


КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

Розробка 3D принтера з додатковими
функціями

Галузь знань 14 Електрична інженерія
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітня програма Електропобутова техніка

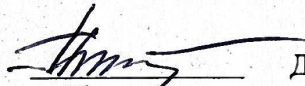
Шифр МРМА 25.00.00.000 ПЗ

Виконав студент
2 курсу група ЕТмз-24


Підпис

Ковальчук Ю.В.
Ініціали, прізвище

Керівник


Підпис, дата


д.т.н., проф. Білий Л.А.
Ініціали, прізвище

Нормоконтролер


Підпис, дата

к.т.н., доц. Тимошук О.Т.
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:
Зав. кафедри МАЕЕС


Підпис, дата

к.т.н., доц. Неймак В.С.
Ініціали, прізвище

10 12 2025 р.

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем
Освітній рівень магістр
Галузь знань 14 Електрична інженерія
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
Освітня програма Електропобутова техніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МАЕЕС

к.т.н., доц. Гейман В. С.

Гейман В. С. 12 .2025 р.

ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Ковальчук Юрій Володимирович

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи **Розробка 3D принтера з додатковими функціями**

Керівник роботи **Білий Леонід Адамович, д.т.н., професор**

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом ректора університету від 25 08 2025 р. № 65

2. Строк подання студентом роботи на кафедру 10.12.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: технологія отримання об'ємних деталей за допомогою 3D друку, параметри 3D друку, класифікація принтерів для 3D друку, елементи автоматики для 3D друку.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Огляд та аналіз технологій 3D друку та конструкцій 3D-принтерів

2. Проектування пристрою автоматичного вилучення виробів з 3D-принтера

3. Перевірка працездатності та надійності конструкції пристрою автоматичного вилучення виробів з 3D-принтера

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)
 Аркуш 1. Технологічний процес 3D-друку. Документ технологічний (A1).
 Аркуш 2. Класифікація 3D-принтерів. Документ оглядовий (A1).
 Аркуш 3. Схема алгоритму роботи пристрою по автоматичному видаленню
 деталей. Документ ілюстраційний (A1). Аркуш 4. Підключення пристрою
 автоматичного вилучення виробів з 3D-принтера. Схема підключення
 (A1). Аркуш 5. Основні деталі пристрою для автоматичного видалення
 деталей. Деталювання (A1). Аркуш 6. Пристрій автоматичного вилучення
 виробів з 3D-принтера. Вид загальний (A1). Аркуш 7. 3D-принтер
 пристроєм автоматичного вилучення виробів. Вид загальний (A1).

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

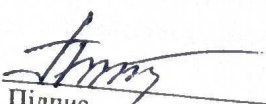
Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1. Огляд та аналіз технологій 3D друку та конструкцій 3D-принтерів	05.09.25р.	
2. Проектування пристрою автоматично- го вилучення виробів з 3D-принтера	20.10.25р.	
3. Перевірка працездатності та надійності конструкції пристрою автоматичного ви- лучення виробів з 3D-принтера	20.11.25р.	

Студент


Підпис

Ковальчук Ю.В.
Ініціали, прізвище

Керівник роботи


Підпис

Білий Л.А.
Ініціали, прізвище

АНОТАЦІЯ

до магістерської роботи студента
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
освітньої програми Електропобутова техніка

1. Прізвище, ім'я та по батькові Ковальчук Юрій Володимирович
2. Тема магістерської роботи Розробка 3D принтера з додатковими функціями
3. Прізвище, ініціали, вчена ступінь та звання рецензента _____
4. Об'єм магістерської роботи: креслень _____ арк., сторінок записки _____
5. Ця робота присвячена розробці 3D принтера з додатковими функціями

У роботі описується технологічний процес 3D друку, види принтерів та етапи проектування 3D принтера з додатковими функціями.

У першому розділі виконано огляд сучасних технологій 3D-друку. Розглянуто фізичні основи формування виробу, процес екструзії філаменту та фактори, що впливають на якість друку. Також проаналізовано кінематичні схеми 3D-принтерів, зокрема способи переміщення екструдера, столу та напрямних.

У другому розділі здійснено проектування пристрою автоматичного вилучення виробів 3D друку. Запропоновано принцип роботи пристрою, який базується на поєднанні лінійного приводу, крокового двигуна та механічного маніпулятора зі скребками для зняття готових виробів 3D друку. Виконано кінематичний розрахунок руху маніпулятора, розрахунок необхідного зусилля для відділення деталі від платформи. Здійснено також підбір електромеханічних компонентів для підключення лінійного приводу, крокового двигуна та механічного маніпулятора до загальної системи 3D принтера. Розроблено конструкцію пристрою спроектовано в середовищі з урахуванням вимог адитивного виробництва.

У третьому розділі виконано розрахунки, що підтверджують працездатність та надійність запропонованої конструкції. Зокрема проведено розрахунок міцності та жорсткості основних елементів маніпулятора, аналіз стійкості конструкції при циклічних навантаженнях, а також розглянуто питання безпеки та екологічності пристрою.

Підпис студента 

« 10 » 12 20 25 р.

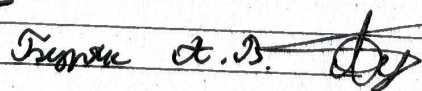
РІШЕННЯ ЕК

Протокол 6 від « 30 » 12 20 25 р.

Оцінка проекту ЕК Відмінно / 11 / 100

Рекомендації ЕК Впровадження з технологічним процесом


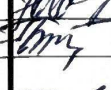

Особливі відмітки -

Технічний секретар 

« 30 » 12 20 25 р.

ЗМІСТ

Вступ	6
1 Огляд та аналіз технологій 3D-друку та конструкцій 3D-принтерів...	7
1.1 Сучасні технології 3D-друку та класифікація адитивних технологій...	7
1.2 Процес формування виробу в FDM-принтерах	9
1.3 Огляд та аналіз кінематичних схем та конструкцій 3D-принтерів	10
1.4 Аналіз існуючих рішень автоматичного вилучення виробів	20
2 Проектування пристрою автоматичного вилучення виробів з 3D-принтера	25
2.1 Загальна концепція та принцип роботи пристрою	25
2.2 Вибір елементної бази пристрою	31
2.3 Кінематичний розрахунок руки-маніпулятора пристрою	36
2.4 Проектування елементів механізму в SolidWorks	42
2.5 Складання пристрою та інтеграція з 3D-принтером	46
3 Перевірка працездатності та надійності конструкції пристрою автоматичного вилучення виробів з 3D-принтера	57
3.1 Розрахунок міцності елементів конструкції	57
3.2 Розрахунок стійкості та жорсткості механізму	63
3.3 Оцінка надійності та ресурсу роботи пристрою.....	66
Висновки	70
Перелік джерел посилань.....	71
Додатки	73

МРМА 25.00.00.000 ПЗ					
Зм.	Арк.	Недокум.	Підпис	Дата	
Виконав		Ковальчук			Розробка 3D принтера з додатковими функціями
Перевір.		Білий			
Затвер.		Неймак			Літера
					v
					Аркуш
					5
					Аркушів
					ХНУ, ЕТМЗ-24

ВСТУП

Сьогоднішній етап розвитку промисловості та інженерії характеризується активним упровадженням адитивних технологій, які суттєво змінюють підходи до проектування, виготовлення та прототипування виробів. 3D-друк набув широкого застосування у машинобудуванні, енергетиці, приладобудуванні, медицині, авіаційній та автомобільній промисловості, а також у сфері освіти та наукових досліджень. Однією з найбільш поширених і доступних технологій адитивного виробництва є технологія пошарового наплавлення термопластичних матеріалів (FDM — Fused Deposition Modeling).

Незважаючи на стрімкий розвиток конструкцій 3D-принтерів та зростання рівня їх автоматизації, більшість наявних моделей потребують участі оператора на завершальному етапі процесу друку, зокрема під час вилучення готових виробів із робочої платформи. Це обмежує можливості безперервної роботи обладнання, знижує продуктивність та ускладнює інтеграцію 3D-принтерів у автоматизовані виробничі лінії. Особливо актуальною ця проблема є для серійного виготовлення дрібних деталей, навчальних та науково-дослідних лабораторій, де важливими є автономність, повторюваність процесів і зменшення впливу людського фактора.

У зв'язку з цим актуальним є завдання розробки 3D-принтера з додатковими функціями, зокрема з пристроєм автоматичного вилучення надрукованих виробів. Застосування таких рішень дає змогу підвищити рівень автоматизації процесу 3D-друку, забезпечити безперервний цикл роботи обладнання, зменшити час простою та підвищити загальну ефективність використання адитивних технологій.

Метою даної магістрської роботи є розробка конструкції 3D-принтера з пристроєм автоматичного вилучення виробів, а також перевірка працездатності та надійності запропонованого технічного рішення. Для досягнення поставле-

ної мети в роботі необхідно вирішити ряд завдань, зокрема провести аналіз сучасних технологій 3D-друку та конструкцій 3D-принтерів, дослідити існуючі рішення автоматичного вилучення виробів, розробити конструкцію пристрою автоматичного вилучення з використанням руки-маніпулятора, виконати кінематичні та міцнісні розрахунки, а також оцінити надійність і ресурс роботи розробленого механізму.

Об'єктом дослідження є процес адитивного виготовлення виробів за технологією FDM.

Предметом дослідження є конструкція та принцип роботи пристрою автоматичного вилучення виробів з 3D-принтера.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання розробленої конструкції 3D-принтера з додатковими функціями в навчальних лабораторіях, науково-дослідних установах та малосерійному виробництві з метою підвищення ступеня автоматизації та ефективності процесу 3D-друку.

					MPMA 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						6
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ 3D-ДРУКУ ТА КОНСТРУКЦІЙ 3D-ПРИНТЕРІВ

1.1 Сучасні технології 3D-друку та класифікація адитивних технологій

Адитивне виробництво або 3D-друк, є сучасним методом виготовлення виробів шляхом пошарового формування об'єкта на основі цифрової тривимірної моделі. На відміну від традиційних субтрактивних методів обробки, адитивні технології передбачають додавання матеріалу лише в необхідних зонах, що забезпечує зменшення відходів, скорочення виробничих витрат та можливість виготовлення деталей складної геометричної форми.

Процес 3D-друку, як правило, включає такі етапи: створення 3D-моделі в системі автоматизованого проєктування (CAD), підготовку моделі до друку шляхом її нарізання на шари за допомогою програмного забезпечення (slicer), формування керуючого коду та безпосереднє пошарове виготовлення виробу на 3D-принтері.

Сучасні адитивні технології класифікуються за способом формування шару, видом використовуваного матеріалу та принципом роботи обладнання.

Найбільш поширеною є екструзійна технологія FDM (Fused Deposition Modeling), яка полягає у видавлюванні розплавленого термопластичного матеріалу через сопло екструдера з подальшим його пошаровим нанесенням на друкарську платформу. Дана технологія широко використовується в побутових і навчальних 3D-принтерах завдяки простоті конструкції, доступності матеріалів та відносно низькій вартості обладнання.

Фотополімерні технології, зокрема стереолітографія (SLA), базуються на полімеризації рідких фотополімерів під дією лазерного випромінювання або ультрафіолетового світла. Такі технології забезпечують високу точність виробництва та якість поверхні, однак потребують складнішого обладнання та подальшої постобробки виробів.

					MPMA 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

До порошкових адитивних технологій припадають селективне лазерне спікання (SLS) та селективна лазерна плавка (SLM). У цих методах формування виробу здійснюється шляхом локального спікання або плавлення порошкоподібного матеріалу лазерним променем. Дані технології застосовуються переважно в промисловості для виготовлення функціональних деталей із полімерних або металевих матеріалів.

Окрім зазначених методів, також використовуються технології струминного нанесення матеріалу (Material Jetting), зв'язувального струминного друку (Binder Jetting) та цифрової світлової обробки (DLP), які мають вузькоспеціалізоване застосування.

Адитивні технології знайшли велике застосування в різних галузях промисловості та суспільної діяльності. Спочатку 3D-друк використовувався переважно для швидкого прототипування в аерокосмічній та автомобільній промисловості, однак з розвитком обладнання і матеріалів його застосування значно розширилося. Нині адитивне виробництво активно використовується в архітектурі й будівництві, медицині, освіті, а також у виробництві споживчих товарів.

Основними перевагами 3D-друку є висока швидкість виготовлення прототипів, свобода проектування складних геометричних форм, зменшення матеріальних відходів і можливість індивідуалізації виробів. Водночас адитивні технології мають низку обмежень, зокрема відносно високу ціну обладнання, обмежений відбір матеріалів, нижчу продуктивність у порівнянні з масовими методами виробництва та певні обмеження за точністю й габаритами виробів. Тому 3D-друк є найбільш ефективним для прототипування, дрібносерійного та індивідуального виробництва.

З урахуванням тематики кваліфікаційної роботи найбільший інтерес становить технологія FDM, оскільки саме вона є основою для більшості побутових 3D-принтерів і дозволяє реалізувати додаткові функції, зокрема автоматичне вилучення надрукованих виробів без втручання оператора.

					MPMA 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

1.2 Процес формування виробу в FDM-принтерах

Формування виробу в 3D-принтерах, що роблять за технологією FDM, здійснюється шляхом пошарового наплавлення розплавленого термопластичного матеріалу. Технологічний процес роботи 3D принтера показаний на рисунку 1.1 та у графічній частині роботи [МРМА 25.00.00.000 ДТ].

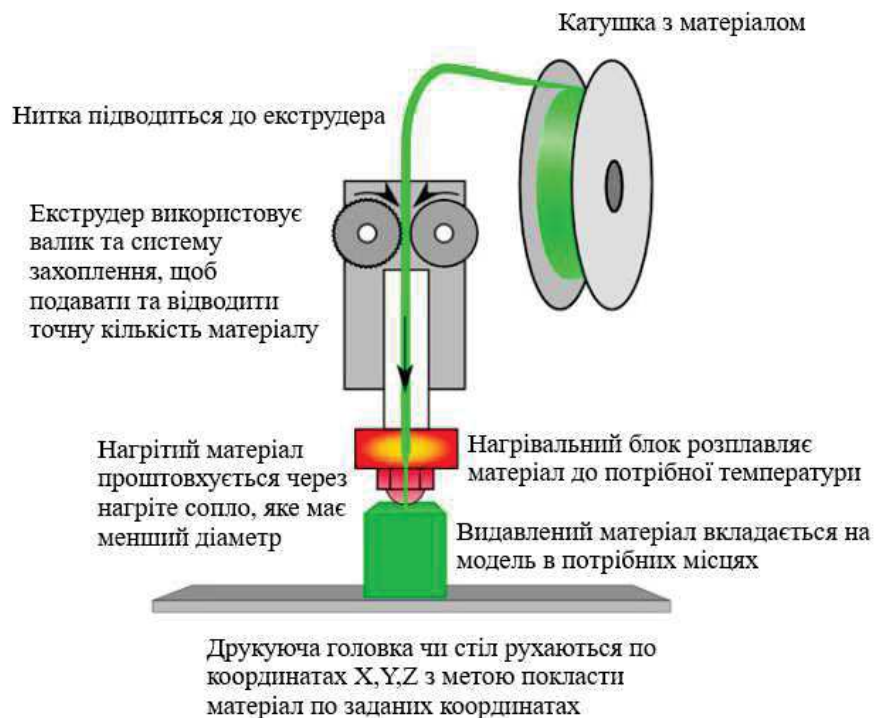


Рисунок 1.1 - Технологічний процес роботи 3D принтера

Вихідною сировиною є полімерний філамент, який подається до екструдера за допомогою подаючого механізму.

У хотенді філамент нагрівається до температури плавлення, після чого у в'язкотекучому стані видавлюється через сопло малого діаметра та наноситься на робочу платформу або на попередньо сформований шар матеріалу. Кожен новий шар матеріалу з'єднується з попереднім за рахунок термічної адгезії, утворюючи суцільну об'ємну конструкцію.

У процесі 3D-друку об'єкт формується поступово, шар за шаром, шляхом нанесення визначених порцій матеріалу. Друкувальна головка переміщується у

площині координат X – Y , забезпечуючи формування кожного шару відповідно до заданого контуру. Після завершення шару робоча платформа або друкувальний вузол зміщується вздовж осі Z , що дозволяє розпочати створення наступного рівня виробу. Траєкторія руху каретки принтера показаний на рисунку 1.2 та у графічній частині роботи [МРМА 25.00.00.000 ДТ].

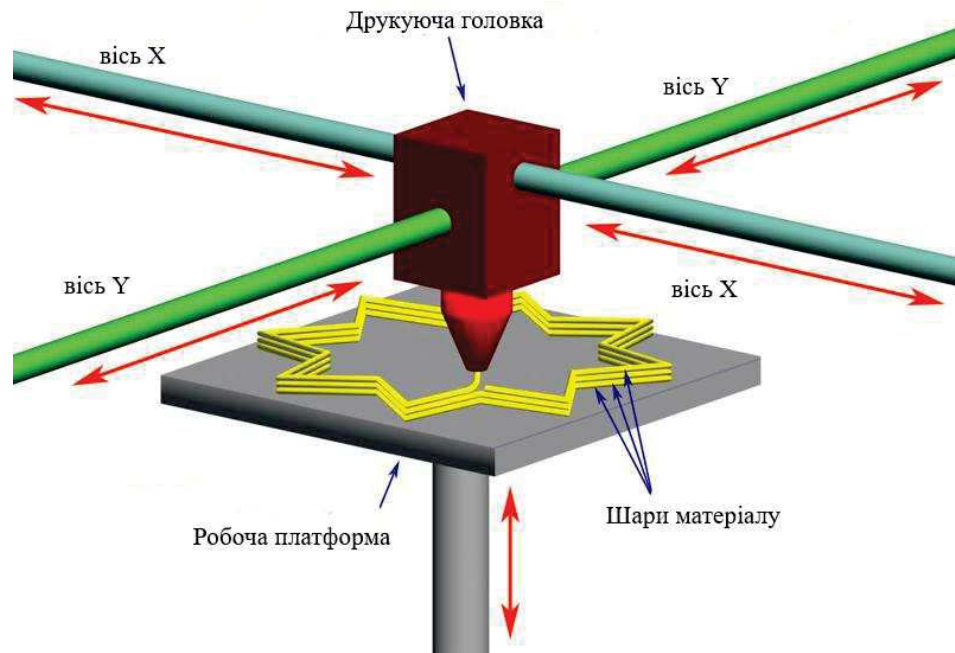


Рисунок 1.2 - Траєкторія руху каретки принтера

Геометрія виробу, товщина шарів, швидкість друку та температурні режими визначаються параметрами, заданими у керуючій програмі, сформованій на основі тривимірної цифрової моделі. По завершенні процесу друку виріб охолоджується та відокремлюється від робочої платформи.

