

ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД  
«УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ ТА ПРАВА «КРОК»»

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

Тема: «Гнучке управління розробкою модифікації 3D FDM-принтерів для друку гранульованим (пелетним) полімером»

Ступінь вищої освіти – магістр

Спеціальність – 073 «Менеджмент»

Освітня програма «Agile-технології розробки програмного забезпечення»

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА**

Керівники: завідувач кафедри інформаційного менеджменту, математики та статистики, доцент, к.е.н.  
Денис БАЛДИК

Виконав: здобувач  
групи МЕН/Agile-24м  
Михайло ЛОЗА

Засвідчую, що кваліфікаційна робота оформлена відповідно до ДСТУ 3008:2015 та не містить запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Здобувач: \_\_\_\_\_  
(підпис)

ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД  
«УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ ТА ПРАВА «КРОК»»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

завідувач кафедри інформаційного  
менеджменту, математики та статистики

\_\_\_\_\_ Денис БАЛДИК

« 28 » жовтня 2025 р.

ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ  
Лоза Михайло Сергійович

Тема роботи	Гнучке управління розробкою модифікації 3D FDM-принтерів для друку гранульованим (пелетним) полімером.
Номер та дата наказу прозатвердження теми	№ 109-2 від 14 жовтня 2025 р.
Коротка постановка завдання	Керуючись методиками гнучкого управління, створити дорожню карту виконання модифікації 3-D принтера(-ів) для друку гранульованим філаментом, виконати модифікацію, оцінити практичні результати і сформулювати рекомендації для подальшого вдосконалення.
Посилання на джерела інформації (не більше п'яти найменувань, які рекомендує науковий керівник)	1) Балдик Д. Інтеграція статистичних методів в Agile-управління бізнес-проєктами // <i>Вчені записки Університету «КРОК»</i> . 2025. № 3(79). С. 236–247. DOI: <a href="https://doi.org/10.31732/2663-2209-2025-79-236-247">https://doi.org/10.31732/2663-2209-2025-79-236-247</a> 2) Данченко О. Б., Корейба А. В. Моделі самоорганізації в проєктних командах // <i>Вчені записки Університету «КРОК»</i> . 2025. № 1(77). С. 49–57. DOI: <a href="https://doi.org/10.31732/2663-2209-2025-77-257-264">https://doi.org/10.31732/2663-2209-2025-77-257-264</a>
Вимоги до кваліфікаційної роботи	Кваліфікаційна робота має містити теоретичне та/або практичне дослідження за темою роботи, яку слід розглядати як складне спеціалізоване завдання або практичну проблематику в галузі управління та адміністрування, яка характеризується комплексністю та невизначеністю умов і потребує застосування Agile-технологій.

Дата видачі завдання « 27 » жовтня 2025 р.

Керівник

Денис БАЛДИК

Здобувач

Михайло ЛОЗА

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання	Примітка
<b>Підготовчий етап</b>			
1	Вибір напрямку дослідження та керівника.	01.09.2025 р.	<i>виконано</i>
2	Формування теми та призначення керівника.	22.09.2025 р.	<i>виконано</i>
3	Затвердження теми кваліфікаційної роботи.	09.10.2025 р.	<i>виконано</i>
4	Затвердження завдання на кваліфікаційну роботу.	27.10.2025 р.	<i>виконано</i>
<b>Основний етап</b>			
5	Розробка концепції кваліфікаційної роботи.	06.11.2025 р.	<i>виконано</i>
6	Підбір та вивчення джерел інформації з напрямку дослідження. Огляд існуючих аналогів.	08.11.2025 р.	<i>виконано</i>
7	Теоретико-методичний аналіз предметної області та розширена постановка завдання. Підготовка та подання керівнику розділу 1 кваліфікаційної роботи.	13.11.2025 р.	<i>виконано</i>
8	Дослідницько-аналітична робота. Підготовка та подання керівнику розділу 2 кваліфікаційної роботи.	20.11.2025 р.	<i>виконано</i>
9	Розробка рекомендацій щодо вдосконалення управління із застосуванням Agile-технологій. Підготовка та подання керівнику розділу 3 кваліфікаційної роботи.	27.11.2025 р.	<i>виконано</i>
10	Підготовка та подання керівнику першого варіанту всієї кваліфікаційної роботи.	01.12.2025 р.	<i>виконано</i>
11	Доопрацювання кваліфікаційної роботи з урахуванням зауважень керівника та представлення керівнику доопрацьованого варіанту кваліфікаційної роботи	03.12.2025 р.	<i>виконано</i>
<b>Завершальний етап</b>			
12	Представлення рукопису для перевірки на плагіат.	08.12.2025 р.	<i>виконано</i>
13	Підготовка презентації та доповіді на передзахист.	20.12.2025 р.	<i>виконано</i>
14	Передзахист кваліфікаційної роботи.	23-24.12.2025 р.	<i>виконано</i>
15	Технічна самооцінка роботи на відповідність вимогам до оформлення та виправлення недоліків.	12-16.01.2026 р.	<i>виконано</i>
16	Експертиза роботи керівником та зовнішнім експертом (рецензентом).	20.01.2026 р.	<i>виконано</i>
17	Доопрацювання доповіді та презентації для захисту.	22.01.2026 р.	<i>виконано</i>
18	Захист кваліфікаційної роботи.	26-30.01.2026 р.	<i>виконано</i>

Керівник

Денис БАЛДИК

Здобувач

Михайло ЛОЗА

## АНОТАЦІЯ

*Лоза М.С. Гнучке управління розробкою модифікації 3D FDM-принтерів для друку гранульованим (пелетним) полімером для хобійного чи малосерійного виробництва.*

В кваліфікаційній роботі розглянуто теоретико-методичні засади застосування Agile та Lean методологій для організації інженерного проєкту з високим рівнем невизначеності на прикладі модифікації FDM 3D-принтера під гранульний (пелетний) екструдер. Обґрунтовано актуальність переходу від філаменту до гранул як способу зниження собівартості 3D-друку та розширення доступу до деяких технічних матеріалів в Україні. Проаналізовано існуючі рішення гранульного друку (промислові та DIY), сформовано підхід до планування та реалізації робіт із використанням Scrum-спринтів, інкрементів і MVP, а також Lean-інструментів мінімізації втрат.

У практичній частині виконано ітеративне проєктування, складання та калібрування параметрів модифікованої системи екструдера та проведено тестування працездатності рішення. Сформовано рекомендації щодо підвищення надійності експлуатації. Додатково розглянуто потенціал альтернативного використання гранульного екструдера для локальної переробки пластикових залишків чи виготовлення філаменту для класичного FDM-друку.

**Ключові слова:** Agile, Scrum, Lean, 5S, MVP, інкремент, 3D-друк, FDM, пелетний екструдер, пелети, полімерні гранули, зниження собівартості.

## ANNOTATION

*Loza M.S. Agile Management of Developing Modifications to 3D FDM Printers for Printing with Granulated (Pellet) Polymer for Hobbyist or Small-Batch Production.*

This qualification thesis examines the theoretical and methodological foundations of applying Agile and Lean methodologies to organize an engineering project with a high level of uncertainty by modifying an FDM 3D printer with a pellet extruder as a case study. The relevance of transitioning from filament to pellets is substantiated as a way to reduce the cost of 3D printing and to improve access to some engineering-grade materials in Ukraine. Existing pellet-printing solutions (industrial and DIY) are analyzed, and an approach to planning and executing the work is developed using Scrum sprints, increments, and an MVP, as well as Lean tools for waste minimization.

In the practical part, the modified extruder system was iteratively designed, assembled and calibrated, followed by functional testing of the solution. Recommendations for improving operational reliability are provided. In addition, the potential for alternative uses of a pellet extruder is considered, including local recycling of plastic waste and producing filament for conventional FDM printing.

Keywords: Agile, Scrum, Lean, 5S, MVP, increment, 3D printing, FDM, pellet extruder, pellets, polymer granules, cost reduction.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ 3D-ДРУКУ ТА ЇХ МОДИФІКАЦІЙ .....	11
1.1. Сучасні норми 3D друку. Аспекти досліджуваної проблеми.....	11
1.2. Огляд літератури та формування джерельної бази.....	17
1.3. Правові аспекти реалізації модифікацій 3D-принтерів.....	22
Висновки до розділу 1.....	26
РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДНИЦЬКО-АНАЛІТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЄКТУ МОДИФІКАЦІЇ 3D-ПРИНТЕРА.....	27
2.1. Аналіз готових рішень. Обґрунтування вибору модифікації .....	27
2.2. Постановка вимог до продукту. Потенційні проблеми та теоретичні рішення .....	30
2.3. Планування процесів проєкту. Створення Scrum-спринтів.....	34
2.4. Теоретична оцінка витрат та економії від реалізації модифікації. ....	40
Висновки до розділу 2.....	44
РОЗДІЛ 3 ПРОЄКТУВАННЯ, ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ВДОСКОНАЛЕННЯ МОДИФІКАЦІЇ 3D-ПРИНТЕРА .....	46
3.1. Покрокові аспекти дизайну в CAD для модифікації 3D принтеру з дотриманням LEAN за планом Scrum спринтів .....	46
3.2. Методика виправлення супутніх проблем та допрацювання модифікації. Реліз після MVP моделі. Оцінка перспективних покращень та рекомендації ....	62
3.3. Оцінка практичної успішності проєкту та фінальні фінансові показники .....	68
3.4. Альтернативні варіанти використання гранульного екструдера.....	70
Висновки до розділу 3.....	72
ВИСНОВКИ .....	74
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	76
ДОДАТКИ .....	80

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

CAD – Computer-Aided Design – комп’ютерне проектування (САПР).

CNC / ЧПК – Computer Numerical Control – числове програмне керування верстатами.

FDM – Fused Deposition Modeling – пошарове наплавлення розплавленого полімеру (FFF-друк).

G-Code – мова керуючих команд для ЧПК/3D-принтерів (траєкторії, температури, подачі тощо).

MCU – Microcontroller Unit – мікроконтролер (плата керування 3D-принтера).

MVP – Minimum Viable Product – мінімально життєздатна версія рішення/прототипу.

Rep-Rap / RepRap – Replicating Rapid Prototyper – відкритий проєкт самовідтворюваних 3D-принтерів.

RPM – Revolutions Per Minute – обертів за хвилину.

PA – Polyamide – поліамід (нейлон), напр. PA6, PA12.

PP – Polypropylene – поліпропілен.

PLA – Polylactic Acid – полілактид, біорозкладний пластик.

PETG – Polyethylene Terephthalate Glycol-modified – модифікований поліетилентерефталат, або «пляшковий пластик» з додаванням гліколя.

PWM / ШІМ – Pulse-Width Modulation – широтно-імпульсна модуляція.

SLA – Stereolithography – стереолітографія (фотополімерний друк).

SoC – System-on-a-Chip – система-на-кристалі (процесор + периферія в одному чипі).

VFA – Vertical Fine Artifacts – вертикальні дрібні артефакти/рифлення на стінках друку (часто від механіки/резонансів).

KPM – кваліфікаційна робота магістра.

ПК – персональний комп’ютер.

ЦМ – Центр маси.

## ВСТУП

*Актуальність теми.* 3D-друк відіграє важливу роль у сучасному середовищі персонального виробництва та прототипування, завдяки теперішній доступності та широким можливостям. Одним із найпоширеніших методів є підвид FDM-друку (Fused Deposition Modeling), який використовує філамент як витратний матеріал. Проте зростання вартості філаменту, обмежена доступність технічних матеріалів у формі нитки в Україні та значні обсяги пластикових відходів стимулюють пошук альтернатив.

Одним із перспективних напрямів є використання гранульного (пелетного) полімеру: для технічних матеріалів гранули часто є значно доступнішими та дешевшими, ніж філамент, а повторне використання пластикових залишків у межах «класичного» підходу фактично неможливе без додаткового перероблення у філамент.

Додатковим каталізатором практичного інтересу до теми стало те, що наприкінці 2024 року автор Greenboy3D представив бета-версію модифікації деяких принтерів для друку полімерними пелетами, що активізувало обговорення гранульного друку серед спільнот користувачів.

У межах власного проєкту на базі принтера FlyingBear Reborn 2 та проєктної практики в лабораторії 3D-друку Університету «КРОК» було підтверджено практичну значущість ідеї, водночас зафіксовано підвищену складність реалізації та потребу в системному управлінні процесом модифікації.

*Мета та завдання роботи.* Метою кваліфікаційної роботи є обґрунтування та практична реалізація модифікації 3D FDM-принтера для друку гранульованим (пелетним) полімером із застосуванням підходів гнучкого управління, а також оцінка практичних результатів і підготовка рекомендацій щодо можливого подальшого вдосконалення.

**Задачі** даної роботи включають:

- На основі підходів Agile та Lean сформулювати дорожню карту (roadmap) розробки модифікації на прикладі власного 3D-принтера.

- Розробити, зібрати та протестувати мінімально життєздатну версію (MVP) гранульного екструдера.
- Оцінити ефективність гранульного екструдера у порівнянні з традиційним FDM-друком за витратами, якістю та стабільністю роботи.
- Розглянути потенціал масштабування модифікації на інші моделі принтерів, включно з варіантами адаптерів.
- Протестувати альтернативні способи використання гранульного екструдера (наприклад, друк подрібненими деталями або FDM-друк філаментом, отриманим з пелетного екструдера).
- Оцінити результати модифікації, зокрема економічну доцільність і практичну ефективність, сформулювати рекомендації для подальшого вдосконалення.

*Об'єкт дослідження* кваліфікаційної роботи – це процес розробки та впровадження модифікації 3D FDM-принтера для друку гранульованим (пелетним) полімером як інженерного проєкту з високим рівнем невизначеності, що поєднує механіку, електроніку та налаштування прошивки.

*Предметом дослідження* – це процеси та практики гнучкого управління (Agile та Scrum) і Lean-підходу, застосовані до організації та управління проєктом модифікації 3D-принтера під пелетний екструдер (беклог, спринти, інкременти/MVP, критерії успіху, мінімізація втрат часу й матеріалів).

*Методи досліджень.* У роботі використано: аналіз та узагальнення джерел і практик у сфері 3D-друку; інженерне проєктування та ітераційне удосконалення рішення; експериментальну перевірку через тестові інкременти (CAD-адаптер, MVP-збірка, тестовий друк); елементи порівняльної оцінки та документування результатів. Agile-підхід застосовано як рамку організації інженерного експерименту з високою невизначеністю, Scrum-практики реалізовано через ведення беклогу, розбиття роботи на спринти та визначення критеріїв успіху.

Lean-принципи використано для мінімізації втрат часу й матеріалів через фокус на MVP та стандартизовані умови тестування; додатково враховано інструменти 5S і логіку PDCA-циклу.

*Практична значущість.* Практичне значення роботи полягає у формуванні керованого підходу до реалізації модифікації FDM-принтера під пелетний екструдер, що потенційно дозволяє зменшити залежність від філаменту, підвищити доступність технічних матеріалів у побутовому чи малосерійному виробництві та створити передумови для скорочення пластикових відходів.

Отримані результати та рекомендації можуть бути використані як основа для повторення або масштабування модифікації на інші моделі 3D-принтерів.

*Апробація результатів* Апробацію результатів здійснено під час виконання власного проєкту модифікації на базі принтера Reborn 2 та в межах проєктної практики за підтримки лабораторії 3D-друку Університету «КРОК» в листопаді 2025 року.

*Структура роботи.* Робота складається зі вступу, трьох розділів і висновків, викладених на 71 сторінці тексту. Матеріали кваліфікаційної роботи містять 4 таблиці і 25 рисунків. Список використаних джерел складається із 35 найменувань, які уміщено на 5 сторінках, 5 додатків – на 5 сторінках.

## РОЗДІЛ 1

### ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ 3D-ДРУКУ ТА ЇХ МОДИФІКАЦІЙ

#### 1.1. Сучасні норми 3D друку. Аспекти досліджуваної проблеми

3D-друк народився як інструмент Rapid Prototyping Manufacturing (RPM): у 80-х інженерам (здебільшого, конструкторським відділам) був необхідний спосіб швидко робити фізичні прототипи з CAD-моделей, щоб не чекати тижні на фрезерування чи лиття. Перші технології – стереолітографія (SLA) Чака Галла (патент 1986) та FDM Скотта Крампа (кінець 1980-х) – спочатку були дуже дорогими, працювали на закритому обладнанні й матеріалах і стояли в R&D-відділах автомобільних, аерокосмічних та медичних компаній як швидкий та простий інженерний інструмент для прототипів [1].

До появи 3D-принтерів прототипи робили «традиційними» фізичними методами. Для грубих концептів брали дерево, піну, гіпс, пластилін або глину: вирізали, шліфували, ліпили форми, щоб просто «помацати» габарити та ергономіку. Коли потрібна була точність, переходили до верстатів й майстерень – часто для цього на виробництві поблизу конструкторських бюро було зарезервовано один комплект: токарного, фрезерного обладнання для металу або пластику, іноді для виготовлення разових форм і лиття (наприклад, з смол чи металу). З 80–90-х до цього додалась ЧПК-обробка, але це все одно означало: спочатку підготовка технології, потім налаштування верстата, потім довгий цикл виготовлення. Будь-яка зміна в конструкції – це переробка креслень і новий цикл виробництва, тому інженери намагалися мінімізувати кількість ітерацій. 3D-друк, по суті, «зламав» цю логіку, зробивши швидкі й часті покращення нормою, а не розкішшю.

Для звичайних користувачів усе змінилося пізніше, коли з'явилися відкриті та дешевші FDM-системи. У 2000-х спрацював ефект open-source, коли RepRap-рух і подібні проєкти показали, що принтер можна зібрати з відносно дешевих деталей, а після закінчення ключових патентів на FDM (близько 2009

року) виробники змогли вільно копіювати базову ідею, різко знизивши ціни. Особливо друкарі завдячують проєкту Rep-Rap доктора Адріана Боуера, що було запущено в 2005 році з метою здешевити RPM-машини (майбутні 3D-принтери) майже в 100 раз. Також, Rep-Rap мав на меті довести, що 3D-принтери здатні до «самореплікації» - що й заключено в назві їх проєкту. Проєкт Rep-Rap виграв декілька значних галузевих нагород в 2017 році, а в 2019 році засновника було нагороджено Орденом Британської Імперії королевою Єлизаветою II [2].

Принцип самореплікації був значущим проривом, у порівнянні з іншими проєктами тої епохи, які, в основному, базувались на конструкціях з фанери. На відміну від них, принтери Rep-Rap розвивались у напрямку досягнення максимального відсотку деталей, що можуть бути надруковані на самому принтері, таким чином, збільшуючи кількість принтерів – можна отримати меншу й меншу вартість одиниці з часом. Саме таку стратегію використала також відома компанія Prusa Research Джозефа Пруші – принтери, що тільки но були виготовлені – брали участь у друці наступної партії принтерів, паралельно друкуючи й певну художню фігурку, що вкладалась в комплект поставки покупцю – як знак перевірки якості принтера.

Так 3D-принтери переїхали з інженерних лабораторій у майстерні, ВУЗи, школи й домівки: їх почали купувати не лише для прототипів, а й для DIY-проєктів, ремонту, хобі та малосерійного виробництва. Таким чином, в лабораторії університету «КРОК» студенти мали можливість обмінятися досвідом і прийняти участь у проєктній практиці в листопаді 2025 року.

Дана кваліфікаційна робота також надалі базуватиметься на принципі самореплікації і буде використовувати здебільшого 3D-друк як основний метод виготовлення деталей для монтажу модифікацій на 3D-принтери.

Класичний FDM-друк вимагає попередньо екструдованого філаменту – пластикової нитки строго заданого діаметра. Це обмежує вибір матеріалів, особливо технічних (наприклад, PA66-GF або PC-CF), які рідко доступні у формі філаменту, тоді як у формі гранул – значно дешевші і доступніші. Крім того,

повторне використання пластикових залишків із попереднього друку неможливе без додаткового перероблення у філамент.

Екструдер (кроковий двигун з колесами) проштовхує філамент через термобар'єр від холодної зони до гарячої зони (хотенда). Цей шлях не уникнути на жодній конфігурації принтера, оскільки необхідно запобігти плавленню філаменту в холодній зоні – інакше подаючі колеса не зможуть проштовхнути підігрітий та розм'якшений філамент.

Калібри каналів подачі пластику та стала ефективна дистанція між подаючими колесами змушує нитку філаменту мати строгі розміри. Варіації діаметру, тим не менш, трапляються часто впродовж друку і можуть приводити або до нестабільної екструзії, або до застрягання філаменту з утворенням «пробки» і необхідності чистки чи ремонту. Необхідність такого контролю значно збільшує вартість філаменту.

Оскільки після подаючих коліс філамент має значну зону, що залишається твердою і, до певної міри, контрольованою, така конфігурація має значні плюси, що виражаються, в більшій мірі, в простоті користування та заміні типу/кольору полімеру, а також в можливості ефективно зменшувати масу пластику в зоні плавлення – тобто, робити ретракти для запобігання просочування зайвого пластику (див. рис. 1.1).

