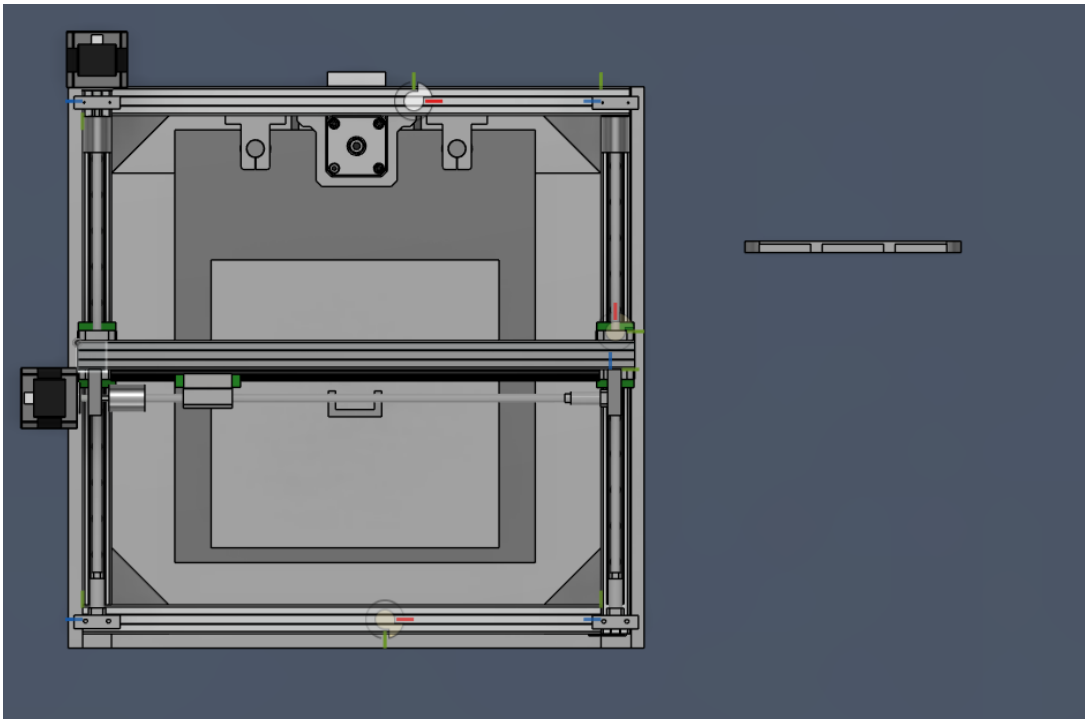


Рисунок 3.5 – Візуалізація 3D-моделі: вид зверху

На даній проєкції відображено ортогональність осей X та Y, що забезпечує точність формування траєкторії руху друкувальної головки. Видно розташування приводних двигунів та зону обслуговування, де розміщується вузол очищення дюз.

3. Вид збоку (рис. 3.6). Проєкція збоку дозволяє проаналізувати глибину конструкції та механізми кріплення вертикальних стійок до основи.