1.3 Огляд та аналіз кінематичних схем та конструкцій 3D-принтерів

Конструкція 3D-принтера є одним із істотних чинників, які впливають на якість, швидкість і стабільність процесу адитивного виготовлення. Основою будь-якого 3D-принтера є його кінематична схема, яка визначає спосіб пере-

міщення друкувальної головки, робочої платформи або їх комбінації у просторі відповідно до заданої програми.

У процесі тривимірного друку формування виробу здійснюється пошаровим способом шляхом точного позиціонування екструдера у координатах X, Y та Z. Рух друкувальної головки або столу реалізується за допомогою крокових двигунів, ремінних, гвинтових або важільних механізмів, що формують різні типи кінематики 3D-принтерів. Вибір кінематичної схеми безпосередньо впливає на інерційні навантаження, точність позиціонування, рівень вібрацій та складність керування. На сьогодні є два основних види кінематики 3D принтерів – це декартова кінематика (рис.1.3, а) та Delta-кінематика (рис.1.3, б) та їх підвиди. Види кінематичних схем роботи принтерів показано на рисунку 1.3 та у графічній частині роботи [МРМА 25.00.00.000 ДО].

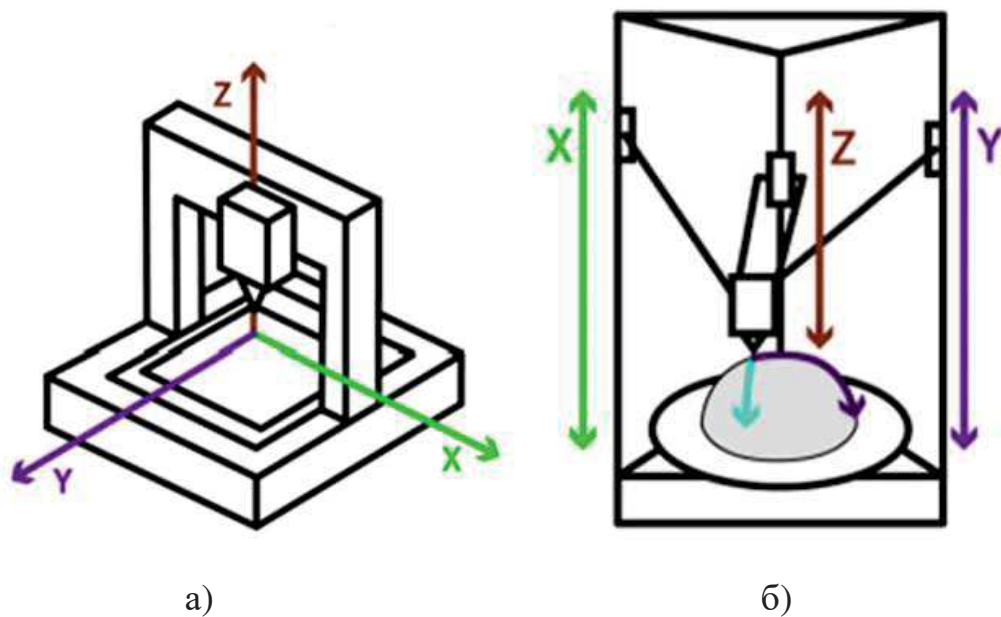


Рисунок 1.3 - Основні види кінематики 3D принтерів: а - декартова кінематика; б - Delta-кінематика

Залежно від організації руху основних вузлів у FDM/FFF-принтерах застосовуються такі принципи керування:

- переміщення лише друкувальної головки;
- переміщення лише робочого столу;
- узгоджене переміщення як друкувальної головки, так і платформи.

Найбільшого поширення набули принтери з декартовою системою координат, до яких належать порталні Cartesian-схеми, а також модифіковані варіанти CoreXY, H-Bot, Ultimaker та Delta.

Декартові 3D-принтери реалізують рух по трьох взаємно перпендикулярних осях X, Y та Z. Найпоширенішою реалізацією є схема Prusa i3, у якій екструдер переміщується по осях X та Z, а стіл - по осі Y. Дана конструкція відзначається простотою складання, низькою вартістю та зручністю обслуговування, що зумовило її широке застосування у побутових і навчальних 3D-принтерах. Разом з тим рухомий стіл створює значні інерційні навантаження, що негативно впливають на якість друку при високих швидкостях та великих габаритах виробів. Це обмежує застосування Cartesian-кінематики у високошвидкісних і промислових системах [2,3].

Кінематика H-Bot. Система H-Bot базується на використанні одного замкнутого ремня, який передає рух від двох крокових двигунів до порталу з екструдером (рис.1.4). Напрямок і швидкість обертання двигунів визначають переміщення каретки по осях X та Y [2,3].

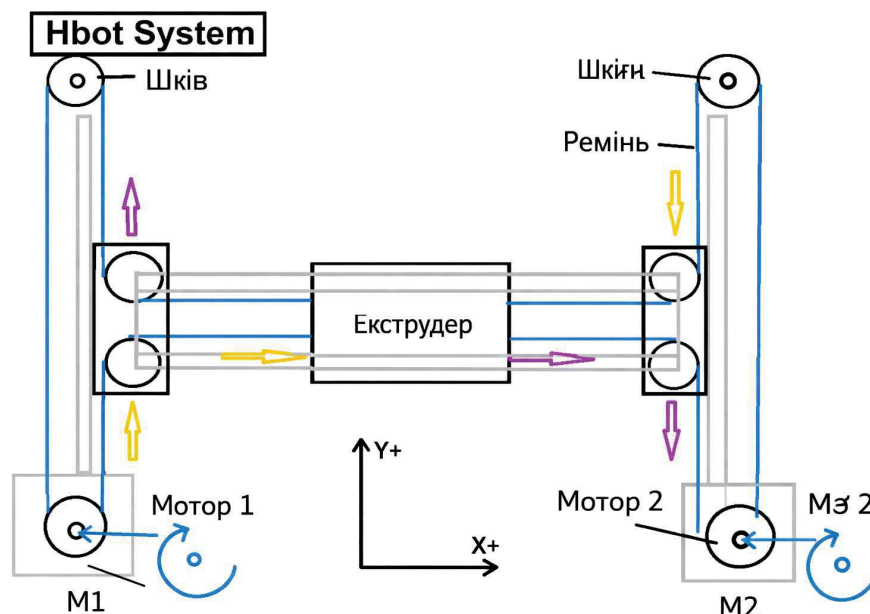


Рисунок 1.4 - Декартова кінематика H-Bot

Перевагою даної схеми є мала маса рухомого порталу та відносно проста конструкція. Проте істотним недоліком H-Vot є виникнення крутного моменту на рамі, що призводить до вібрацій і потребує використання жорсткого та масивного каркаса.

Кінематика CoreXY. Кінематична схема CoreXY є розвитком і вдосконаленням H-Vot (рис.1.5). У цій системі використовуються два перехресні ремені, що дозволяє компенсувати паразитні крутні моменти та зменшити деформації порталу [2,3].

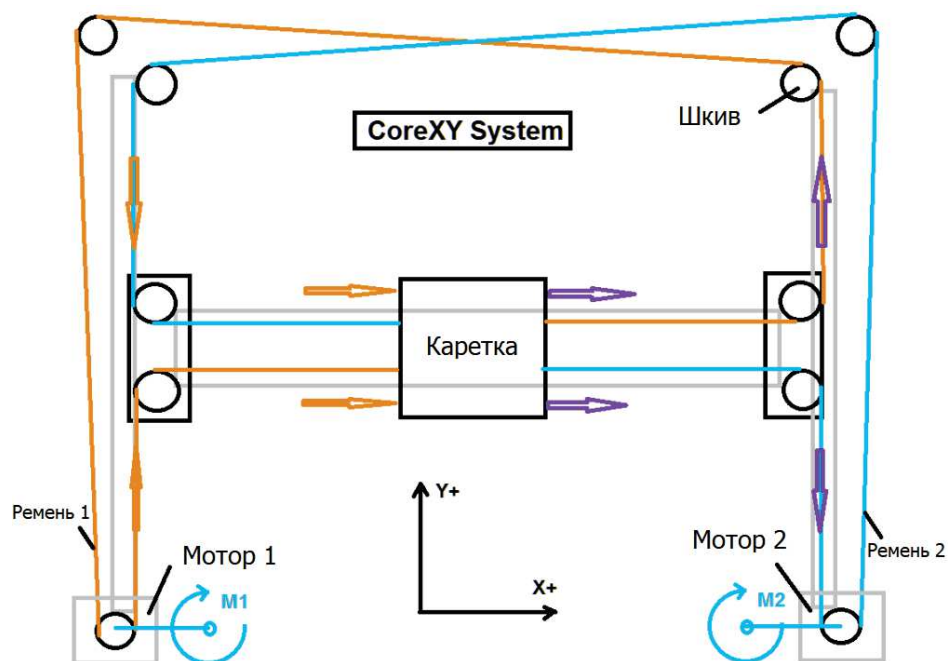


Рисунок 1.5 - Декартова кінематика CoreXY

Система CoreXY забезпечує високу точність позиціонування, зниження вібрацій і можливість роботи на підвищених швидкостях. Разом з тим вона характеризується складнішою реалізацією, більшими вимогами до керуючої електроніки та точності монтажу [2,3].

Кінематика Ultimaker. Кінематика типу Ultimaker поєднує в собі низьку масу рухомих елементів і високу стабільність (рис. 1.6). Переміщення порталу здійснюється за допомогою системи лінійних валів, які одночасно виконують

обертальний і поступальний рух.

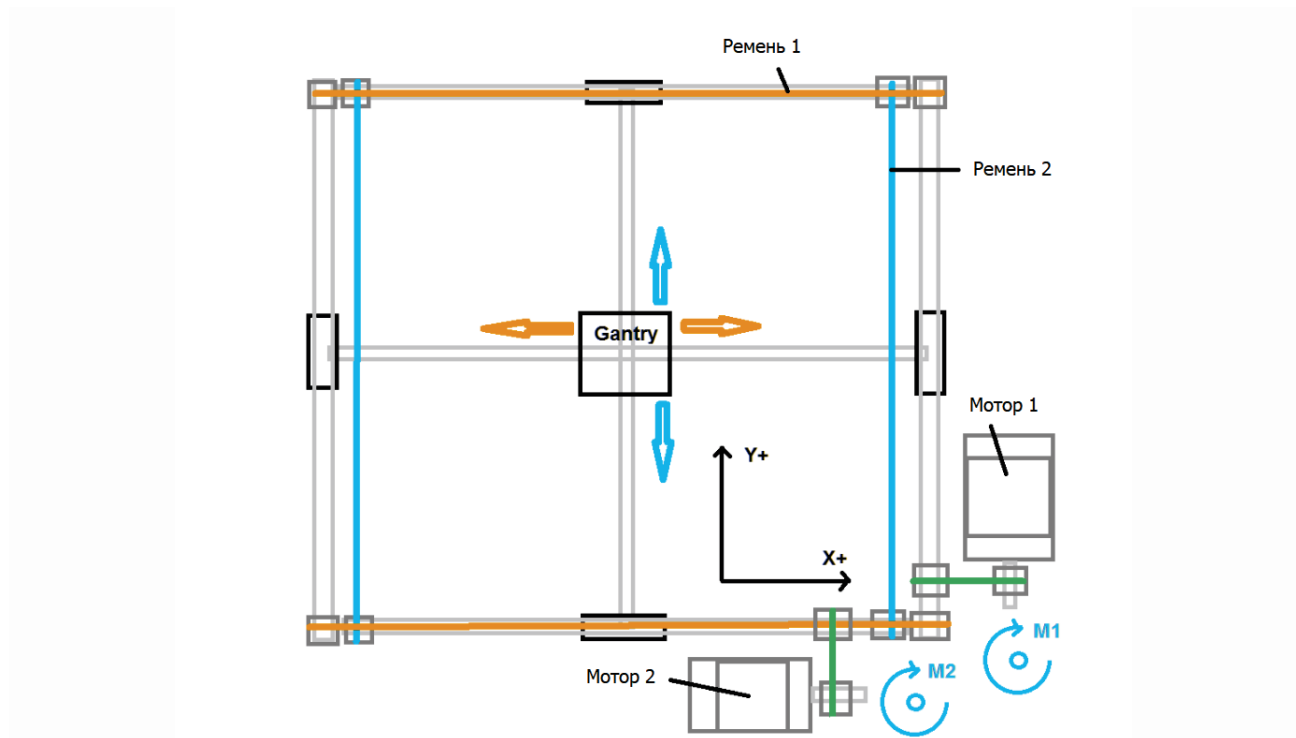


Рисунок 1.6 - Декартова кінематика Ultimaker

Дана схема забезпечує високу якість друку та практично повну відсутність вібрацій, однак є складною в обслуговуванні та виставляє підвищені вимоги до точності виробництва механічних компонентів [2,3].

Delta-кінематика. Delta-принтери реалізують інший принцип переміщення друкувальної головки. Екструдер закріплений на системі з трьох важелів, які з'єднані з вертикальними напрямними (рис. 1.7). Кожен важіль переміщується незалежним кроковим двигуном уздовж осі Z, а координатне позиціонування у площині X–Y досягається за рахунок узгодженого руху всіх трьох приводів [2,3].

Основними перевагами Delta-кінематики є висока швидкість друку, мала маса рухомих частин і можливість виготовлення високих моделей невеликого поперечного перерізу. Недоліками є складність математичної моделі керування, підвищені вимоги до калібрування та обмежена ремонтпридатність [2,3].

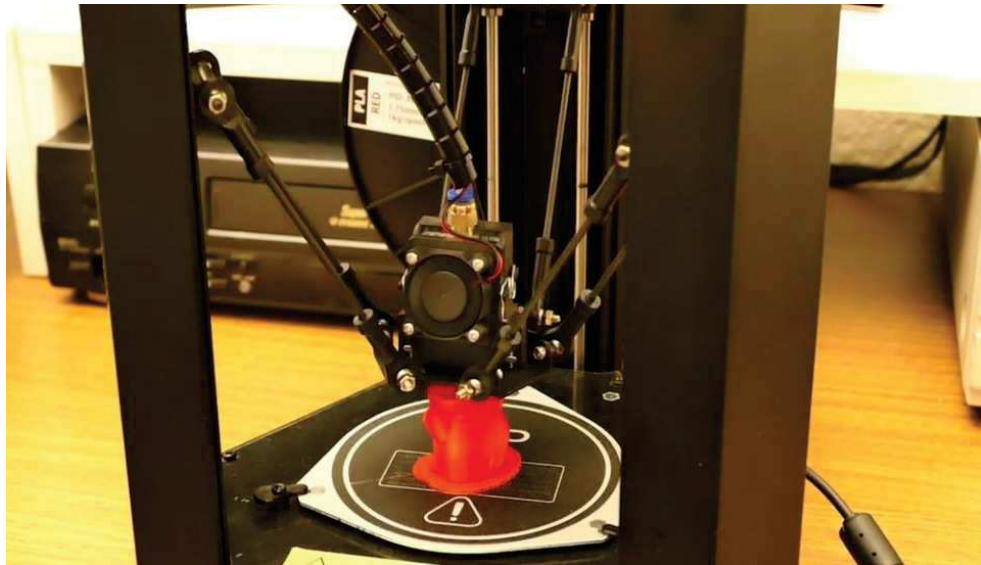


Рисунок 1.7 - Delta-кінематика

Таким чином, аналіз кінематичних схем 3D-принтерів показує, що характер переміщення робочих органів безпосередньо залежить від застосованої адитивної технології. Для принтерів, що працюють за технологією FFF/FDM, найбільш поширеними є декартові та дельта-кінематичні схеми, які забезпечують переміщення екструдера або робочої платформи по осях X, Y та Z та формують відповідну геометрію робочої зони. Інші технології 3D-друку, зокрема SLA та SLS, мають відмінні принципи формування виробу, що зумовлює інше конструктивне виконання та вимоги до механічної частини обладнання. У зв'язку з цим подальший розгляд конструкцій 3D-принтерів доцільно зосередити на аналізі загального вигляду та конструктивних особливостей FDM/FFF-принтерів як найбільш поширених і технологічно придатних для інтеграції додаткових функцій, зокрема систем автоматичного вилучення надрукованих виробів.

Принтери, що працюють за технологією FFF (Fused Filament Fabrication), формують тривимірні вироби шляхом екструзії розплавленого термопластичного матеріалу через сопло друкувальної головки (рис. 1.8).

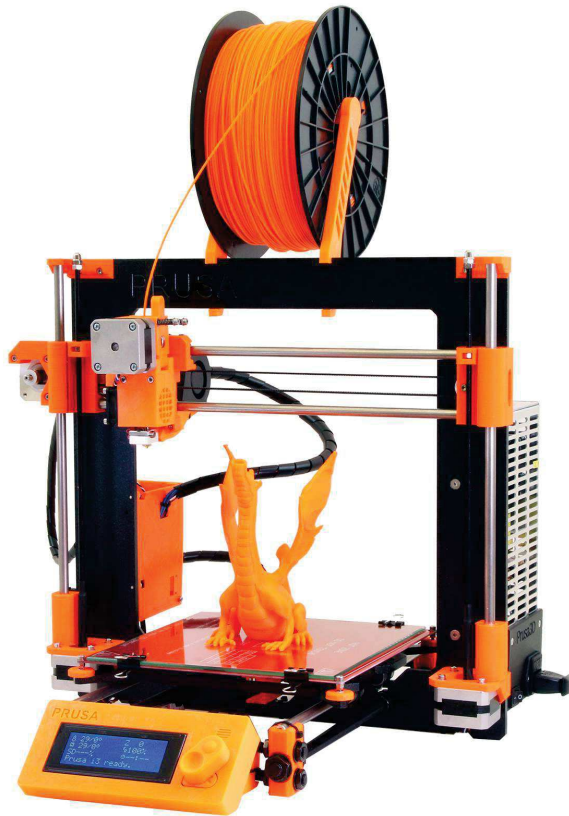


Рисунок 1.8 – Загальний вигляд 3D принтерів типу FDM Prusa i3

У порівнянні з іншими адитивними технологіями, FFF-принтери характеризуються відносною простотою експлуатації, що зумовлено відсутністю складних оптичних систем та зниженими вимогами до засобів безпеки під час роботи. У декартових 3D-принтерах типу FFF переміщення екструдера або робочої платформи здійснюється вздовж взаємно перпендикулярних осей X, Y та Z. У промислових системах компанії Stratasys для аналогічного процесу використовується позначення FDM (Fused Deposition Modeling) [3].