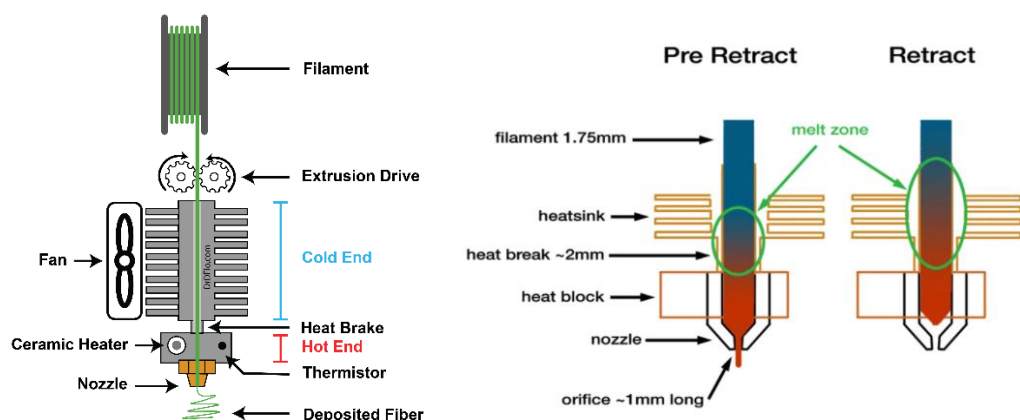
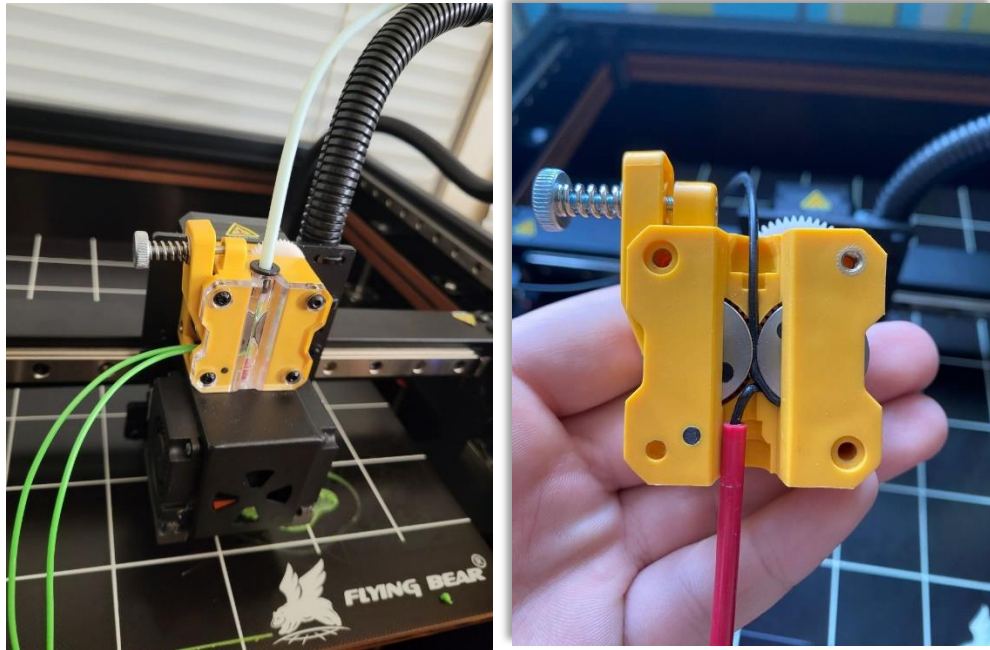


Рисунок 1.1 – Схематичні зображення FDM-екструдера для філаменту

Джерело: [3, 4]

Говорячи про зону, де філамент має залишатись твердим – варто згадати, що є філаменти та полімери м'якого класу. Такі філаменти можуть стискатись, згинатись, або навіть просочуватись в внутрішню частину екструдера при значно нижчому темпі друку, ніж з «простими» філаментами (див. рис. 1.2).



*Рисунок 1.2 – Наочні приклади проблем при друці м'якими філаментами  
Джерело: розроблено автором*

Проте заміна кольору, особливо коли в рамках одного шару використовується декілька кольорів, - багатократно збільшує кількість відходів та часу на друк (на прикладі використання системи AMS від BambuLab) (див. рис. 1.3). Тому більшість друкарів (людей, що професійно займаються 3д-друком) надає перевагу пост-обробці та фарбуванню готових деталей, замість заміни філаменту. Гранульні екструдери мають аналогічне обмеження у вигляді неефективної заміни матеріалу, тому рішення з фарбуванням готових деталей є універсальним, а ця проблема не буде вирішуватись в даному проєкті.

Отже, класичний підхід є дорожчим, менш гнучким і екологічно менш ефективним.



*Рисунок 1.3 – Результат друку кольорової моделі на однокструдерному користувацькому принтері Vatoolab*

*Джерело: [5]*

Альтернативним підходом є використання гранульного (пелетного) екструдера, який подає сировину у вигляді пластикових гранул, або безпосередньо з мішка або перероблених залишків. Такий екструдер базується на шнековій подачі, забезпечує ефективне плавлення та дозволяє використовувати широкий спектр полімерів.

Пелетні екструдери за своєю історією є старші за філамент. Сам же філамент виробляють на близьких за будовою екструдерах з тих самих гранул, але на обладнанні промислового масштабу. Такої ж конструкції екструдери використовуються для лиття пластику під тиском в металеві форми.

Конструкція (див. рис. 1.4) : варіативна геометрія шнека дозволяє як зачепити гранули на вході, так і підвищувати тиск розплаву по мірі просування до зони плавлення. В таких екструдерах відсутнє строге розділення термобар'єром на гарячу та холодну область, проте все ще присутній радіатор – щоб зберегти прийнятну температуру на вході для монтажу на принтер та для збереження твердості гранул і, відповідно, їх сипучості.

Загальне порівняння ключових характеристик наведено в таблиці 1.1.

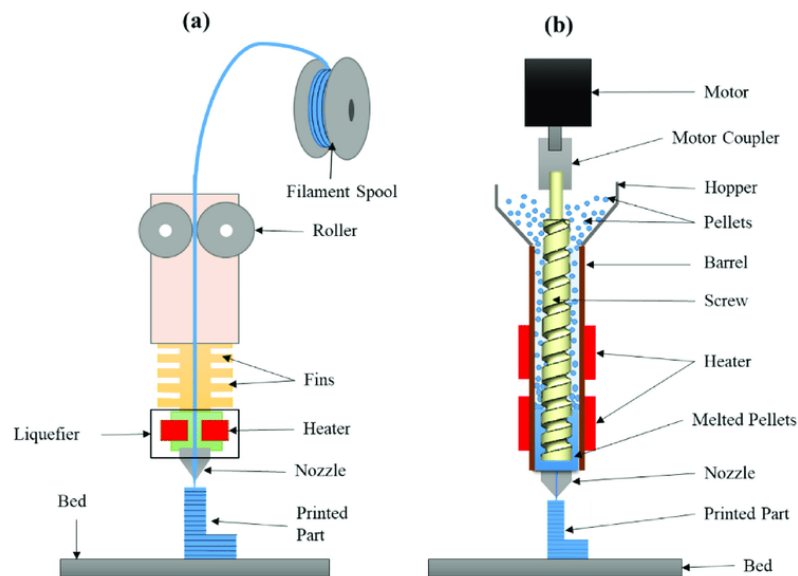


Рисунок 1.4 – Схематичне порівняння класичного та pelletного екструдера

Джерело: [6]

У проєкті реалізується модифікація користувацького 3D-принтера для встановлення такого екструдера. При цьому процес організовано з використанням принципів Agile та Lean – із поділом на ітерації, фокусом на MVP, короткими циклами тестування та адаптацією на основі зворотного зв'язку.

Таблиця 1.1 – Порівняння ключових характеристик класичного і гранульного екструдерів

Тип екструдера	Класичний	Гранульний
Вартість пластику	Близько 500 грн/кг	Близько 100 грн/кг
Якість друку	Хороша; виключаючи дефекти, спричинені типом кінематики	Прийнятна для деталей складної геометрії та хороша для плоскоповерхневих деталей; виключаючи дефекти, спричинені типом кінематики
Друк термостійкими інженерними пластиками (РА і композити)	Вартість від 1500 грн/кг; конструкція термокамери спрощена	Вартість від 300 грн/кг; конструкція термокамери ускладнюється резервуаром для гранул

<i>Тип екструдера</i>	<i>Класичний</i>	<i>Гранульний</i>
<i>Друк м'якими (TPU) та надм'якими (TPE) пластиками</i>	Можливість друку необхідно вивчати для конкретних принтерів через вплив конструкції каналу. Об'ємна швидкість друку не перевищує 3-5 мм <sup>3</sup> /сек. Ретракти та компенсація різкої зміни потоку ускладнені	Параметри друку не залежать від жорсткості пластику і обмежені швидкістю крокового двигуна та/або здатності нагріти пластик і рівна ~40 мм <sup>3</sup> /сек з потенціалом для покращення
<i>Вага, вплив на швидкість руху та лінійні прискорення</i>	Вага стандартних комплектуючих 600-800 грам. Користувацькі модифікації здатні покращити параметри до 400-500 грам для екструдера продуктивністю 20~40 мм <sup>3</sup> /сек; заводські параметри прискорення з можливістю пришвидшення об'ємної швидкості друку	Вага комплектуючих 750-1000 грам для екструдера продуктивністю ~40 мм <sup>3</sup> /сек; Базово висока об'ємна швидкість друку, проте можливі незначні обмеження на заводські параметри прискорення для збереження якості
<i>Наявність ресурсів (3D-моделей) у відкритому доступі</i>	Велика кількість варіантів апгрейдів без зусиль	Обмежено певним набором принтерів – проте і наявні моделі потребують корегувань

## 1.2. Огляд літератури та формування джерельної бази

### Передумови до аналізу наукових джерел

Аналіз джерел варто почати з історії знайомства з 3D-друком автора цієї кваліфікаційної роботи.

З 2020 по 2022 було пройдено внутрішній тренінг компанії Boeing та отримано базове розуміння того, як поводить себе полімер під час 3D-друку, проте інформація про конструкцію не була пріоритетною та не була охопленою. Тим часом, таргетована реклама надавала рекомендації технічних каналів на YouTube та Reddit, а також студії Prusa Research, які дали основу та розуміння основи тенденцій ринку 3D-принтерів та зробити вибір між SLA-принтером (принтер, що друкує методом фото-полімеризації – затвердівання рідкої смоли під дією спрямованого ультрафіолетового випромінювання) та FDM (принтер, що друкує будь-яким твердим полімером, розплавляючи його термічно).

З 2022 по 2023 рік було обрано та придбано FDM 3D-принтер FlyingBear Reborn 2, та проводилась робота по налаштуванню, ремонтам, та необхідним модернізаціям. YouTube канал CNC Kitchen допомагає зрозуміти поведінку різних видів полімерів при варіативних налаштуваннях друку; логи та форуми розробки слайсерів PrusaSlicer та OrcaSlicer (Слайсер – програма для «нарізання» моделі на шари та генерації керуючої програми – G-Code) дали найбільш актуальну інформацію про сучасні та перспективні можливості розвитку слайсерів, рідше – принтерів, а також вагомий внесок у розуміння можливостей слайсерів у сфері оптимізації якості та швидкості друку; перегляд інновацій на фестивалях 3D-друку, як от Rocky Mountain RepRap Festival 2023 дали інсайди на концепції нетипових конструкційних рішень для 3D-принтерів від ентузіастів 3D-друку.

З 2023-го року було придбано 3D-принтер Creality K1C, а 3D-принтер Reborn 2 перейшов у стадію користувацького проєкту, з розробкою різноманітних варіантів модифікацій та ре-інжинірингу, надихнувшись розробками Voron Studio, VZ-BOT та різноманітними користувацькими модифікаціями на порталі Thingiverse. Крім того, чисельні виставки 3D-принтерів від відомих виробників, університетів Німеччини, та новин від виробників SLA/FFF 3D принтерів (RPM) для промисловості дають розуміння перспективних можливостей та конструкцій чи нових сфер застосування 3D-друку, як от: медицина та друк з біо-матеріалів; 4- та 5-осеві 3D принтери для більш точного контролю “Grain Control” – різниці міцності в різних напрямках, спричиненої різницею міжшарової адгезії та міцності власне матеріалу тощо.

В ці періоди набувався досвід як успішного друку, так і вирішення проблем як з налаштуваннями друку, так і з конструкційними недоліками принтерів, деякі з яких було описано в минулому підрозділі 1.1. Участь у великих партіях друку для Друк Армії та друк великих оснасток для метало- та деревообробки для власної майстерні привели до розуміння високих витрат на філамент для 3D-друку, особливо враховуючи некомерційну складову роботи.

Одночасно з тим, в кінці 2024го року, автор Greenboy3D, на своєму YouTube каналі пропонує бета-версію модифікації деяких принтерів для використання полімерних пелет (гранул). Після того, перспективи гранульного друку для пересічного 3D-друкаря обговорювались в різних групах, присвячених 3D-друку. Приблизно рівні частини користувачів цікавились як економією на матеріалах, так і можливістю друку такими матеріалами, філамент з яких просто не міг існувати.

Продовження роботи над власним проєктом на базі принтера Reborn 2, а також участь у проєктній практиці в лабораторії 3D-друку Університету КРОК, закріпила зацікавленість автора цієї КРМ у перспективах гранульного 3D-друку. Провівши оцінку рівня складності реалізації, а також рівень необхідного досвіду для отримання високих показників успішності друку, було вирішено, що дана модифікація не є оптимальним рішенням для навчальних цілей для студентів або як початкова точка для введення в 3D-друк пересічного користувача. Проте перспективи гранульного 3D-друку мають велику перевагу в умовах сталого виробництва.

### **Огляд та аналіз наукових джерел**

Варто зауважити, що в літературному форматі інформація про сучасний 3D-друк не є активно представленою, оскільки швидкість еволюції та значних змін навіть до сталих підходів часто вимірюється тижнями, а не роками і не може бути відносно швидко покрита літературою. Тому у роботі використано поєднання наукових і практичних джерел. Наукова база охоплює праці з технологій адитивного виробництва полімерів, властивостей матеріалів і керування процесом екструзії. Практична база включає технічну документацію виробників, відкриті інженерні проєкти (open-source) та професійні спільноти, що відображають актуальні інженерні рішення і типові експлуатаційні проблеми.

В своїй праці «Design of Pellet Extrusion System for 3D Printers» [7], що була представлена на науковій конференції «International Conference on Advances and

Innovations in Engineering» в вересні 2023-го року, Erdogan KARIP, Methap MURATOGLU, Emrah CELIK з університету FIRAT, провели аналіз існуючого консенсусу про загальну адаптованість більшості 3D-принтерів під філаментну форму друку, що, певним чином, накладає деякі обмеження на розвиток деяких перспективних використань 3D-принтерів. Свою ж роботу вчені присвятили проектуванню прототипу pelletного екструдера для друку біо-матеріалами в медичних цілях. Так само, як і велика кількість друкарів з 2016-го по наш час, модифікацію провели на одному з найпопулярніших 3D-принтерів у світі – Creality Ender 3, який є варіацією від принтерів Prusa I3. В приведеній роботі було описано й одні з основних недоліків pelletного екструдера – це складність тонкого контролю потоку на виході з сопла, і, виявляється, дана проблема стосується не тільки класичних пластиків, а й біо-полімерів. Однією з інноваційних пропозицій в даній роботі було запропоновано додати додаткову «лопатку» в накопичувальну зону для перемішування та покращення вирівнювання розподілення гранул по відсіку.

На ранньому етапі становлення доступного 3D-друку, в 2014 році, було опубліковано дві важливі роботи «The Impact and Application of 3D Printing Technology» Cephas Mawere [8] та «Experimental investigation of FDM process for improvement of mechanical properties and production cost» Ismail DURGUN та Rukiye ERTAN [9]. Перша робота коротко описувала загальні застави 3D-друку, а також аспекти його використання в різних сферах та напрямках, таких як: будівництво, стоматологія, протезування та біоніку, виробництво одягу, промисловість та, звісно, домашнє використання. Також можна додати з власного досвіду автора цієї кваліфікаційної роботи – навіть в авіабудуванні, де 3D-надруковані деталі не можуть встановлюються на літаки (крім особливих пластиків бренду ULTEM), але одночасно 3D-друк широко використовується для допомоги в організації робочих місць та інструментальної оснастки в цехах Boeing.

Друга наведена робота – була наповнена емпіричними даними досліджень різних деталей на навантаження та геометричну точність та шорсткість

поверхонь за умови варіативного напрямку шарів, оскільки 3D-друк створює анізотропні деталі (тобто, такі, що мають різну міцність в різних напрямках). Зараз не складно здогадатись, що за результатами даної роботи було доведено значний вплив напрямку волокон (шарів) на міцність та еластичність друківаних деталей, але саме після таких досліджень 3D-друкарі стали поступово відмовлятися від масового використання пластиків типу ABS та подібних через низьку міжшарову адгезію, що часто робило деталі надто м'якими чи крихкими для багатьох сфер використання, паралельно піднімаючи популярність та доступність пластиків типу PLA та PETg, що зараз є широко розповсюдженими серед друкарів.

Статтею «Моделі самоорганізації в проєктних командах» [10] від Олени ДАНЧЕНКО та Андрія КОРЕЙБИ в журналі «Вчені записки Університету КРОК» від березня 2025-го року, було описано важливість процесів самоорганізації та гнучкого управління в системах (проєктах) високого рівня складності, а особливо в тих випадках, коли треба швидка реакція на зовнішні обставини чи зміни ринку. В роботі було описано основні принципи Agile-управління: ітеративність, самоорганізація, гнучкість, прозорість; основна ідея методології Scrum: циклічне планування роботи автономних команд, виконання та аналіз результатів на ретроспективах. Швидке прийняття рішень та адаптація до умов, що змінюються – це також може бути надзвичайно актуально для організації проєкту з конструювання чи модифікації 3D-принтерів.

Частково посиленнями з робіт вчених Університету КРОК, частково проходячи управлінські курси в Boeing та навчання менеджменту, одними з найважливіших робіт для практичної організації будь-якого сучасного виробництва є методологія «Ощадливого мислення» Lean, що описані в книзі «Toyota Production System» Taiichi OHNO, що була перекладено з Японської в 1988-му році [11]. Ця методологія зароджувалась в найскладніших умовах, коли оптимізація виробництва стала необхідністю і значила для компанії скоріше не «заробити», а «вижити». Відданість методам Lean привела японських виробників до розквіту та лідируючих позицій, а також стала обов'язковим атрибутом

сучасного виробництва чи організації проєктної діяльності. Lean має методика «5S», підходи якої українською переклав Lean Institute в Україні [12] як: Сортування, Слідкування за порядком, Слідкування за чистотою, Стандартизація, Самодисципліна. Цей систематичний підхід базується на циклі Демінга, що має такі складові як: Планування → Виконання → Перевірка → Дія. Для практичного використання, загальна задача 5S та Lean підходу загалом, перехрещується з методологією Agile і доповнюють одне одного.

Під час роботи над цією кваліфікаційною роботою будуть використані та поєднані методології Scrum та 5S та інші інструменти для ефективного досягнення поставленої мети з адаптації гранульного екструдера на класичні 3D-принтери.

### **1.3. Правові аспекти реалізації модифікацій 3D-принтерів**

Модифікація серійного обладнання, такого як 3D-принтери, має низку правових наслідків у міжнародній практиці. Більшість виробників передбачають, що самостійне втручання в конструкцію чи прошивку веде до втрати гарантії. В конкретному випадку заводська конструкція принтеру була попередньо значно модифікована. Крім того, економічна ефективність від встановлення гранульного екструдера зараз, так само як і покращення механічних характеристик принтера раніше мають перевагу і значні плюси, що є особливо актуально у випадку з принтером FlyingBear Reborn 2, адже його базова конструкція містить заводські недоліки, які не виправдовують збереження гарантії. До того ж виробник не представлений на українському ринку, що робить гарантійне обслуговування фактично недоступним.

Проте, для інших видів користувацьких принтерів є сенс максимально обережно відноситись до модифікацій таким чином, щоб модифікація не порушила можливість функціонування в повністю стандартному варіанті, оскільки у багатьох країнах (наприклад, в ЄС та США) діє норма, що виробник не може автоматично відмовити в гарантії лише через сам факт модифікації – спершу потрібно довести, що саме модифікація спричинила несправність.

Інакше кажучи, якщо дефект не пов'язаний із внесеними змінами, споживач зберігає право на гарантійний ремонт.

При модифікації 3D-принтера виробник зазвичай знімає з себе відповідальність за подальшу безпечність роботи пристрою. Усі ризики бере на себе користувач-умілець.

**Сертифікація та відповідність стандартам.** При внесенні змін у конструкцію можуть виникати питання щодо сертифікації та безпеки, у тому випадку, якщо такі вимоги діють. Це не є актуально для домашнього використання і, навіть, для дистрибуції принтерів у більшості країн, але є критичним аспектом для виробничого обладнання. У тому числі, це є однією з основних причин значної різниці у вартості та застарілості конструкції сучасних RPM – 3D-принтерів, що використовуються на передових виробництвах. Через галопуючу динаміку змін у сфері 3D-друку, конструкція Hardware чи Software 3D-принтеру цілком ймовірно стане застарілою за час проходження сертифікації. Це одна з причин «консервативного» підходу до конструювання, коли необхідно надавати продукт для проходження ним сертифікації.

В ЄС усталено підхід, за яким особа, що суттєво модифікує машину після її введення в обіг, фактично стає “новим виробником” модифікованого обладнання та несе відповідальність за його відповідність вимогам технічних регламентів [13]. Тому критично важливо розуміти свого клієнта і нести відповідальність за безпеку модифікацій. Модифікації, що впливають на безпечність (наприклад, заміна блоків живлення, нагрівальних елементів тощо), повинні проводитися з урахуванням норм безпеки: у деяких випадках потрібно отримати схвалення виробника або провести незалежну перевірку безпечності. В іншому разі відповідальність за можливі інциденти (пожежі, ураження струмом тощо) лягає на того, хто виконав модифікацію. Зокрема, нормативи на кшталт європейського Регламенту з машинобудування 2023/1230 прямо вимагають, щоб після значної зміни обладнання особа, що її здійснила, задекларувала відповідність зміненого пристрою вимогам безпеки та заново нанесли маркування відповідності.

**Рух open-source** (відкритих вихідних кодів і конструкцій) відіграє ключову роль у розвитку 3D-друку. Багато популярних 3D-принтерів (приміром, і3 MK3, MK4 від Prusa Research, принтери проєкту RepRap та інші) розроблені спільнотами на умовах відкритих ліцензій [14].

**MIT License.** Дозвільна ліцензія, що найчастіше використовується для програмного забезпечення. Вона дозволяє вільно використовувати, копіювати, змінювати і поширювати програмний код (у тому числі комерційно) за умови збереження повідомлення про авторське право та відмови авторів ліцензії від відповідальності. В контексті 3D-принтерів ліцензія MIT застосовується, наприклад, до окремих бібліотек або прошивок, де автори хочуть максимально спростити повторне використання коду.

**GNU GPL (General Public License).** Ліцензія вимагає збереження відкритості коду у похідних проєктах. Якщо прошивка 3D-принтера або його програмне забезпечення випущені під GPL – їх можна легально змінювати, поширювати (у т.ч. комерційно), але за умови збереження доступності (поширенню) власного вихідного коду, а модифіковане ПЗ залишиться під тією ж GPL-ліцензією. Простіше кажучи, GPL гарантує, що вдосконалення однієї людини стануть доступними всій спільноті на тих самих умовах.

Ліцензія GPL стала основним каталізатором стрімкого розвитку напрямку 3D-друку. Наприклад, прошивка Marlin для настільних 3D-принтерів поширюється під GPLv3, що зобов'язує виробників принтерів відкривати власні зміни в коді прошивки. Відкриті апаратні проєкти (open hardware), такі як Voron Design чи RatRig також можуть потрапляти під дію GPL або схожих ліцензій (як-от CERN Open Hardware License), які вимагають публікації схем і дизайнів змінених пристроїв. Усі такі ліцензії залишають авторам право відмови від відповідальності.

Проте, варто зауважити, що в нинішніх ринкових умовах ліцензія GPL є об'єктом частого порушення прав тримачів ліцензії. Значна частина виробників принтерів на Marlin чи Klipper не зосереджується на дотриманні релевантності та оновленнях вихідних кодів прошивок. А слайсери, створені на основі

відкритого Slic3r чи PrusaSlicer – часто стають закритими та мають функції, що можна використовувати тільки на принтерах конкретної компанії. Закриті продукти, що базуються на GPL-вихідному коді, мають недолік у відсутності безкоштовної підтримки та розробки силами open-source спільнот.