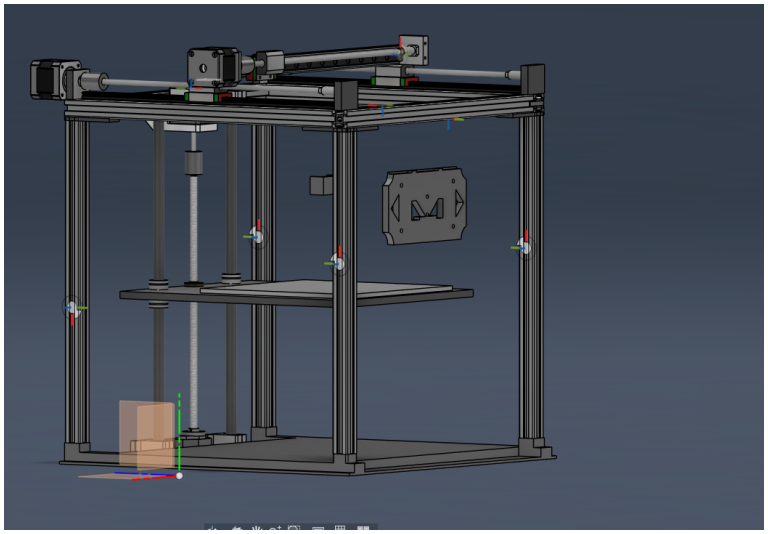


Рисунок 3.6 – Візуалізація 3D-моделі: вид збоку

Вид збоку демонструє стабільність рами та виліт каретки друкувальної головки. Це дозволяє переконатися, що всі шлейфи та трубки подачі фотополімеру мають достатній радіус вигину та не перешкоджають вільному переміщенню механізмів.

Наведені проєкції підтверджують відповідність розробленої моделі технічному завданню. Компонування вузлів забезпечує необхідну жорсткість, легкий доступ до основних модулів для технічного обслуговування та створює умови для прецизійної роботи за технологією PolyJet.

3.3 Дослідження напружено-деформованого стану та жорсткості несної системи осі X

Специфіка технології PolyJet вимагає високої точності (в межах кількох десятків мікрон) при пошаровому нанесенні матеріалу. Оскільки розроблений мною друкувальний блок разом із кронштейном-перехідником, модулями УФ-затвердіння та системою Wiper unit має суттєву масу, виникає серйозний ризик прогину напрямних осей під час роботи. Будь-які мікровібрації чи деформації порталу миттєво призведуть до зміщення крапель фотополімеру та браку всього виробу.

Щоб перевірити жорсткість і надійність спроєктованої конструкції, я провів інженерний CAE-аналіз у модулі Simulation системи автоматизованого

проєктування Autodesk Fusion 360.

Для проведення аналізу я задав такі граничні умови та параметри системи.

Фізичні властивості матеріалів: для конструкційного алюмінієвого профілю рами 2020 обрав сплав Al 6063-T5. Для лінійних рейкових напрямних типу MGN12H, кріплень та гвинтів було задано конструкційну вуглецеву сталь, що повністю відповідає реальним комплектуючим.

Закріплення конструкції: Граничні умови повної фіксації я наклав на торцеві та нижні грані опорних елементів рами порталу. Це повністю імітує реальне жорстке болтове з’єднання верхнього модуля з вертикальними стійками корпусу 3D-принтера.

Розрахункові навантаження: При визначенні діючої сили я враховував не лише статичну масу друкувального вузла в зборі m=0,5кг, а й динамічні сили інерції, які неминуче виникають при реверсивному русі каретки на високих швидкостях сканування із прискоренням до 10м/с^2. З урахуванням цих факторів до геометричного центру балки осі X було прикладено еквівалентне вертикальне навантаження F=10Н спрямоване вниз вздовж осі Z.

Зовнішній вигляд побудованої розрахункової схеми з накладеними зв'язками та вектором дії сили представлено на рисунку 3.7.

