

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Приладобудівний факультет
Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій виробництва приладів

«На правах рукопису»
УДК 681.5 : 621.7 : 62-4

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

 Наталія СТЕЛЬМАХ

«16»  2024 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи та
технології в приладобудуванні»

зі спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка»

на тему: «Автоматизована система керування процесами постобробки деталей,
утворених 3D-друком»

Виконав:

студент II курсу, групи ПБ-31мп

Жук Ярослав Борисович

Науковий керівник:

Ст. наук. співробітник, канд. техн. наук, доцент,

Клочко Тетяна Реджинальдівна

Консультант з розроблення стартап-проекту:

Завідувач кафедри економічної кібернетики,

д.е.н., проф. Бояринова Катерина Олександрівна

Рецензент:

Професор, д.т.н., професор,

Микитенко Володимир Іванович

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент (-ка) 

Київ – 2024 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Приладобудівний факультет
Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій виробництва приладів

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 174 - Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

 Наталія СТЕЛЬМАХ

«16» вересня 2024 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту

Жуку Ярославу Борисовичу

1. Тема дисертації «Автоматизована система керування процесами постобробки деталей, утворених 3D-друком», науковий керівник дисертації - Ключко Тетяна Реджинальдівна, к.т.н., ст. наук. співробітник, затверджені наказом по університету від «07» 11 2024 р. № 4987
2. Термін подання студентом завершеної дисертації 9 грудня 2024 року
3. Об'єкт дослідження: процеси постобробки деталей, утворених 3D-друком.
4. Вихідні дані: деталь типу «Корпус підшипника», виконана методом FDM 3D-друку; габарити згідно 3D-моделі – 34x15x22 (ДхШхВ, мм), та маса деталі – 7.47 г, відхилення по EN 22768-1 f без врахування термальної усадки, наявність матеріалу-підтримки - відсутня.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити: 1) Розробити схему та технологічний процес роботи автоматизованої системи; 2) Проаналізувати можливість автоматизації визначення габаритних та основних розмірів деталі та проведення аналізу форми; 3) Спроекувати автоматизований модуль швидкісного вимірювання розмірів для підвищення швидкості та точності обмірів поверхонь деталі; 4) Розробити керуюче програмне забезпечення; 5) Розробити стартап-проект.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: порівняння моделі деталі із CAD-середовища, щойно надрукованої деталі та повністю обробленої деталі, план автоматизованої системи, схема автоматизованої системи, модель роботи модуля ШВР, алгоритми роботи модуля ШВР, ілюстративні доповнення тексту доповіді.

7. Орієнтовний перелік обов'язкових публікацій: наукова стаття у фаховому журналі категорії Б, тези на науково-технічних конференціях.

8. Консультанти розділів дисертації*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Стартап-проекти	Завідувач кафедру економічної кібернетики, д.е.н., проф. Бояринова К.О.		

9. Дата видачі завдання 16 вересня 2024 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1.	Огляд літературних джерел	04.10.2024	
2.	Аналітичний огляд процесу 3D-друку та постоброблення. Обґрунтування актуальності завдання.	11.10.2024	
3.	Розробка технологічного процесу постобробки деталі.	25.10.2024	
4.	Проведення експериментального дослідження на вибірці друківаних деталей	08.11.2024	
5.	Розробка моделі та алгоритму роботи модуля ШВР	22.11.2024	
6.	Розробка керуючого програмного забезпечення та апаратного устаткування	29.11.2024	
7.	Розробка стартап-проєкту, кінцеве оформлення дисертації.	06.12.2024	

Студент

Ярослав ЖУК

Науковий керівник

Тетяна КЛОЧКО

Консультант з розроблення стартап-проєкту Катерина БОЯРИНОВА

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, висновків до кожного розділу, загального висновку роботи, переліку джерел та посилань та додатків у вигляді тексту програми. Основний текст складається із 89 сторінок, включає 93 рисунків, 34 таблиць та 51 джерело згідно з переліком посилань.

У вступі описана актуальність теми даної дисертації, описано головну мету роботи, обґрунтовано ключові завдання до вирішення, описано об'єкт та предмет дослідження, розглянуті в роботі, наведено методи досліджень, представлено наукову новизну, а також відомості про апробацію та публікації за темою дисертації.

У першому розділі представлено результати огляду наукової та науково-популярної літератури, які описують технологію 3D-друку, її активне застосування у виробництві, її переваги та недоліки, способи виявлення та усунення похибок. Виконано аналіз особливостей технологічного процесу Моделювання Плавленого Осадження, на якому ґрунтується розв'язання проблем дисертації, описано стан використання надрукованих деталей. Розглянуто сучасні варіанти полегшення процесу постобробки, проаналізовано можливість їх автоматизації. Наведено висновки із аналізу літературних джерел та сформульовано головні задачі магістерської дисертації.