**Creative Commons (CC) [15].** Ліцензії сімейства Creative Commons часто застосовуються до моделей деталей, креслень, посібників та іншого контенту, що супроводжує 3D-принтер або його модифікації. На платформах типу Thingiverse чи Printables автор при завантаженні моделі обирає одну з умов CC, яка визначає, що дозволено робити з цією моделлю.

CC BY (Attribution) дозволяє вільно використовувати і змінювати матеріал, якщо зазначено авторство;

CC BY-SA (Attribution-ShareAlike) додає вимогу, щоб похідні роботи поширювалися на тих самих умовах (схоже до принципу GPL для програм);

CC BY-NC (NonCommercial) забороняє комерційне використання без дозволу автора.

Отже, користувач, який хоче адаптувати чи опублікувати (поширити) чужу open-source розробку, має уважно ознайомитися з її ліцензією: чи потрібно вказувати авторів оригіналу, чи необхідно відкривати свої модифікації, чи дозволено комерційне застосування тощо. Лише дотримання цих умов забезпечує законність використання чужих напрацювань і сприяє довірі чи навіть отриманні допомоги в розвитку продукту від open-source спільноти.

Дана робота базується на розробках проєкту, де моделі та інструкції (які наявні на даний момент) розповсюджуються за моделлю CC BY (Attribution), та дозволяють усі види операцій з розробками модифікацій з дотриманням посилань на автора комплекту для пелетного екструдера – Greenboy3D. Це дозволяє виконувати будь-які дії, модифікації, комерційну реалізацію модифікації – дотримуючись згадування автору ліцензії. Деталі, що будуть надруковані пелетним екструдером, після модифікації принтера, не будуть мати жодних ліцензійних обмежень – проте можуть мати ліцензійні обмеження для

самим друкованих моделей, що вказані на Printables, Thingsiverse тощо – проте це універсально, і не залежить від принтеру чи встановлених модифікацій.

## **Висновки до розділу 1**

У розділі 1 було визначено основні дані про класичний FDM-друк та його обмеження, а також визначено, що гранульний (пелетний) екструдер є перспективним напрямом для користувацьких 3D-принтерів, оскільки дозволяє працювати з гранулами та потенційно зменшує витрати на пластик у кілька разів.

Обґрунтовано, що через високу динаміку розвитку 3D-друку доцільним є поєднання наукових та прикладних джерел, а для організації модифікації як інженерного експерименту з необхідністю гнучкого підходу, логічно застосувати Agile/Lean-підхід (Scrum-ітерації, MVP і 5S) як інструмент системного зниження втрат часу й матеріалів та швидкої адаптації рішень.

Було оцінено правові рамки модифікацій: виробник зазвичай знімає відповідальність за безпечність після втручання, а гарантійні методи, якщо такі були доступні, можуть бути нівельовані за певних умов. Також було підкреслено важливість дотримання open-source ліцензій у похідних модифікаціях.

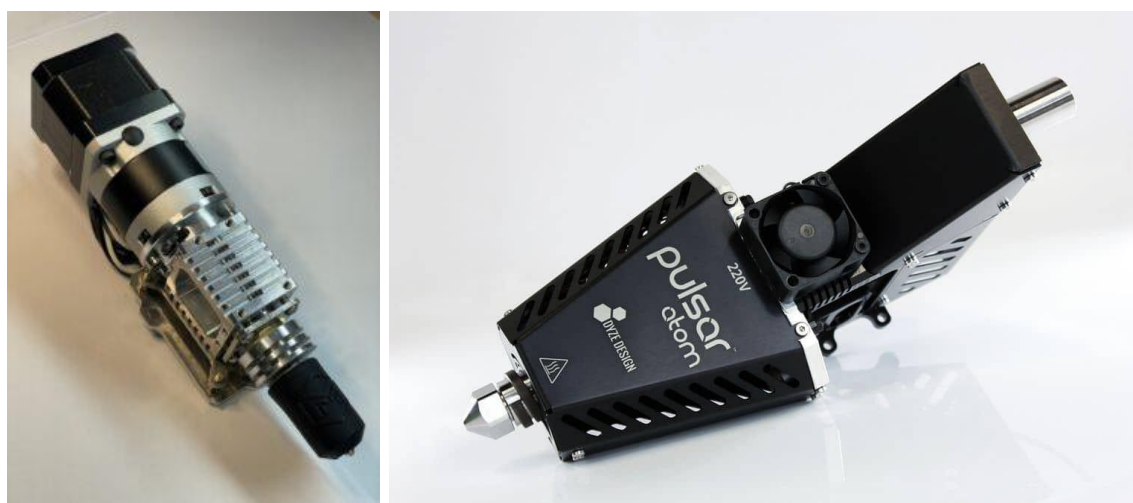
Таким чином, розділ 1 сформував теоретичне, методологічне та правове підґрунтя для подальших розділів роботи: вибору підходу до переходу на гранульний друк і побудови керованого процесу реалізації та оцінювання модифікації.

## РОЗДІЛ 2

### ДОСЛІДНИЦЬКО-АНАЛІТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЄКТУ МОДИФІКАЦІЇ 3D-ПРИНТЕРА

#### 2.1. Аналіз готових рішень. Обґрунтування вибору модифікації

На ринку існує кілька комерційних рішень гранульних екструдерів, зокрема промислові системи від Mahor XYZ та Dyze Design. Вони забезпечують високу продуктивність і орієнтовані на професійне застосування, проте їхня вартість (від кількох сотень до кількох тисяч доларів США) робить інтеграцію таких рішень економічно невиправданою для побутових та бюджетних 3D-принтерів. Дані екструдери зображені на Рис. 2.1. Паралельно у DIY-середовищі сформувався пласт проєктів pellet-екструдерів на базі крокового двигуна та шнекового механізму подачі, але ці рішення часто є нестандартизованими, вимагають значної ручної адаптації до конкретного принтера та не супроводжуються повноцінною документацією. Таким чином, наразі відсутнє універсальне й доступне гранульне рішення з адаптивним кріпленням, орієнтоване саме на користувацькі принтери, що підтверджує актуальність даної модифікації.



*Рисунок 2.1 – Пелетні екструдери від Mahor XYZ (ліворуч) – 845 € ; від Dyze Design (праворуч) – від \$3600*

*Джерело: [16, 17]*

Основою для реалізації модифікації в рамках цього проєкту обрано екструдер Greenboy3D (Рис. 2.2), як одне з небагатьох рішень, що реально доступні кінцевому користувачу. Попри відсутність повного комплексу 3D-моделей та детальної документації (що ускладнює інтеграцію і вимагає додаткової інженерної роботи), саме цей екструдер став доцільною відправною точкою для експериментів з універсальним кріпленням, адаптацією до різних конструкцій принтерів та подальшим вдосконаленням. Додатковою перевагою є орієнтація Greenboy3D на роботу з технічними пластиками у форматі гранул, що добре корелює з цільовими задачами проєкту.



*Рисунок 2.2 – Ключові елементи пелетного екструдера від Greenboy3D*

*Джерело: [18]*

З точки зору витратних матеріалів, гранульні рішення мають важливу перевагу: усі полімери у форматі гранул є суттєво дешевшими за аналогічні матеріали у вигляді філаменту, а особливо це стосується технічних (теплоємних) матеріалів, де різниця може бути десятикратною. Наприклад, Nylon GF15 (PA6) у вигляді пелетів коштує близько \$7,99 за кілограм або приблизно ₹394/кг (при замовленні 20 кг), що суттєво дешевше порівняно з аналогічним матеріалом у формі філаменту, ціна якого часто перевищує \$25-35/кг. Така різниця дозволяє знизити витрати на друк у 3-5 разів, особливо у випадках виробництва масивних або технічних деталей. Фото екрану позиції з магазину гранул в Німеччині наведено на Рис. 2.3, а порівняння різних пластиків у форматі гранул та відповідного філаменту – у таблиці 2.1. Така ситуація дозволяє розглядати

гранульний екструдер як інструмент зниження собівартості друку та відкриття доступу до пластиків, малодоступних або недоступних у вигляді нитки – або через складність виробництва філаменту, або через неможливість друку таким типом пластиків за допомогою подаючих колес класичного екструдера (наприклад, надм'яких чи слизьких пластиків). Це ще раз підтверджує доцільність модифікації саме у напрямку переходу до pellet-друку на базі користувацького 3D-принтера.



**NYLON GF15 - \$7,99 / kg**

**Greenboy3D™ Nylon GF15 (PA6) Pellets**

€7,885.99  
20.0kg | €394.30 / kg

Amount: 20 kg

1

ADD TO CART

Рисунок 2.3 – Ціни на великі партії пелетів PA6-GF15, з ціною за 1 кг

Джерело: [18]

Таблиця 2.1 – Порівняння ринкових цін на пластики різного формату, грн/кг

Тип пластику	Гранули	Філамент
PLA монотонний	99,41	500,00
PETG монотонний	149,36	560,00
PET eco-recycled	149,36	Знятий з виробництва
PA6-GF15	399.13 (Німеччина) 140,00 (Україна)	3500,00 (Китай)
PC/ABS-GF20	399.13	3370,00

Таблиця 2.1 – Порівняння ринкових цін на пластики різного формату, грн/кг

Тип пластику	Гранули	Філамент
TPU 90A	249,27	1120,00
TPU 60A	249,27	2020,76 (конверсія з Євро, не продається в Україні)
TPE 40A	249,27	Не виробляється
TPE 15A	349,17	Не виробляється
TPE 30	748,80	Не виробляється

## 2.2. Постановка вимог до продукту. Потенційні проблеми та теоретичні рішення

Базова мета проєкту полягає у зменшенні вартості 3D-друку шляхом адаптації гранульного (пелетного) екструдера до побутового 3D-принтера із застосуванням принципів Agile та Lean для організації процесу модифікації, тестування та вдосконалення конструкції. На цій основі формуються вимоги до продукту, які включають: розробку дорожньої карти (roadmap) модифікації на прикладі конкретного принтера; створення, збирання та тестування мінімально життєздатної версії (MVP) гранульного екструдера; оцінку його ефективності у порівнянні з класичною FDM-конфігурацією за витратами, якістю та стабільністю друку; перевірку потенціалу масштабування рішення на інші моделі принтерів; дослідження альтернативних

Було виділено критерії успіху (Milestones) проєкту, а також окремо для MVP моделі. Було використано формулювання в завершеному стані з метою використання позицій в даному списку як процесуального чек-листа.

З метою коректної та об'єктивної оцінки було визначено стандартизовані умови тестування, які будуть представлені різними типами деталей:

Плоско-паралельною, з мінімальним впливом ретрактів та охолодження;

Стандартними тестовими моделями Orca Cure та 3DBenchy, що дасть можливість порівняти умови для типового друку середньої складності, а також порівняти результати з будь-яким принтером інших користувачів, за необхідності, або ж використати бібліотеку наочних дефектів, що написані на основі приведених моделей;

Складну модель з тонкими «шипамі» - максимально складна деталь для тестування ретрактів та відносної вологості пластику.

Результати попереднього друку стандартизованих моделей на класичній конфігурації 3D-принтера наведено в Додатку А.

## Оцінка потенційних проблем та рішень

1. Конструктивно, через великий об'єм зони, в якій полімер знаходиться в стані розплаву, очікується **зниження ефективності ретрактів**. Це може бути спричинено різними факторами: неідеальністю герметизації шнека до корпусу, довгим прямим каналом від входу до виходу в сопло (див. Рисунок 1.4), потраплянням повітря чи вологи у зону розплаву.
  - a. З першим фактором покращення конструкції шнека свій внесок зробив автор обраних комплектуючих Greenboy3D, проте текстура шнека залишається шершавою – з точки зору обслуговування та видалення пластику при розбірці гладка обробка чи поліровка шнеку може мати позитивні результати.
  - b. Пелетний екструдер є адаптованим під встановлення сопел, що є типовими для класичних 3D принтерів. Такі сопла мають циліндричний отвір діаметром 2 мм. В класичних 3D-принтерах цей циліндр, разом з відповідною частиною термобар'єру, формує зону розплаву. Оскільки зона розплаву в пелетних екструдерах має значно більший об'єм і її основа виходить за рамки сопла – отвір в соплі стає рудиментарною «фічею», приводячи до двох різних зон контролю розплаву. Теоретично, вважаю, що зменшення різниці об'єму може дати позитивні результати (див. Рисунок 1.4). Це буде перевірено експериментально, шляхом розсвердлення внутрішнього отвору до більшого діаметру.
2. Оскільки філамент є неперервною ниткою, коли проходить через класичний екструдер, то заміна філаменту витрачає відносно невелику кількість матеріалу. Високі витрати (waste) при зміні матеріалів на пелетному екструдері, в першу чергу, спричинені через залишки розплаву, який неможливо витягнути з екструдера без розборки, а тільки замінити новим пластиком. Проте, автор комплекту в референсних моделях пропонує використовувати знімні стінки, для видалення гранул з заборної камери, дозволяючи легко дістати ще не відпрацьований полімер. Проте, для адаптації

на принтер кінематики CoreXY необхідно виконати ряд змін, що будуть описані у Розділі 3.1.

- a. Потенційне рішення – використання матеріалів одного кольору або введення «очисного» пластику;
  - b. Потенційне рішення – проста і швидка заміна на класичну друкуючу головку для таких випадків;
3. Підвищена маса гранульного екструдера є невід’ємною складовою підвищення інерційності руху осей, на які цей екструдер буде встановлено. Незважаючи на значні об’єми змін для принтерів зі схемою кінематики CoreXY, такі принтери задіюють обидва крокових двигуна для рухів в обох напрямках:  $X + Y$ , а також ось  $Y$  має жорстку балку, що змонтована на направляючих рейках з кожного боку – ці умови можуть частково нівелювати ефект від збільшення інерційності при встановленні гранульного екструдера.
- a. Потенційне рішення - зміщення двигуна за межі каретки, наприклад, через використання гнучкого валу;
4. Гранули (пелети) полімеру постачаються в фасованих поліетиленових пакетах. При доставці, зберіганні, а особливо при пересипанні гранул в ресивер принтера існує ризик розсипання гранул.
5. Принтери, що побудовані на кінематичній схемі типу CoreXY, зазвичай, вважаються більш стійкими до підвищених навантажень. Проте однією із основних проблем є підвищені вимоги до компактності самої друкуючої головки у напрямку  $X$  та  $Y$  – інакше, доведеться зменшувати ефективну зону друку.

Оцінивши задачі та проблеми модифікації, було виявлено та описано критерії, за якими можна буде вважати проєкт модифікації успішним. Оскільки значуща частина роботи буде перевірена за допомогою MVP-моделі, було окремо описано критерії успіху, за якими можна переходити від MVP моделі до релізного продукту.

## Критерії успіху проєкту

1. Оцінка класичної схеми (FDM) та нинішніх проблем довела, що аномального зниження вартості філаменту в Україні не очікується, а/або інженерні версії філаментів PA6 / PA66 / PP / PC / TPE-PTU залишаються малодоступними на ринку філаментів, одночасно будучи доступними на ринку гранул, включаючи композитні варіанти зі скловолокном (\*-GF) та з вуглеволокном (\*-CF).

2. Підтвердження раціональності модифікації доведено – ресурсні витрати на модифікацію окупляться економією за період до 2х років в несерійних умовах друку (середній час друку < 2 год на день).

3. MVP модель відповідає умовам успіху і її використання приводить до стабільного друку. (див. наступний слайд).

4. Релізна модель дозволяє отримати якісь, невідмінну від FDM-варіанта на відстані до 1м.

5. Додатково: Проведені успішні тести додаткових методів використання Pellet-екструдера:

1) Соплом, розсвердленим до 1.5-1.7 мм отримано нитку філаменту 1.75мм +/- 0,04 мм і цю нитку протестовано в FDM-екструдері.

2) Виконано успішний друк подрібненими залишками деталей з простих матеріалів: PLA/PETG.

## Критерії успіху MVP моделі

1. Безпекові фактори успішно протестовані:

1) Температура зчитується вірно (+/-2 градуси). Вентилятор залишається увімкненим при температурі хотенда понад 40 градусів;

2) Перевищення або зниження попередньо встановлених тимчасових лімітів температури або швидкості зміни температури приводить до знеструмлення нагрівача хотенда та режиму «аварія»;

3) Переміщення по усім трьом осям в домашню позицію (Homing) не приводить до контакту/удару в будь-яких напрямках. Переміщення по

осям має вірно виставлені обмеження – переміщення в кінець осей не дозволяє з'їхати з направляючої рейки чи привести до колізії. Діапазон руху по осях X або Y не обмежувався.

2. Тестування друку успішно проведено:

1) Успішне тестування Z-Offset та вирівнювання столу під модифікований екструдер підтверджено успішним друком одношарових «квадратів» в різних зонах столу.

2) Успішний друк тестової моделі Orca Cube – надруковано без розривів по швам та по шарам. Обдув моделі достатній для запобігання критичним провисанням (до 0.5мм в екстремумі).

3) Після калібровки потоку довготривалий друк (понад 1.5 години) завершився успішно.

### **2.3. Планування процесів проєкту. Створення Scrum-спринтів**

У контексті даної роботи підхід Agile виступає не лише як популярна методологія з розробки програмного забезпечення, а як універсальна рамка для організації інженерного експерименту з високим рівнем невизначеності. Модифікація 3D-принтера під пелетний екструдер поєднує механіку, електроніку, частково теплотехніку та гнучке налаштування прошивки, тому заздалегідь неможливо детально спрогнозувати всі ризики й результати. Agile дозволяє структурувати цей процес у вигляді ітерацій, у кожній з яких формується невеликий, але завершений інкремент – базова CAD-модель адаптера, MVP-збірка екструдера чи процес тестового друку.

Застосування Scrum-практик у проєкті проявляється через наявність беклогу, розбиття роботи на спринти та формування чітких критеріїв успіху для кожного етапу. Замість одноразового «великого» проєктування всі кроки розподіляються на логічну послідовність функціональних завдань: від аналізу проблеми та вибору модифікації – до калібрування, довготривалих тестів і документування. Це дає змогу оперативно реагувати на виявлені дефекти (наприклад, проблеми з ретрактами чи охолодженням), вносити конструктивні

зміни вже в наступному циклі та не «заморожувати» значні ресурси в невдалих рішеннях.

Принципи Lean у цій роботі підкріплюють Agile-компонент, акцентуючи увагу на мінімізації втрат часу й матеріалів. Вони реалізуються через фокус на MVP, з попереднім тестування критичних параметрів на спрощених зразках, використання стандартизованих умов друку й систематичне порівняння гранульного екструдера з класичним FDM. Кожна ітерація проєкту спрямована на те, щоб отримати максимум корисної інформації (про якість друку, стабільність подачі, економію матеріалу) за мінімальних витрат пластику та/або робочого часу. Таким чином, Agile та Lean у даній кваліфікаційній роботі виступають не теоретичним «фоном», а практичним інструментом організації розробки, що дозволяє довести доцільність модифікації й підготувати основу для масштабування рішення на інші моделі принтерів.

Для гнучкого контролю проєкту, тобто управління задачами та прогресом, корисно запровадити Scrum-підхід – де робота ділиться на чіткі ітерації (спринти) з фіксованою тривалістю та ретроспективою в кінці кожного спринта. Дана робота була виконана автором без участі команди, тому окремі Kanban-дошки не були використані, проте кожен спринт перетворився у певний «чек-лист», з маркуванням завершеної роботи та роботи у статусі TBD – To Be Done. In Process статус доцільно розглядати в командах з будь-якою кількістю людей, яка більше одного. В таких командах вважається доцільним використати поєднання методик Scrum та Kanban в так званий Scrumban – візуалізація прогресу допоможе в будь-який момент побачити, на якому етапі кожне завдання, водночас короткі спринти зі спланованими цілями додадуть дисципліни і дедлайнів, щоб доводити почате до кінця.

Беклог проєкту було сформовано відповідно до Scrum-практик і містить основні кроки:

- аналіз проблеми FDM-друку,
- дослідження рішень на основі гранул,
- створення CAD-моделі адаптера,

- виготовлення MVP-версії екструдера,
- тестування механіки та прошивки,
- довготривалі тести друку,
- документування конструкції та підготовка до масштабування.

Для організації ефективного виробництва, Lean підхід рекомендує методику 5S для організації робочого простору. 5S охоплює п'ять кроків: Sort, Straighten, Shine, Standardize, Sustain, що для цієї роботи має значення:

- відсортувати зайве,
- впорядкувати необхідне,
- підтримувати чистоту,
- стандартизувати процеси,
- підтримувати порядок.

У практичному сенсі це означає розчистити й облаштувати робоче місце: забрати зайві речі, зручно розмістити інструменти і деталі, підписати коробки та полицьки. Така систематизація зменшує хаос і економить час – впорядкований простір мінімізує час на пошук інструментів та матеріалів і знижує ризик їхнього загублення.

Для покращення організації процесу доцільно вести облік інформаційного та матеріального забезпечення у форматі Bill of Material (BOM). Це спростить облік наявних компонентів чи документів і допоможе запобігти зайвим повторюванням (дублікатам). Варто додатково звернути увагу, що випадкове використання невірних інкрементів з високою імовірністю може привести до введення повторних модифікацій в 3D-модель, які або вже були виконані і є надмірними, або останній інкремент був втраченим чи не був надрукованим. Наприклад – збільшення зазору компонентів може бути надмірним, якщо інкремент був пропущений чи втрачений і зміна була внесена повторно, вважаючи, що попередня зміна була недостатньою.

Тобто, ключовим моментом є послідовність змін – виконавець має вносити зміни в новий інкремент, орієнтуючись на попередній, а не на інкременти/ітерації до цього. Якщо ж інкремент є некоректним або дефектним

– доцільно завантажити попередній Milestone і «заморозити» невірну операцію. Інкременти, виконані по ітераціям після «заморозки» варто вважати «шкідливими» і утилізувати якнайшвидше, для запобігання потрапляння некондиційних деталей в продакшин. Альтернативно, допустимо маркувати некондиційні деталі великим та помітним хрестом, якщо негайна утилізація відкладена чи недоцільна.

Детальні кроки, зміст та мету спринтів наведено нижче. Кожен спринт був завершений короткою ретроспективою. Після цього вносились плани в попередній драфт наступного(-их) спринтів, паралельно закриваючи минулий спринт. Загальну Scrum-схему зображено в додатку Б.