Іншим різновидом FFF-принтерів є дельта-кінематичні системи, до яких належить 3D-принтер Fisher Delta RepRap. У таких пристроях переміщення друкувальної головки реалізується за допомогою трьох вертикально розташованих кареток, з'єднаних з ефектором паралельними важелями (рис. 1.9).

Застосування дельта-кінематики забезпечує підвищену швидкість переміщення друкувальної головки та плавність її траєкторій, що позитивно впливає на якість поверхні надрукованих виробів. Робоча зона таких принтерів має

форму циліндра з конічною вершиною, що суттєво відрізняється від кубоїдної області побудови декартових систем.



Рисунок 1.9 – Загальний вигляд 3D-принтера Fisher Delta RepRap

Fisher Delta RepRap належить до відкритих RepRap-проектів, що дозволяє здійснювати модифікацію конструкції та програмного забезпечення з метою використання у навчальних та експериментальних цілях. Водночас підвищена складність кінематичних розрахунків і процедур калібрування обмежує доцільність застосування дельта-принтерів у системах з додатковими автоматизованими функціями.

Технологія стереолітографії (SLA) базується на вибіркового затвердінні фотополімерної рідини під дією світлового випромінювання (рис. 1.10).

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

MPMA 25.00.00.000 ПЗ

Арк.

17



Рисунок 1.10 – Загальний вигляд 3D-принтер Formlabs Form2 типу SLA

На відміну від FFF-принтерів, тривалість процесу друку в SLA-системах визначається переважно висотою виробу, а не кількістю або складністю об'єктів у площині X–Y, що дозволяє ефективно використовувати всю площу робочої платформи без впливу на час друку. Більшість SLA-принтерів здійснюють формування виробу у перевернутому положенні, що має незначний вплив на якість готового виробу. Разом з тим SLA-обладнання характеризується підвищеними вимогами до експлуатації та післяобробки надрукованих деталей [3].

Селективне лазерне спікання (SLS) є адитивною технологією, що ґрунтується на пошаровому сплавленні порошкоподібних матеріалів за допомогою лазерного випромінювання (рис. 1.11). У процесі друку делікатний шар порошку рівномірно наноситься на робочу платформу, після чого лазер вибірково спікає матеріал у відповідності до поперечного перерізу цифрової моделі [3].



Рисунок 1.11 – Загальний вигляд 3D принтера типу SLS

Після завершення формування шару виробу, платформа опускається та наноситься наступний шар порошку і процес знову повторюється до абсолютного виготовлення виробу. SLS-принтер складається з робочої камери з контрольованою температурою, системи подачі та вирівнювання порошку, лазерного випромінювача з оптичною системою сканування та механізму переміщення платформи. Особливістю SLS-технології є відсутність необхідності у додаткових опорних конструкціях, оскільки незаспечений порошок виконує функцію підтримки виробу, що дозволяє виготовляти деталі складної геометрії з високою механічною міцністю [3].

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

МРМА 25.00.00.000 ПЗ

Арк.
19

1.4 Аналіз існуючих рішень автоматичного вилучення виробів

Зростання вимог до безперервності та автономності процесу 3D-друку зумовлює необхідність мінімізації участі оператора на завершальному етапі виготовлення виробів. У зв'язку з цим, виняткового значення набувають автоматизовані системи видалення надрукованих виробів з робочої платформи 3D-принтера, що дозволяють підвищити продуктивність обладнання та забезпечити можливість його інтеграції в автоматизовані виробничі комплекси.

Гнучкі (пружинні) змінні платформи «flex plate». Принцип роботи таких систем наступний. Друк виконується на пружинній сталевій пластині (часто з PEI), яка кріпиться магнітом. Після завершення пластину знімають і згинають, а деталь відпадає. Це рішення не завжди «повністю автоматичне», але є базою для автоматизації (маніпулятор може знімати/ставити пластину, або механіка може згинати її). Опис типових листів є в довідці Prusa (flex sheets) [6].

Типова автоматизація полягає у застосуванні: механізму «вигину» платформи важелем/ексцентриком; «підхоплення» платформи та заміна на чисту (plate swapping).

Переваги: швидке та акуратне зняття, низький ризик поломки деталі, невисока вартість апгрейду. Недоліки: сама по собі система не «автомат», потребує дій оператора або додаткової механізації (згин/заміну).

Конвеєрний стіл (belt printer) - «нескінченний Z» і самоскидання. Принцип роботи такої системи наступна: замість жорсткого столу є рухома стрічка-конвеєр (рис.1.12). Після завершення стрічка прокручується і деталь автоматично сходить із краю в лоток. Готові вироби від'єднуються при досягненні кінця стрічки. Це один із найпростіших способів отримати «потокове» виробництво без робота/скребка [7].



Рисунок 1.12 – Конвеєрний стіл (belt printer)

Переваги: безперервність, мінімум механічних вузлів «знімача», проста логістика скидання. Недоліки: специфічна кінематика/слайсинг, обмеження по геометрії (кут друку, адгезія до стрічки), вартість переходу на інший тип принтера.

Механічний знімач (скребок/лопатка/«плужок») як додатковий модуль. Суть автоматизації процесу полягає у тому, після завершення друку каретка або окремий привід переміщує лопатку, яка підлазить під край виробу й зсуває його зі столу в приймальну зону. Приклад модульного підходу 3D APR, де механізм підводиться до столу та знімає деталь. Такі рішення найчастіше розглядають як додаток до звичайних принтерів (Ender/Prusa-клас).

Переваги: можна інтегрувати у більшість FDM-принтерів як модуль; забезпечує автоматичність без повної заміни принтера; відносно доступні компоненти (кроковий двигун, лінійний привід, мікроконтролер). Недоліки: ризик пошкодження деталі або покриття столу; потрібні точні налаштування (висота лопатки, форма кромки, траєкторія); залежність від адгезії/матеріалу.

«Скидання» за рахунок керованого роз'єднання адгезії. Суть способу по-

						МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк. 21
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата			

лягає в другому: деталь відпадає не силою, а через зміну умов зчеплення: охолодження столу (особливо для матеріалів/покриттів, де адгезія різко падає після охолодження); покриття/плівки з керованою адгезією; комбінація «охолодив легко зрушення». Це часто використовується як допоміжний принцип, щоб зменшити зусилля знімача та ризик пошкодження.

Автоматична заміна/переміщення плат (plate changer / plate carousel). Суть цієї автоматизації полягає в наступному: принтер не «відриває» деталь, а змінює платформу і відпрацьована плита від'їжджає в касету, а чиста стає в робочу позицію. Приклад комерційного рішення PrintFlow3D Plate Changer (позиціонується як механічна заміна плат для багатопартійного друку) (рис.1.13). [8]

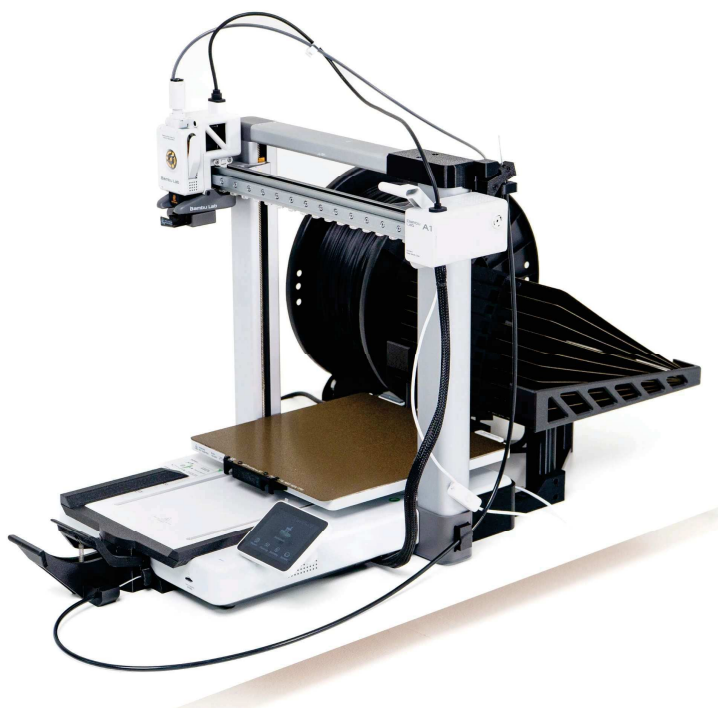


Рисунок 1.13 – Автоматична заміна (plate changer / plate carousel) 3D принтера PrintFlow3D Plate Changer

Цей підхід суттєво знижує механічні ризики для деталі, але ускладнює механіку та вимоги до геометричної повторюваності.

Переваги: дуже надійно для серійності; зменшує силовий вплив на деталі; хороша повторюваність. Недоліки: складна механіка, необхідність точної повторюваної бази/позиціонування, габарити та ціна.

Роботизований маніпулятор Dobot Magician для підтримки 3D-друку (рис. 1.14). Роборука призначена для зняття/логістики 3Д друку після завершення процесу. Суть автоматизації полягає в наступному: робот бере деталь (або платформу), переносить у лоток/на конвеєр, ставить нову платформу, натискає «старт» та виконує інші маніпулятивні функції [9].



Рисунок 1.14 – Роботизований маніпулятор Dobot Magician для підтримки 3D-друку

Найкраще працює у «фермах» принтерів, але вимагає значних витрат і налаштування системи безпеки.

Переваги: максимальна гнучкість (може знімати, сортувати, обслуговувати кілька принтерів). Недоліки: найдорожчий і найскладніший варіант; вимоги до безпеки; складність захоплення деталей різної форми.

Обґрунтування необхідності розробки додаткового пристрою автоматичного вилучення

Для типового університетського (лабораторного) FDM-принтера класу Ender/Prusa-подібних найчастіша присутня така ситуація: друк ведеться на жорсткому столі (скло/PEI/пластина), адгезія часто підвищена (клей, лак, тексту-

ровані поверхні); серійні завдання потребують мінімізації простоїв; оператор не завжди може бути поруч (нічний друк); потрібна технологічна відтворюваність та зменшення ризиків травмування при ручному відриві деталей.

Тому можна зробити висновок, що модульний додатковий пристрій (скребок/виштовхувач/знімач із власним приводом і керуванням) є компромісом між вартістю та функціональністю: на зміну від конвеєрного принтера не вимагає зміни типу обладнання; на відміну від робо-руки суттєво дешевший і простіший у впровадженні; на відміну від ручної flex-платформи може забезпечити саме автоматичність (підвід → контрольований контакт → скидання → повернення у вихідне положення).

Тобто потреба в розробці додаткового знімача обґрунтовується: необхідністю серійного друку без постійного персоналу; підвищенням безпеки та зменшенням ручних операцій; можливістю уніфікувати рішення під наявні принтери лабораторії; перспективою інтеграції з «чергою» друку та датчиками (кінцевики, датчик наявності деталі, контроль температури столу).

Висновок до розділу 1

У першому розділі виконано огляд сучасних технологій 3D-друку та проведено аналіз основних адитивних методів виготовлення виробів. Розглянуто фізичні основи формування виробу, процес екструзії філаменту та головні технологічні фактори, що впливають на якість і точність друкування. Проаналізовано кінематичні схеми 3D-принтерів, зокрема способи переміщення екструдера, робочого столу та напрямних, а також особливості формування робочої зони для різних типів кінематики принтерів. Окрему увагу приділено аналізу існуючих засобів автоматизації зняття надрукованих виробів, зокрема рішень на основі гнучких платформ, механічних скребоків, стрічкових столів та маніпуляторів, що дозволило обґрунтувати доцільність розробки пристрою автоматичного вилучення виробів для підвищення автономності та продуктивності 3D-принтера.

2 ПРОЄКТУВАННЯ ПРИСТРОЮ АВТОМАТИЧНОГО ВИЛУЧЕННЯ ВИРОБІВ З 3D-ПРИНТЕРА

2.1 Загальна концепція та принцип роботи пристрою

Додатковий пристрій автоматичного вилучення призначений для зняття надрукованих виробів зі столу FDM/FFF-принтера та їх переміщення в зону накопичення (лоток/контейнер) з мінімальним втручанням оператора. Алгоритм роботи проєктованого пристрою планується зробити наступним:

- підготовка столу/головки (паркування, охолодження/відлипання);
- механічне відокремлення виробу від платформи (скребком);
- контрольоване утримання/супровід виробу («рукою» маніпулятора);
- переміщення та скидання виробу в накопичувач;
- повернення механізмів у вихідне положення і підготовка принтера до наступного завдання.

Пристрій проєктується як модуль, який можна встановити на раму принтера або поряд зі столом без суттєвої перебудови кінематики осей X–Y–Z.

Запропонована концепція проєктування пристрою для автоматичного вилучення виробів з 3D-принтера є комбінованою, оскільки поєднує два принципи [11]:

- скребок (ніж) виконує силове відокремлення деталі від поверхні столу, тобто долає адгезію першого шару або «підрізає» край виробу.

- рука-маніпулятор забезпечує кероване поводження з виробом після відриву: утримує, страхує від перекидання чи удару, спрямовує в лоток, інколи виконує функцію «дотиску» в момент відділення, щоб виріб не підчепився за сопло чи не полетів у випадковому напрямку.

Це дає ключову перевагу: скребок працює з малим контактом, а маніпулятор бере на себе стабілізацію та логістику виробу. У підсумку знижується ризик: пошкодження виробу під час зсуву; подряпин покриття столу; заклинювання деталі між скребком і соплом; «хаотичного падіння» виробу.

					MPMA 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						25
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Принцип роботи пристрою і технологічний цикл (алгоритм) можна описати у вигляді блок-схеми керування і виокремити окремі технологічні операції. Послідовність технологічного циклу (алгоритму) показано на рисунках 2.1-2.6 та у графічній частині роботи [МРМА 25.00.00.000 ДТ].

Етап 0. Умови запуску циклу автоматичного вилучення 3D деталей після друку. Цикл автоматичного вилучення запускається лише за виконання умов безпеки: друк завершено (сигнал Print End); сопло відпаркували у безпечну зону (наприклад, край столу або в «паркінг»); стіл піднято на безпечну висоту Z (щоб уникнути ударів); температура столу знижена до рівня, коли адгезія менша (опціонально); робоча зона не заблокована, дверцята/екран безпеки закриті.

Етап 1. Позиціонування вузлів (рис. 2.1.)

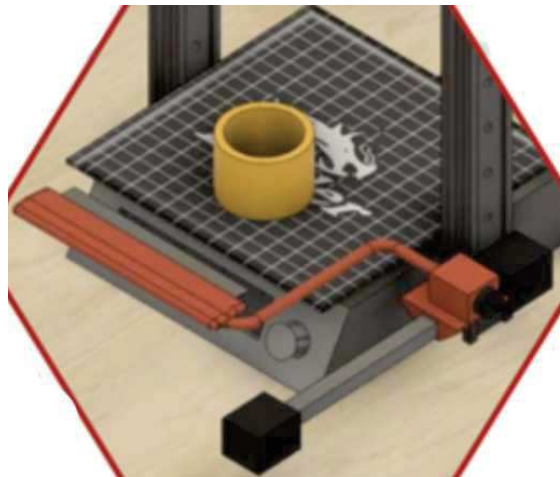


Рисунок 2.1 – Пристрій знаходиться у положенні спокою

Каретка (головка) принтера від'їжджає в «паркінг». Скребок переходить у стартову позицію біля передньої кромки столу. Маніпуляторна «рука» переходить у позицію очікування над виробом (або збоку) на безпечній відстані.

Етап 2. Виявлення деталі та уточнення траєкторії (рис. 2.2-2.4).

Для підвищення надійності система використовує: датчик кінцевого положення скребка/маніпулятора; простий датчик присутності виробу (індуктивний); «карту розташування» деталі з G-коду (координати габаритів друку).

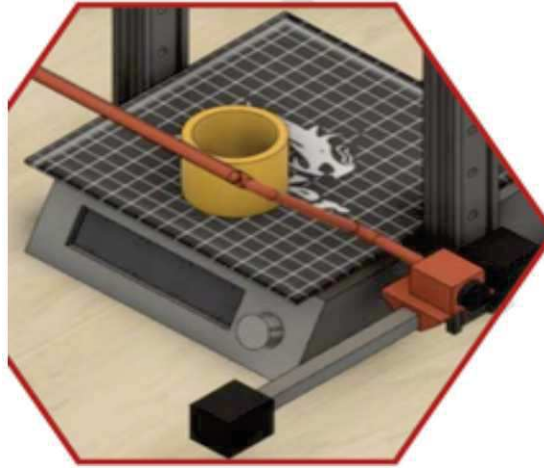


Рисунок 2.2 – Пристрій знаходиться у положення обертання для екстракції (видалення) виробу

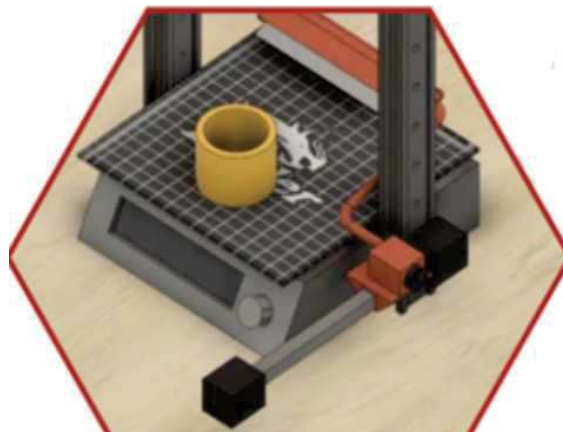


Рисунок 2.3 – Пристрій знаходиться у положенні підходу до платформи принтера

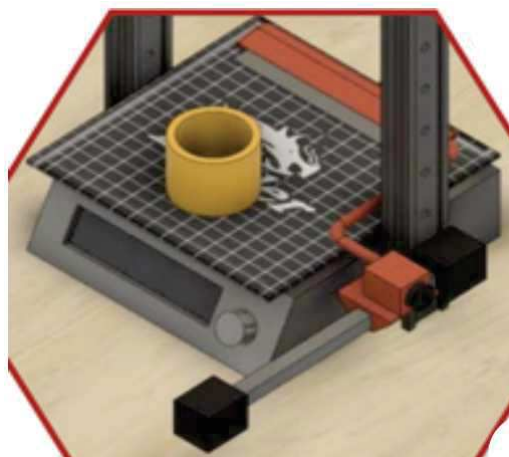


Рисунок 2.4 – Пристрій знаходиться у положенні розміщення на платформі принтера

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

МРМА 25.00.00.000 ПЗ

Арк.