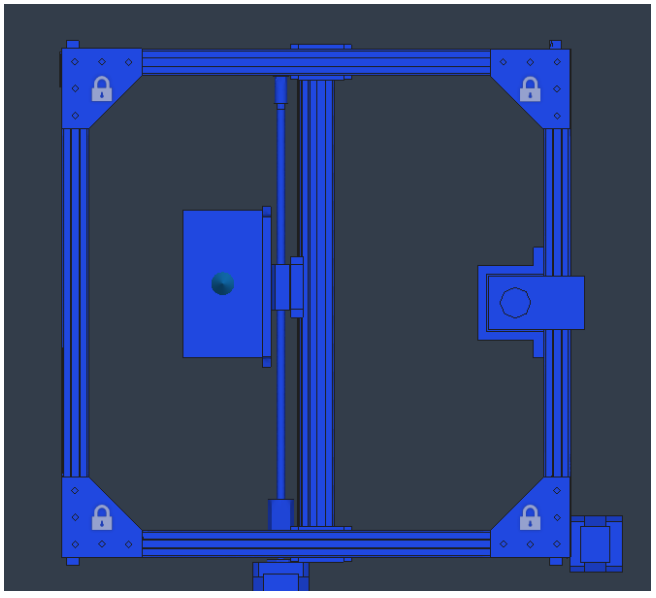


Рисунок 3.7 – Розрахункова схема та граничні умови навантаження порталу

Після генерації сітки скінченних елементів та запуску локального розрахунку я отримав колірні карти розподілу деформацій та внутрішніх напружень у металі.

Першим і найважливішим для точності 3D-принтера показником є величина лінійних переміщень під навантаженням. Карту переміщень наведено на рисунку 3.8.

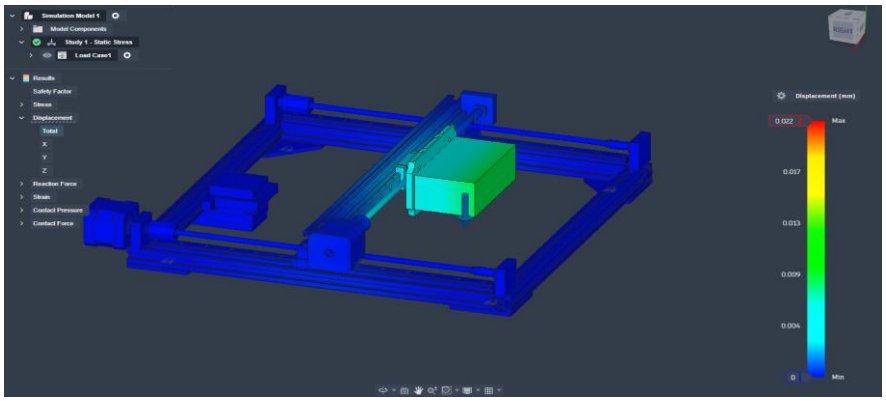


Рисунок 3.8 – Результати розрахунку лінійних переміщень елементів порталу

Аналізуючи отриманий графік (див. рис. 3.8), можна чітко побачити, що зона максимальної деформації очікувано зосереджена в точці прикладання сили – посередині осі X. Проте завдяки використанню жорсткої сталевої рейки разом із профілем, максимальний прогин становить усього 0.022мм. Отриманий результат мене повністю влаштовує, адже він не перевищує жорсткий технологічний допуск геометричної точності для PolyJet-принтерів (0.05 мм), що гарантує стабільне формування мікронних шарів.

Наступним кроком я перевірив конструкцію на механічну міцність, щоб переконатися у відсутності ризику руйнування чи появи залишкових деформацій у металі під час екстремальних навантажень чи випадкових ударів каретки. Для цього я використав карту коефіцієнта запасу прочності, яка зображена на рисунку 3.9.