У другому розділі, на основі висновків попереднього розділу, було описано та розроблено схему роботи та технологічний процес автоматизованої системи керування процесом постобробки, покроково проведено аналіз та описано модулі, що входять в автоматизовану систему. Докладно розглянуто модуль швидкісного вимірювання розмірів деталі, визначено головні параметри, необхідні для дослідження, на основі яких проведено експериментальне дослідження друкованих деталей. На основі експериментальних даних, розроблено та представлено модель роботи та співвідношення для налагодження модуля. Наведено висновки до розділу та сформульовано задачі та пункти, що будуть використані для розроблення програмного забезпечення керування параметрами постобробки.

У третьому розділі на основі схеми роботи, алгоритму, моделі роботи та отриманих співвідношень із переліком параметрів розроблено апаратне та програмне

забезпечення для керування модулем швидкого вимірювання розмірів. Проведено налагодження програмного забезпечення з використанням наочних прикладів. Наведено висновки до розділу, підбито підсумки.

У четвертому розділі було розроблено стартап-проект, що призвело до формалізації та концептування проекту, розгляду перспектив на ринку та проведення технологічного аудиту. Розроблено маркетингову стратегію продукту та позиціонування стартап-проекту. Наведено висновки за результатами дослідження ринку.

ABSTRACT

The master's thesis consists of an introduction, four sections, conclusions to each section, the general conclusion of the work, the list of sources and references and applications in the form of a program text. The main text consists of 93 pages, includes 41 figures, 34 tables and 51 sources according to the list of references.

In the introduction the relevance of the topic of this thesis and the main purpose of the work are described, key tasks for solving, object and subject of research considered in the work are substantiated, research methods, scientific novelty, as well as information on the testing and publication on the subject of dissertation are presented.

In the first section the results of the review of scientific and popular literature are presented. Review describes the technology of 3D printing, its active use in production, its advantages and disadvantages, ways of detecting and eliminating errors. The analysis of the modeling of the melted deposition is made, on which the solution of problems of the thesis is based, the state of use of printed parts is described. Modern options for facilitating the process of post -processing are considered, the possibility of automation is analyzed. The conclusions from the analysis of literature sources are given and the main tasks of the master's thesis are formulated.

In the second section, on the basis of the conclusions of the previous section, the scheme of operation and technological process of the automated system of control of the process of post -processing was described and developed, the modules included in the automated system were analyzed and described. The rapid part size measurement module is considered in detail, the main parameters required for the study were determined, on the basis of which the experimental study of printed parts is conducted. On the basis of experimental data, a model of work and ratio for module adjustment is developed and presented. Conclusions are given to the section and formulated tasks and items that will be used to develop software management of post-processing parameters.

In the third section on the basis of the scheme of work, algorithm, models of work and the obtained ratios with the list of parameters, hardware and software was developed to control the rapid part size measurement module. The software was adjusted using visual examples. Conclusions to the section are summarized.

In the fourth section, a startup project was developed, which led to the formalization and conceptualization of the project, consideration of prospects in the market and technological audit. The product strategy and positioning of startup project have been developed. Conclusions are given on the results of market research.

ЗМІСТ

РОЗДІЛ 1	13
АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПРОЦЕСІВ 3D-ДРУКУ ДЕТАЛЕЙ ТА ЇХ ПОСТОБРОБКИ	13
1.1. Огляд літератури.....	13
1.2. Напрямки використання друкованих деталей	14
1.3. Огляд проблем поверхонь 3D-друкованих деталей.....	18
1.4. Дослідження способів отримання точних поверхонь під час FDM 3D-друку	21
Висновки до розділу 1	24
РОЗДІЛ 2	25
ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИНЦИПУ РОБОТИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ	25
2.1. Огляд роботи системи керування.....	25
2.2. Розробка схеми роботи системи та технологічного процесу постобробки	29
2.3. Дослідження модуля ШВР, аналіз його обладнання та устаткування.....	33
2.4. Методика визначення розмірів та недоліків форми на готовій деталі	36
2.5. Проведення апріорного експерименту для розробки моделі роботи.....	41
2.6. Розробка моделі роботи модуля ШВР на основі отриманих експериментальних даних.....	48
Висновки до розділу 2	50
РОЗДІЛ 3	52
РОЗРОБКА МОДУЛЯ ШВИДКОГО ВИМІРЮВАННЯ РОЗМІРІВ	52
3.1. Вибір методів та устаткування для розробки модуля ШВР	52
3.2. Розробка апаратного устаткування модуля ШВР	54
3.3. Розробка керувального програмного забезпечення модуля ШВР	59
Висновок до розділу 3:	63
РОЗДІЛ 4.....	65
РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЄКТУ	65
4.1. Опис ідеї проєкту.....	65
4.2. Розробка ринкової стратегії та маркетингової програми стартап-проєкту	77
4.3. Розробка маркетингової програми та бізнес моделі стартап-проєкту.....	80
Висновки до розділу 4	86
ВИСНОВКИ ДО ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ	87
Додатки.....	94