27

Це дозволяє визначити: з якого боку безпечніше підчіплювати; яку швидкість/зусилля застосовувати; чи не залишилась деталь на столі після спроби.

Етап 3. Підрізання/підчіплювання виробу скребком (рис. 2.5.)

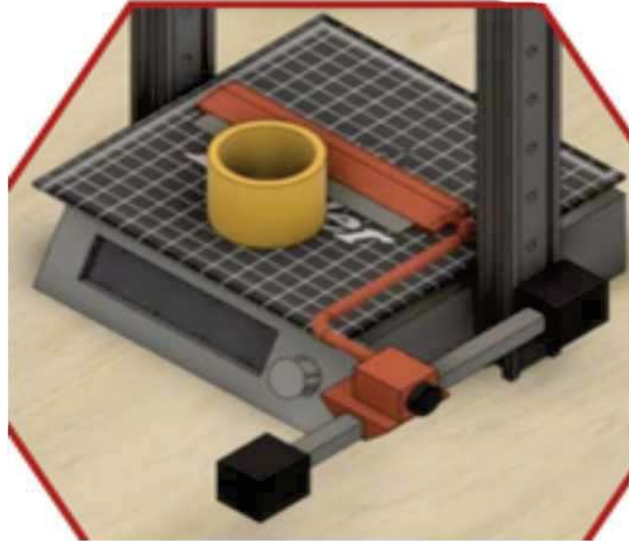


Рисунок 2.5 – Пристрій знаходиться у положенні скидання друкованої 3D деталі

Скребок рухається по напрямній та заходить під край виробу на мінімальній висоті над столом (практично 0...0,2 мм залежно від конструкції). Механічно відбувається: формування клинового ефекту (тонка кромка); локальне відривання першого шару; частковий зсув виробу на кілька міліметрів.

Важливий момент розробки: скребок не обов'язково витискає деталь до кінця. Його задача зірвати адгезію та створити умови для контрольованого переміщення.

Етап 4. Супровід виробу маніпулятором.

Після моменту відриву маніпуляторна рука: підводиться до виробу та м'яко притискає/підтримує його (через накладку з еластомеру); або захоплює за бокову грань (якщо є простий захват); або виконує роль «огорожі», щоб деталь не відскочила. Цей етап критичний для тонких та високих деталей, які можуть: перекинутися; зламатися при ударі об рамку; зрушитися і застрягнути на траєкторії скребка.

Етап 5. Переміщення деталі в зону скидання (рис. 2.6)

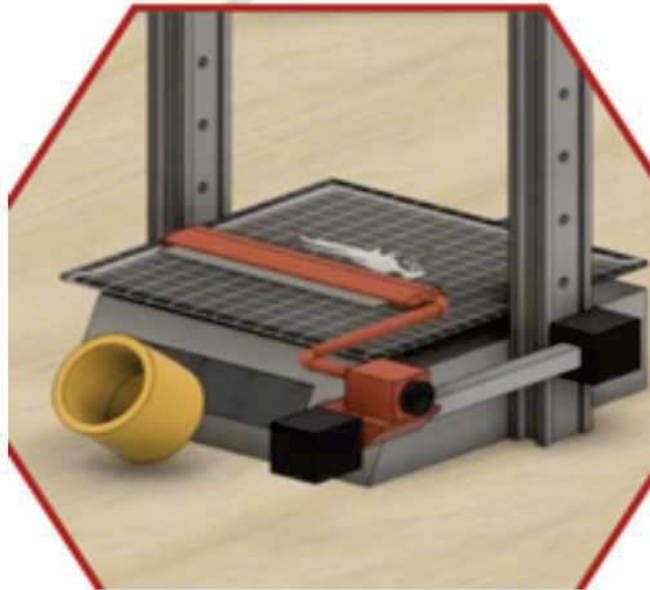


Рисунок 2.6 – Пристрій знаходиться у положенні видалення друкованої 3D деталі

Можна зробити два варіанти реалізації: виштовхування скребком до краю столу, а рука лише страхує та спрямовує; маніпулятор переносить і перекидає деталь у лоток, а скребок працює тільки як «відривний» вузол.

Етап 6. Контроль успішності та повернення в “нуль” датчик присутності на столі перевіряє, чи деталь знята; за необхідності робиться повторний прохід скребка (повільніший, з меншим кроком); механізми повертаються у вихідні положення; принтер готується до наступного друку (очистка, продув, старт наступного G-коду).

На основі технологічної схеми роботи пристрою здійснимо компоновку основних вузлів пристрою для автоматизації видалення виробів 3Д друку з принтера. Пристрій буде складатися з двох основних вузлів: Скребковий вузол та вузол маніпуляторна рука.

Скребковий вузол складається з:

- лінійного приводу (каретка + напрямна), що забезпечує поступальний рух скребка;
- скребка-лопатки (металева пластина або композит з тонкою кромкою);

– механізму регулювання висоти кромки над столом (гвинт-обмежувач, ексцентрик, пружна підвіска);

– датчиків кінцевих положень (HOME/END) для повторюваності циклу.

Основна вимога вузла: скребок має працювати паралельно столу, а його кромка не повинна врізатися у покриття.

Вузол маніпуляторна рука може бути конструйований як:

– 1-2 ступеневий важіль (обертальна кінематика) з сервоприводом/кроковим двигуном;

– лінійна штанга, що підводиться і відводиться;

– комбінована схема (лінійний підвід + обертання робочого елемента).

Функції маніпулятора-руки: притиснути/підтримати; направити в лоток.

В проєктованій конструкції ми застосували комбіновану схему. Комбінація двох модулів у порівнянні з одним скребком дає можливість: зменшити силове навантаження на скребок (він відриває, а не виштовхує під час процесу видалення); зменшити ризик пошкодження поверхні столу; суттєво більшу стабільність для високих/тонких деталей; краще керувати траєкторією падіння/скидання (важливо для організації лотка накопичення).

Основні вимоги до проєктованого пристрою для автоматичного видалення деталей:

– повторюваність: однакова траєкторія, однакові кінцеві положення, мінімум “плаваючих” факторів.

– безпека для принтера: рухи не повинні створювати ударів по столу, соплу, рамі; обов’язково паркування головки.

– безпека для виробу: відрив має бути контрольованим, без різких ривків, з мінімальною деформацією.

– універсальність: робота з різними матеріалами (PLA/PETG/ABS) та покриттями (скло/PEI/текстурні листи).

– сумісність із процесом друку: пристрій не заважає під час друку (має “паркінг-позицію”), не створює вібрацій і не зменшує робочий об’єм.

					MPMA 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						30
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

- обслуговуваність: швидка заміна скребка/накладок, можливість калібрування висоти.
- надійний контроль станів: кінцевики, контроль наявності деталі на столі, аварійна зупинка.

2.2 Вибір елементної бази пристрою

Вибір елементної бази електричної схеми пристрою автоматичного вилучення виробів з 3D-принтера здійснювався з урахуванням вимог до надійності, сумісності з типовими системами керування FDM/FFF-принтерів, енергоефективності та простоти інтеграції. Основними критеріями відбору компонентів були забезпечення необхідного крутного моменту приводів, точність позиціонування виконавчих механізмів, стабільність роботи в режимі багаторазових циклів, а також можливість реалізації гнучкого алгоритму керування. Додатково враховувались доступність компонентів на ринку, поширеність у навчальних і дослідницьких проєктах та наявність відкритої технічної документації.

Всі компоненти проєктованої схеми компонуємо з існуючою платою існуючого принтера.

Важливою перевагою плати 3D-принтера Creality Ender-3 V3 KE, CR4NS200320C13 є її оптимізація під сучасні прошивки та високошвидкісний друк, що особливо актуально для Ender-3 V3 KE. Плата здатна забезпечувати плавну роботу крокових двигунів, зменшуючи вібрації та рівень шуму під час друку, що позитивно впливає як на комфорт користування, так і на якість поверхні надрукованих моделей.

Плата керування має інтегровані схеми живлення та захисту, що підвищує надійність роботи принтера та зменшує ризик ушкодження електронних складників при перепадах напруги або коротких замиканнях. Завдяки цьому забезпечується стабільна робота нагрівальних елементів, вентиляторів і датчиків протягом тривалого часу експлуатації.

Ще однією суттєвою перевагою є сумісність плати з автоматичними системами калібрування та сучасними датчиками

Як центральний елемент системи керування обрано мікроконтролерну платформу Arduino Uno (чи Arduino Nano), яка забезпечує керівництво виконавчими механізмами, обробку сигналів від датчиків та синхронізацію роботи пристрою з 3D-принтером. (рис. 2.7). Для приводу механізму автоматичного вилучення використано крокові електродвигуни типу NEMA 17, що широко застосовуються у 3D-принтерах і забезпечують достатній крутний момент при компактних габаритах. Керування двигунами реалізовано за допомогою драйверів A4988 або DRV8825, які дозволяють здійснювати мікрокрокування та зменшувати вібрації під час роботи механізму.

Основним керуючим елементом принтера є плата керування, до якої під'єднано:

- крокові двигуни осей X, Y, Z;
- кроковий двигун екструдера;
- кроковий двигун системи автоматичного зняття виробу;
- вентилятори охолодження;
- кінцеві вимикачі;
- нагрівальні елементи хотенду та екструдера.

Плата керування забезпечує створення керуючих сигналів для драйверів крокових двигунів, контроль температури нагрівальних елементів та обробку сигналів від кінцевих вимикачів.

Arduino Nano отримує сигнали керування від плати керування принтера (логічні сигнали запуску та завершення друку) та формує сигнали керування для драйвера крокового двигуна, який, у свою чергу, керує поворотним кроковим двигуном механізму ножа.

Драйвер крокового двигуна працює за стандартним інтерфейсом STEP/DIR:

- сигнал STEP визначає кількість кроків двигуна;

- сигнал DIR задає напрямок обертання;
- сигнал ENABLE/SLEEP застосовується для активації або деактивації двигуна.

Основними перевагами такого драйвера є висока точність керування завдяки підтримці мікрокрокування, що дозволяє зменшити вібрації та шум під час роботи. Драйвер забезпечує стабільний струм у фазах двигуна незалежно від коливань напруги живлення, що підвищує надійність та повторюваність рухів. Наявність входів керування дозволяє легко інтегрувати драйвер з платами керування 3D-принтерів та мікроконтролерами, зокрема Arduino, а компактність і ефективність роблять його придатним для використання у системах автоматизації та 3D-друку.

Крокові двигуни, які використовуються в системі: двигуни осей X, Y, Z Nema 17; двигун екструдера; двигун системи автоматичного зняття виробу.

Крокові двигуни NEMA 17 мають достатній крутний момент для переміщення осей та подачі філаменту, водночас споживаючи помірну кількість електроенергії. Стандартні монтажні розміри спрощують їх інтеграцію у різні конструкції 3D-принтерів і полегшують заміну або модернізацію обладнання. Завдяки сумісності з більшістю поширених драйверів та плат керування ці двигуни є універсальним і економічно доцільним рішенням для систем FDM-друку.

Після завершення процесу друку Arduino Nano подає керуючі сигнали на драйвер, внаслідок чого кроковий двигун повертає ніж на заданий кут. Після зняття виробу ніж повертається у вихідне положення, а система переходить у режим очікування наступного циклу друку.

Для контролю крайніх положень рухомих елементів застосовано кінцеві вимикачі типу KW11-3 (механічні) або оптичні датчики, що підвищують точність позиціонування та забезпечують захист від перевантажень. Живлення електричної схеми здійснюється від імпульсного джерела живлення постійного струму із вихідною напругою 12 В та 5 В, наприклад на базі модуля LM2596,

що забезпечує стабільну роботу мікроконтролера та виконавчих пристроїв. Для підняття безпеки та надійності роботи в схемі передбачено елементи електричного захисту - запобіжники, діоди захисту від зворотної полярності та фільтрувальні конденсатори.

На рисунку 2.7 та у графічній частині роботи [MPMA 25.00.00.000 E3] показано електричну схему підключення елементів 3D-принтера, оснащеного системою автоматичного зняття надрукованої деталі з робочої поверхні. Дана система реалізована за принципом, описаним у джерелі [11] та адаптована і доопрацьована автором під конструкцію широкоформатного FDM 3D-принтера.

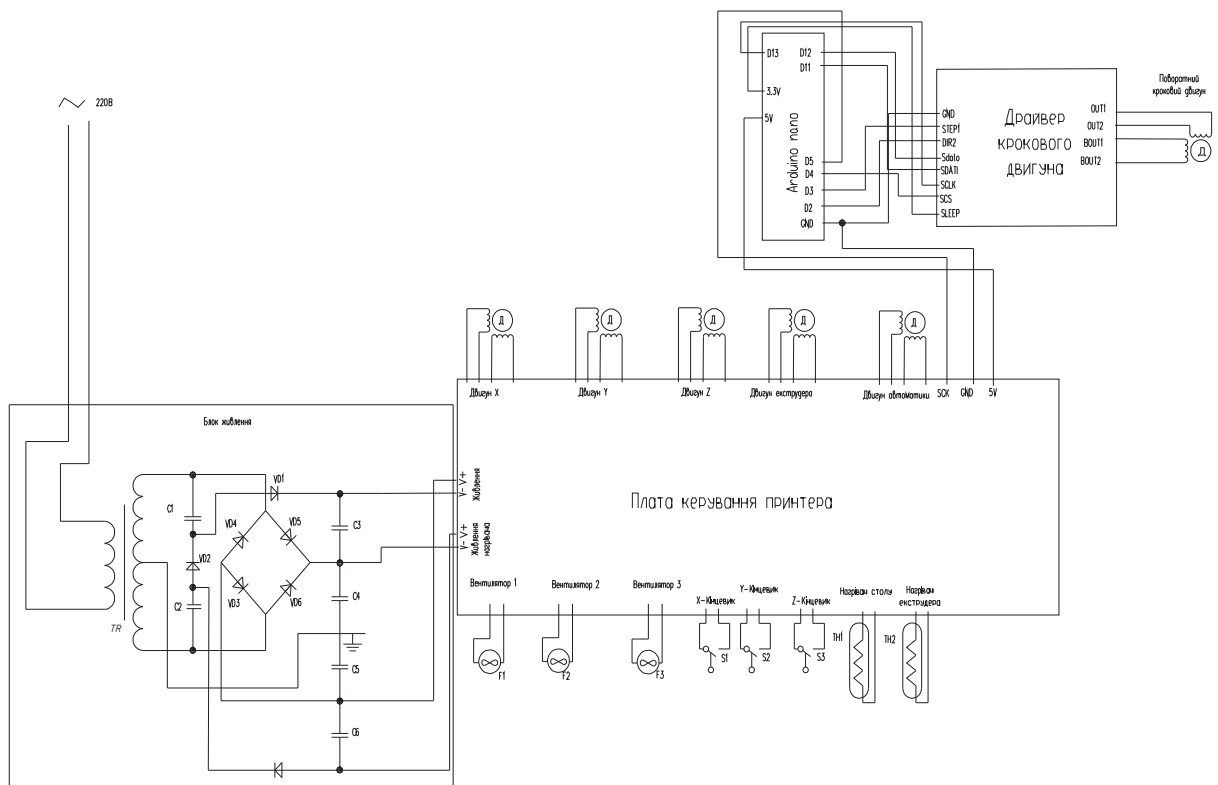


Рисунок 2.7 – Електрична схема підключення елементів 3D-принтера з системою автоматичного зняття надрукованої деталі з робочої поверхні

Живлення системи автоматизованого вилучення виробів здійснюється від центральної мережі, яка подається на блок. У блоці живлення напруга зни-

жується, випрямляється за допомогою діодного мосту та фільтрується конденсаторами. Вихідна стабілізована напруга постійного струму використовується для живлення плати керування принтера, крокових двигунів, вентиляторів, нагрівальних елементів та допоміжної електроніки.

Система автоматичного зняття надрукованого виробу. Для реалізації механізму автоматичного зняття надрукованої деталі використовується поворотний ніж, який після завершення друку проходить по поверхні стола та механічно відокремлює модель від робочої платформи.

Керування приводом поворотного ножа реалізовано окремо від основної плати керування принтера за допомогою мікроконтролерної плати Arduino Nano. Таке рішення дозволяє:

- зменшити навантаження на основну плату керування;
- реалізувати гнучку логіку керування механізмом зняття;
- спростити інтеграцію та налагодження системи.

Система охолодження та датчики. Для забезпечення стабільної роботи електронних компонентів у схемі передбачено використання декількох вентиляторів:

- вентилятори охолодження плати керування;
- вентилятори охолодження крокових двигунів;
- вентилятори охолодження друкованого шару;
- вентилятор охолодження деталі перед зняття з пластини.

Охолодження двигунів здійснюється постійно після подачі живлення, тоді як охолодження друкованої моделі може регулюватися програмно залежно від типу матеріалу.

Охолодження деталі після друку здійснюється окремим вентилятором та триває 30 секунд при максимальних обертах вентилятора

Після вибору елементної бази та формування структури електричної схеми необхідно узгодити можливості системи керування і приводів із вимогами до рухів руки-маніпулятора. Зокрема, обрані крокові двигуни та їх драйвери

визначають доступний крутний момент, діапазон швидкостей, точність позиціонування (крок/мікрокрок) і динаміку розгону-гальмування, а датчики кінцевих положень, задають межі робочого ходу та умови безпечної зупинки. Тому наступним етапом є кінематичний розрахунок руки-маніпулятора, який дозволяє встановити необхідні переміщення та швидкісні параметри ланок, підібрати передатні відношення, а також перевірити відповідність обраної електричної частини заданим режимам роботи пристрою.