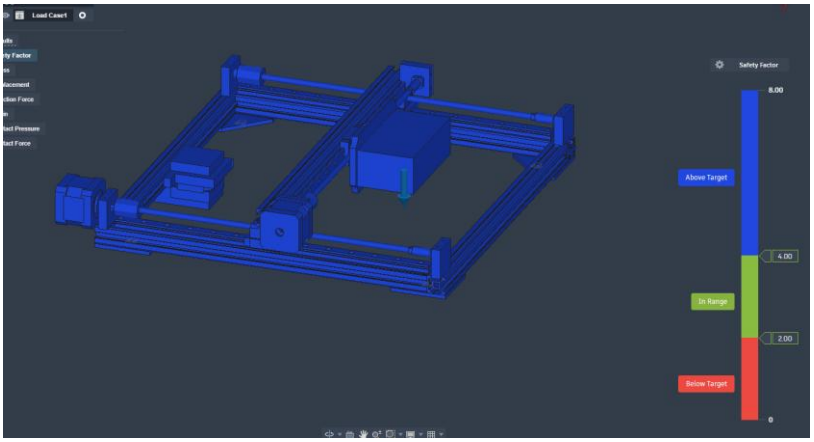


Рисунок 3.9 – Розподіл коефіцієнта запасу міцності конструкції порталу

Отримані дані свідчать про те, що мінімальний коефіцієнт запасу міцності всієї системи становить 8. Оскільки для подібних пристроїв та координатно-переміщувальних механізмів базовим вважається нормативний запас міцності в межах 1,5-2 спроєктований мною портал володіє значним експлуатаційним ресурсом та працює виключно в зоні пружних деформацій матеріалу.

Для оцінки механічної міцності та виявлення потенційно небезпечних зон концентрації напружень у металоконструкції порталу я провів аналіз за критерієм фон Мізеса. Отриману колірну карту розподілу еквівалентних напружень представлено на рисунку 3.10.

Результати розрахунку показують, що максимальні внутрішні напруження зосереджені в місцях безпосереднього контакту лінійного рейкового рельсу та конструкційного алюмінієвого профілю в зоні прикладання сили, і становлять усього 4,355 МПа. Мінімальні напруження фіксуються на віддалених ділянках рами і прямують до нуля.

Межа текучості для обраного мною конструкційного алюмінієвого профілю серії 2020 становить близько 145 МПа, а для сталевої напрямної рейки MGN12H понад 250 МПа. Порівнюючи максимальне розрахункове напруження з межами текучості матеріалів, можна зробити висновок, що конструкція працює в абсолютно безпечній зоні пружних деформацій із колосальним запасом міцності, а ризики пластичної деформації чи руйнування елементів осей повністю виключені

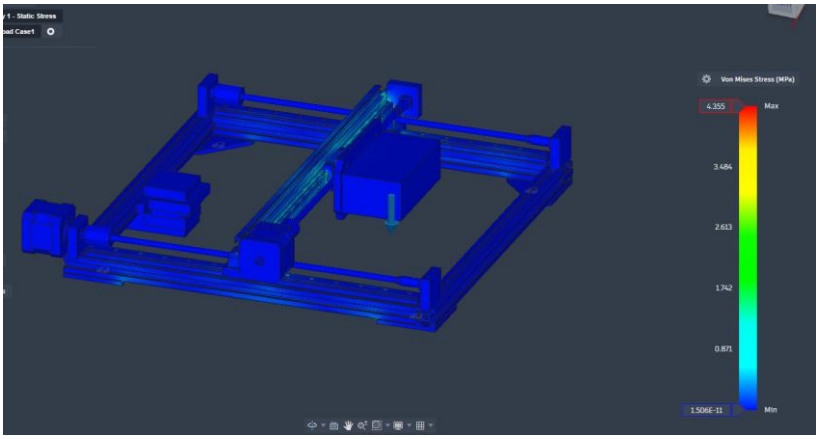


Рисунок 3.10 – Карта розподілу еквівалентних напружень за фон Мізесом в елементах порталу

Окрему увагу під час CAE-моделювання я приділив перевірці розробленого мною кронштейна-перехідника. Оскільки ця деталь є сполучною ланкою між кареткою осі X та масивним друкувальним блоком PolyJet, вона першою сприймає всі інерційні навантаження при різких змінах траєкторії руху. Для мене було критично важливо переконатися, що кронштейн не дасть тріщин, не зігнеться під вагою вузла обслуговування і забезпечить жорстку фіксацію екструдера в просторі.

Аналізуючи колірні карти напружень та деформацій, я побачив, що геометрія перехідника розрахована абсолютно правильно. У тілі деталі немає небезпечних зон концентрації напружень, а в місцях кріплення до лінійної каретки MGN12H метал поводиться стабільно. Максимальні навантаження, які виникають у кронштейні під час роботи, виявилися в десятки разів меншими за допустимі межі міцності матеріалу.