### **Sprint 1**

- 1) Опис проблеми і перспективи Класичного FDM та Pellet FDM екструдерів
- 2) Дослідження готових рішень
- 3) Формування стандартизованих умов тестування
- 4) Тестовий друк практичної та художньої моделей на класичній конфігурації принтера

### **Sprint 2**

- 1) Оцінити можливості та складності модифікації для конкретного принтера
- 2) Побудова алгоритму модифікації:
  - Оформлення замовлення комплектуючих
  - Підготовка чек-листу для безпекової реалізації модифікації - для запобігання механічним зіткненням та коротким замиканням при тестах MVP

### **Sprint 3**

- 1) Оцифровка наявних об'єктів в CAD збірці моделі
- 2) Створення CAD-моделей необхідних план-шайб для подальшого 3Д друку:

- Waste reduction: для критичних параметрів – виділення мінімально необхідної ділянки і друк мінімальних зразків для одноразової примірки та геометричних корекцій в моделі

- Друк функціональної MVP версії

#### **Sprint 4**

- 1) Збірка механічних компонентів
- 2) Пайка/збірка коннекторів для інтеграції в проводку
- 3) Наладка ручна та візуальний тест з вимкненим живленням та з увімкненим за дотриманням безпекового чек-листа

#### **Sprint 5**

- 1) Калібровка параметрів принтера та пластику перед друком
- 2) Тестовий друк стандартизованих зразків MVP варіантом
- 3) Порівняння та оцінка дефектів.
- 4) Збір варіантів покращення дизайну для подальших ітерацій

#### **Sprint 6**

- 1) Моделювання нових інкрементів дизайну
- 2) Калібровка стандартних параметрів перед друком кожним новим інкрементом дизайну
- 3) Друк передрелізною версію дизайну з матеріалу PA6-CF15, мінімально необхідною витратою матеріалу для оцінки можливих змін в геометрії для друку високотемпературним пластиком.
- 4) Друк релізної версії

#### **Sprint 7**

- 1) Фінальні тести друку
- 2) Аналіз отриманого результату
- 3) Аналіз фактично затрачених ресурсів та порівняння з теоретичними розрахунками
- 4) Перспективи покращення та подальшого розвитку технології

Проект було виконано автором індивідуально. Проте з позиції менеджменту інженерних R&D-ініціатив ефективність виконання робіт може

бути підвищена за рахунок формування невеликої крос-функціональної команди з чітким розподілом задач та регулярною синхронізацією (див. Рисунок 2.4).

У рамках проекту модифікації 3D-принтера під гранульний (пелетний) екструдер доцільно виділити три базові ролі: 1) менеджер, 2) інженер-конструктор, 3) інженер-технолог. Така структура підтримує підхід Scrum-спринтів, описаний вище, оскільки забезпечує одночасно: формування бачення продукту та пріоритетів, створення інженерного рішення та його практичну реалізацію з оперативним зворотним зв'язком.

Ключовою особливістю схеми є «замкнений цикл» рішень: менеджер визначає цінність і пріоритети, конструктор перетворює їх у вимоги та модель (CAD), технолог реалізує інкремент (збірка/друк/тести) і надає фідбек щодо технологічності (Design for Manufacturing, DFM), після чого команда коригує беклог наступного спринту за результатами ретроспективи, менеджер тримає роль scrum-майстра.



Рисунок 2.4 – Схема взаємодії кросфункціональної команди

Джерело: розроблено автором

## 2.4. Теоретична оцінка витрат та економії від реалізації модифікації.

Оцінка економічної складової починається з аналізу прибутковості – та рентабельності модифікації. Рентабельність – це відношення прибутків (допустимої ціни, за яку імовірноше буде придбано надруковані деталі) до витрат на друк.

$$R = \frac{Price}{Expenses} \times 100\%$$

Витрати бувають явні – фінансові та неявні – витрати часу, у випадку самостійного друку і обслуговування принтерів та надрукованих деталей.

Явні витрати складаються з витрат на матеріал та електроенергію. У випадку з використанням резервних систем живлення, у зв'язку з проблемами енергетики в Україні в 2025-му році, також доцільно врахувати ККД – тобто, енергію, яку буде втрачено від зарядки акумуляторної батареї до перетворення електроенергії та віддачі її в мережу для принтеру.

Пропонується взяти середню точку ефективності при роботі від системи батарея + інвертор, яка знаходиться в діапазоні 80-90% та прийняти ККД витрат від мережі близьким до 100% - тобто, лише ту, що буде рахувати лічильник. При приблизно однакових інтервалах відключень електроенергії середньою точкою можна вважати 90%.

Таким чином, реальні (явні) витрати складаються з:

$$Cost = Matl_{used} \times Matl_{price} + \frac{Elec_{used}}{Efficiency} \times Elec_{price} (грн),$$

$$Elec_{used} = \text{Час роботи принтера, год} \times \text{Середнє споживання, кВт} \cdot \text{год}$$

### Класичний екструдер.

Транслюємо це в цифрові значення. Візьмемо за основу типовий середній сценарій: виконується друк партії деталей пластиком PLA, загальною вагою 250 грам протягом 6 годин. Ціна вказаного філаменту складає, в середньому, 500 грн/кг. Середнє споживання принтеру 200 Вт, тобто за період друку буде

спожито  $0,2 \text{ кВт} \cdot \text{год} * 6 \text{ год} = 1,2 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ . Враховуючи вартість електроенергії в  $4,32 \text{ грн/кВт} \cdot \text{год}$ , загальна вартість буде складати:

$$0,25 \text{ кг} \times 500 \frac{\text{грн}}{\text{кг}} + \frac{1,2 \text{ кВт} \cdot \text{год}}{0,90} \times 4,32 \frac{\text{грн}}{\text{кВт} \cdot \text{год}}$$

$$125,00 \text{ грн} + 5,76 \text{ грн} = 130,76 \text{ грн}$$

До додаткових витрат також відносять [19]: витрати на амортизацію обладнання, обслуговування принтерів. А до неявних також витрати на пост-обробку друкованих деталей, певний відсоток невдалого друку. В середньому, на додаткові витрати припадає до 15~20% до явних витрат. Тобто, загальні витрати можуть бути до 156,91 грн ( $130,76 \text{ грн} + 20\%$ ).

Тепер можемо виділити витрати на філамент як долю від усіх загальних витрат:

$$\frac{125,00}{156,91} \times 100\% = 80\%$$

Як видно, з повної суми витрат, вітчизняний друкар витрачає на філамент близько 80%, або навіть більше, якщо кількість додаткових витрат була б меншою.

Прийнятою методикою розрахунку ціни є додавання до загальних витрат погодинну ставку заробітної плати власної або найманого працівника (за наявності) + маржу власника. Замовник може надавати власні моделі для друку чи замовляти проєктування по власним ескізам, прикладним моделям, чи замовляти інженерно-конструкторську роботу по самостійному проєктуванню деталей по функціональним, габаритним та іншим критеріям.

Також додатковим аспектом впливу на ціноутворення є складність деталі у значенні адаптації («зручності») деталі для 3D-друку. Особливості проєктування моделей для оптимального 3D-друку добре описано в інтернет-статті «Design for 3D-Printing» [20].

### **Пелетний екструдер.**

Встановлення пелетного екструдера практично не має впливу на споживання енергії, а вартість матеріалів було порівняно в Таблиці 2.1 підрозділу 2.1. Тому підставимо в формулу явних витрат вартість гранул (99,41 грн/кг):

$$0,25 \text{ кг} \times 99,41 \frac{\text{грн}}{\text{кг}} + 5,76 \text{ грн} = 24,85 \text{ грн} + 5,76 \text{ грн} = 30,61 \text{ грн}$$

Незважаючи на багатократну різницю в явних витратах, кількість додаткових витрат на обслуговування та пост-обробку деталей може бути вище, особливо в перші місяці користування після модифікації, у зв'язку з постійним пошуком оптимальних налаштувань. Тому, керуючись песимістичним прогнозом, закладемо до 40% на додаткові витрати, збільшивши їх долю вдвічі:

$$30,61 \text{ грн} + 40\% = 42,85 \text{ грн}$$

Також, оцінимо долю вартості гранул від загальних витрат:

$$\frac{24,85}{42,85} \times 100\% = 58\%$$

Орієнтовна економія від використання гранульного екструдера може складати:

$$100\% - \frac{42,85}{156,91} \times 100\% = 72,7\%$$

### **Витрати на модифікацію та період окупності.**

Варіативність витрат на саму модифікацію є значною складовою даної модифікації. Можливість скоротити витрати залежить від наявності додаткового часу, ресурсів та обладнання. Розглянемо три сценарії витрат:

- 1) Усі механічні компоненти замовлені з інтернет-магазину Greenboy3D, автора гранульного екструдера;

- 2) Тільки унікальні деталі замовлено з інтернет-магазину Greenboy3D, інші компоненти – в українських постачальників, чи з Китаю;
- 3) Замовлено повний готовий комплект гранульного екструдера з маркетплейса AliExpress;
- 4) Замовлено усі окремі компоненти гранульного екструдера з маркетплейса AliExpress.

Зведемо дані в таблиці 2.2. Необхідно зауважити, що необхідність витрат пластику та часу на проєктування корпусних елементів та встановлення на принтер не залежить від приведених варіантів і є незворотнім.

*Таблиця 2.2 – Варіанти кошторису витрат на комплектуючі*

<i>Сценарій витрат</i>	<i>Прямі витрати</i>	<i>Додаткові компоненти</i>	<i>Сума</i>
1	17 246,85*	~ 100,00	~ 20 492*
2	9 547,10*	~ 2 100,00	~ 12 614*
3	10 098,56*	~ 0.00	~ 10 956*
4	2 581,22	~ 2 250,00	~ 4 832

\* Товари, що вимагають митних платежів. Мита враховані в загальну суму.

Різні наведені в таблиці 2.2 варіанти вимагатимуть різних витрат часу та можуть приводити до варіації результатів, тому теоретичне порівняння може бути значно скореговане після практичного досвіду використання гранульних екструдерів. Враховуючи обчислену раніше перевагу гранульних екструдерів в загальних витратах в 72,7%, порахуємо період окупності, припустивши, що середні витрати активного домашнього 3D друку філаментом для подальшої реалізації складають до 4 тис грн на місяць. Зведемо дані в таблицю 2.3.

#### Витрати на модифікацію

$$0,727 \times \text{Витрати класичного друку на місяць}$$

Таблиця 2.3 – Теоретичний період окупності для зазначених умов

<i>Сценарій витрат</i>	<i>Період окупності, міс</i>
1 (20 492 грн)	Від 7,04
2 (12 614 грн)	Від 4,34
3 (10 956 грн)	Від 3,77
4 (4 832 грн)	Від 1,66

Результуючі теоретичні підрахунки показують доцільність як модифікації загалом, так і доцільність проведення експериментальних модифікацій з більш дешевих комплектуючих, придбаних на маркетплейсах в різних продавців.

## **Висновки до розділу 2**

У розділі 2 було виконано дослідницько-аналітичне обґрунтування проекту модифікації користувачького 3D-принтера під гранульний (пелетний) екструдер. Показано, що наявні промислові рішення (зокрема Mahor XYZ та Dyze Design) є досить дорогими для побутового сегмента, а DIY-проекти часто потребують суттєвої ручної адаптації та не мають достатньої стандартизації й документації, що підтверджує актуальність обраного напрямку модифікації.

Обґрунтовано вибір екструдера Greenboy3D як практично доступної бази для експериментів та подальшого інжинірингу універсального кріплення й адаптації до певних конструкцій принтерів, попри неповноту вихідних моделей/документації. Окремо підкреслено економічну доцільність переходу на гранули: полімери у форматі пелетів суттєво дешевші за філамент, що потенційно дає можливість суттєво знизити витрати на друк і відкриває доступ до матеріалів, які складно або дорого використовувати у філаментній формі.

Сформовано вимоги до продукту та логіку оцінювання результатів: визначено цілі модифікації, а також стандартизовано підхід до випробувань через набір типових моделей/деталей різної складності для візуального аналізу. Додатково проаналізовано ключові ризики пелетної екструзії (зниження ефективності ретрактів через великий об'єм розплаву, особливості геометрії

сопла, складність зміни матеріалу, інерційність через підвищену масу, ризики розсіпання гранул) і запропоновано попередні теоретичні напрями їх мінімізації.

Таким чином, розділ 2 заклав основу для практичного етапу: визначено раціональний вибір базового рішення, сформовано вимоги та критерії успіху, описано ключові технічні ризики й підходи до їх перевірки, що створює логічний перехід до розділу 3 – проєктування, реалізації та аналізу результатів в реальних умовах.

## РОЗДІЛ 3

### ПРОЄКТУВАННЯ, ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ВДОСКОНАЛЕННЯ МОДИФІКАЦІЇ 3D-ПРИНТЕРА

#### 3.1. Покрокові аспекти дизайну в CAD для модифікації 3D принтеру з дотриманням LEAN за планом Scrum спринтів

При переході до практичної частини, керуючись рекомендаціями Lean та, зокрема, 5S підходів, окрім підготовки робочого місця, виконаємо збір забезпечення: інформаційного та матеріального. До інформаційного забезпечення автор відносить роадмап, чек-листи, схеми та необхідні інтернет-ресурси, такі як сторінки проекту принтера чи виробника електроніки на GitHub, сайт GreenBoyzd та Вікі-сторінка ПЗ управління 3D-принтерами та RPM-машинами Klipper. До матеріального забезпечення відноситься принтер та необхідні комплектуючі, включаючи комплектуючі для первинної модифікації, тощо.

В рамках боротьби з дублікатами та для покращення розпізнавання схожих деталей різних ітерацій, введено систему маркування. Було прийнято рішення вести список деталей та інкрементів, проводити маркування і вносити дані в Додаток В.

Було використано ПЗ Fusion360 для CAD 3D-моделювання. Як і переважна більшість CAD-програм, Fusion360 дозволяє зберігати історію змін, надаючи можливість зберігати як прості зміни, так і «Milestones» – це певні зміни, до версій яких можна повернутись будь-якої миті. Оцінивши переваги системи обліку ревізій в програмі, було вирішено синхронізувати її та облік інкрементів таким чином:

- 1) Будь-яка ревізія моделі деталі, після якої було виконано 3D-друк деталі, має бути збережена як Milestone-версія в Fusion360. Базова (вихідна) версія, якщо така наявна – тобто, якщо деталь не проектувалась повністю з нуля – буде позначено як V0, а кожна ітерація, що була надрукована – V1, V2..Vn.

2) Кожна надрукована деталь чи інкремент деталі буде або мати маркування, що закладено в 3D-модель або промаркована перманентним маркером контрастного кольору, рідше – приклеюванням допоміжної малярної плівки з маркуванням на ній. Аналогічно з пунктом 1) – базова деталь (якщо така версія наявна) буде позначено як V0, а кожен інкремент, що був надрукований – V1, V2..Vn.

Як бачимо – однаковий результат має допомогти структурувати деталі для зберігання та унеможливити використання невірних інкрементів (попередніх/позачергових) та запобігти небажаним змінам чи переробкам 3D-моделі.

З метою отримання об'єктивних результатів друку, на етапі підготовки було знято та занотовано конкретні параметри друку класичного екструдера. Також було визначено набір тестових моделей, які будуть надруковані обома екструдерами для практичної оцінки якості та ефективності друку.

Для дотримання норм безпеки життя, здоров'я та справності обладнання, було розроблено чек-лист для безпечного тестування модифікацій, пов'язаних з екструдером, який включає деталі, що обертаються та деталі, що нагріваються. Критерії чек-листа:

1) Температура зчитується коректно ( $\pm 2$  градуси). Вентилятор хотенду залишається увімкненим при температурі хотенда понад 40 градусів.

2) Перевищення або зниження тестово встановлених лімітів температури або швидкості зміни температури приводить до знеструмлення нагрівача хотенда та режиму «аварія».

3) Переміщення по усім трьом осям в домашню позицію (Homing) не приводить до контакту/удару в будь-яких напрямках. Переміщення по осям має вірно виставлені обмеження – переміщення в кінець осей не дозволяє з'їхати з направляючої рейки чи привести до колізії.

На цьому етапі було завершено спринти 1 та 2. Проведена ретроспектива підтвердила доцільність попереднього плану модифікації та структурний набір спринта 3 був сформований відповідно до попереднього плану.

Окремо автор вважає доцільним зауважити особливість підходу оптових постачальників полімерних гранул до замовлень та листів фізичних осіб в Україні: нажаль, часто комунікація не встановлюється чи встановлюється зі значущою затримкою, особливо у порівнянні з виробниками, що орієнтовані на фізичних осіб, а не на підприємства. Цей контраст варто враховувати у разі плануванні такої модифікації. Контакти ж з найближчими закордонними постачальниками гранул були відмічені як суто позитивні та відносно швидкі. Проте митні збори для масштабних замовлень пелетів з-за кордону варто окремо розглядати і враховувати.

Перед власне моделюванням було отримано складальну модель 3D-принтера FlyingBear Reborn 2 шляхом запиту до виробника електронною поштою та обрано одну з наявних шаблонних корпусних деталей від GreenBoy3D – для принтера Creality CR10 Smart. В процесі збирання наявних моделей було виявлено відсутність моделей шнека, корпусу, нагрівача та редуктора крокового двигуна – на рисунку 3.1 вказано компоненти, які було виміряно за допомогою штанген-циркуля, методу фото-референсу та побудовані 3D-моделі, що несуть усі необхідні габаритні параметри.

Дані моделі є основними компонентами гранульного екструдера та виконані зі сталевих чи мідних компонентів. Вказані деталі є основою для проєктування – вони будуть вихідною точкою для проєктування пластикових деталей і модифікація цих деталей, на даному етапі, не очікується. Тому Milestone-версія цих компонентів була позначена як V0.

На рисунку 3.1 не було зазначено кроковий двигун та сопло, оскільки їх готові моделі було трансформовано як окремі компоненти з загальної складальної збірки 3D-принтера.

При проєктуванні референсних 3D моделей, доцільно робити спрощення певних конструктивних елементів у таких випадках (див. приклади на рисунку 3.2):

1) коли елементи знаходяться в габаритних контурах, які не передбачають інтерференцію з друкованими деталями. Наприклад – ребра радіатора;

2) коли елементи перекриваються іншими референсними елементами. Наприклад, спіральний контур шнека всередині корпусу екструдера. У таких випадках допустиме також спрощення методом об'єднання двох деталей;

3) Коли необхідно забезпечити зазор, який буде гарантовано більшим, ніж необхідно для конкретного компоненту, чи розмір та доступність компоненту буде гарантовано у будь-якому разі.

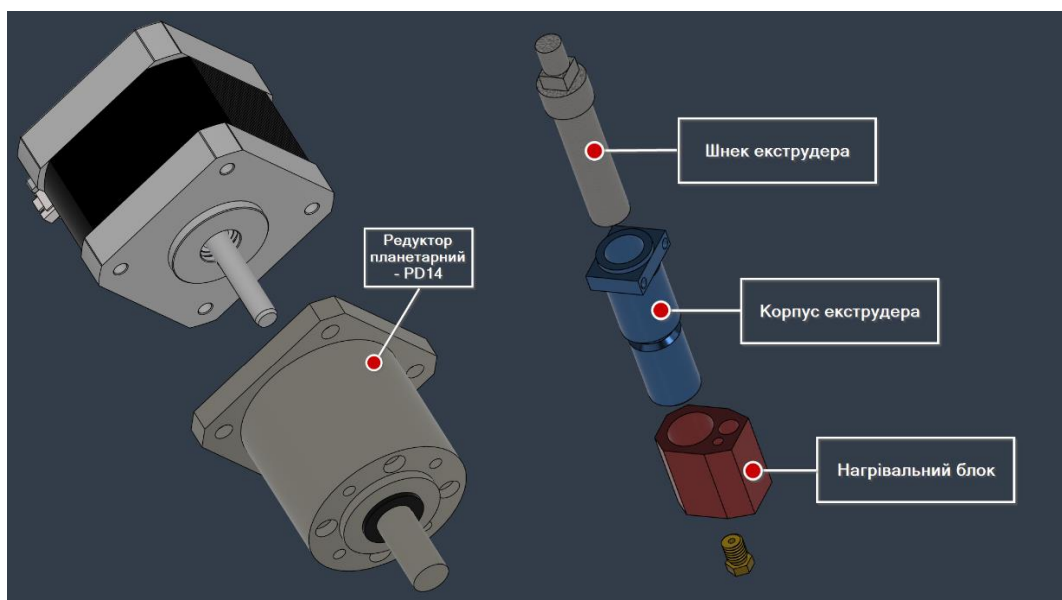


Рисунок 3.1 – Ключові 3D моделі для вхідних даних для проєктування

*Джерело: розроблено автором*

Маючи необхідний мінімум базових деталей та шаблон рекомендованої моделі від GreenBoy3D для іншого принтера, перейдемо до створення попередніх «приміркових» збірок з наявних компонентів. Ці дії дозволити наочно побачити приблизний вигляд деталей в зібраному вигляді, а також виявити потенційні проблеми до друку деталей та до того, як втілювати значні конструкційні зміни в референсні деталі, що можуть бути не до кінця коректними.

Першою тестовою збіркою стала збірка самого pelletного екструдера з вихідних компонентів, що зображена на рисунку 3.3. На тому ж рисунку зображено зону накладення валу редуктора крокового двигуна на вал шнека екструдера. Варто зауважити, що величина чи навіть наявність даного дефекту могли також залежати від різниці партії планетарного редуктора чи шнека – через потенційні варіації довжини валів, але для наявних компонентів необхідно внести деякі зміни в конструкцію.