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

3D-друк (3D-printing),

Постобробка (Post-processing);

Моделювання плавленням матеріалом (Fused Deposition Modeling, FDM);

Поверхня (Surface);

Кінематика;

ШВР - Швидкісне Вимірювання Розмірів;

Дельта-кінематика (Delta kinematics);

Декартова кінематика (Cartesian kinematics);

CoreXY – варіант декартової кінематики;

АМ – Адитивне Виробництво (від Additive Manufacturing);

STL – формат файлу з інформацією про поверхню 3D-об'єкта у CAD-середовищі.

ВСТУП

Актуальність теми

Процеси адитивного виробництва характеризуються однаковими основними етапами, відрізняючись способом побудови шарів. Ці процеси були популяризовані завдяки створенню 3D-принтерів, де об'єкти будуються шар за шаром на основі 3D-моделі [1].

У процесі FDM 3D-друку шари отримують шляхом осадження полімеру, який пропускається через гарячий наконечник (сопло друкарської головки). Друкарська головка забезпечена нагрівальними компонентами для пластифікації нитки та датчиками температури, які забезпечують рівномірно високу температуру всередині сопла. Тиск, створюваний входом нитки, сприяє екструзії розплавленого матеріалу через сопло [2].

3D-друк — це потужна технологія, яка дозволяє створювати нестандартні та складні об'єкти на вимогу. Але це також може бути тривалим, дорогим і трудомістким, особливо для великомасштабного або великого виробництва. Ось чому багато компаній, які займаються 3D-друком, шукають способи автоматизувати та оптимізувати свої робочі процеси, від проектування до постобробки [3].

Сфера технологій постобробки для 3D-друку зазнає стрімкого прогресу, який спонукає постійний розвиток матеріалів, технологій і виробничих процесів. У найближчому майбутньому можна очікувати багато майбутніх тенденцій і досягнень у цій галузі, що прокладає шлях для більш ефективних, автоматизованих і передових методів, які можуть ще більше покращити механічні властивості, якість поверхні та функціональні характеристики друкованих частин [4].

Головною метою цієї роботи є дослідження автоматизованої системи керування процесами постобробки деталей, виконаних 3D-друком.

Завданнями дисертації є наступні:

1. Дослідити процеси ручної постобробки друкованих деталей, які найбільш застосовані для підвищення якості виготовлення;
2. Розробити схему та технологічний процес для постобробки деталей за допомогою автоматизованої системи.

3. Провести аналіз друкованої деталі, що досліджується експериментальним шляхом, на основі отриманих даних розробити модель роботи модуля.

4. За даними експерименту та моделлю роботи розробити модуль швидкісного вимірювання розмірів (далі – ШВР), який є складником загальної автоматизованої системи постобробки, спроектувати апаратну частину, створити керуюче програмне забезпечення модуля.

Об'єктом дослідження в даній роботі є процес автоматизованої постобробки деталей, утворених 3D-друком. Цей процес є комплексним, оскільки він передбачає розробку системи, яка задовольнятиме необхідні параметри швидкості обробки відповідно до заданих параметрів точності поверхні. До того ж, процес не повинен бути перевантажений з економічної точки зору, оскільки для потенційних користувачів система може виявитися збитковою.

Предметом дослідження є розміри та форма деталі, щойно знятої з робочої поверхні принтера. Автоматизована система має отримати основні параметри деталі, такі як габарити відповідальних поверхонь та відсутність чи наявність відхилення форм, та запропонувати способи оброблення поверхні

Методи досліджень

При виконанні роботи використані методи аналізу експериментальних досліджень, прикладне застосування бібліотеки комп'ютерного зору OpenCV та її методів оброблення та роботи із зображеннями (cvtColor, Canny, Opening, Closing). Обміри габаритних та основних розмірів деталі та детекція поверхневих відхилень виконуються за допомогою розробленого модуля ШВР, який докладно розглянуто та описано в розділах роботи.

Наукова новизна

При виконанні дисертації було отримано наступні результати:

1. Аналізовано та докладно описано автоматизовану систему постобробки, розроблено технологічний процес та розроблено схему роботи автоматизованої системи;

2. Визначено основні параметри для опису та створення моделі роботи, виконано експериментальне дослідження форми та габаритів друкованих деталей;

3. Розроблено конструкцію модуля ШВР деталі та програмне забезпечення керування модулем;

4. Розроблено стартап-проект.