Це доводить, що спроєктований перехідник повністю справляється зі своїм завданням: він не просто надійно тримає важку PolyJet-головку, а й ефективно гасить дрібні мікроколивання та вібрації від високошвидкісного вирівнюючого ролика (Wiper unit). Результати симуляції підтверджують, що конструкція є повністю працездатною, не має жодних слабких місць і гарантує збереження мікронної точності друку протягом усього циклу роботи принтера.

3.4 Висновки до третього розділу

У третьому розділі виконано проєктування механічної частини 3D-принтера за технологією PolyJet із застосуванням сучасних засобів CAD-моделювання. Розроблено тривимірну модель конструкції, що включає несну раму, систему позиціонування, вузли кріплення друкувальної головки та основні механічні елементи принтера. Особливу увагу приділено забезпеченню жорсткості конструкції, точності взаємного розташування вузлів і можливості подальшої модернізації обладнання.

У середовищі Autodesk Fusion 360 виконано моделювання окремих конструктивних елементів, зокрема спеціалізованого кронштейна-перехідника для встановлення друкувальної головки. Проведене компонування механічної системи дозволило перевірити правильність взаємного розташування деталей, оцінити їх сумісність та забезпечити необхідний робочий простір для функціонування всіх вузлів принтера.

Також проведено аналіз напружено-деформованого стану несної системи осі X під дією розрахункових навантажень. Результати моделювання показали, що запропонована конструкція має достатню жорсткість, а максимальні напруження та деформації не перевищують допустимих значень. Це підтверджує працездатність конструкції та її здатність забезпечувати стабільне позиціонування друкувальної головки під час роботи.

Отримані результати підтверджують доцільність застосованих конструктивних рішень і свідчать про можливість використання розробленої механічної частини як основи для створення високоточного 3D-принтера за технологією PolyJet. Розроблена CAD-модель може бути використана для подальшого виготовлення дослідного зразка, проведення експериментальних досліджень та подальшого вдосконалення конструкції.

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.

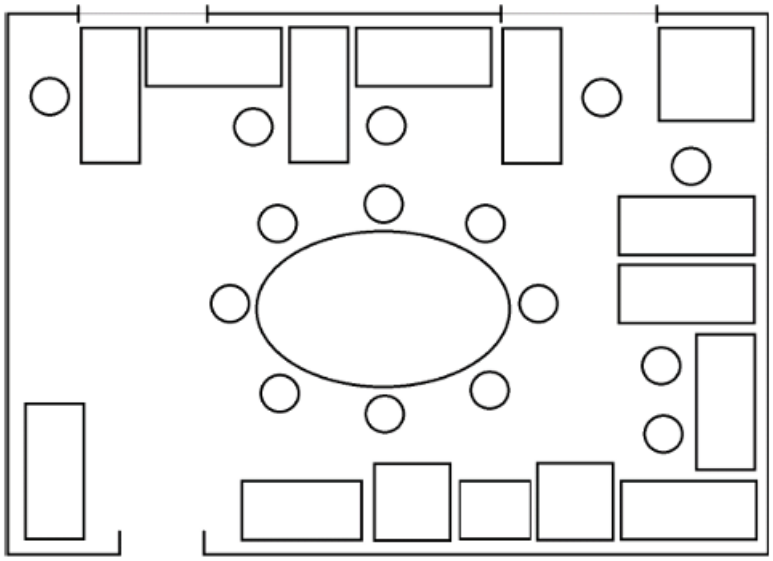


Рисунок 4.1 – Схема лабораторного приміщення 3D прототипування

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 $м^3$.