2.3 Кінематичний розрахунок руки-маніпулятора пристрою

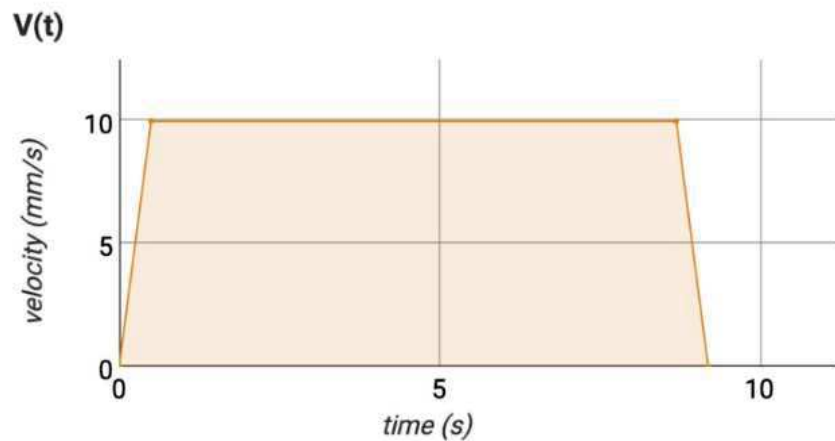
Кінематичний розрахунок руки-маніпулятора є одним із ключових етапів проєктування пристрою автоматичного вилучення виробів з 3D-принтера, оскільки саме від кінематичної схеми та параметрів руху залежить точність, надійність і безпечність виконання операції зняття надрукованої деталі. Маніпулятор у даному пристрої виконує допоміжну функцію та працює у тісній взаємодії з робочою зоною 3D-принтера, що накладає обмеження на допустимі траєкторії руху, швидкості та прискорення.

Під час проєктування кінематики маніпулятора необхідно забезпечити виконання кількох основних умов: гарантований підхід до виробу без зіткнення з елементами конструкції принтера, створення достатнього зусилля для відриву деталі від робочої платформи, а також безпечне відведення виробу за межі зони друку. Враховуючи характер завдання, доцільним є застосування маніпулятора з обмеженою кількістю ступенів вільності, що спрощує конструкцію, алгоритм керування та підвищує загальну надійність системи.

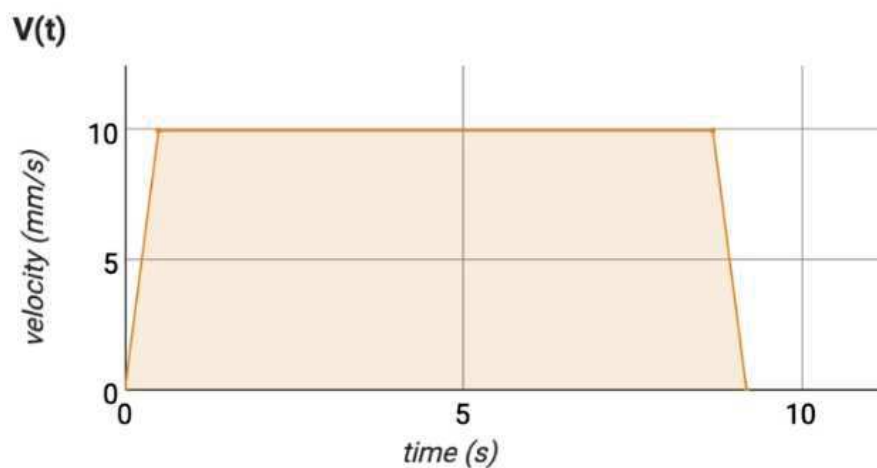
У більшості пристроїв автоматичного зняття виробів використовуються маніпулятори з одним або двома ступенями вільності, які реалізують лінійний або обертальний рух робочого органу. Такий підхід є достатнім, оскільки положення виробу на робочому столі 3D-принтера відоме заздалегідь і визначається програмою друку. Відповідно, траєкторія руху маніпулятора може бути

зафіксованою або параметричною, без необхідності складного просторового позиціонування.

Кінематичний аналіз полягає у встановленні залежності між переміщеннями виконавчого органу маніпулятора та рухом приводу, а також у визначенні необхідних лінійних або кутових переміщень, швидкостей і прискорень (рис. . При цьому важливо враховувати, що надмірно високі швидкості руху можуть призводити до ударних навантажень, втрати кроків кроковим двигуном або пошкодження надрукованого виробу. Тому швидкісні параметри маніпулятора зазвичай обираються значно меншими, ніж у основних осей 3D-принтера.



a)



a)

Рисунок 2.8 – Координати визначення положення деталі та маніпулятора на площині стола залежно від швидкості: а) координати від 10 мм до 97 мм; б) від 97 мм до 10 мм

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

МРМА 25.00.00.000 ПЗ

Арк.

37

Окрему увагу в кінематичному розрахунку приділяють визначенню зусилля, необхідного для вилучення деталі. Це зусилля залежить від матеріалу першого шару, температури столу, типу адгезійного покриття та площі контакту деталі з робочою поверхнею. У практичних інженерних розрахунках зусилля відриву приймається на основі експериментальних даних або довідкових значень із введенням коефіцієнта запасу, що дозволяє компенсувати варіації умов друку та зношування поверхонь.

Результати розрахунку зусилля безпосередньо впливають на вибір типу приводу маніпулятора та параметрів передавального механізму. При використанні гвинтових, рейкових або важільних механізмів зусилля на виході пов'язується з крутним моментом електродвигуна через передатне відношення та коефіцієнт корисної дії механізму. Тому кінематичний розрахунок тісно пов'язаний із силовим та енергетичним аналізом, а також із вибором електричних компонентів пристрою.

Таким чином, кінематичний розрахунок руки-маніпулятора дозволяє визначити раціональні параметри руху, забезпечити узгодження механічної та електричної частин пристрою та створити передумови для стабільної й безпечної роботи системи автоматичного вилучення виробів з 3D-принтера.

1. Визначення траєкторії руху маніпулятора

Для пристрою автоматичного вилучення виробів прийняли траєкторію типу «підхід → захоплення/підчеплення → відрив → відведення → скидання». У найпростішій реалізації використовується площинний рух у зоні столу (X–Y) і підйом/відрив (Z) або еквівалентний «відрив» за рахунок важеля/скребка під кутом.

Для подальшого розрахунку задаємося такими даним:

Траєкторія руху маніпулятора задається з урахуванням геометрії робочої зони 3D-принтера та положення надрукованого виробу. У загальному випадку рух можна представити як комбінацію горизонтального переміщення у площині

ні столу та вертикального переміщення, необхідного для відриву деталі. Основними кінематичними параметрами є горизонтальний хід L_x , вертикальний хід L_z та робочий хід виконавчого механізму s .

Горизонтальний хід визначається відстанню від парковочного положення маніпулятора до точки контакту з виробом з урахуванням запасу безпеки визначається за формулою:

$$L_x = x_{park \rightarrow part} + \Delta x_{safe} \quad (2.1)$$

де Δx_{safe} - додатковий запас ходу, який у розрахунках приймається в межах 10..30 мм.

Вертикальний хід визначається висотою відриву деталі від поверхні столу визначається за формулою:

$$L_z = h_{lift} + \Delta z_{safe} \quad (2.2)$$

2. Розрахунок необхідного ходу та швидкості

Швидкість руху маніпулятора вибирається з умови забезпечення плавності переміщення та уникнення ударних навантажень.

Для кожної ділянки траєкторії задається допустимий час виконання операції визначається за формулою:

$$V_x = \frac{L_x}{t_x}, \quad V_z = \frac{L_z}{t_z} \quad (2.3)$$

З урахуванням вихідних даних та конструктивних припущень здійснимо розрахунок.

Приймаємо горизонтальний хід $L_x = 220 \text{ мм} = 0.22 \text{ м}$ та час підходу $t_x = 4 \text{ с}$
Тоді:

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						39
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

$$V_x = 0,22 / 4 = 0,055 \text{ м/с.}$$

Для вертикального відриву приймаємо $L_z = 20 \text{ мм} = 0,02 \text{ м.}$

$$V_z = 0,02 / 1,5 \approx 0,013 \text{ м/с.}$$

Отримані швидкості є відносно невеликими, що відповідає вимогам до точності позиціонування та знижує динамічні навантаження на механізм.

3. Розрахунок зусилля для вилучення деталі

Зусилля, необхідне для вилучення деталі, визначається адгезією першого шару до робочої платформи. Для інженерних розрахунків використовується питомий опір відриву q , котрий залежить від матеріалу філаменту, типу поверхні столу та температурного режиму друку визначається за формулою:

$$F_{дет} = q \cdot A \quad (2.4)$$

де A - площа контакту деталі з робочою поверхнею.

З урахуванням коефіцієнта запасу k , що компенсує варіації умов друку визначається за формулою:

$$F = k \cdot F_{дет} \quad (2.5)$$

З урахуванням вихідних даних та конструктивних припущень здійснимо розрахунок.

Приймаємо $A = 30 \text{ см}^2$, $q = 0.5 \text{ Н/см}^2$, $k = 1.5$.

$$F_{дет} = 0,5 \cdot 30 = 15 \text{ Н.}$$

					MPMA 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						40
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

$$F = 1,5 \cdot 15 = 22,5 \text{ Н.}$$

4. Розрахунок крутного моменту крокового двигуна

У разі використання лінійного приводу на основі гвинтової пари зв'язок між зусиллям та крутним моментом двигуна визначається за формулою:

$$M = \frac{F \cdot p}{2\pi \cdot \eta} \quad (2.6)$$

де p - крок гвинта руху, η - коефіцієнт корисної дії гвинтової пари.

З урахуванням вихідних даних та конструктивних припущень здійснимо розрахунок.

Для гвинта типу TR8×8 ($p = 8 \text{ мм} = 0,008 \text{ м/об}$), $\eta = 0,35$, $F = 22,5 \text{ Н/}$

$$M = \frac{25,5 \cdot 0,008}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,35} = 0,082.$$

З урахуванням коефіцієнта запасу по моменту $k_m = 2 \dots 3$

$$M_{рез} \approx 0.16 \dots 0.25 \text{ Н.}$$

Отримане значення відповідає можливостям крокових електродвигунів типу NEMA 17, що підтверджує доцільність їх застосування в розроблюваному пристрої.

					MPMA 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						41
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

2.4 Проєктування елементів механізму в SolidWorks

Проєктування елементів механізму автоматичного вилучення виробів виконувалося з використанням системи автоматизованого проєктування SolidWorks, що забезпечує можливість створення параметричних тривимірних моделей, перевірки взаємної узгодженості деталей та подальшого аналізу їх міцності й працездатності. На основі результатів кінематичного розрахунку було сформовано перелік основних деталей механізму, до якого входять елементи руки-маніпулятора, кронштейни кріплення, рухомі та нерухомі ланки, а також допоміжні конструктивні елементи.

Побудова 3D-моделей деталей здійснювалась у середовищі SolidWorks з використанням стандартних операцій параметричного моделювання: ескізів, витягування, обертання, вирізів, фасок і скруглень. Геометричні параметри деталей задавались із урахуванням результатів розрахунків необхідних ходів, зусиль та габаритних обмежень робочої зони 3D-принтера. Параметричний підхід до моделювання допускає швидко вносити зміни до конструкції у разі коригування кінематичної схеми або вибору інших типорозмірів елементної бази.

При проєктуванні деталей враховувались технологічні особливості їх виготовлення, зокрема можливість 3D-друку або механічної обробки, мінімізація маси рухомих елементів та забезпечення достатньої жорсткості конструкції. Для зменшення концентрацій напружень у відповідальних зонах застосовувались скруглення та раціональне розміщення отворів під кріпильні елементи.

У розроблюваному пристрої використано як стандартні промислові компоненти, так і спеціальні деталі, виготовлені методом 3D-друку з ABS-пластику, що підтверджується технічною документацією виробу.

На основі аналізу компоувальної конструкції було визначено перелік основних деталей, що входять до складу механізму руки-маніпулятора: тримач крокового двигуна, з'єднувальна муфта, монтажні кронштейни, елементи руки маніпулятора, тримач скребка та захисні кожухи.

Основні деталі спроектовані у середовищі SolidWorks показані на рисунку

2.9.

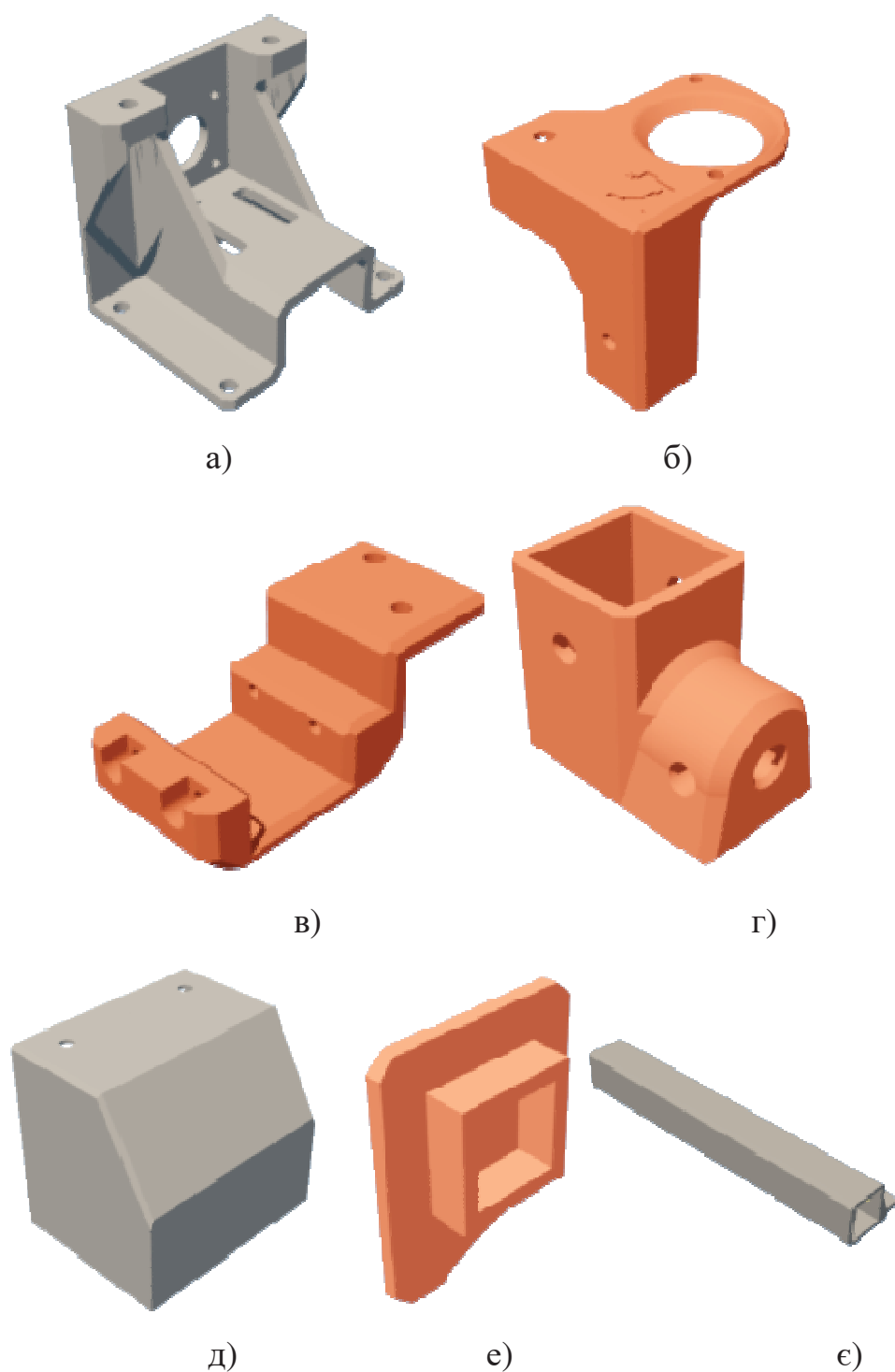


Рисунок 2.9 - Основні деталі спроектовані у середовищі SolidWorks: а - тримач поворотного крокового двигуна механізму ножа; б - кріплення обдуву; в - монтажний кронштейн кріплення механізму вилучення виробів; г - муфта поворотного механізму; д – захисний кожух; е – тримач напрямляючої; ж – ніж зі кріпленням

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

МРМА 25.00.00.000 ПЗ

Арк.

43

Деталювання основних компонентів проєктованого пристрою показано у графічній частині роботи [МРМА 25.00.00.000].

3D-моделі деталей створювалися в SolidWorks із застосуванням параметричного моделювання, що дозволило забезпечити узгодженість геометричних розмірів та можливість адаптації конструкції під інші типорозміри компонентів. При побудові моделей враховувались габаритні обмеження робочої зони 3D-принтера Creality Ender 3 Pro, з яким інтегрується система автоматичного вилучення виробів.

Для лінійного переміщення робочого органу використано готовий лінійний актуатор IGUS DLE-FG-0003, геометричні параметри якого враховувались під час побудови 3D-моделей та компонування механізму (рис. 2.10).

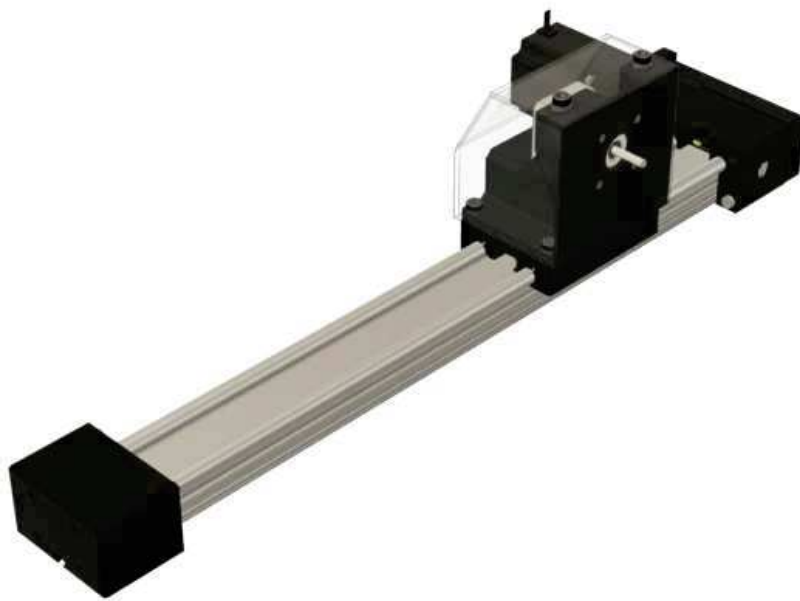


Рисунок 2.10 - Лінійний актуатор IGUS DLE-FG-0003

Використаний лінійний актуатор IGUS DLE-FG-0003 має робочу область 500×500 мм, вантажопідйомність до 1,0 кг, швидкість переміщення до 0,5 м/с та повторюваність позиціонування ± 1 мм, що відповідає вимогам для переміщення робочого органу у системі автоматичного вилучення виробів з 3D-принтера [12].