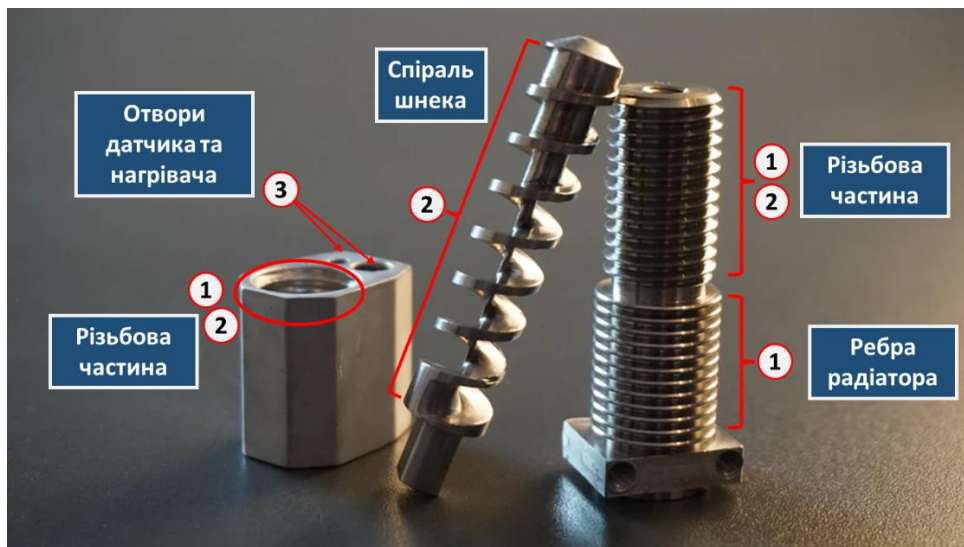


Рисунок 3.2 – Елементи, що підлягають спрощенню в моделюванні. В

кружечках – тип спрощення, з наведених вище

Джерело: розроблено автором

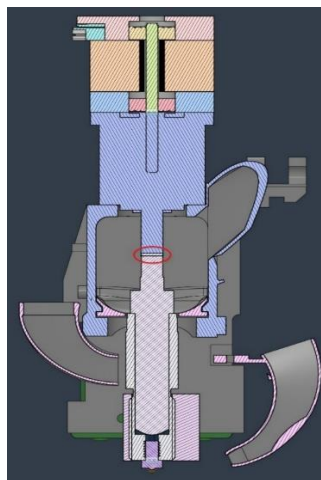
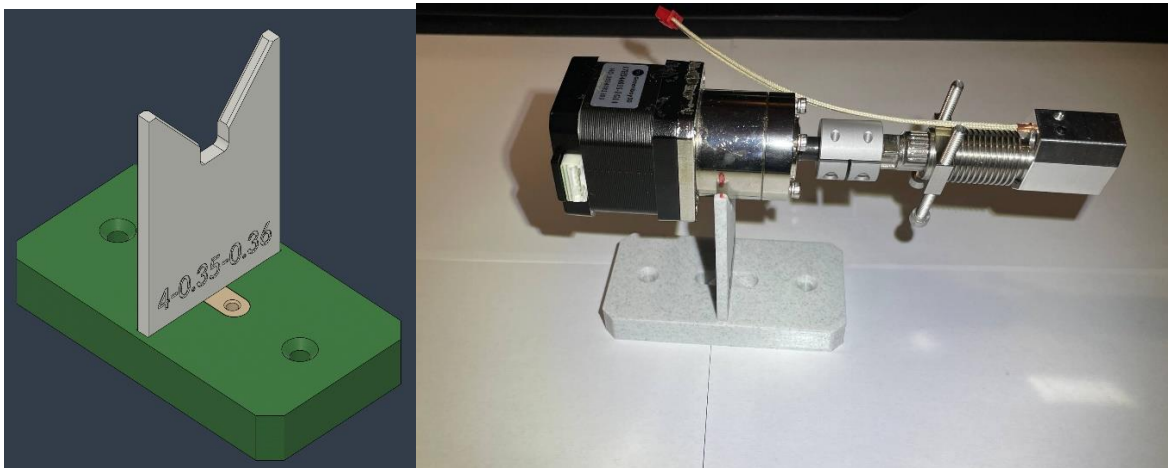


Рисунок 3.3 – Тестова збірка з виявленим конструкційним дефектом

Джерело: розроблено автором

Рішенням проблеми було скорегувати (потовщити) опорну поверхню крокового двигуна, щоб забезпечити зазор між валами у 1,5мм.

Маючи значення зазору, було фізично зібрано усі наявні (недруковані) деталі з метою визначити їх центр маси, з міркувань отримання оптимального балансування екструдера відносно каретки. Неоптимальне балансування ваги (відцентрове) може приводити до появи значного крутного моменту на каретку з перспективою прискореного зносу направляючої рейки чи інших видів поломок. Для цього було сконструйовано досить просту модель призматичної опори з заокругленими стінками – для точного центрошування (Див. Рисунок 3.4). Експериментальним методом, з усім недрукованим навісним обладнанням, розташування центру мас від однієї з опорних поверхонь дорівнювало 9,5 мм.



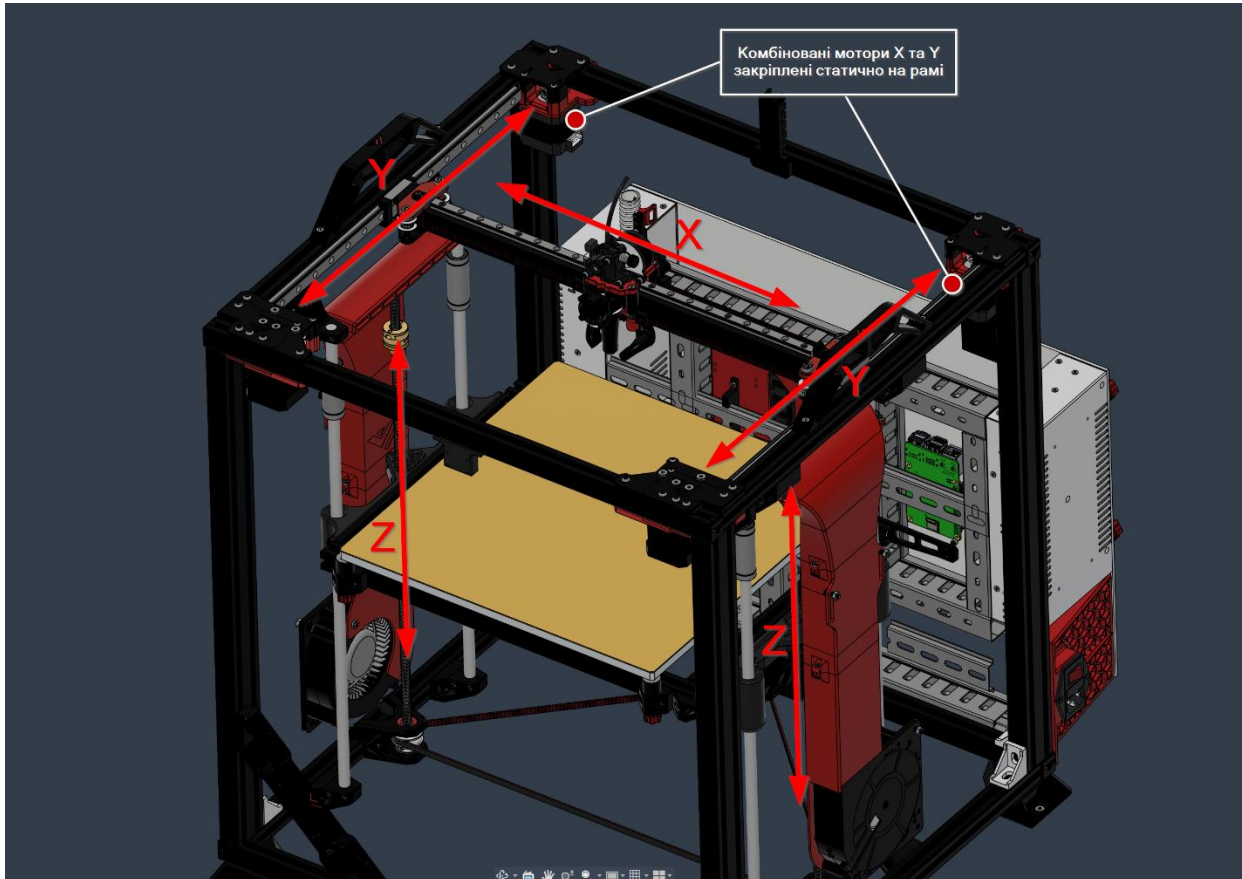
*Рисунок 3.4 – Визначення центру маси*

*Джерело: розроблено автором*

Після визначення центра мас, враховуючи об'єм тримача для пелет, ступінь заповнення кубічної форми тримача округлими гранулами, та питомої щільності пластику (PLA), було введено корекцію для орієнтовного оптимального положення майбутньої друкуючої голови в зібраному варіанті, що становить +2 мм від ЦМ в сторону гарячої зони екструдера, тобто, в напрямку сопла.

Наступною тестовою збіркою мало бути розташування тестової моделі на 3D-моделі збірки принтера. Особливістю даного рішення, як і відмінність від

наявних шаблонів в бібліотеці GreenBoy3D, є встановлення на принтер, що сконструйований за кінематичною схемою CoreXY, замість більш простих BedSlinger. Базові принципи кінематики вказані на рисунку 3.5.



*Рисунок 3.5 – Кінематична схема CoreXY на прикладі принтеру VZ-Bot  
Джерело: розроблено автором на базі [21]*

Принтери CoreXY мають як ряд переваг, так і певні недоліки перед дешевшими та простішими принтерами BedSlinger:

- 1) Потенційно вищі показники прискорень переміщення каретки:
  - a. Менша маса – усі двигуни встановлені на нерухомій рамі;
  - b. Стіл, який має вищу масу, рухається по осі Z, яка є значно менш динамічною, ніж ось Y, у порівнянні з компоновкою BedSlinger;
  - c. Як правило, вища несуча здатність для переміщення більш важких друкуючих голів.

- 2) Менша залежність швидкості / якості друку від висоти друку – основна конструкція «портал XY» принтера є абсолютно статичним, а збільшення висоти друку (іншими словами – збільшення дистанції до столу) досягається за рахунок опускання самого столу;
- 3) Можливість легкого встановлення бічних стінок через компоновку типу «кубик».

Проте недоліки компоновки CoreXY, як правило, досить неочевидні, але можуть бути значними:

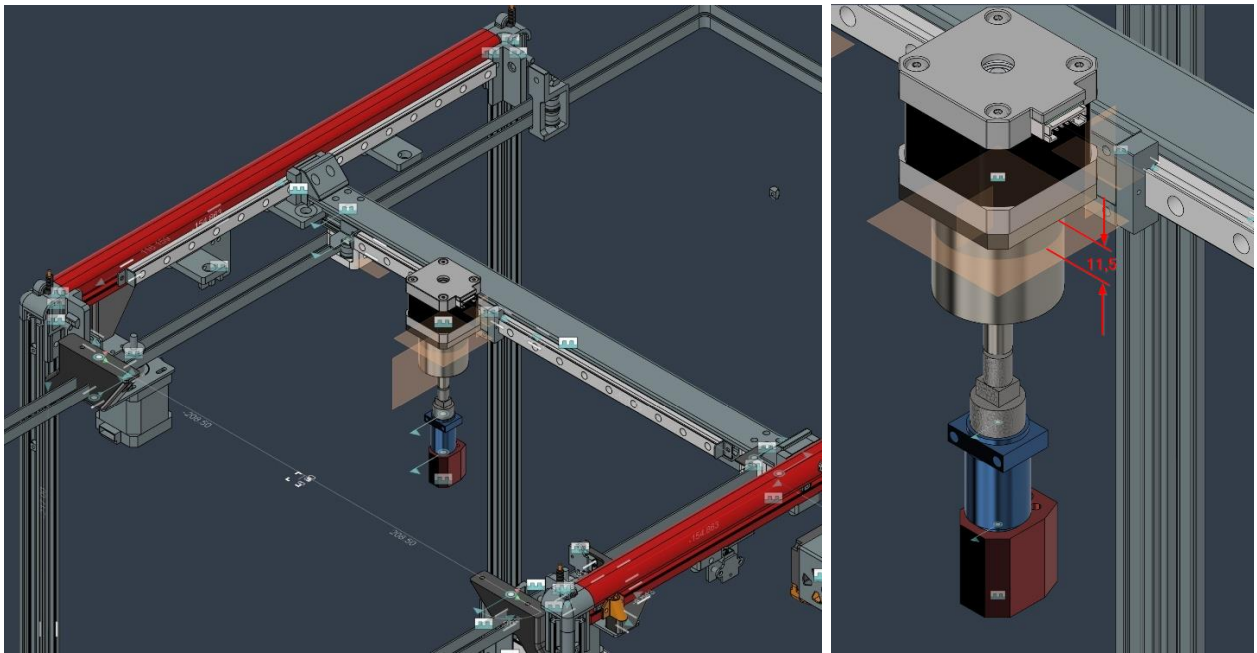
- 1) Вища вірогідність отримання дефекту типу Vertical Fine Artifact (VFA) – маловивчений дефект резонансної природи, що створює вертикальні виїмки фіксованого кроку на конкретних діапазонах швидкості друку;

- 2) Всупереч популярній думці, формат «кубика» змушує принтер займати більшу площу в висоту та ширину (особливо в режимі простою чи зберігання), при цьому економлячи не більш ніж 25% місця вздовж осі Y, вздовж якої у BedSlinger необхідно було б забезпечувати запас місця на переміщення столу.

- 3) Розташування каретки разом з друкуючою головкою всередині порталу XY приводить до утворення штучних обмежень у місцях потенційного контакту з рамою порталу, ременями, моторами на рамі чи будь-якими іншими конструкційними елементами порталу.

Враховуючи обмеження, що накладаються конструкцією принтера Reborn 2, який побудований на основі кінематики CoreXY, необхідно перевірити тестову збірку на наявність колізій з рамою принтера чи іншими конструкційними елементами порталу XY.

Розташуємо базові компоненти вздовж вертикальної осі симетрії каретки та за  $9,5 + 2,0$  мм (позиція ЦМ + припуск на друковані деталі та пелети) вище горизонтальної осі симетрії каретки (або просто осі симетрії рейки), як зображено на рисунку 3.6.



*Рисунок 3.6 – Позичювання базових компонентів*

*Джерело: розроблено автором*

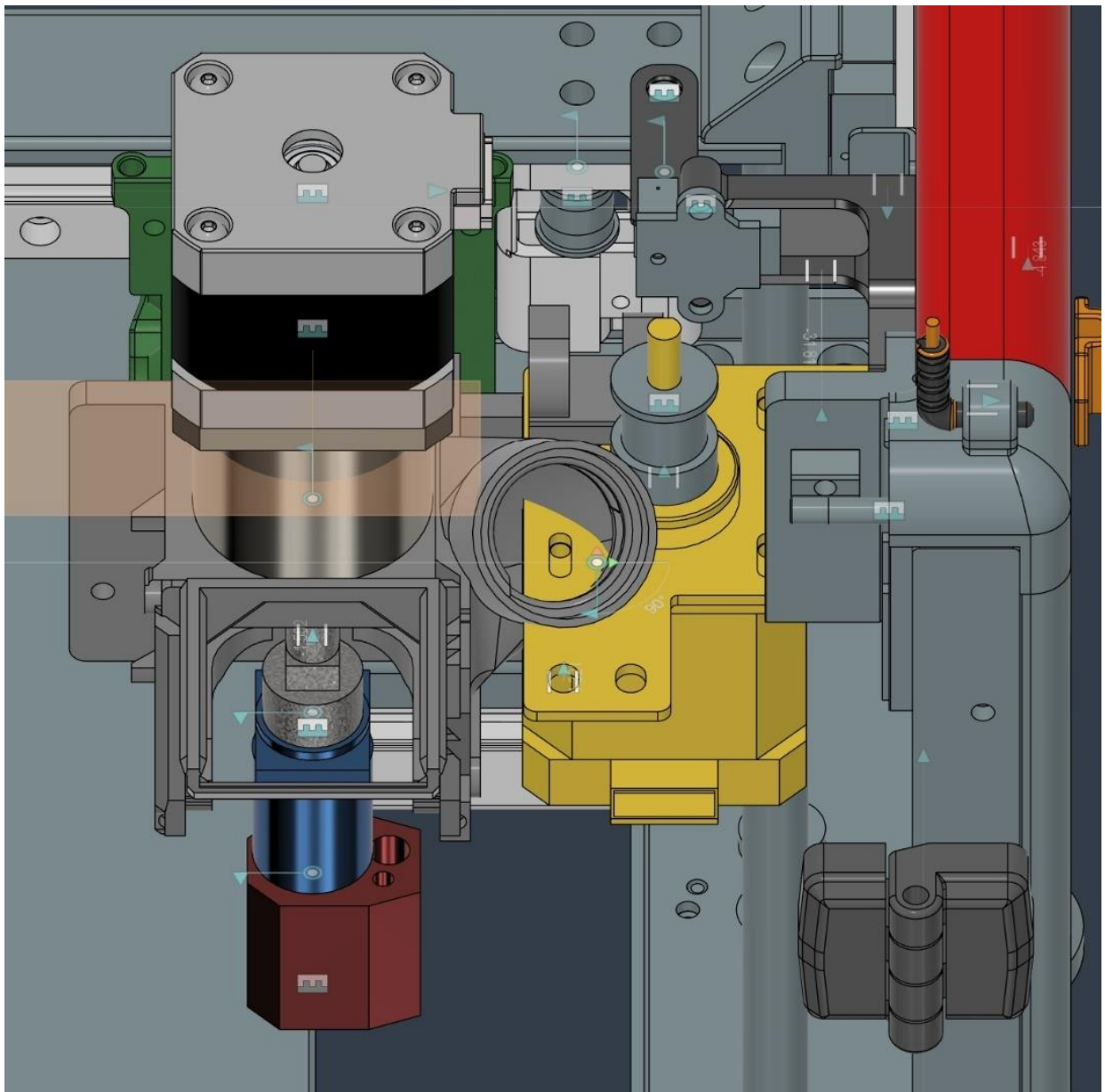
Зафіксуємо вертикальне положення базових компонентів відносно осі Z, тобто, в площині порталу XY. Додаймо компоненти початкових (V0) корпусних деталей та встановимо й інші залежності переміщення, де:

- Каретка принтера вільно переміщається відносно рейки X та перекладини осі X;
- Перекладина осі X вільно переміщається по рейкам Y;
- Встановлено ліміти переміщень згідно до реальних вимірювань, для спрощення та об'єктивізації дослідження складальної моделі.

Маючи рухому параметризовану збірку, було отримано можливість дослідити наявність потенційних колізій, чи будь-яких незручностей в обслуговуванні екструдера чи принтера так само, як би було визначено у випадку реального друку початкових деталей версії V0. Критичні колізії на моделі визначаються:

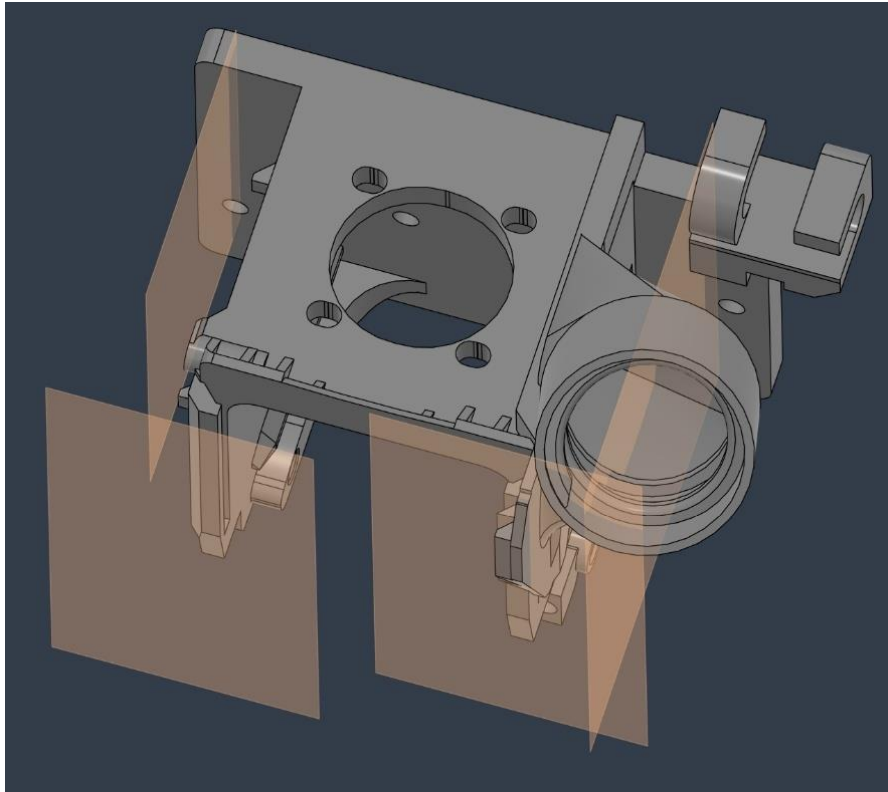
- А) Візуально;
- Б) Методом поперечного перерізу;
- В) Метрологічно – вимірами на 3Д моделі.

Такі колізії було визначено, занотовано і сплановано підхід до подальшого проектування. Один з прикладів колізії зображений на рисунку 3.7. Для спрощення середовища проектування та зменшення навантаження на систему ПК, було виділено обмежуючі площини з усіх сторін, де наявна потенційна колізія, і збережено окремо від великої складальної моделі принтера як модель виключно друкуючої голови з перенесеними обмежувальними площинами, як видно на рисунку 3.8.



*Рисунок 3.7 – Приклад колізії корпусу (вводу труби подачі пелетів) з двигуном*

*Джерело: розроблено автором*



*Рисунок 3.8 – Площини, де була виявлена колізія*

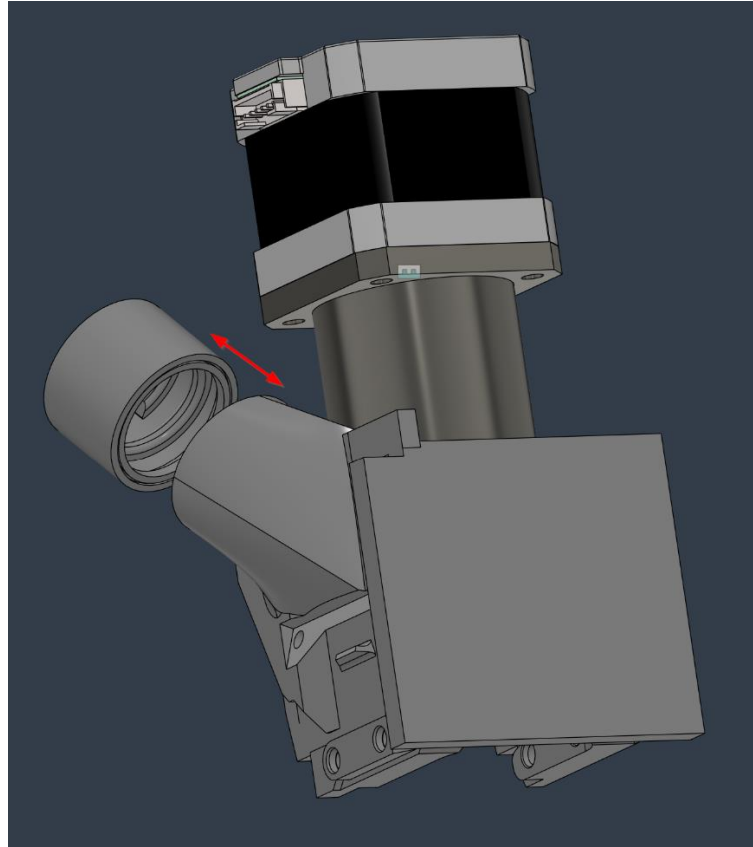
*Джерело: розроблено автором*

Метод обмежуючих площин є таким, який часто використовується автором цієї КРМ. Така методика, крім зменшення навантаження на ПК, дозволяє поставити чітке центрування по одній базовій моделі без будь-яких додаткових візуальних незручностей при навігації в 3Д просторі Fusion360. Альтернативним підходом може слугувати використання пристрою вводу 3D-Mouse, який допомагає ввести незалежний контроль переміщення в 3Д просторі. Але відокремлення деталей чи невеликих збірок від великих збірок також зменшує візуальний дискомфорт від перевантаженості інформацією.