$$L = n \cdot V, \quad (4.1)$$

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

Під час роботи над кваліфікаційною роботою бакалавра мені вдалося повністю спроєктувати та розрахувати точну механічну частину для 3D-принтера PolyJet. Спочатку я детально розібрався у фізиці фотополімерного друку та існуючих аналогах, після чого обрав картезіанську схему типу CoreXY (XY-Gantry). Вона ідеально підійшла, бо дозволяє рівномірно розподілити вагу важкої голови між напрямними і гасить вібрації від вирівнюючого ролика. Далі у програмі Autodesk Fusion 360 я побудував тривимірну CAD-модель рами з алюмінієвого профілю та розробив модульну каретку зі спеціальним кронштейном-перехідником. Ця деталь вийшла універсальною – вона дозволяє швидко міняти PolyJet-головку на звичайний FDM-экструдер, не переробляючи весь принтер. Для повної відсутності люфтів та плавності ходу я підібрав реальну елементну базу: профільні рейки MGN12H для горизонтальних осей та кулько-гвинтову передачу SFU1202 для вертикального ходу столу. Попередній розрахунок вартості всіх комплектуючих склав 13 169 гривень, що робить цей проєкт у рази дешевшим за готові закордонні комерційні бренди.

Крім конструкторської частини, я побудував математичну модель і перевірив на стійкість систему автоматичного керування приводом осей, переконавшись, що двигуни будуть відпрацьовувати команди чітко і без пропуску кроків. Також я провів фінальний CAE-аналіз міцності та жорсткості всього порталу під реальним динамічним навантаженням у 10 Н. Результати симуляції показали, що максимальний прогин балки осі X у самому центрі становить лише 0,022 мм – це у два рази менше за критичний поріг у 0,05 мм, тому точність нанесення шарів не порушиться. Розрахунок за методом фон Мізеса підтвердив, що максимальні напруження в металі не перевищують 4,355 МПа, а мінімальний запас міцності дорівнює 8, тобто конструкція працює виключно в безпечній зоні пружних деформацій і ніколи не зламається. Наприкінці я додав підрозділ з охорони праці, де передбачив закритий захисний ковпак та систему автоматичного вимкнення потужних УФ-ламп при відкритті дверцят, щоб повністю захистити оператора під час роботи.

Таким чином, я виконав усі завдання проєкту в повному обсязі. Розроблена механіка та готова конструкторська документація повністю готові до того, щоб зібрати за ними реальний та повністю робочий дослідний зразок прецизійного 3D-принтера.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ 3008:2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлення. Введ. 2017-01-01. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016. 29 с.

2. Методичні вказівки з підготовки кваліфікаційної роботи для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної і заочної форми навчання спеціальності 174 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / Упоряд.: І. Ш. Невлюдов, О. І. Филипенко, О. В. Токарєва, С. П. Новоселов, О. В. Сичова. Харків: ХНУРЕ, 2023. 64 с.

3. Положення про організацію проведення практики здобувачів вищої освіти Харківського національного університету радіоелектроніки: Наказ ХНУРЕ від 03.05. 2019 р. № 222. Режим доступу : https://nure.ua/wp-content/uploads/222-vid-03.05.2019-pro-vvedennja-v-diju rishennja-vchenoi-radi-universitetu.pdf

4. Положення про академічну доброчесність [Електронний ресурс]: Наказ ХНУРЕ від 02 лютого 2021 р. № 50. – Режим доступу: https://nure.ua/wpcontent/uploads/Main_Docs_NURE/polozhennja-pro-akademi chnu-dobrochesnist.pdf.