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		44

Проектування вузлів кріплення та з'єднань. Вузли кріплення та з'єднання елементів механізму проектувалися з використанням стандартних різьбових з'єднань відповідно до конструкції 3D. У механізмі застосовано кріпильні елементи типу DIN 912 та DIN 7991 з різьбами М3, М4 та М6, а також Т-гайки для алюмінієвого профілю 2020, що забезпечує жорстке та водночас модульне з'єднання елементів конструкції.

Особлива увага при проектуванні приділялася вузлам кріплення крокового двигуна NEMA 17 та його з'єднанню з виконавчим механізмом. Для цього використано 3D-друкований тримач двигуна та з'єднувальну муфту, конструкція яких забезпечує співвісність валів і зменшення додаткових навантажень на підшипники двигуна. Рухомі з'єднання руки-маніпулятора спроектовано таким чином, щоб забезпечити плавність переміщення скребка та стабільність зусилля під час відриву деталі від робочої платформи.

Також у конструкції використані елементи кріплення та направляючі для двигуна, маніпулятора та ножа показані на рисунку 2.11.



Рисунок 2.11 - Елементи кріплення та направляючі для двигуна, маніпулятора та ножа показані на: а - направляючі для двигуна; б - маніпулятора; в - ножа

Збірка механізму виконувалася у середовищі SolidWorks Assembly із застосуванням кінематичних залежностей, що дозволило перевірити працездат-

ність конструкції, коректність руху маніпулятора та відсутність взаємних перетинів деталей. Отримана збірна 3D-модель слугувала основою для подальших розрахунків міцності та жорсткості елементів конструкції, а також для підготовки робочих креслень.

2.5. Складання пристрою та інтеграція з 3D-принтером

Складання пристрою автоматичного вилучення виробів здійснювалося на основі розробленої конструкторської документації та тривимірних моделей елементів механізму.

У розроблюваному пристрої автоматичного вилучення виробів використано кроковий електродвигун типу NEMA 17 (рис. 2.12), який забезпечує точне позиціонування та повторюваність рухів руки-маніпулятора. Крокові двигуни даного типу широко застосовуються у 3D-принтерах і автоматизованих механізмах завдяки простоті керування, можливості роботи у відкритому контурі та достатньому крутному моменту при компактних габаритах. Використання крокового двигуна дозволяє реалізувати плавний рух виконавчого механізму з високою точністю без застосування складних систем зворотного зв'язку [13].



Рисунок 2.12 - Кроковий електродвигун типу NEMA 17

					MPMA 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		46

Основні характеристики крокового двигуна NEMA 17: номінальний крок - $1,8^\circ$; кількість кроків на оберт - 200 кроків/об; номінальний крутний момент - до 0,4–0,5 Н·м; робоча напруга - 12–24 В; номінальний струм фази - 1,2–1,7 А.

Вентилятор для обдуву (охолодження) (рис. 2.13). Для забезпечення сталого температурного режиму електродвигуна та прилеглих елементів механізму в конструкції передбачено вентилятор примусового обдуву. Охолодження є необхідним для запобігання перегріву крокового двигуна під час тривалої роботи, що сприяє підвищенню надійності та ресурсу пристрою. Вентилятор створює спрямований повітряний потік, який ефективно відводить тепло від корпусу двигуна та інших тепловиділяючих компонентів [14].



Рисунок 2.13 - Вентилятор для обдуву (охолодження)

Основні характеристики вентилятора обдуву: тип - осьовий або радіальний (blower); живлення - 12 В постійного струму; типорозмір - 40×40×10 мм; продуктивність - 6–9 л/с; рівень шуму - до 30–35 дБ.

Процес складання виконувався поетапно з урахуванням конструктивних особливостей руки-маніпулятора, лінійного приводу та вузлів кріплення, що забезпечує правильне взаємне розташування деталей і працездатність механізму в цілому.

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						47
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

При виготовленні деталей та складанні механізму потрібно дотримуватися технічних умов, які наведені нижче.

Технічні умови складання та експлуатації пристрою

1. Виріб виготовляти та збирати відповідно до вимог даного креслення, діючих стандартів ЄСКД та технологічної документації.

2. Деталі, виготовлені методом 3D-друку, після друку підлягають: очищенню від підтримок; видаленню залишків філаменту; зачищенню гострих кромки; за потреби - шліфуванню поверхонь, що контактують із рухомими елементами.

3. Поверхні деталей, що з'єднуються шляхом склеювання, перед складанням необхідно: знежирити; висушити; склеїти полімерним клеєм, сумісним з матеріалом деталі.

4. Нерівності, напливи та дефекти поверхні, що можуть перешкоджати нормальній роботі механізмів, не допускаються.

5. Рухомі з'єднання (напрямні, каретки, лінійні приводи) повинні переміщуватися плавно, без заїдань і перекосів.

6. Після складання всі різьбові з'єднання повинні бути надійно затягнуті; у відповідальних з'єднаннях допускається використання різьбових фіксаторів.

7. Базування деталей під час складання здійснювати по функціональних поверхнях, що забезпечують співвісність і паралельність напрямних та приводів.

8. Неуказані граничні відхилення лінійних розмірів за ISO 2768-m (або ДСТУ ISO 2768).

9. Неуказані граничні відхилення кутових розмірів за ISO 2768-m.

10. Гострі кромки притупити фаскою $0,5 \times 45^\circ$ або радіусом R0,5, якщо інше не вказано на кресленні.

11. Допуски форми та розташування елементів, що не обумовлені на кресленні, приймати такими, що забезпечують працездатність виробу.

12. Електричний монтаж виконувати згідно зі схемою електричною

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						48
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

принциповою, із забезпеченням надійної ізоляції провідників.

13. Після складання виріб підлягає: перевірці плавності ходу механізмів; перевірці точності позиціонування; пробному циклу автоматичного вилучення надрукованої деталі.

14. Виріб вважати придатним до експлуатації за умови відсутності механічних пошкоджень, сторонніх шумів та збоїв у роботі.

Послідовність складання показано на рисунках 2.14-2.20.

На першому етапі виконувалося складання базової несучої конструкції пристрою, яка включає алюмінієві профілі та кронштейни кріплення. Далі здійснювалося встановлення лінійного актуатора та крокового електродвигуна з використанням відповідних тримачів і монтажних елементів. Особливу увагу приділяли забезпеченню співвісності рухомих елементів, надійності різьбових з'єднань і відсутності люфтів, які можуть негативно впливати на точність переміщення маніпулятора.

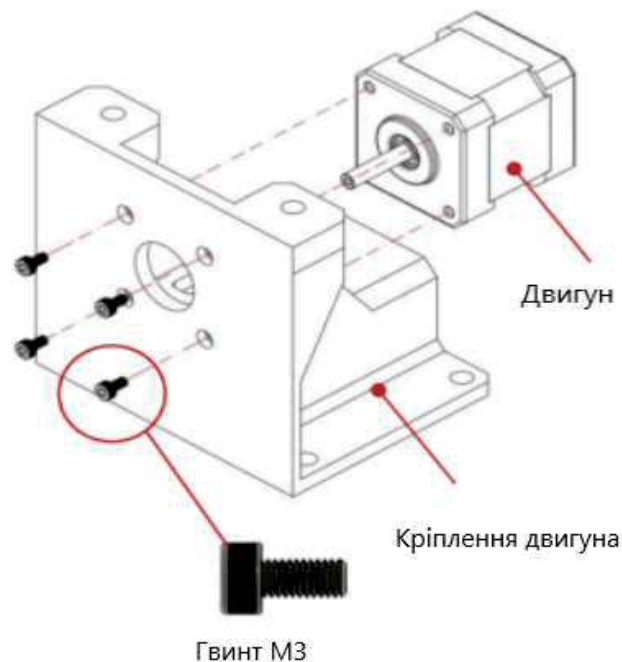


Рисунок 2.14 – Кріплення двигуна до тримача

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

МРМА 25.00.00.000 ПЗ

Арк.

49

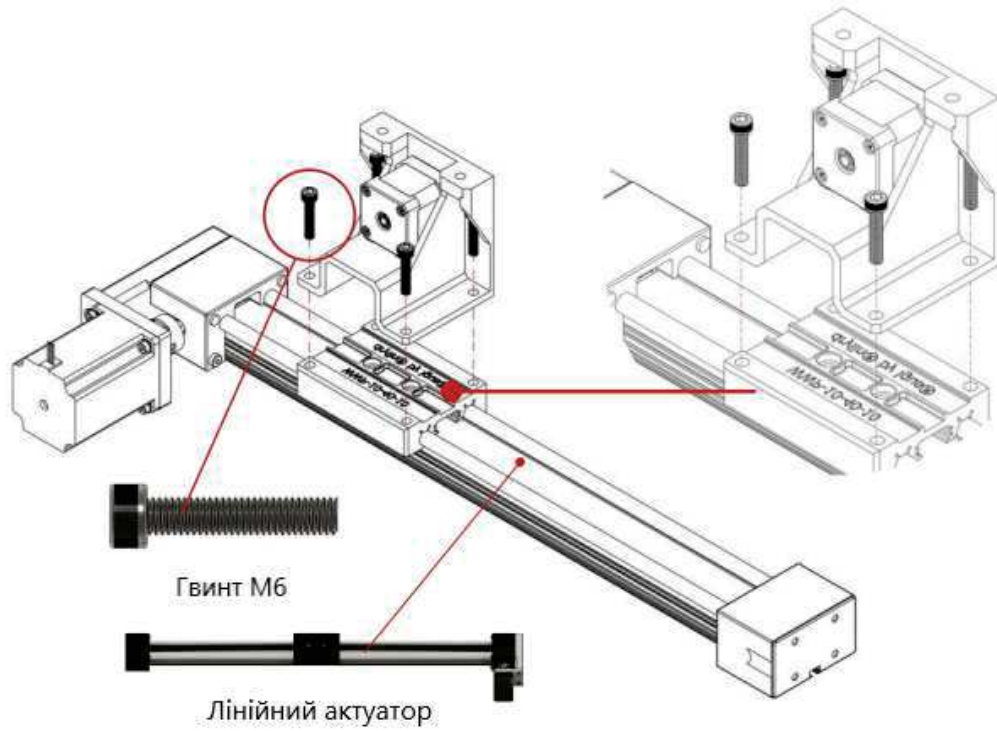


Рисунок 2.15 – Кріплення двигуна до кронштейна і направляючої

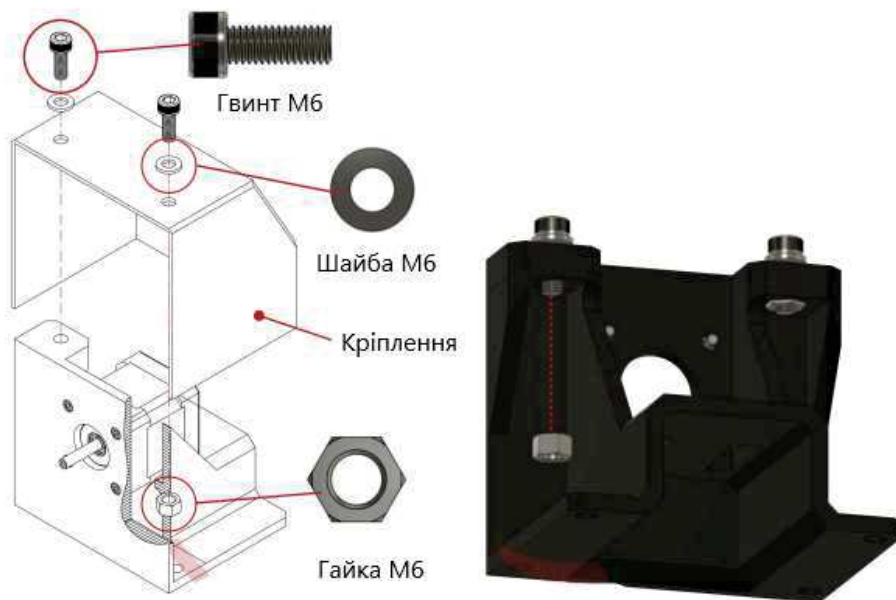


Рисунок 2.16 – Кріплення захисного кожуха

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

МРМА 25.00.00.000 ПЗ

Арк.