Обмежуючі площини – це ті площини, які можна спроектувати на ескізи, наприклад, операцій вирізання, попередньо заклавши незначний зазор для гарантування вільного переміщення на будь-яких режимах без колізій.

Оцінимо існуючу вихідну модель V0. Плaska площина задньої стінки та вдосталь місця до крокового двигуна дозволяє зручно адаптувати кріпильні поверхні та виконати отвори для закріплення на кріпильну каретку осі X. Проте різьбовий отвір під трубку подачі гранул, що також має значну колізію, доцільно

відсікти інструментом Split Body та зберегти його для подальшого та більш комплексного етапу проектування нових каналів подачі гранул, як зображено на рисунку 3.9.

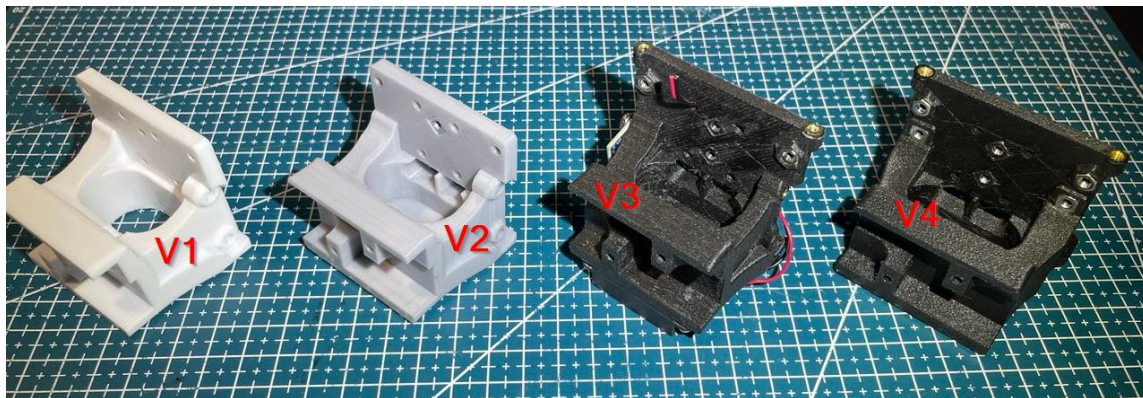


*Рисунок 3.9 – Приклад відокремлення та переносу частин моделі*

*Джерело: розроблено автором*

На цьому етапі було прийнято рішення тимчасово заглушити канал подачі гранул і перенести проектування системи таких каналів на етап після тестування MVP версії. Це пов'язано з практичною неможливістю простої переробки моделі, якщо були використанні інструменти Fusion360 такі як Sweep та Loft, тому такі конструктивні елементи варто проектувати в останню чергу.

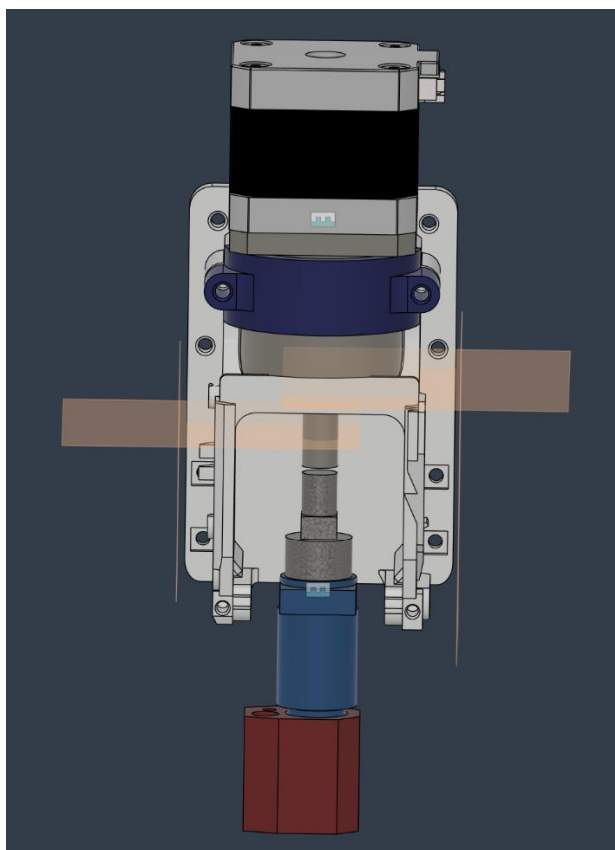
Додатково було розташовано скобу рівно в центрі мас друкуючої голови, а також внесені незначні модифікації в каретку осі X (V4), розташували додаткові отвори для більш гнучкого кріплення різних друкуючих голів. Історична черговість інкрементів зображена на рис. 3.10.



*Рисунок 3.10 – Інкременти каретки X*

*Джерело: розроблено автором*

Було допрацьовано модель корпусу екструдера, яка не має колізій зі статичними елементами принтера та може бути встановленою на каретку осі X та зображено на рисунку 3.11.



*Рисунок 3.11 – Версія корпусних деталей V1*

*Джерело: розроблено автором*

Як видно на рисунку 3.11, між обмежувачими площинами та корпусом тепер наявний невеликий зазор і вільне переміщення осями X та Y гарантоване.

Для мінімальних тестувань друку, тобто для створення MVP моделі, на цьому етапі достатньо забезпечити охолодження холодної зони радіатора, щоб запобігти плавленню чи розм'якшенню гранул в холодній зоні екструдера. Оригінальна конструкція розглядала кріплення вентиляторів по обидва боки екструдера, оскільки принтери конструкції BedSlinger не мають ніяких габаритних обмежень по ширині друкуючої голови. У випадку з будь-яким принтером CoreXY, місце ліворуч та праворуч сильно обмежені, тому було обрано місце під перекладиною осі X, тобто позаду самого корпусу екструдера. Таким чином, було розміщено вентилятор радіатора позаду корпусу під кутом  $45^\circ$ , спроектовано тримач та повітропровід через радіатор, а також було додано невелику відсічну «губу», щоб запобігти потраплянню зайвого повітря на нагріваючі елементи або на друковану деталь, коли це є небажаним. Деталь зображена синім кольором на рисунку 3.12.

Дані деталі були надруковані з пластику PETg та попередньо зібрані для базових тестувань, як показано в Додатку Г. Були підключені необхідні конектори для живлення вентилятора, зчитування показників датчику температури, живлення крокового мотору екструдера та PWM живлення нагрівача.

Враховуючи висоту пелетного екструдера та його монтажну позицію, відстань від перекладини осі X до столу 3D-принтера в такому розташуванні неминуче буде менше, ніж при класичній компоновці. Автором було розроблено двопозиційний «прапорець», який має два режими спрацювання тригера оптичного датчику осі Z. Положення з вищим відсіканням (+116 мм) приводить до паркування столу принтеру нижче, що підходить для пелетного екструдера. Натомість, заміна на класичний екструдер буде вимагати лише ручного провертання в позицію +39 мм. Прапорці осі Z були віддзеркалені для обох сторін столу для незалежного вирівнювання столу при паркуванні, що зображено на рисунку 3.13

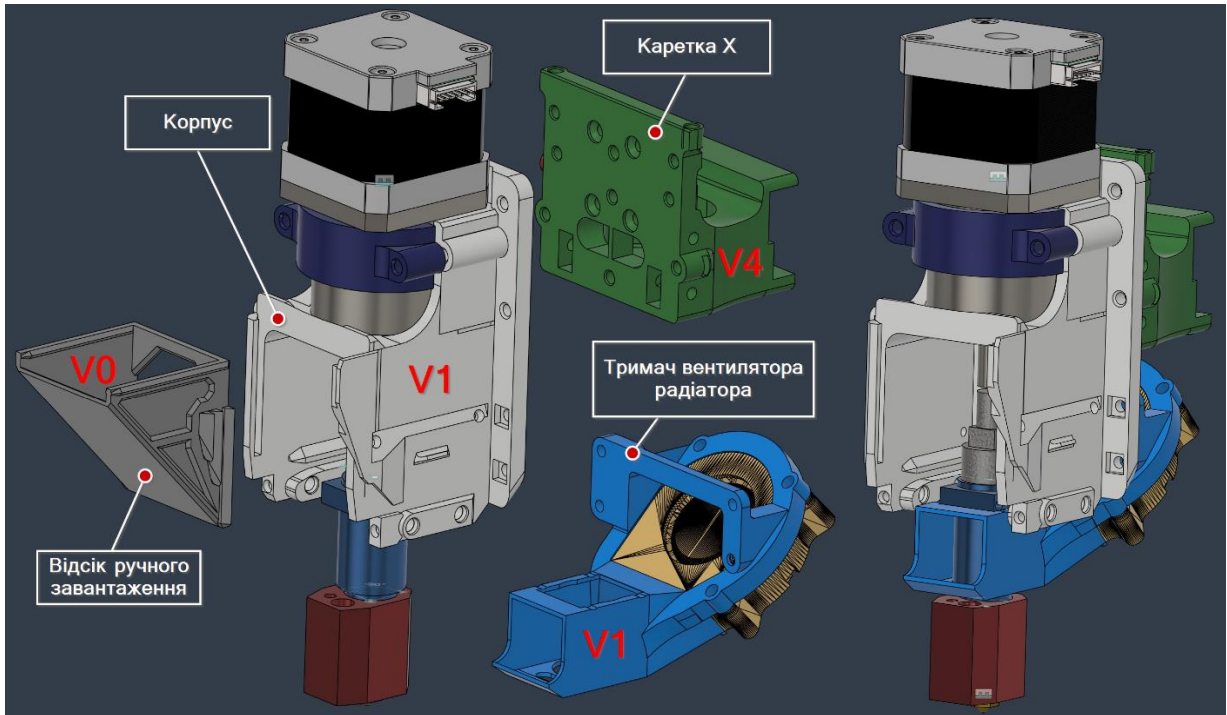


Рисунок 3.12 – Проектування та збірка охолодження радіатора (V1)

Джерело: розроблено автором

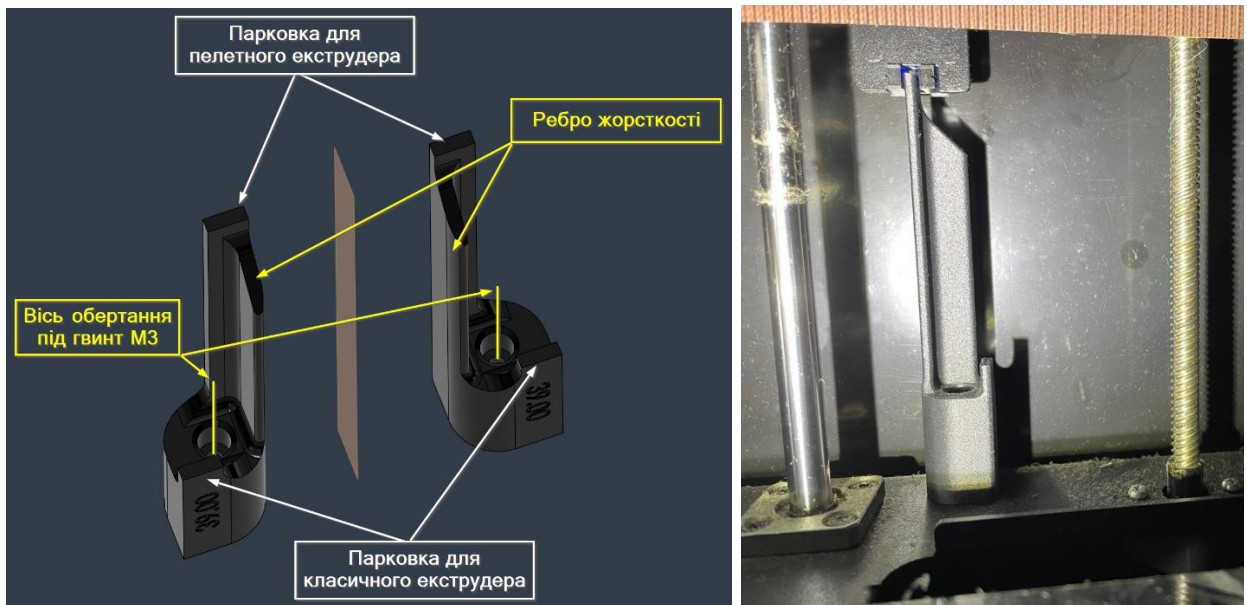


Рисунок 3.13 – Прапорці для оптичних датчиків осі Z

Джерело: розроблено автором

З міркувань безпеки, для гранульного екструдера були вказані наступні обмежуючі параметри в конфігураційному файлі системи Klipper:

`[verify_heater extruder1]` ; *перевірено правильність вказання екструдера – класичний екструдер залишиться підключеним і має найменування `extruder`, а пелетний екструдер має найменування `extruder1` в системі Klipper.*

`hysteresis: 5` ; *“мертва зона” (в °C) навколо цільової температури, в якій Klipper не вважає відхилення проблемою.*

`max_error: 120` ; *якщо різниця між виміряною температурою і цільовою стане більше 120 градусів – Klipper вважає це аварійною ситуацією.*

`heating_gain: 2` ; *мінімальний приріст температури, який Klipper очікує зареєструвати під час нагріву.*

`check_gain_time: 30` ; *контрольний інтервал (у секундах) для перевірки.*

Та обов'язково перевіряємо правильність налаштування та функціонування вентилятора радіатора гарячої зони екструдера:

`[heater_fan Hotend-2-fan]` ; *в цій секції назву можна вказувати довільною.*

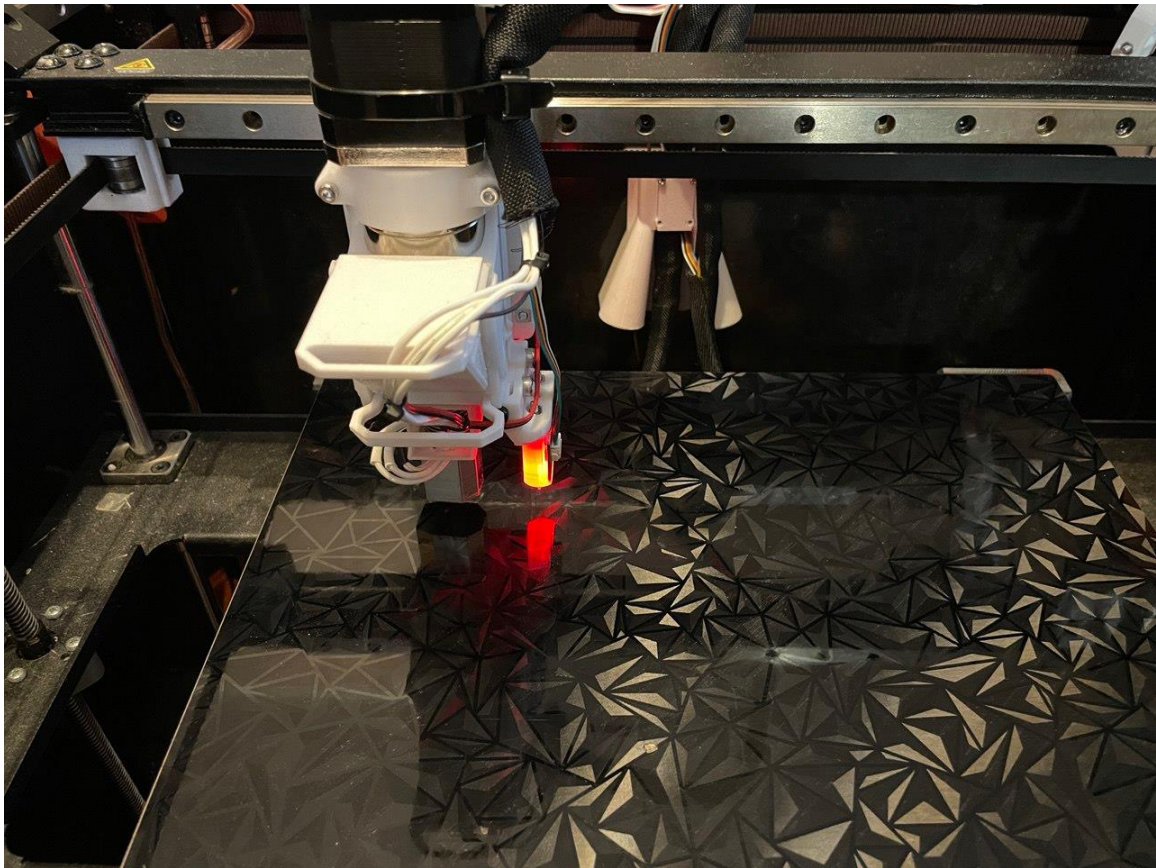
`pin: PA8` ; *коректно асоціюємо код та номер конектору (пінів) з реально підключеними на материнській платі принтеру.*

`heater: extruder1` ; *вказується елемент, активація якого приводить до активації вентилятора.*

`shutdown_speed: 1.0` ; *швидкість вентилятора у випадку аварії дорівнює 100%, без урахування температури – щоб гарантувати наявність охолодження, поки принтер в аварії чи перезавантажується.*

Надрукувавши та зібравши усі компоненти з розділу 3.1, керуючись безпековим чек-листом, підключивши повторно електричні конектори, та змонтувавши екструдер на принтер, було отримано результат, відображений на фото 3.14 та в Додатку Д.

На цьому було завершено спринт №3 та №4. Ретроспектива дала зрозуміти, що спринт 3 та 4 мали певний дисбаланс в кількості та складності задач, а спринт 3 було б доцільно розбити на підзадачі. Тим не менш, результату було досягнути і затверджено задачі на наступний спринт.



*Рисунок 3.14 – Принтер обладаний пелетним екструдером  
Джерело: розроблено автором*

### **3.2. Методика виправлення супутніх проблем та допрацювання модифікації. Реліз після MVP моделі. Оцінка перспективних покращень та рекомендації**

Після монтажу пелетного екструдера та успішного тестування переміщень та парковки усіх трьох осей, було проведено первинне налаштування екструдера. Але, в порівнянні з класичним екструдером, налаштування пелетних екструдерів ускладнюється неможливістю достовірно оцінити кількість використаного матеріалу за один оберт крокового мотора чи валу редуктора. Одне з рекомендованих значень налаштування рухів крокового мотора екструдера подано в значенні параметра “steps\_per\_mm”. Більшість референсних принтерів, що було модифіковано цим чи схожими підтипами пелетних екструдерів, мали встановлену прошивку Marlin та не мали окремого SoC зі встановленим середовищем Klipper. Проте, значення “steps\_per\_mm” можна трансформувати в прийнятне для Klipper “rotation distance” за наступною формулою:

$$steps\_per\_mm = \frac{full\ steps\ per\ revolution \times microsteps}{rotation\_distance}$$

З якої:

$$rotation\_distance = \frac{full\ steps\ per\ revolution \times microsteps}{steps\_per\_mm}$$

В наведених формулах значення “full steps per revolution” дорівнює кількості імпульсів від одного повного прокручування мотора. Для більшості крокових моторів, один імпульс трансформується в 1,8° обертання. Таким чином:

$$full\ steps\ per\ revolution = \frac{360^\circ}{1,8^\circ} = 200$$

Значення microsteps залежить, більшою мірою, від моделі драйверу крокового двигуна. Для встановленого драйвера TMC2209 стандартним значенням є 16 мікрокроків.

Беручи до уваги, що рекомендованим значенням “steps\_per\_mm” було 445 кроків/мм, перетворимо це в “rotation distance”:

$$\frac{200\ \text{кроків на оберт} \times 16\ \text{мікрокроків}}{445\ \text{кроків на мм}} = 7,191\ \text{мм}$$

Цей параметр було внесено в конфігурацію Klipper для пелетного екструдера (параметр для extruder1) та почато калібровку потоку загального призначення (див. Рисунок 3.15).

Незважаючи на періодичні досягнення правильного рівня потоку, стабільність екструзії стала значною проблемою. При детальному вивченні стану гвинтів та муфти, після екстракції невикористаних гранул, було виявлено проблему механічного характеру – вал шнека екструдера, сприймаючи навантаження від підвищеного тиску в зоні розплаву, виштовхувало вглиб муфти до контакту з валом редуктора, крім того, ослабляючи хват муфти та приводячи до періодичного прослизання валу в муфті. Див. Рисунок 3.16.

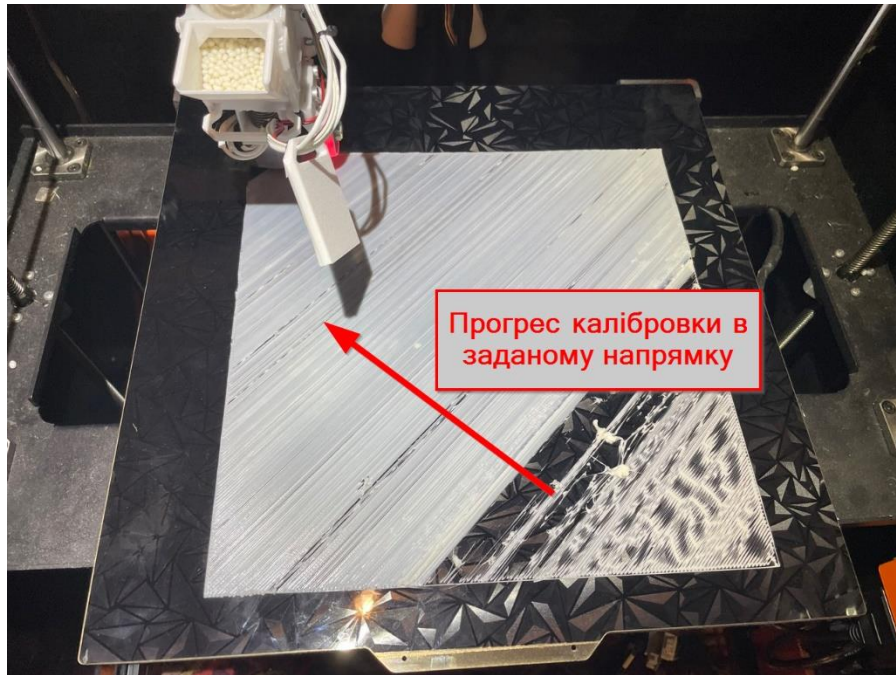


Рисунок 3.15 – Первинні спроби налаштування потоку  
Джерело: розроблено автором

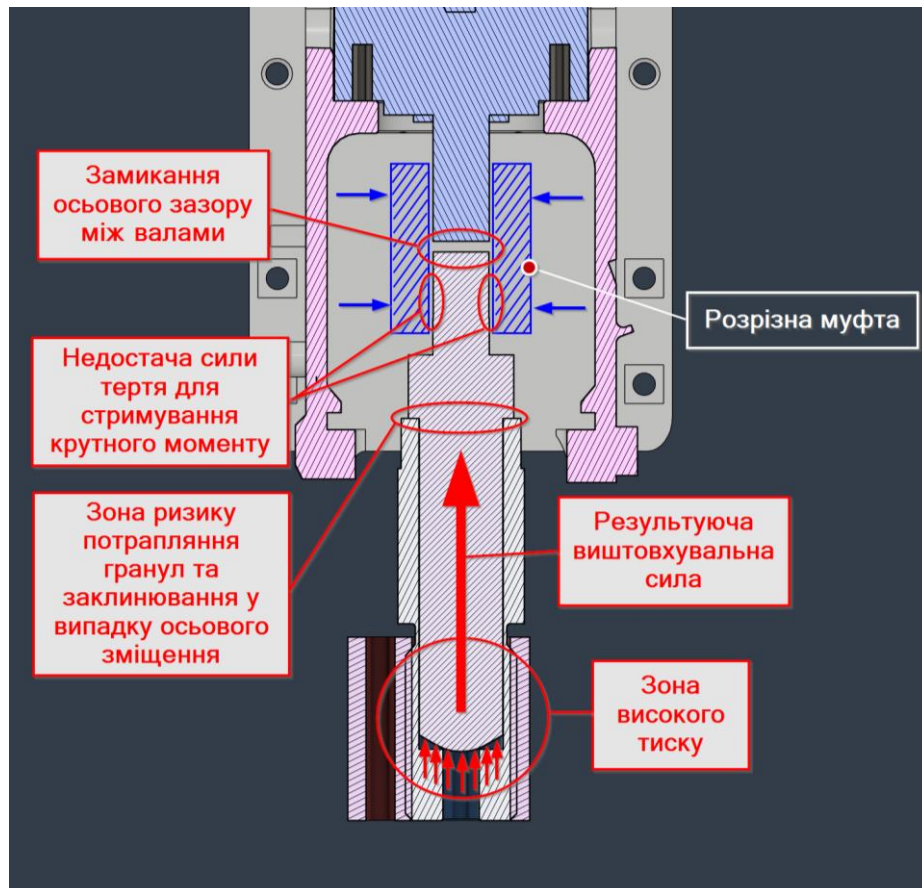


Рисунок 3.16 – Опис проблеми нестачі затискної сили муфти  
Джерело: розроблено автором

Незважаючи на те, що жорстка нерозрізна муфта є призначеною як для торсіонного, так і для осьового навантаження, в даному випадку сили затискання, тобто, сили тертя між валом та муфтою, недостатньо для коректного функціонування. З високою вірогідністю, прослизання валу в муфті, могло бути причиною проблем в налаштуванні потоку.