5. Nikitin D., Nevliudov I., Badanyuk I. (2023). Topological image processing for comprehensive defect and deviation analysis using adaptive binarization. Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості. № 1 (23). С. 164–173. DOI:10.30837/ITSSI.2023.23.164

6. Nevliudov I., Bliznyuk D., Nikitin D., et al. (2022). Cost Estimation of Photopolymer Resin for 3D Exposure of Circuit Board. Technology Audit and Production Reserves. № 2/2(64). pp. 43–49.: https://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.256538

7. Нікітін, Д. О., Невлюдов, І. Ш., Жарікова, І. В., Бронніков, А. І., & Стрілець, Р. Є. (2025). Розробка методу контролю виробів під час фотополімерного 3D-друку. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies,

4(1 (136), 42–54. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.335706

8. Масючок О. П., Юрженко М. В., Колісник Р. В. та ін. Адитивні технології полімерних матеріалів (огляд) // Автоматичне зварювання. – 2020. – https://patonpublishinghouse.com/as/pdf/2020/pdfarticles/05/10.pdf

9. Манжілевський О. Д., Іскович-Лотоцький Р. Д. Сучасні адитивні технології 3D друку. Особливості практичного застосування : навчальний посібник. – Вінниця : ВНТУ, 2021.
https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/IRVC/2021/Manzhilev_2021_105.pdf

10. Nevlyudov I., Razumov-Frizyuk E., Nikitin D., et al. (2023). Practical results of the study of photopolymer exposure of printed circuit board topology. Information systems in project and program management: Collective monograph edited by I. Linde. European University Press. Riga: ISMA. P. 262–280. ISBN 978-9984-891-22-4. https://doi.org/10.30837/MMP.2023.262

11. І.Ш. Невлюдов, Є.А. Разумов-Фризюк, Д.О. Нікітін, Р.Є. Стрілець. (2025). Контроль якості фотополімерного 3D-друку. Харків: ХНУРЕ, 2025. – 208 с. ISBN: 978-617-8332-79-2: https://doi.org/10.30837/978-617-8332-79-2

12. Любченко В. П. Огляд технологій швидкого прототипування та інтеграція 3D принтерів // Вісник інженерної академії. – 2021.

13. Демків Т. В. Покращення внутрішньої структури деталей, виготовлених методом адитивної технології : магістерська дисертація. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021.
https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/c777ef3e-d3ec-4f99-9951-2f1755420873/content

14. Поліщук О. С., Поліщук А. О., Лісевич С. П. та ін. Дослідження технологічних особливостей 3D-друку металами // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – 2022
https://journals.khnu.km.ua/vestnik/wp-content/uploads/2022/07/vknu-ts-2022-n3-104-110.pdf

15. Павлов В. А., Корабльов В. А. Сучасні адитивні технології: обладнання та матеріали : навчальний посібник. – Дніпро : НТУ «ДП», 2020.
https://lib.iitta.gov.ua/id/eprint/749478/1/steam-

osvita%2020_26%20%D1%82%D1%80%D0%B0%D0%B2%D0%BD%D1%8F%202026.pdf

16. Bose S., Akdogan E. K., Balla V. K. et al. 3D printing of ceramics: Advantages, challenges, applications, and perspectives // Journal of the American Ceramic Society. – 2024. – Vol. 107. – P. 7885–7921.
https://zenodo.org/records/14284515

17. Cárdenas Correa E. F., Torres Barahona E. A., Carda Castelló J. B. Additive Manufacturing of Ceramic Materials via Direct Ink Writing (DIW): A Review // Ceramics.
https://www.mdpi.com/2571-6131/9/2/16

18. Теорія автоматичного управління. Нелінійні та дискретні системи: Навчальний посібник [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології», освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології кібер-енергетичних систем»; уклад.: О. Й. Штіфзон, П. В. Новіков. – Електронні текстові дані . – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 98 с.

19. 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. https://catalogue.nure.ua/knmz/

20. Мельніков, С. В. Архітектура Веб-додатків: фронтенд та бекенд як складові інформаційної системи / С. В. Мельніков // Автоматизація та Приладобудування («Automation and Development of Electronic Devices» ADED-2026) [Електронний ресурс] : збірник студентських наукових статей / Харківський національний університет радіоелектроніки; [редкол.: І.Ш. Невлюдов та ін.]. – Харків : ХНУРЕ, 2026. – Вип. 1. – pp. 63-69.