50

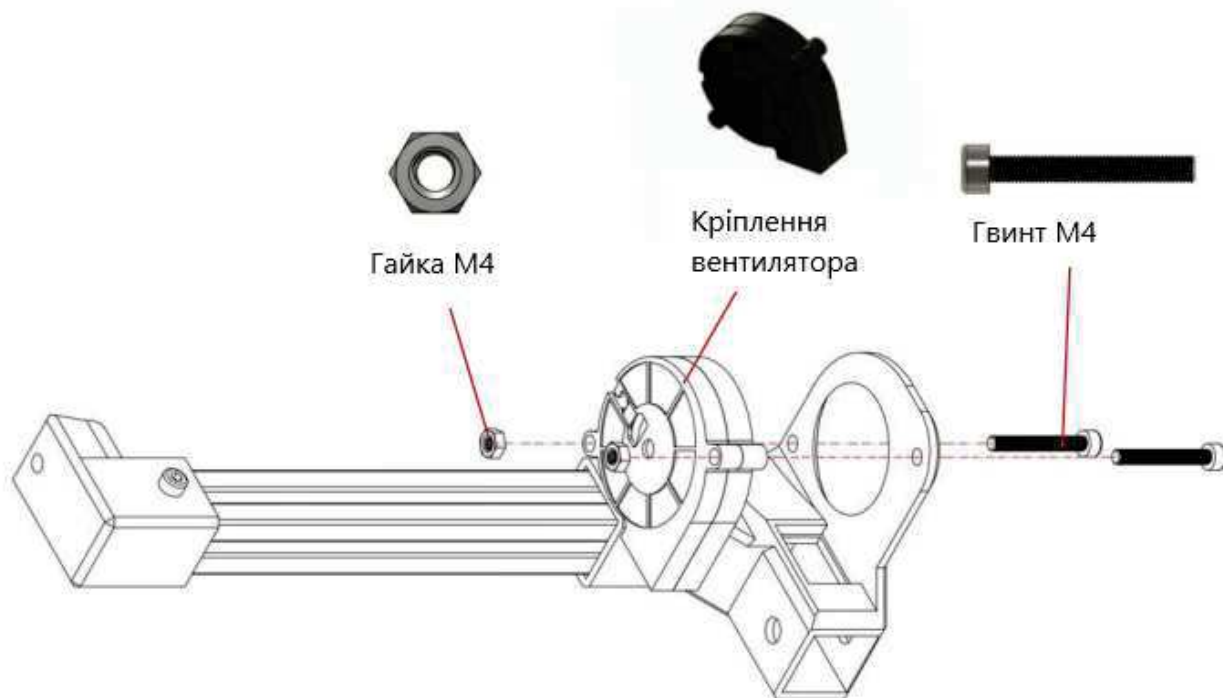


Рисунок 2.17 – Кріплення системи обдуву

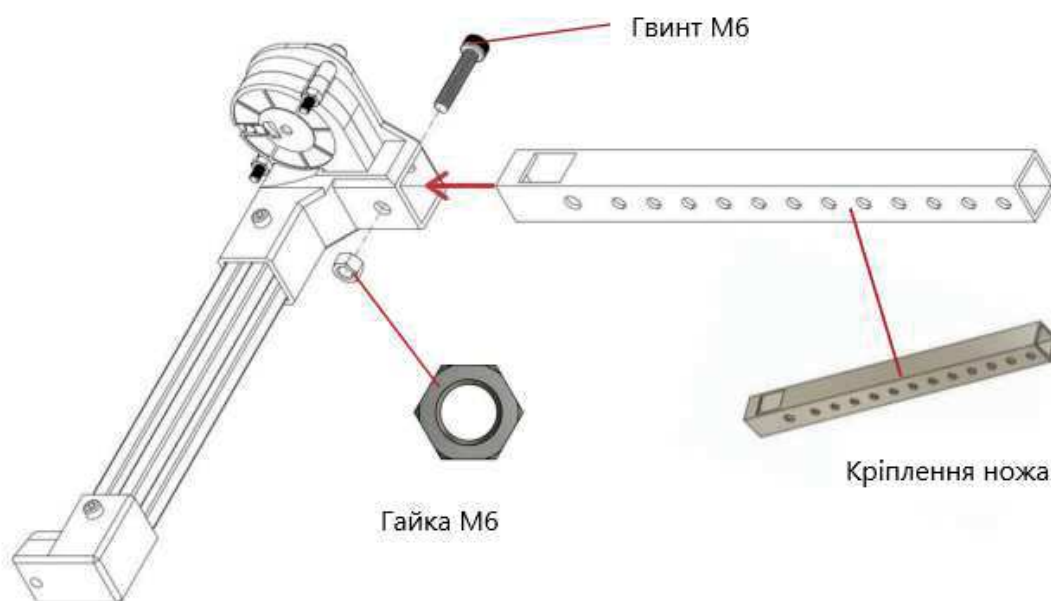


Рисунок 2.18 – Кріплення маніпулятора до напрямляючої

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

МРМА 25.00.00.000 ПЗ

Арк.
51

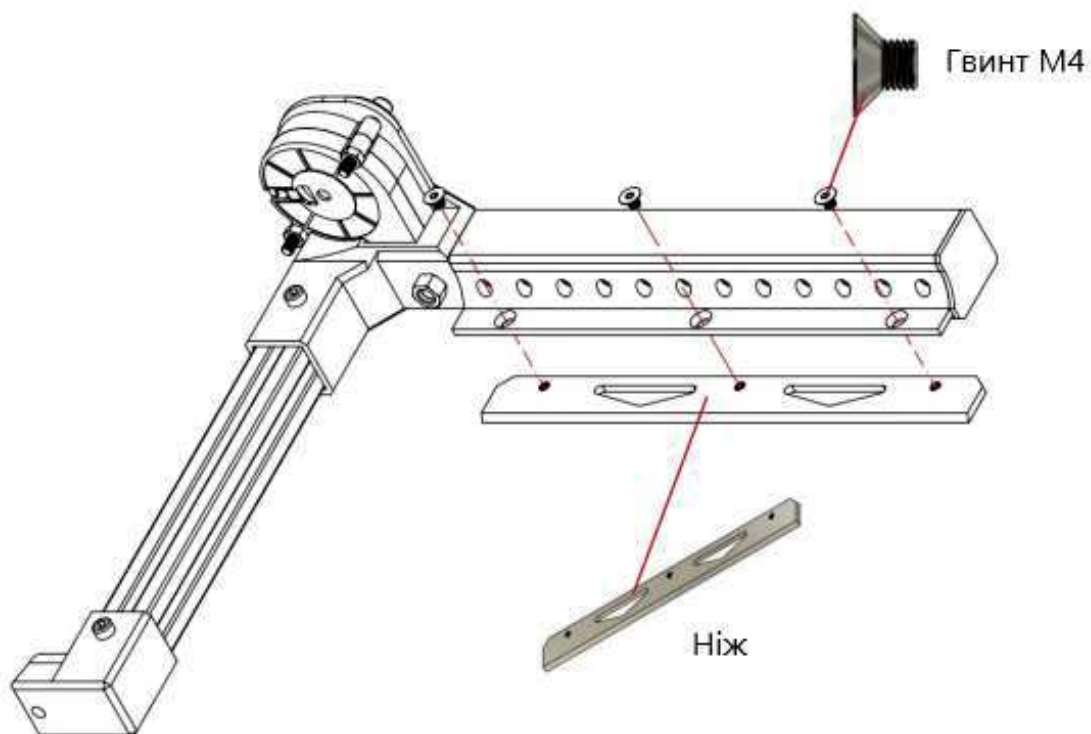


Рисунок 2.19 – Кріплення направляючої ножа і ножа до системи

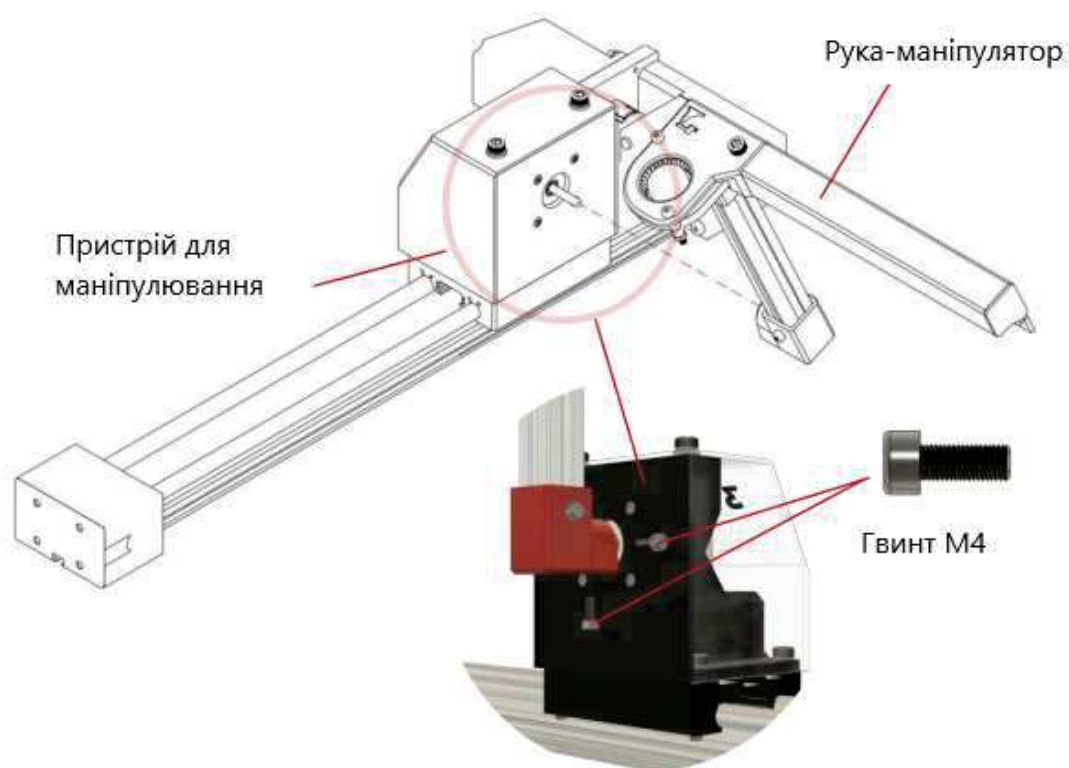


Рисунок 2.20 – Кріплення автоматизованого пристрою до принтера

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

МРМА 25.00.00.000 ПЗ

Арк.
52

Після складання механічної частини виконувалося встановлення робочого органу - скребка або елемента захоплення, який безпосередньо контактує з надрукованим виробом. Конструкція робочого органу забезпечує створення необхідного зусилля для відриву деталі від робочої платформи без пошкодження виробу або поверхні столу 3D-принтера. Також монтувалися допоміжні елементи, зокрема захисні кожухи та вентилятор для примусового обдуву, що сприяє стабільній роботі електродвигуна.

Інтеграція пристрою з 3D-принтером здійснювалася шляхом його механічного закріплення на рамі принтера з використанням стандартних монтажних вузлів, що не потребують суттєвих змін базової конструкції 3D-принтера. Розташування пристрою обиралося таким чином, щоб не обмежувати робочу зону друку та не впливати на переміщення штатних осей X, Y та Z. Це дозволяє використовувати пристрій як додатковий модуль, який може бути демонтований без порушення працездатності 3D-принтера.

Електричне підключення пристрою виконувалося з урахуванням сумісності з системою керування 3D-принтера. Керування роботою маніпулятора здійснюється окремим мікроконтролером або через допоміжні сигнали від контролера принтера після завершення процесу друку. Такий підхід забезпечує синхронізацію процесів друку, охолодження виробу та його автоматичного вилучення.

Після завершення складання та інтеграції пристрою виконувалося налагодження механізму, перевірка правильності руху маніпулятора, коректності роботи кінцевих вимикачів і відповідності траєкторії руху заданим параметрам. Проведене складання та інтеграція підтвердили можливість використання розробленого пристрою в складі 3D-принтера для реалізації безперервного та автоматизованого процесу виготовлення виробів.

Після завершення процесу моделювання та збирання проєктованого виробу було зроблено проєкційне креслення пристрою для автоматичного видавлення виробів 3D друку (рис. 2.21) та проєкційне креслення пристрою, що ада-

птоване з існуючим 3D принтером (рис. 2.22). Дані рисунки показані у графічній частині роботи [МРМА 25.00.00.000 ВЗ].

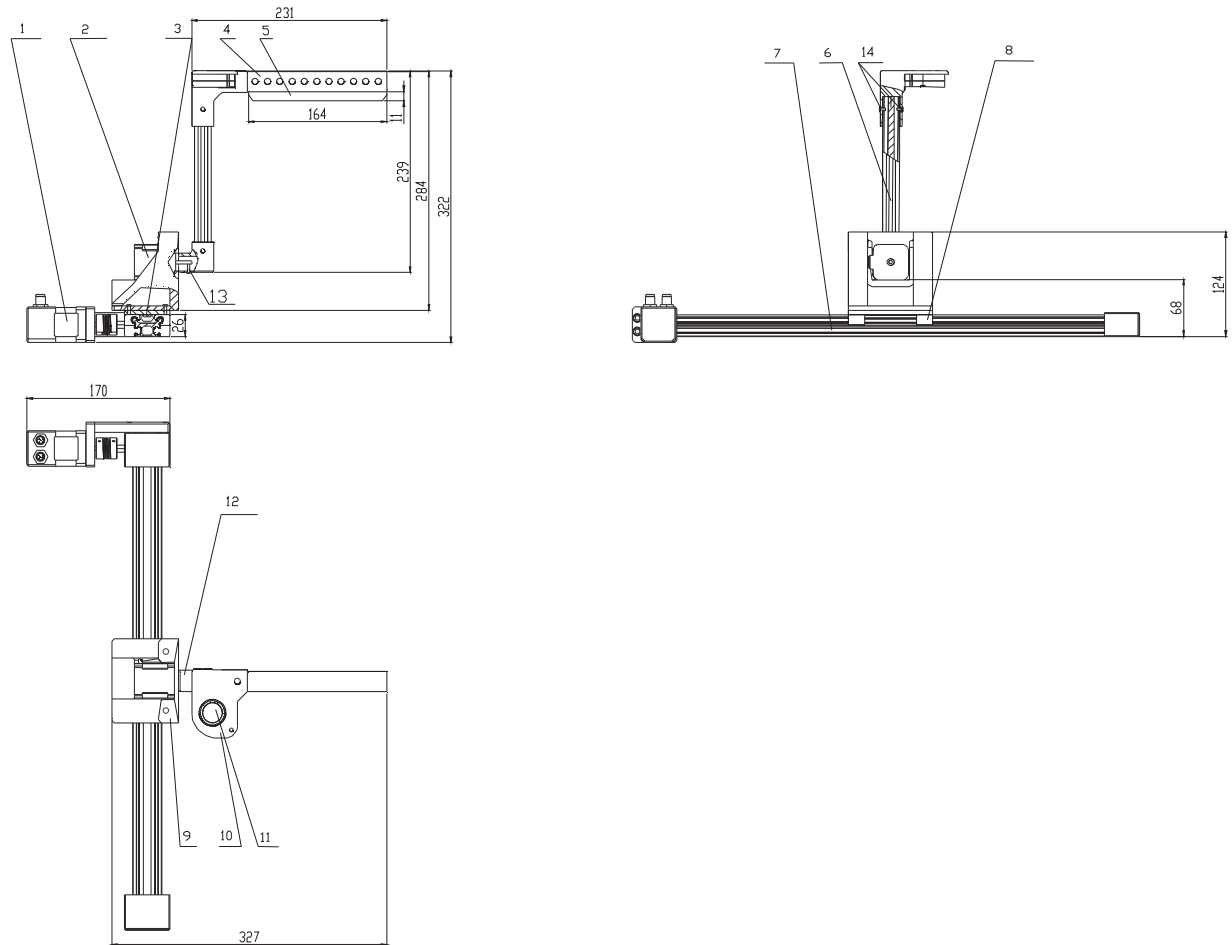


Рисунок 2.21 – Проекційне креслення пристрою для автоматичного видалення виробів 3D друку

Технічні характеристики пристрою для автоматичного видалення виробів 3D друку

1. Тип механізму лінійно-поступальний маніпулятор із приводом від крокового двигуна.
2. Кроковий двигун NEMA 17: кут кроку: $1,8^\circ$; кількість кроків на оберт: 200; номінальний струм: 1,2-2,0 А; номінальна напруга: 12-24 В; утримуючий момент: 40-50 Н·см.
3. Лінійний модуль: IGUS DLE. тип руху: лінійно-поступальний. Хід

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата
-----	------	---------	--------	------

МРМА 25.00.00.000 ПЗ

Арк.

54

5. Товщина шару друку 0,1-0,3 мм.
6. Діаметр сопла 0,4 мм.
7. Матеріали для друку PLA, PETG, ABS.
8. Температура екструдера до 260 °С.
9. Температура робочої платформи до 110 °С.
10. Тип приводів крокові двигуни NEMA 17.
11. Система керування мікроконтролерна, з підтримкою G-code.
12. Живлення 220 В, 50 Гц.
13. Споживана потужність до 350 Вт.
14. Додаткова функція автоматичне вилучення (екстракція) надрукованих виробів після завершення циклу друку.
15. Режим роботи безперервний, з можливістю серійного друку без участі оператора.

Висновки до розділу 2.

У другому розділі здійснено проектування пристрою автоматичного вилучення виробів 3D друку. Запропоновано принцип роботи пристрою, який базується на поєднанні лінійного приводу, крокового двигуна та механічного маніпулятора зі скребками для зняття готових виробів 3D друку. Виконано кінематичний розрахунок руху маніпулятора, розрахунок необхідно-го зусилля для відділення деталі від платформи. Здійснено також підбір електромеханічних компонентів для підключення лінійного приводу, крокового двигуна та механічного маніпулятора до загальної системи 3D принтера. Розроблено конструкцію пристрою спроектовано в середовищі з урахуванням вимог адитивного виробництва.

3 ПЕРЕВІРКА ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ТА НАДІЙНОСТІ КОНСТРУКЦІЇ ПРИБРОЮ АВТОМАТИЧНОГО ВИЛУЧЕННЯ ВИРОБІВ З 3D-ПРИНТЕРА

3.1. Розрахунок міцності елементів конструкції

Розрахунок міцності елементів конструкції з урахуванням того, що частина деталей виготовляється методом 3D-друку (ABS).

Під час проєктування пристрою автоматичного вилучення виробів важливо забезпечити міцність і працездатність як металевих елементів каркаса, так і деталей, виготовлених методом 3D-друку. Особливістю 3D-друкованих деталей (FDM/FFF) є анізотропія механічних властивостей: міцність у площині шарів (XY) зазвичай вища, ніж у напрямку між шарами (Z). Це зумовлено характером зчеплення екструдованих доріжок та міжшаровою адгезією. Тому при міцнісних перевірках для полімерних деталей доцільно враховувати напрямок навантаження відносно шарів та вводити підвищений коефіцієнт запасу.

Вихідні дані для розрахунку. Навантаження на механізм визначається зусиллям відриву деталі від робочої платформи. За результатами попереднього розрахунку прийнято $F = 22,5$ Н.

Також у конструкції можливі додаткові динамічні складові (ривок, тертя, удар при контакті скребка), тому вводиться коефіцієнт динамічності $k_d = 1.2 \dots 1.5$.

Розрахункове навантаження визначаємо за формулою:

$$F_{розр} = k_d \cdot F \quad (3.1)$$

Для подальших оцінок приймемо $k_d = 1,3$.

Тоді розрахункове навантаження буде:

$$F_{розр} = 1,3 \cdot 22,5 = 29,25 \text{ Н.}$$

Матеріал 3D-друкованих деталей ABS. Для інженерних оцінок приймають допустимі напруження з урахуванням запасу. Орієнтовні межі міцності ABS при FDM-друці залежать від параметрів друку, однак для розрахунку доцільно використовувати консервативні допустимі напруження:

- для розтягу/згину в площині шарів: $\sigma_{розт/згин,XY}$ приймаєм з великим запасом;
- для міжшарової міцності: $\sigma_{міцн,Z}$ зменшене значення;
- для зсуву (особливо у зоні отворів під болти): $\tau_{зсув}$ приймають ще нижче.

На практиці проектування 3D-друкованих вузлів рекомендується закласти коефіцієнт запасу не менше 2...3, а для навантаження «на відрив шарів» 3...5.

1. Перевірка міцності 3D-друкованого кронштейна (згин).

Одним із найбільш навантажених 3D-друкованих елементів у подібних пристроях є кронштейн або тримач робочого органу (скребка/захвата), на який діє сила $F_{розр}$ з плечем l відносно площини кріплення.

Згинальний момент визначається за формулою:

$$M_{згин} = F_{розр} \cdot l \quad (3.2)$$

Напруження згину в небезпечному перерізі:

$$\sigma_{згин} = \frac{M_{згин}}{W} \quad (3.3)$$

де W - момент опору перерізу.

Для прямокутного перерізу шириною b та товщиною h :

$$W = \frac{b \cdot h^2}{6} \quad (3.4)$$

Тоді:

$$\sigma_{згин} = \frac{6F_{розр}l}{b \cdot h^2} \quad (3.5)$$

Критерій міцності визначимо буде:

$$\sigma_{згин} \leq \sigma_{розр} \quad (3.6)$$

Практична рекомендація для FDM-деталей: небезпечний переріз слід орієнтувати так, щоб основні розтягуючі напруження діяли в площині шарів (XY), а не «розривали» деталь по шарах (Z).

2. Перевірка кріпильних зон 3D-друкованих деталей (зсув і зминання)

Найчастіше руйнування 3D-друкованих деталей відбувається в зоні отворів під болти через: зсув матеріалу; зминання під головкою гвинта/шайбою; розшарування при затягуванні.

Зсув у зоні провущини кронштейна. Кронштейн має дві стінки, що сприймають зусилля то розрахунок зсуву визначається за формулою:

$$\tau = \frac{F_{розр}}{A_{зсув}}, \quad (3.7)$$

де $A_{зсув}$ - площа зсуву.

Умова міцності:

$$\tau \leq \tau_{розр} \quad (3.8)$$

Змінання (контактні напруження) біля отвору. Контактні напруження біля отвору визначаються за формулою:

$$\sigma_{згин.отв.} = \frac{F_{розр}}{t \cdot d} \quad (3.9)$$

де t - товщина деталі; d - діаметр отвору (гвинта).

Умова на відповідність контактним напруженням:

$$\sigma_{отв} \leq \sigma_{згин.отв.} \quad (3.10)$$

Для 3D-друкованих деталей доцільно використовувати шайби збільшеного діаметра або закладні металеві втулки, щоб зменшити контактні напруження і ризик розшарування.

3. Перевірка елементів каркаса (алюмінієвий профіль 2020)

Металеві елементи каркаса (профіль 2020, кронштейни, стяжки) мають значно вищу жорсткість і міцність порівняно з полімерними деталями, тому для них перевірка зазвичай показує великий запас. Для оцінки напружень у профілі можна застосувати аналогічний підхід (згин або розтяг), а також перевірку різьбових з'єднань на зрив/зминання в Т-гайках.

Оскільки частина елементів пристрою автоматичного вилучення виробів виготовляється методом FDM/FFF 3D-друку (ABS-пластик), при міцнісних розрахунках необхідно враховувати особливості матеріалу та технології виготовлення. Для 3D-друкованих деталей характерна анізотропія властивостей: міцність у площині шарів (XY) зазвичай вища, ніж у напрямку між шарами (Z). Тому для забезпечення надійності в розрахунок вводять коефіцієнти запасу, а також рекомендують орієнтувати деталь при друці так, щоб основні розтягуювальні напруження діяли переважно в площині шарів.