Для вирішення даної проблеми, було вирішено повернутись до компромісного варіанту, у порівнянні з Рисунком 3.3, залишивши мінімальний зазор в 0,08 мм замість 1,5 мм. Крім того, було вирішено підвищити шорсткість/адгезивну здатність валу шнека, з метою фіксації валу в муфті на роз'ємний фіксатор підшипників Loctite 641.

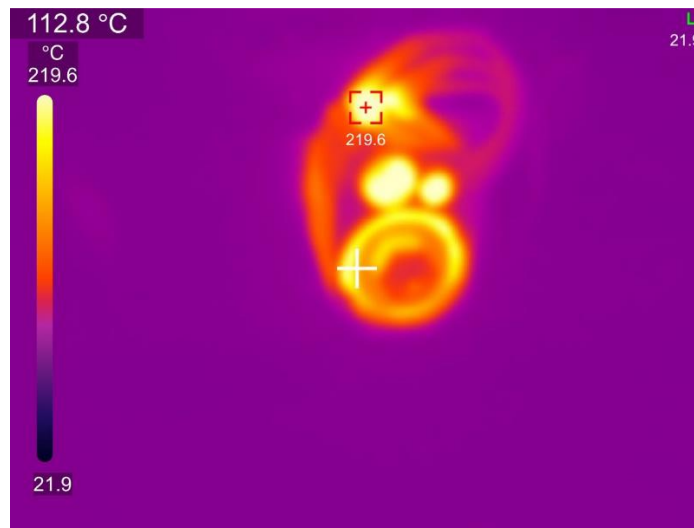
Ця проблема була критичною і вимагала вирішення для коректного виконання калібровок та інших задач, пов'язаних безпосередньо з друком, згідно плану спринта 5.

Оцінюючи вплив процесів, описаних на рисунку 3.16, очікується певне навантаження на вали та підшипники планетарного редуктора. **Перспективним рішенням** могло б бути встановлення упорного шарикового підшипника та створення нового інкременту корпусу, що додатково мав би опорну стінку для упорного підшипника - таким чином, можливо досягти повного або часткового зняття осьового навантаження з компонентів планетарного редуктора.

Також перспективним рішенням може бути підбір іншого варіанту жорсткої розрізної муфти, або розсвердлення наявної алюмінієвої муфти з гвинтів M2.5 на гвинти M3.

Одним з відносно незначних зауважень до конструкції є довге та нерівномірне нагрівання блоку нагрівача, як показано на рисунку 3.17. Крім того, сам блок нагрівача має передати тепло через різьбове з'єднання – проте це може бути розглянуто як негативний, так і позитивний фактор. Певні втрати між блоком нагрівача та стінками екструдера будуть наявні через додатковий інтерфейс термообміну, але, з іншого боку – різьбова поверхня, за рахунок виступів та впадин, має більшу площу поверхні. Таким чином, одним з

перспективних рішень буде нанесення високотемпературної термопровідної пасти на різьбове з'єднання.



*Рисунок 3.17 – Термограма нагрівача пелетного екструдера*

*Джерело: розроблено автором*

Як видно на рисунку 3.17, передача тепла в значній мірі переходить на гвинти їх фіксації та сусідній отвір термістора – найгарячіші точки на термограмі під тепловізором. Це фактично може приводити до того, що температура, яка зчитується, і та температура, до якої дійсно було нагріто зону розплаву буде мати певну девіацію. Рішення цієї проблеми було описане в розробці нагрівачого блоку та сопел компанії E3D в 2014-му році [22], і заключається в простому рознесенні нагрівача та термістора по різні боки термоблоку, забезпечуючи таким чином рівномірне прогрівання компоненту.

Перспективним та, імовірно, достатнім рішенням може бути ізоляція термоблоку за допомогою високотемпературної каптонової клейкої стрічки, яка була створена з метою термоізоляції космічних апаратів – та досить добре підходить до різноманітного використання в 3D-друці. Крім того, ізоляція каптоновою стрічкою дозволить захистити нагрівачий блок від просадок температури, коли моделі, що друкується, буде необхідним активне охолодження, яке неминуче буде частково обдувати нагрівачий блок.

Переходячи до допрацювання MVP моделі до версій, близьких до релізу, було поставлено на меті досягнути наступних результатів або вирішити наступні проблеми:

- 1) скорегувати зазор між валами шнека та редуктора;
- 2) організувати другий вентилятор для охолодження деталі – так званий “part\_fan” в середовищі Klipper;

Розплавлений полімер, що виходить з пелетного екструдера, сильніше прогрівається та не довше остигає до стабільних температур. В переважній більшості випадків одного вентилятора формату 4020 буде досить достатньо. Автор цієї КРМ має на меті в подальшому провести експеримент з додаванням статично закріпленого радіального вентилятора формату 120 мм для додаткового охолодження усієї площі перегрітого пластику.

- 3) організувати подачу пелет через трубу подачі з певної ємності для гранул;
- 4) інтегрувати кріплення для датчику вимірювання кривизни столу;
- 5) надрукувати основні компоненти з міцного та жаростійкого поліаміду PA12-CF: Корпус друкуючої голови, Кріплення для вентиляторів та будь-які інші друковані елементи, що знаходяться поблизу джерел високої температури.

Результати реалізації запланованих змін наведено на рисунку 3.18.

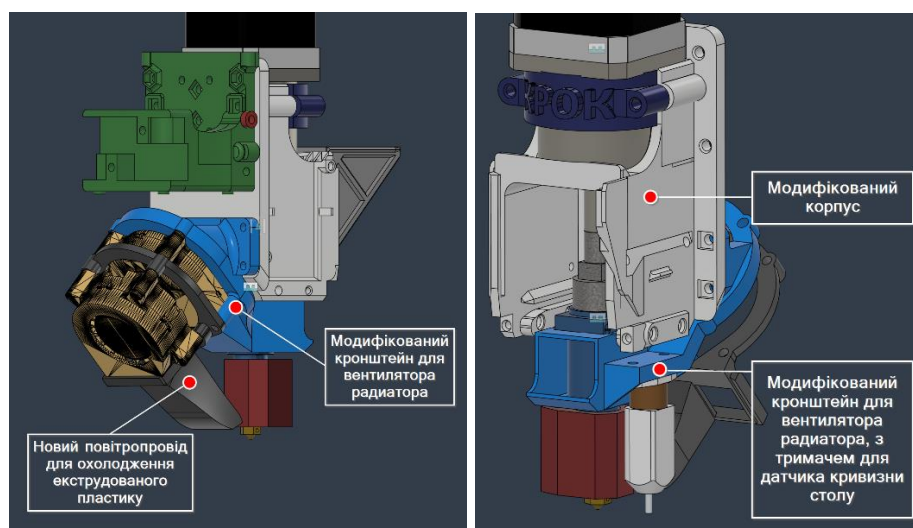


Рисунок 3.18 – Зміни в передрелізних ітераціях

Джерело: розроблено автором

### 3.3. Оцінка практичної успішності проєкту та фінальні фінансові показники

Після реалізації проєкту, можна зробити певні висновки про ефективність модифікації, додаткові витрати, теоретичні та реальні проблеми і їх рішення. Варто зауважити, що як налаштування принтера, так і досвід друкаря (автора) з друком конкретним екструдером ще потребують вдосконалення, тому в даному розділі будуть враховані реальні показники витрат та успішності друку, які безумовно будуть покращуватися з часом.

Переглядаючи план успіху модифікації, що наданий у розділі 2, було зроблено висновок про:

- 1) Необхідність пошуку надійного та контактного постачальника гранул, якщо розглядати робити замовлення в Україні;
- 2) Протяжність друку в 1.5 години для MVP моделі вимагає або періодичного ручного додавання гранул, або ж рівень MVP моделі буде практично рівним релізному варіанту.

Незважаючи на певну розбіжність, загалом результати модифікації вважаються позитивними. З теоретичних проблем усі виявились незначними, крім проблеми зберігання та сортування гранул. Ризик розсипати гранули є значним на етапі тестування конструкції, проте в релізному варіанті ця проблема, більшою мірою, стосується зберігання та сортування пелет – і ця тема заслуговує подальшого вивчення і використання нового підходу.

Завдяки модифікації несучої каретки X та ре-інжинірингу геометрії корпусу екструдера вдалося досягти навіть більшого діапазону руху, ніж попередньо з класичним екструдером: 335 мм замість 327 мм – тобто, на всю довжину направляючої рейки. Варто зауважити, що при встановленні класичного екструдера на несучу каретку V4, дана характеристика тепер не погіршується також.

Підходи Scrum та Lean дозволили побачити значну частину потенційних задач, що потребували рішення, без реального друку некондиційних деталей. Проте, проблеми з приводом шнека екструдера були неявними та неочікуваними,

з необхідністю замовлення та очікування фіксатору підшипників, з подальшим демонтажем та перебіркою екструдера.

Модифікації, що мають вплив на фінансові показники:

Витрати на комплект екструдера вже було приведено в розділі 2.4.

Додатковими витратами стали:

- 1) Набір гвинтів M2,5x8 – 25 шт за ~ 15 грн;
- 2) Пластик (філамент): до 200г PETg (550 грн/кг) + до 130г PA12-CF (1700 грн/кг) = 330 грн;
- 3) Набір вилочних наконечників для проводів SNBM2-4 + термоусаджувальна трубка – 10 шт за ~ 25 грн;
- 4) Наждачний папір P180 – 115x280 за ~ 10,80 грн;
- 5) Loctite 2286 грн / 50г (витрачено до 5г);

Стосовно прямих витрат на 3D-друк пелетним екструдером, варто зауважити попередньо невисокий показник успішності друку (біля 40%), який з часом майже вирівнявся з показниками класичного екструдера, але за цей період було невдало витрачено майже 0.5 кг гранул на суму до 50 грн. Також нагрівання та підтримування температури вимагає 70 Вт, а не 50 Вт, але в загальному розрахунку різниця витрат на електроенергію є мінімальною і нею можна знехтувати. Таким чином, попередній розрахунок витрат на друк можна вважати актуальним.

До попереднього ж розрахунку витрат на модифікацію варто додати додаткові витрати вище + витрачені пелети на 50 грн. Таким чином, сумарні витрати дорівнюють:

$$20\,492 + 15 + 330 + 25 + 10,80 + 2286 + 50 = 23\,208 \text{ (грн)}$$

Можна порівняти практичні результати з теоретичними розрахунками:

$$(23\,208 \div 20\,492) \times 100\% = 113,2\%$$

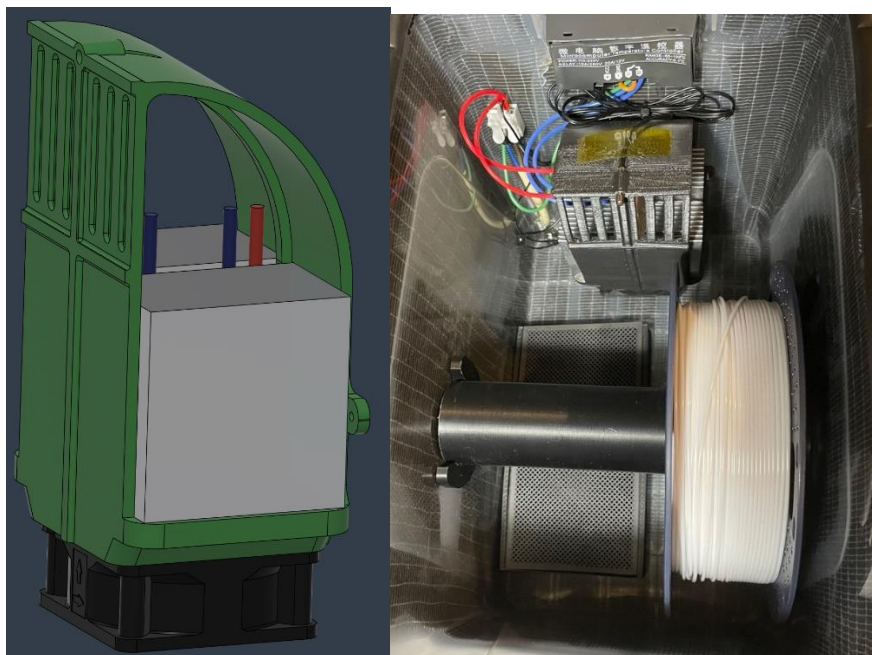
Тобто, в результаті модифікації було витрачено на 13.2% більше теоретичних витрат. Проте, варто зауважити, що велика кількість компонентів залишається у власності автора, має залишок на значну вартість та може бути використана повторно, чи в інших проектах.

### 3.4. Альтернативні варіанти використання гранульного екструдера

В цьому розділі розглянемо альтернативні методики використання пелетного екструдера, а також зробимо оцінку потенційної можливості використання класичних екструдерів в приведених прикладах.

Перший варіант – переробка або утилізація відходів 3D-друку. Теоретично пелетний екструдер може дозволити плавити і екструдувати будь-яку термопластичну стружку чи гранули, зокрема подрібнені невдалі деталі. практично це означає, що потрібно спочатку подрібнити або натерти деталі на маленькі фрагменти (менше – краще), просушити отримані фрагменти та використовувати їх як сировину.

Варто зауважити, що для багатьох видів як філаментів, так і гранул, рекомендується мати активну сушку для пластику. Як приклад – автором КРМ раніше було розроблено нагрівачий модуль, здатний кріпитись в будь-який контейнер, зображено на рисунку 3.19. Автор рекомендує друкувати дану модель виключно з полімерів, що не підтримують горіння, наприклад з додаванням антипріопрену.



*Рисунок 3.19 – Варіант високотемпературної DYI сушки для різних видів полімерів*

*Джерело: розроблено автором*

Необхідність подрібнення деталей на фрагменти вимагає додаткового обладнання – мінішредер або фреза для пластику, контейнери для сортування різних типів як подрібнених фрагментів, так і цілих деталей, що підлягають переробці. Варто також звернути увагу що конкретний тип полімеру не бажано змішувати з іншими типами полімерів – це може привести як до крихкого філаменту в результаті, так і до засмічення екструдера чи утворення пластикового нагару.

Крім того, оглядова стаття “Potential of recycled PLA in 3D printing: A review” [23] показує, що вироби з переробленого PLA часто мають знижену міцність, отже їх потрібно доповнювати добавками або компаундувати з чистим матеріалом.

З перероблених пелетів можна як друкувати напряму, так і використовувати їх у виробництві саморобного філаменту. Для цього необхідно створити систему, яка буде охолоджувати нитку полімеру на виході після екструдера та контролювати швидкість намотки, що впливає на результуючий діаметр філаменту [24].

Продовжуючи тему використання пелетного екструдера для виробництва філаменту, враховуючи вартість гранул, може бути доцільним навіть виробляти філамент не тільки з переробленої сировини, але й з самих гранул. На відміну від попереднього методу – це не вимагає додаткового обладнання у вигляді шредера, який може бути найдорожчою складовою переробки (крім самого пелетного екструдера).

Другий варіант – пелетні екструдери не обмежуються 3D-принтерами та не обмежуються пластиками. Аналогічні конфігурації можна використовувати для друку харчовими матеріалами – наприклад, шоколадною крихтою [18]. Важливим застереженням є чітко розмежовувати «харчові» та принтери, що друкують пластиком, оскільки потрапляння пластику до їжі може привести до серйозних проблем зі здоров'ям. Також у розділі 1.2 були наведені приклади використання пелетних принтерів для друку біо-матеріалами з медичними цілями.

Повертаючись до звичайного 3D-друку гранулами, додавати барвники чи спеціальні присадки прямо до гранул. Наприклад, на пелети наносять пігмент чи люмінесцентний порошок, перемішують та сушать – і екструдер вже друкуватиме з новим кольором або іншою бажаною властивістю. Greenboy3D радить змішувати гранули з пігментом, щоб отримати будь-який бажаний колір за низьку ціну [18].

### **Висновки до розділу 3**

У розділі 3 було виконано практичну реалізацію модифікації 3D-принтера під пелетний екструдер: від CAD-проєктування та поетапного складання вузлів до впровадження організаційних практик (поділ робіт на спринти, створення чек-листів) і виходу на працездатну конфігурацію принтера. Функціональність модифікації досліджено на етапі монтажу та завершення спринтів із формалізацією подальших задач, що засвідчило керованість процесу розробки та придатність ітеративного підходу для інженерних змін високої складності.

Для безпечної експлуатації розроблено чек-лист тестування та введено захисні обмеження в Klipper (контроль температурних відхилень, інтервали перевірки нагріву, логіка роботи вентиляторів), що зменшує ризики при роботі з високотемпературними вузлами та рухомими елементами екструдера.

Оцінка практичної успішності показала наявність конкретного та об'єктивного результату розробки модифікації. Проте практичне тестування показало ускладнення з калібруванням налаштувань пелетного екструдера – це об'єктивно ускладнює адаптацію пелетного екструдера на сторонні принтери. Проте перетворення гранул в філамент в домашніх може мати фінансову доцільність, і може бути виконана без встановлення екструдера на принтер, тобто, стаціонарно. При цьому фактичні витрати на реалізацію виявилися вищими за теоретичні на 13,2%, проте суттєва частина компонентів зберігає повторну цінність і буде надалі використана в інших проєктах.

Сформульовано практичні рекомендації для вдосконалення та впроваджено дані вдосконалення до релізної версії: корекція механічних зазорів, додавання охолодження зони друку, організація подачі гранул із зовнішнього накопичувача, інтеграція датчика кривизни столу.

## ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі практично досліджено доцільність модифікації побутового FDM-3D-принтера під гранульний (пелетний) екструдер як способу зниження собівартості друку та розширення доступу до технічних полімерів у форматі гранул.

У розділі 1 сформовано теоретичне, методологічне та правове підґрунтя дослідження: окреслено обмеження класичного FDM-друку та обґрунтовано перспективи гранульного друку для користувацьких принтерів як підходу, що потенційно зменшує витрати на матеріал у декілька разів. Також аргументовано застосування Agile/Lean (Scrum-ітерації, MVP, 5S) як практичної рамки керування інженерним експериментом із високою невизначеністю, і підкреслено важливість дотримання правових рамок і open-source ліцензій при модифікаціях.

У розділі 2 виконано дослідницько-аналітичне обґрунтування проєкту: показано, що промислові рішення для pellet-друку є дорогими для побутового сегмента, а DIY-підходи часто потребують суттєвої адаптації та мають слабку стандартизацію й документацію — що підтверджує актуальність обраного напрямку модифікації.

Проведено теоретичну оцінку економічної доцільності: розрахунки враховують суттєву перевагу гранульного підходу в загальних витратах до 72,7% та демонструють короткий теоретичний період окупності модифікації: від 1,66 до 7,04 місяців залежно від виробника та місця придбання.

У розділі 3 реалізовано практичну частину: виконано ітеративне проєктування та доведення модифікації до релізного стану, зроблено опис побічних проблем та прийняті певні технічні рішення.

Для підвищення надійності та безпечності експлуатації розроблено чек-лист тестування та введено захисні обмеження в Klipper (контроль температурних відхилень, інтервали перевірки нагріву, логіка роботи вентиляторів), що знижує ризики під час роботи з високотемпературними вузлами та рухомими елементами екструдера.

Практична оцінка успішності підтвердила наявність об'єктивного результату модифікації. Водночас встановлено, що фактичні витрати на реалізацію перевищили теоретичні на 13,2%, однак частина компонентів зберігає повторну цінність і може бути використана в подальших проєктах.

Додатково розглянуто потенціал використання гранульного екструдера за альтернативними призначеннями: для виконання друку із подрібнених залишків деталей з PLA/PETG, та для виготовлення філаменту з подрібнених фрагментів чи пелетів. Це демонструє реалістичність напрямів локальної переробки відходів та часткової замкненості матеріального циклу в умовах хобі та малих серій.

Загалом проєкт довів ефективність адаптації гранульного екструдера до побутового 3D-принтера як інструменту зниження результуючої вартості 3D-друку, а ітеративна розробка із застосуванням Agile-практик показала себе дієвою для швидкого виявлення критичних проблем і побудови тактики їх усунення на ранніх етапах.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. 3D printing history: from 1980s SLA to modern manufacturing [Електронний ресурс]. – Sinterit. – URL: <https://sinterit.com/3d-printing-guide/introduction-to-3d-printing/3d-printing-history/> (дата звернення: 20.12.2025).
2. RepRap project [Електронний ресурс]. – RepRap Wiki. – URL: <https://reprap.org/wiki/RepRap> (дата звернення: 20.12.2025).
3. Wylie B., Moore C. Optical Methods of Error Detection in Additive Manufacturing: A Literature Review // *Journal of Manufacturing and Materials Processing (JMMP)*. 2023. Vol. 7, No. 3. Article 80. DOI: [10.3390/jmmp7030080](https://doi.org/10.3390/jmmp7030080)
4. Калібровка ретрактів в 3D друці [Електронний ресурс]. – Artline. – URL: <https://artline.ua/uk/blogs/kalibrovka-i-nastroyka-retraktov-v-3d-pechati> (дата звернення: 20.12.2025).
5. Bambu Lab A1 Mini review [Електронний ресурс]. – The3DPrinterBee. – URL: <https://the3dprinterbee.com/bambu-lab-a1-mini-review/> (дата звернення: 20.12.2025).
6. Gupta P., Taufik M. Effect of Process Variables on Performances Measured in Filament and Pellet Based Extrusion Processes // *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 47. P. 5177–5184. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.507>
7. Karip E., Muratoğlu M., Çelik E. Design of Pellet Extrusion System for 3D Printers : Conference Paper // *International Conference on Advances and Innovations in Engineering*. Elazığ, September 2023. URL: [https://www.researchgate.net/publication/393975346\\_Design\\_of\\_Pellet\\_Extrusion\\_System\\_for\\_3D\\_Printers](https://www.researchgate.net/publication/393975346_Design_of_Pellet_Extrusion_System_for_3D_Printers) (дата звернення: 20.12.2025).
8. Mpfu T. P., Mawere C., Mukosera M. The Impact and Application of 3D Printing Technology // *International Journal of Science and Research (IJSR)*. 2014. Vol. 3, Issue 6. P. 2148–2152. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/264157357\\_The\\_Impact\\_and\\_Application\\_of\\_3D\\_Printing\\_Technology](https://www.researchgate.net/publication/264157357_The_Impact_and_Application_of_3D_Printing_Technology) (дата звернення: 20.12.2025).

9. Durgun I., Ertan R. Experimental investigation of FDM process for improvement of mechanical properties and production cost // *Rapid Prototyping Journal*. 2014. Vol. 20, No. 3. P. 228–235. DOI: <https://doi.org/10.1108/RPJ-10-2012-0091>
10. Данченко О. Б., Корейба А. В. Моделі самоорганізації в проєктних командах // *Вчені записки Університету «КРОК»*. 2025. № 1(77). С. 49–57. DOI: <https://doi.org/10.31732/2663-2209-2025-77-257-264>
11. Ohno T. Toyota Production System: Beyond Large-Scale Production. – New York : Productivity Press, 1988. URL: [Toyota Production System: Beyond Large-Scale Production - PDFDrive.com](https://www.pdfdrive.com/toyota-production-system-beyond-large-scale-production-pdf) (дата звернення: 20.12.2025).
12. Демидов Д. Система 5S в Lean-методології: особливості та переваги використання [Електронний ресурс]. – Lean Institute Ukraine. – URL: <https://lean.org.ua/blog/5s/systema-5s-v-lean/> (дата звернення: 20.12.2025).
13. GT Engineering. Substantial modifications [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.gt-engineering.it/en/insights/machinery-directive/machinery-substantial-modifications/> (дата звернення: 20.12.2025).
14. EPAM SolutionsHub. Open Source Licenses: Definition, Types, and Comparison [Електронний ресурс]. – URL: <https://solutionshub.epam.com/blog/post/open-source-licenses-definition-types-and-comparison> (дата звернення: 20.12.2025).
15. About CC Licenses [Електронний ресурс]. – Creative Commons. – URL: <https://creativecommons.org/share-your-work/cclicenses/> (дата звернення: 20.12.2025).
16. Mahor XYZ. Pellet Extrusion Solutions [Електронний ресурс]. – URL: <https://mahor.xyz> (дата звернення: 27.11.2025).
17. Dyze Design. Pellet Extruders [Електронний ресурс]. – URL: <https://dyzedesign.com> (дата звернення: 27.11.2025).
18. Greenboy3D. Extruder, Pellets, Wiki [Електронний ресурс]. – URL: <https://greenboy3d.de> (дата звернення: 27.11.2025).

19. 3D Printing Cost Calculator: How to Accurately Estimate Your Expenses [Електронний ресурс]. – Tridimensio. – URL: <https://tridimensio.com/3d-printing-cost-calculator-how-to-accurately-estimate-your-expenses/> (дата звернення: 20.12.2025).
20. Design for 3D-Printing [Електронний ресурс]. – Rahix' Blog. – URL: <https://blog.rahix.de/design-for-3d-printing/> (дата звернення: 20.12.2025).
21. VzBoT [Електронний ресурс]. – GitHub. – URL: <https://github.com/VzBot3D> (дата звернення: 20.12.2025).
22. The E3D V6 HotEnd Design and Details [Електронний ресурс]. – E3D Online. – URL: <https://e3d-online.com/blogs/news/the-e3d-v6-hotend-design-and-details> (дата звернення: 20.12.2025).
23. Hasan M. R., Davies I. J., Pramanik A., John M., Biswas W. K. Potential of recycled PLA in 3D printing: A review // *Sustainable Manufacturing and Service Economics*. 2024. Vol. 3. Article 100020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.smse.2024.100020>
24. Recycling Plastic Cutlery into 3D Printing Filament [Електронний ресурс]. – CNC Kitchen. – URL: <https://www.cnckitchen.com/blog/recycling-plastic-cutlery-into-3d-printing-filament> (дата звернення: 20.12.2025).
25. Lukutin O., Baldyk D., Garkusha V. Navigating complexity: the crucial role of organizational structure change in transformative environments // *Держава, регіони, підприємництво: інформаційні, суспільно-правові, соціально-економічні аспекти розвитку*: тези доп. V Міжнар. конф. (Київ, 7 грудня 2023 р.). – Київ : Університет «КРОК», 2023. – URL: <https://conf.krok.edu.ua/SRE/SRE-2023/paper/view/1902> (дата звернення: 20.12.2025).
26. Балдик Д. Інтеграція статистичних методів в Agile-управління бізнес-проєктами // *Вчені записки Університету «КРОК»*. 2025. № 3(79). С. 236–247. DOI: <https://doi.org/10.31732/2663-2209-2025-79-236-247>
27. Данченко О. Б. Практичні аспекти реінжинірингу бізнес-процесів: навч. посіб. – Київ : Університет економіки та права «КРОК», 2017. – 238 с. URL: <https://dspace.krok.edu.ua/handle/krok/73> (дата звернення: 20.12.2025).

28. Chukurna O., Tkacheva N., Baldyk D. Strategic Approaches to Pricing in Digital Economy // *Zeszyty Naukowe Wyższej Szkoły Technicznej w Katowicach*. 2020. No. 12. P. 21–36.

29. Методичні рекомендації до виконання кваліфікаційної роботи здобувачами ОП «Agile технології розробки програмного забезпечення», освітнього рівня «магістр», спец. 073 «Менеджмент», галузь знань 07 «Управління та адміністрування» / уклад.: Орлова-Курилова О. В., Балдик Д. О., Мічківський С. М., Мушинський О. Ю. – Київ : Університет «КРОК», 2024. – 72 с.

30. Klipper 3D Printer Firmware [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.klipper3d.org> (дата звернення: 27.11.2025).

31. What is Agile? [Електронний ресурс]. – Agile Alliance. – URL: <https://agilealliance.org/agile101/> (дата звернення: 27.11.2025).

32. Prusa Research. Original Prusa XL (product page) [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.prusa3d.com/product/original-prusa-xl-assembled-single-toolhead-3d-printer/> (дата звернення: 27.11.2025).

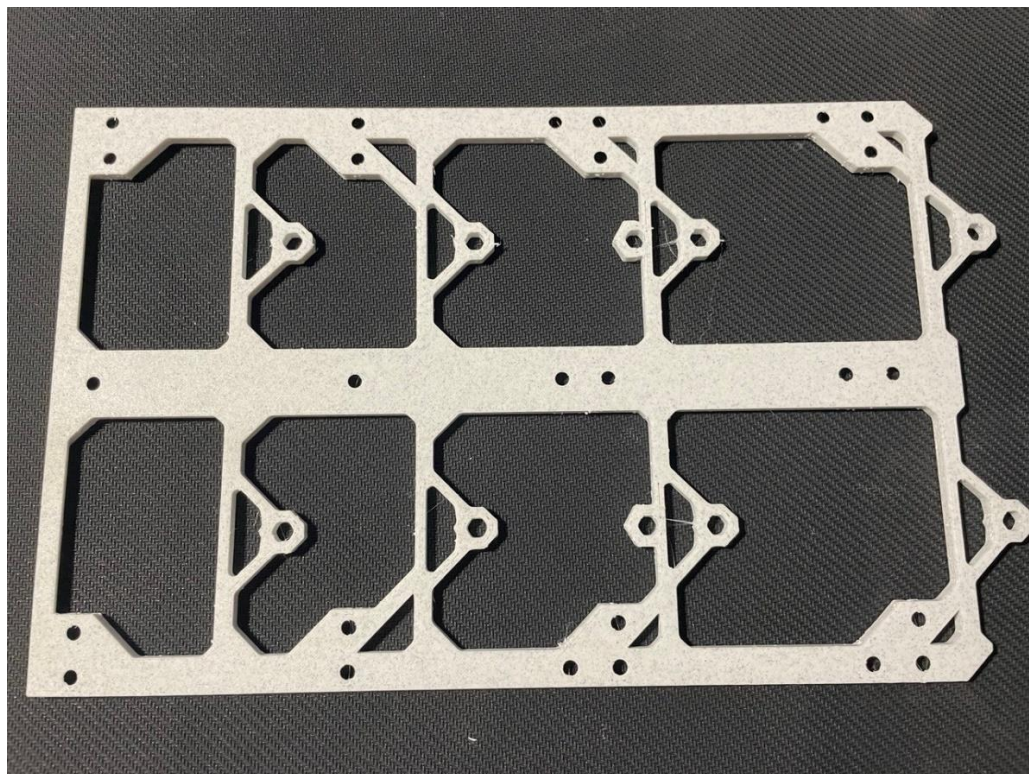
33. BIGTREETECH OCTOPUS Pro Board [Електронний ресурс]. – GitHub. – URL: <https://github.com/bigtreetech/BIGTREETECH-OCTOPUS-Pro> (дата звернення: 27.11.2025).

34. FlyingBear Reborn 2 Download Center [Електронний ресурс]. – 3DFlyingBear. – URL: <https://3dflyingbear.com/pages/3d-printer-laser-engraver-download-center> (дата звернення: 27.11.2025).

35. Best Practices for Prototype Model Documentation [Електронний ресурс]. – KAD Models and Prototypes. – URL: <https://kadmodels.com/blog/best-practices-for-prototype-model-documentation/> (дата звернення: 20.12.2025).

## ДОДАТКИ

## ДОДАТОК А



*Рис А.1 – Результати попереднього друку стандартизованих моделей класичною конфігурацією fdm 3d-принтера*

*Джерело: розроблено автором*

# Scrum-схема проєкту

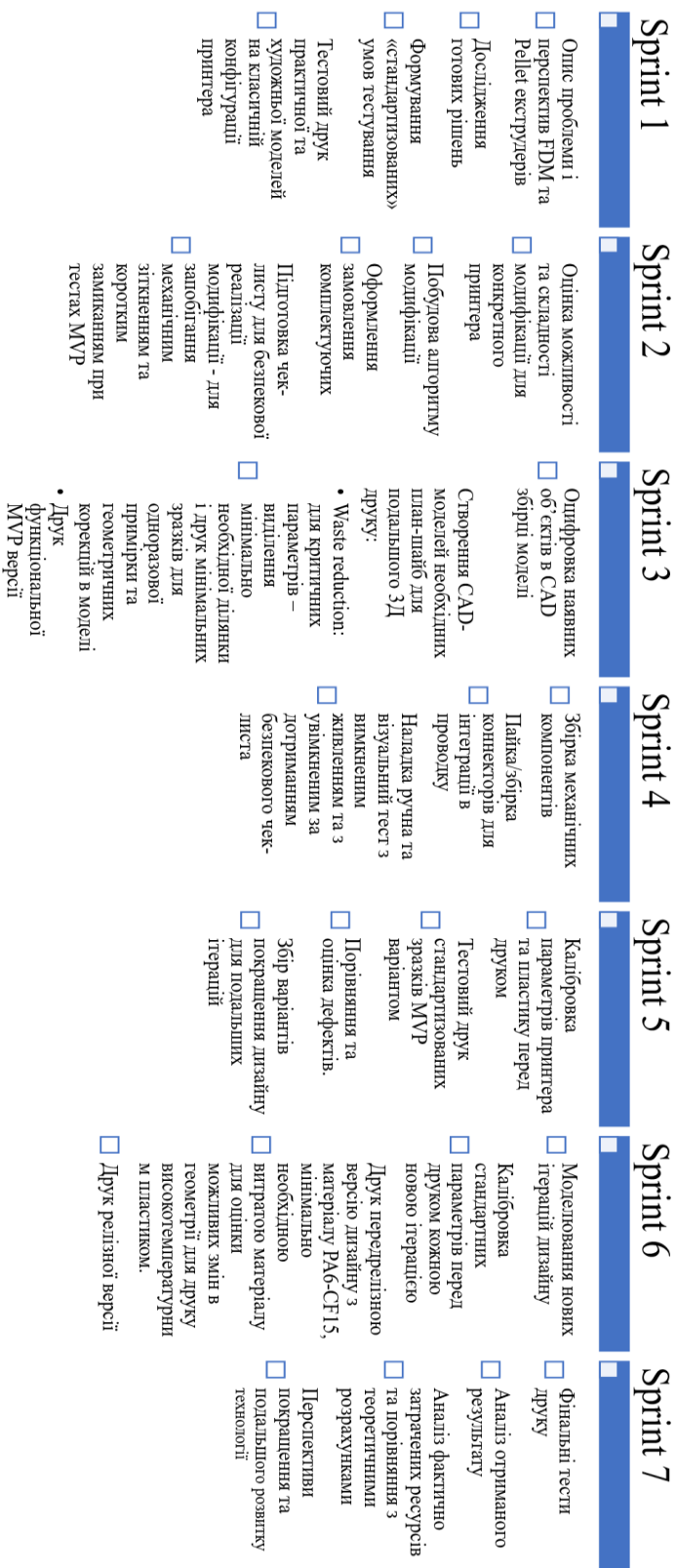


Рис Б.1 – Загальна scrum-схема проведених спринтів

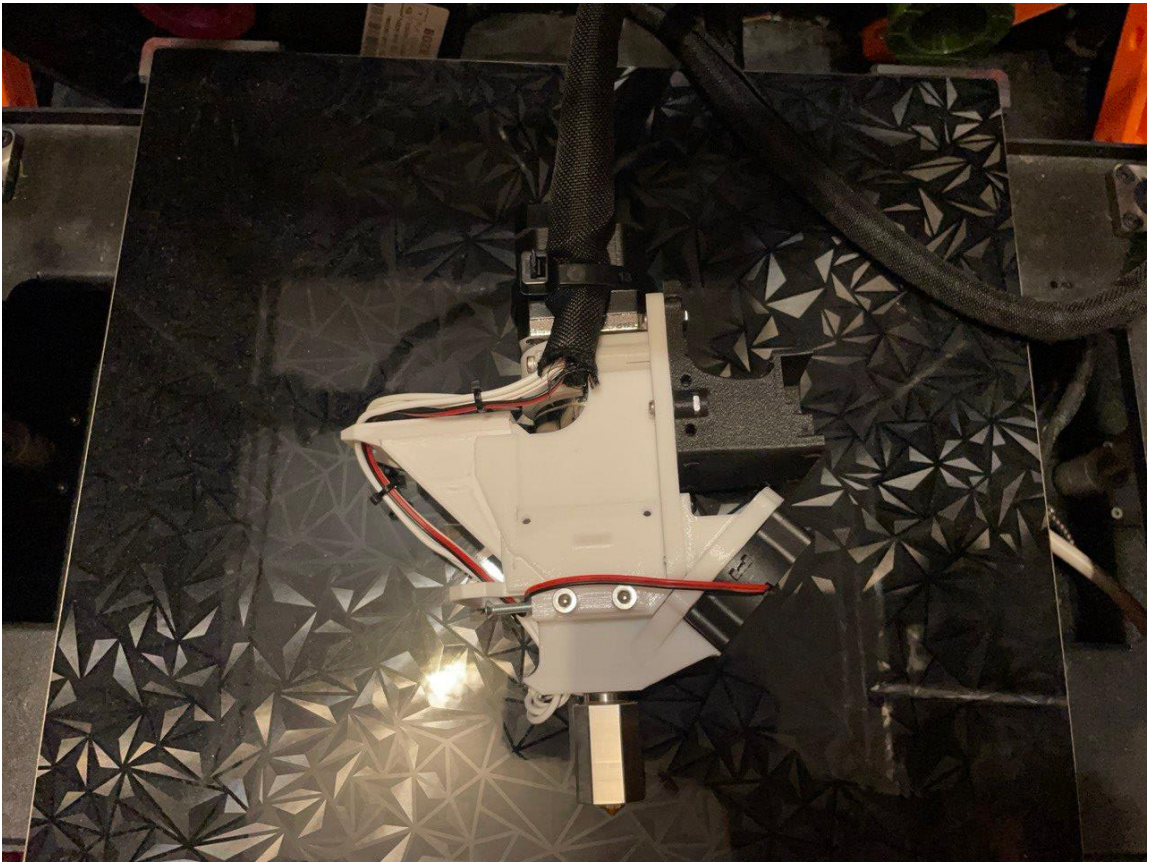
Джерело: розроблено автором

## ДОДАТОК В

Таблиця В.1 - Форма обліку та маркування ревізій та друкованих інкрементів

Назва компонента	Версія (ревізія)	Тип маркування	Промарковано як:	Особливі примітки
Корпус	V0	Рукописне	“V0-X”	(тест функціональних можливостей)
Корпус	V1	Рукописне	“V1”	
Корпус	V2	Друковане	“V2”	(фікси проблем)
Корпус	V3	Друковане	“V3”	(передрелізна)
Корпус	V4	Друковане	“Rev.1.0” + “КРОК”	(реліз, колір – чорний)
Нижня внутрішня кришка	V0	Рукописне	“V0”	
Нижня зовнішня кришка	V0	Рукописне	“V0”	
Нижня зовнішня кришка	V1	Друковане	“V1” + “CAUTION-HOT!”	(реліз, колір – чорний)
Бункер прийняття гранул	V0	Рукописне	“V0”	
Бункер прийняття гранул	V1	Рукописне	“V1”	
Бункер прийняття гранул	V2	Друковане	“Rev.1.0”	(реліз, колір – прозорий)
Каретка X	V1	Рукописне	“V1”	
Каретка X	V2	Рукописне	“V2”	
Каретка X	V3	Друковане	“Rev.1.0”	
Каретка X	V4	Друковане	“Rev.2.0”	

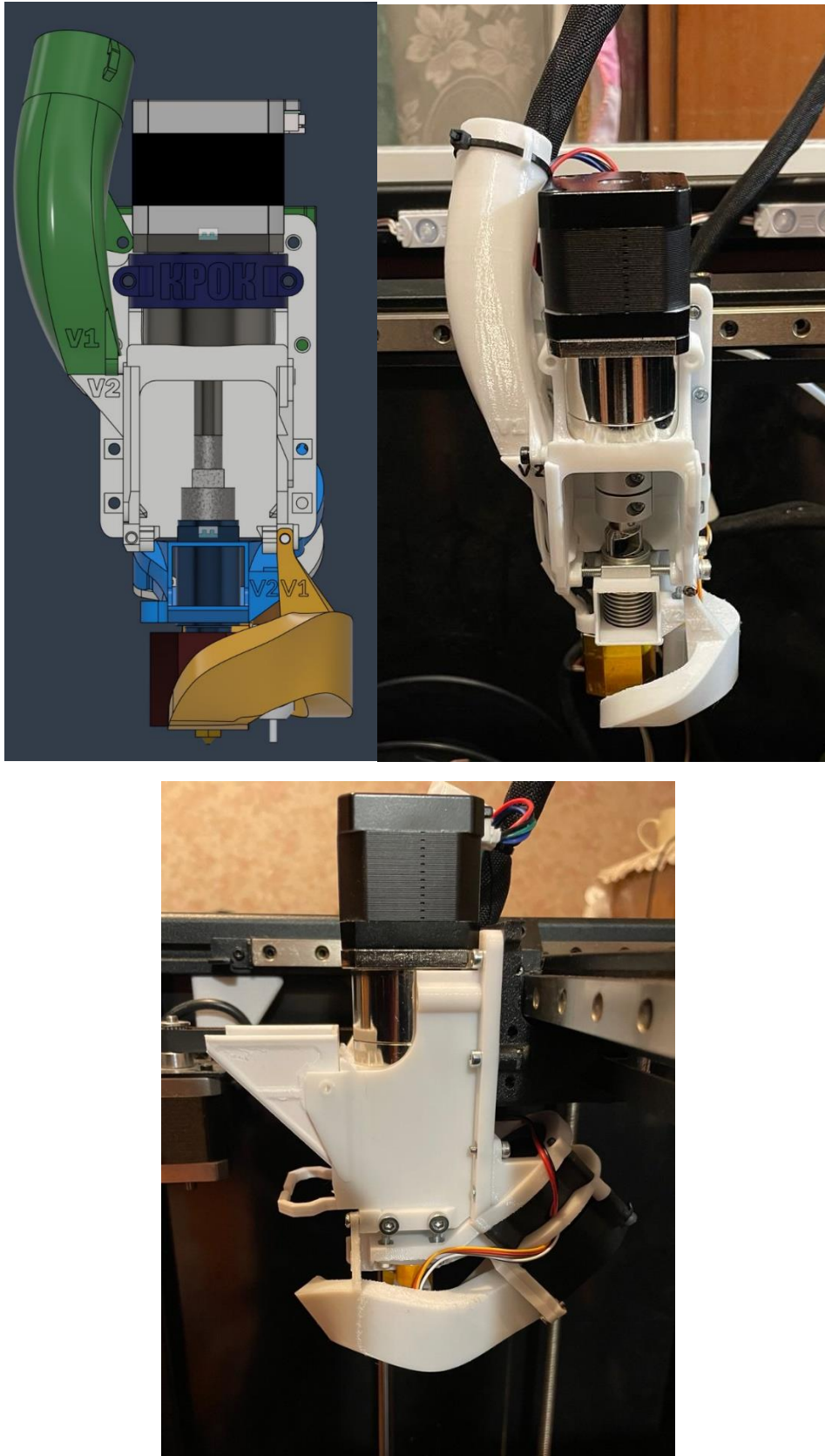
## ДОДАТОК Г



*Рис Г.1 – Друк та збірка тур-моделі*

*Джерело: розроблено автором*

## ДОДАТОК Д



*Рис Д.1 – Пелетний екструдер, встановлений на 3d-принтері*

*Джерело: розроблено автором*