Небезпечним елементом приймається 3D-друкована деталь кріплення/важіль, на який діє зусилля зняття виробу. Розрахункова схема це консольна пластина, закріплена одним кінцем, на вільному кінці діє сила $F_{розр}$ з плечем l .

Вихідні дані (за заданими параметрами): товщина (висота перерізу): $h = 4$ мм; ширина: $b = 42$ мм; плече прикладання сили: $l = 50$ мм; діаметр отвору у зоні кріплення: $d = 5$ мм; розрахункове навантаження з урахуванням динамічності: $F_{розр} = 29,25$ Н.

З врахуванням числових значень зробимо розрахунок деталей на міцність та згин.

Максимальний згинальний момент у зоні закріплення:

$$M = 29,25 \cdot 50 = 1462,5 \text{ Н}\cdot\text{мм.}$$

Для прямокутного перерізу момент опору згину:

$$W = (42 \cdot 16) / 6 = 112 \text{ мм.}$$

Напруження згину:

$$\sigma_{згин} = 1462 / 112 = 13,06 \text{ МПа.}$$

Отримане напруження згину $\sigma_{згин} \approx 13,1$ МПа є визначальним для оцінювання працездатності деталі, оскільки саме згин є домінуючим видом навантаження для консольних елементів.

Середнє напруження зрізу для перерізу:

$$A = b \cdot h = 42 \cdot 4 = 168 \text{ мм}^2. \quad (3.11)$$

$$\tau = F_{розр} / A = 29,25 / 168 = 0,174 \text{ МПа.} \quad (3.12)$$

					MPMA 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						61
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Напруження зрізу $\tau \approx 0,17$ МПа є малим порівняно із напруженнями згину і не є критичним.

Перевірка кріпильної зони біля отвору на зминання

У зоні отвору під гвинт можливе локальне зминання матеріалу. Контактні напруження визначаються за формулою:

$$\sigma_{розр} = \frac{F_{розр}}{h \cdot d} \quad (3.13)$$

$$\sigma_{розр} = \frac{29,25}{4 \cdot 5} = 1,46 \text{ МПа.}$$

Отримане контактне напруження $\sigma_{розр} \approx 1,46$ МПа не є критичним, однак для підвищення довговічності вузла доцільно застосовувати шайбу збільшеного діаметра або закладну втулку, що зменшить контактні напруження та ризик локального руйнування.

Оцінка запасу міцності для 3D-друкованої деталі. Для ABS-деталей, виготовлених методом FDM, допустимі напруження суттєво залежать від параметрів друку (температура, заповнення, кількість периметрів) та орієнтації шарів. Для інженерної оцінки доцільно приймати консервативні допустимі значення:

- при навантаженні в площині шарів (XY): $\sigma_{розр} \approx 15$ МПа
- при навантаженні з ризиком міжшарового руйнування (Z): $\sigma_{розр} \approx 10$ МПа.

Запас міцності визначимо за формулою:

$$n = \sigma_{розр} / \sigma_{факт} \quad (3.14)$$

1. Для кращого варіанту (XY):

$$n = 15 / 13,06 = 1,15.$$

2. Для гіршого випадку (Z):

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						62
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

$$n = 10/13,06 = 0,77.$$

Отже, при товщині $h = 4$ мм і плечі $l = 50$ мм елемент має прийнятну працездатність лише за умови правильного розташування шарів (щоб напруження діяли переважно в площині XY) та якісного друку. Для забезпечення підвищеної надійності і ресурсу роботи пристрою рекомендовано конструктивне підсилення деталі.

Виконані розрахункові залежності дозволяють оцінити напружений стан елементів конструкції з урахуванням специфіки 3D-друкованих деталей. Найбільш критичними з точки зору міцності є зони концентрації напружень у 3D-друкованих кронштейнах та вузлах кріплення, де можливі зсув, зминання та міжшарове руйнування. Для забезпечення необхідної надійності рекомендовано орієнтувати шари друку відповідно до напрямку навантаження, застосовувати підсилення у вигляді ребер жорсткості, збільшені шайби та закладні елементи, а також приймати коефіцієнт запасу не менше 2...3 (а для відриву шарів до 5).

3.2. Розрахунок стійкості та жорсткості механізму

Жорсткість механізму автоматичного вилучення виробів визначає точність позиціонування робочого органу та стабільність процесу зняття деталі зі столу. Недостатня жорсткість призводить до пружних деформацій, вібрацій, збільшення часу операції та ризику пошкодження виробу або робочої поверхні. Для конструкцій з 3D-друкованими елементами (FDM/FFF) питання жорсткості особливо актуальне через нижчий модуль пружності полімерів порівняно з металами та можливу анізотропію властивостей.

Для оцінки жорсткості розглядається найбільш навантажений елемент (кронштейн/плече/важіль), який у розрахунковій схемі моделюється як консольна балка прямокутного перерізу з навантаженням на кінці. Стійкість розгля-

					MPMA 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						63
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

дається як здатність елементів зберігати геометричну форму та не переходити у нестійкий стан під дією стискуючих навантажень; у даному механізмі критичними є деформації згину, тоді як класичне поздовжнє стиснення (Ейлера) зазвичай не є визначальним через відносно малі сили.

Розрахунок жорсткості 3D-друкованого елемента (прогин).

Вихідні дані: $F_{розр} = 29,25$ Н; $l=50$ мм; $b = 42$ мм; $h = 4$ мм; $E = 20000$ Н/мм².

Момент інерції прямокутного перерізу:

$$I = b h^3 / 12 \quad (3.15)$$

$$I = (42 \cdot 4^3) / 12 = 224 \text{ мм}^4.$$

Прогин кінця консольної балки при силі на кінці балки:

$$\delta = \frac{F_{розр} l^3}{3E \cdot I} \quad (3.16)$$

Підстановка числові значення отримаємо:

$$\delta = \frac{29,25 \cdot 50^3}{3200000 \cdot 224} = 0,272 \text{ мм.}$$

Отже, розрахунковий прогин 3D-друкованого елемента становить:

$$\delta \approx 0,272 \text{ мм.}$$

Це доволі незначене значення для вузла, який повинен забезпечувати контрольований контакт зі столом і стабільне зусилля зняття.

Жорсткість елемента можна оцінити як відношення сили до прогину визначається за формулою:

$$k = \frac{F_{розр}}{\delta} \quad (3.17)$$

$$k = \frac{29,25}{0,72} = 40,629 \text{ Н/мм.}$$

Отримана жорсткість $k \approx 40,629$ Н/мм характеризує значну жорсткість конструкції.

Перевірка точності кута повороту пристрою (додатково для точності).

Кут повороту консольного елемента на вільному кінці визначається за формулою:

$$\varphi = \frac{F_{розр} l^3}{2EI} \quad (3.18)$$

$$\varphi = \frac{29,25 \cdot 50^3}{2 \cdot 20000 \cdot 224} = 0,00816 = 0,47 \text{ градуса.}$$

Кут $\varphi \approx 0,47$ градуса не може впливати на геометрію контакту робочого органу зі столом.

У розглянутому вузлі основне навантаження викликає згин, а не поздовжнє стиснення, тому класична втрата стійкості за Ейлером є малоюмовірною. Разом з тим, стійкість у прикладному сенсі для даного механізму означає: відсутність різких коливань та самозбудження при контакті зі столом; відсутність «пружного відскоку» робочого органу; збереження геометрії траєкторії при циклічній роботі.

Тому для підвищення стійкості руху доцільно: обмежувати прискорення приводу (плавний розгін/гальмування); зменшувати люфти в шарнірах і кріпленнях; збільшувати жорсткість найбільш податливих 3D-друкованих деталей.

3.3 Оцінка надійності та ресурсу роботи пристрою

Надійність пристрою автоматичного вилучення виробів з 3D-принтера визначається здатністю механізму виконувати задані функції у встановлених режимах експлуатації протягом заданого часу або кількості циклів без відмов. Для даного пристрою ключовими показниками є:

- безвідмовність (відсутність відмов у процесі виконання циклу вилучення);
- довговічність (ресурс до граничного стану деталей/вузлів);
- ремонтпридатність (можливість швидкої заміни вузлів);
- збережуваність (стійкість параметрів при зберіганні).

Оскільки механізм працює циклічно (кожне вилучення = один цикл), доцільно оцінювати ресурс у циклах та переводити його в термін служби через середню кількість циклів за добу/місяць.

Визначення навантажувального циклу і режиму роботи. Один робочий цикл пристрою складається з послідовних етапів: підхід робочого органу → контакт/відрив виробу → відведення → скидання → повернення в початкове положення. За результатами силових розрахунків у критичний момент циклу (відрив) діє розрахункове зусилля $F_{розр} = 29,25$ Н.

Це навантаження є визначальним для оцінки втомної довговічності елементів, зокрема 3D-друкованих (ABS) кронштейнів/важелів, а також кріпильних вузлів.

Типово для безперервної роботи 3D-принтера приймають 10...30 циклів/добу.

Загальна кількість циклів за час експлуатації ТТТ (у днях):

Для пристрою з 3D-друкованими деталями найбільш імовірно відмови пов'язані з: втомним руйнуванням або тріщинами в 3D-друкованих елементах у зонах концентрації напружень (біля отворів, ребер, тонких перемичок); розхитуванням різьбових з'єднань (вібрація, повторні навантаження); зносом шарнірів/напрямних (тертя, люфти); перегрівом приводу (кроковий двигун, драйвер) та деградацією електроніки; відмовою кінцевих вимикачів або збоями керування (неправильна кінематика, некоректне позиціонування).

Тому ресурс оцінюється перш за все для найбільш навантажених елементів: 3D-друкованого важеля/кронштейна, кріплення, рухомих з'єднань та приводу.

Оцінка ресурсу 3D-друкованого елемента за напруженням (циклічна робота). За результатами розрахунку міцності для 3D-друкованого елемента (ABS) при $l = 50$ мм отримано напруження згину $\sigma_{\text{згину}} \approx 13,06$ МПа

Для полімерів FDM характерна залежність довговічності від амплітуди напружень. Для інженерної оцінки приймають допустимий рівень напружень при багатоцикловій роботі як частку від статичної міцності, а також вводять коефіцієнти, що враховують: анізотропію (міжшарова міцність нижча); якість друку (заповнення, периметри); концентрацію напружень (отвори, різкі переходи); вплив температури.

Для ABS-деталей FDM практично доцільно забезпечувати запас по витривалості не менше $n_{\text{довг}} \geq 1,5 \dots 2$. Якщо прийняти консервативно σ граничне ≈ 15 МПа для навантаження в площині шарів (XY), то:

$$n_{\text{довг}} = 15/13,06 = 1,15.$$

Отриманий запас є мінімально допустимим, тобто ресурс забезпечується за умови правильної орієнтації шарів, достатньої кількості периметрів і відсутності ударних навантажень. Для підвищення ресурсу рекомендується підси-

лення деталі (ребра жорсткості, збільшення товщини, металева накладка, зменшення плеча).

Оцінка ресурсу у циклах і терміні служби.

Прийmemo інтенсивність роботи $n = 20$ циклів/добу (типовий режим при серійному друці дрібних виробів).

Тоді за рік буде:

$$N_{рік} = 20 \cdot 365 = 7300 \text{ циклів/рік.}$$

Для кваліфікаційної роботи можна прийняти цільовий ресурс пристрою:

$$N_{границний} = 20\,000 \text{ циклів.}$$

Тоді орієнтовний термін досягнення ресурсу:

$$T_{границний} = N_{границний} / n = 20000 / 20 = 1000 \text{ діб} \approx 2,74 \text{ роки.}$$

Таким чином, при прийнятому режимі експлуатації ресурс пристрою можна оцінити на рівні 2–3 років до необхідності планового обслуговування або заміни найбільш навантажених 3D-друкованих вузлів (насамперед кронштейнів і елементів кріплення).

Якщо фактична інтенсивність нижча (наприклад, 5–10 циклів/добу), то термін служби зростає пропорційно.

Для забезпечення стабільної роботи та підвищення ресурсу пристрою доцільно:

- друкувати відповідальні деталі з високим заповненням ($\geq 50\text{--}70\%$), 4–6 периметрів;
- орієнтувати модель так, щоб головні напруження діяли в площині шарів (XY);
- застосовувати скруглення, уникати різких переходів і тонких перемичок;
- у зонах отворів використовувати шайби збільшеного діаметра або втулки;

- виконувати періодичний контроль затягування різьбових з'єднань;
- забезпечити охолодження приводу (вентилятор), щоб уникнути перегріву двигуна та драйверів;
- передбачити "м'які" режими руху (обмеження прискорення) для зменшення ударних навантажень.

Оцінка надійності та ресурсу показала, що при циклічній роботі пристрою найбільш критичними з точки зору довговічності є 3D-друковані елементи в зоні згину та кріпильні вузли. Ресурс пристрою при інтенсивності 20 циклів/добу оцінено на рівні приблизно 20 000 циклів, що відповідає 2–3 рокам експлуатації з урахуванням планової заміни найбільш навантажених полімерних деталей.

Висновок до розділу 3

У третьому розділі виконано розрахунки, що підтверджують працездатність та надійність запропонованої конструкції. Зокрема проведено розрахунок міцності та жорсткості основних елементів маніпулятора, аналіз стійкості конструкції при циклічних навантаженнях, а також розглянуто питання безпеки та екологічності пристрою.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У першому розділі виконано огляд сучасних технологій 3D-друку та проведено аналіз основних адитивних методів виготовлення виробів. Розглянуто фізичні основи формування виробу, процес екструзії філаменту та основні технологічні фактори, що впливають на якість і точність друку. Проаналізовано кінематичні схеми 3D-принтерів, зокрема способи переміщення екструдера, робочого столу та напрямних, а також особливості формування робочої зони для різних типів кінематики. Окрему увагу приділено аналізу існуючих засобів автоматизації зняття надрукованих виробів, зокрема рішень на основі гнучких платформ, механічних скребоків, стрічкових столів та маніпуляторів, що дозволило обґрунтувати доцільність розробки пристрою автоматичного вилучення виробів для підвищення автономності та продуктивності 3D-принтера.

У другому розділі здійснено проектування пристрою автоматичного вилучення виробів 3D друку. Запропоновано принцип роботи пристрою, який базується на поєднанні лінійного приводу, крокового двигуна та механічного маніпулятора зі скребками для зняття готових виробів 3D друку. Виконано кінематичний розрахунок руху маніпулятора, розрахунок необхідно-го зусилля для відділення деталі від платформи. Здійснено також підбір електромеханічних компонентів для підключення лінійного приводу, крокового двигуна та механічного маніпулятора до загальної системи 3D принтера. Розроблено конструкцію пристрою спроектовано в середовищі з урахуванням вимог адитивного виробництва.

У третьому розділі виконано розрахунки, що підтверджують працездатність та надійність запропонованої конструкції. Зокрема проведено розрахунок міцності та жорсткості основних елементів маніпулятора, аналіз стійкості конструкції при циклічних навантаженнях, а також розглянуто питання безпеки та екологічності пристрою.

					MPMA 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						70
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ

1. Застосування адитивного виробництва та 3D-друку код доступу: Код доступу: <https://blog.thriveon.net/the-rise-of-additive-manufacturing-and-3d-printing-modern>
2. Ультраробокс – з турботою про ваш 3Д друк. Інтернет магазин комплектуючих 3Д друку. Код доступу: <https://www.ultrarobox.ru/blog/3d-articles/2021/raznovidnosti-kinematik-3d-printerov/>
3. Все про 3D-друк. Код доступу: https://en.wikibooks.org/wiki/3D_Printing
4. Як працює 3D принтер [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://moyaosvita.com.ua/tehnologii/yak-pracyuye-3d-printer/>
5. 5.Технології 3D друку [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://www.ixbt.com/printer/3d/3d_tech.shtml
6. Prusa: Flexible steel sheets (пружинні/гнучкі листи). Код доступу: https://help.prusa3d.com/article/flexible-steel-sheets-guidepost_2195.
7. Creality CR-30 / 3DPrintMill (конвеєрний стіл. Код доступу: <https://3dprintingindustry.com/news/creality-launches-its-3dprintmill-cr-30-conveyor-belt-3d-printer-on-kickstarter-technical-specifications-and-pricing-180256/>
8. E3D ToolChanger / Motion System – приклади «промисловішого» підходу (ілюстрації системи): <https://3dprintingindustry.com/news/review-e3d-motion-system-and-toolchanger-multitool-and-multi-material-3d-printer-186182/>
9. Роботизований маніпулятор Dobot Magician Підтримка 3D-друку. Код доступу: Детальніше: <https://top-device.com.ua/ua/p975788459-robotizirovannyj-manipulyator-dobot.html>
10. Інноваційні, енерго- та ресурсозберігаючі технології галузі: методичні вказівки до вивчення дисципліни для здобувачів вищої освіти ОНР «доктор філософії» спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» / упоряд.:

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						71
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

О.С.Поліщук, М.Є.Скиба, С.П.Лісевич, О.О.Коротич, В.О.Харжевський. Хмельницький : ХНУ, 2021. 212 с.

11. Autodesk Instructables – проекта та стартапи. Код доступу: <https://www.instructables.com/3D-APR-3D-Automatic-Print-Removal>.

12. Igus Motion plastics. Офіційний сайт розробника актуаторів. Код доступу: <https://www.igus.com.ua/product/>

13. Крокові двигуни – каталог продукції. Код доступу: <https://3dwayshop.com.ua/krokovyi-dvyhuny/>

14. Евелекс. Інтернет-магазин товарів і послуг: код доступу: <https://evelex.in.ua/ua/p2590799647-ventilyator-4010s-12v>.

15. Набродов В. З. Допуски, посадки та технічні вимірювання : підручник / В. З. Набродов. — Київ : Літера ЛТД, 2019. — 224 с.

16. ДСТУ ISO 286-2:2002. Система допусків і посадок / український стандарт.

17. Шваб'юк В.І., Книш В.В., Кривень О.М. Опір матеріалів: підручник. - К. : Знання, 2016. ISBN 978-617-07-0360-4.

18. Гурняк Л.І., Гуцуляк Ю.В., Юзьків Т.Б. Опір матеріалів : підручник. Новий світ-2000, 2024.

					MPMA 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						72
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТКИ

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						73
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