Практичне значення

На сьогодні практично не ведуться наукові дослідження автоматизації процесу 3D-друку загалом, тим паче автоматизації процесу постобробки друкованої деталі. Спираючись на існуючі наукові дослідження та наявні технічні рішення, які охоплюють проблеми постобробки у процесах 3D-друку, тема роботи щодо створення автоматизованої системи є актуальною.

Враховуючи необхідність отримання прототипів або уже готових деталей якнайшвидше та якнайточніше, описана автоматизована система потенційно може замінити складні виробничі системи оброблення деталей, які традиційно використовуються й зараз (наприклад, з використанням токарних та фрезерних верстатів). Всупереч поширеним переконанням, деталі, виконані 3D-друком, мають набагато вищий запас міцності, особливо при правильному виборі матеріалу, технології друку та процесів постобробки.

Орієнтовна вартість окремих елементів системи є відносно низькою у порівнянні з окремими токарними та фрезерними верстатами із числовим програмним керуванням. До того ж, окремі модулі можна вилучати із системи за необхідності задля економії ресурсів. З огляду на це, описану автоматизовану систему можна розширювати та модифікувати, додаючи у неї інші структурні елементи, наприклад, збільшену кількість 3D-принтерів для одночасного друку декількох деталей, що має пришвидшити сам процес виробництва і надати змогу виконувати більш обширні замовлення.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПРОЦЕСІВ 3D-ДРУКУ ДЕТАЛЕЙ ТА ЇХ ПОСТОБРОБКИ

1.1. Огляд літератури

Моделювання плавленого осадження (далі - FDM), як технологія у виробництві, взяло свій початок у 1989 та запатентована у 1992 році компанією Stratasys, США. Ця технологія відноситься до пристрою та процесу для формування тривимірного об'єкта попередньо визначеної конструкції, зокрема до виготовлення моделі або виробу шляхом нанесення кількох шарів матеріалу в рідкому стані на основу. Після подачі розплавленого матеріалу, його температуру контролюють таким чином, щоб він застигав практично миттєво під час екструзії або розподілу на основу, з накопиченням шарів, які послідовно утворюють бажаний виріб [5].

В даний час використання цих технологій виходить за рамки початкової мети швидкого прототипування, дозволяючи виробляти кінцеві продукти. Використання цієї технології прогресує в найрізноманітніших галузях знань. Однак застосовність обладнання має певні обмеження, особливо враховуючи невеликий обсяг виробництва через розмір будівельної платформи, малі партії друку та невеликий вибір комерційно доступного матеріалу [6].

На сьогодні переважна більшість виробників, які застосовують 3D- друк для виготовлення деталей, використовують ручну постобробку. На це є кілька причин – низька вартість обробки та відносно непогана точність очистки.

Проблемна ситуація полягає в тому, що ручна постобробка 3D-друку часто є надзвичайно повільною та трудомісткою. В залежності від розміру та форми деталі може знадобитися від кількох хвилин до цілого дня щоб завершити очищення, згладжування та підготовку особливо великих або складних компонентів. Низька швидкість ручної постобробки збільшує час виконання, що безпосередньо негативно впливає на продуктивність робочого процесу. Як наслідок, виробництво друкованих деталей стає менш рентабельним, що може зменшити або навіть звести нанівець економію коштів через відсутність спеціального обладнання [7].

Метрологія текстури поверхні відіграє ключову роль у АМ-процесах та виробництві деталей 3D-друком. Якість деталей, виготовлених за допомогою різних АМ-процесів, має глибокий вплив на структуру, нерівності поверхні, внутрішні аномалії, точність продукту, функціональність і етапи постобробки. Фактори, що впливають на якість поверхні, включають властивості матеріалу, діапазон розміру та розподіл частинок, орієнтацію деталей, товщину шару, підготовку файлу STL, кут поверхні, тип обробки, параметри сканування та постобробку. Мікроструктура поверхні впливає на механічні властивості, такі як міцність на розтяг, межа текучості, міцність на втому, властивості на стиск, розширення тріщини, опір зсуву та кінцеву міцність деталей АМ-виробництва [8].

1.2. Напрямки використання друківаних деталей

З початку свого використання, 3D-друк отримав значний розвиток і тепер може виконувати вирішальну роль у багатьох сферах застосування, з яких найпоширенішими є промислове виробництво, медицина, архітектура, нестандартне мистецтво та дизайн, і можуть варіюватися від повністю функціональних до суто естетичних застосувань.

На відміну від більш традиційних методів отримання пластикових деталей, як от за допомогою лиття під тиском у прес-форми, технологія 3D-друку дозволяє отримувати точні прототипи деталей, за якими можна наочно оцінити стан готового продукту, роботу деталі у складі вузла чи механізму, або ж виготовити деталь чи партію деталей, виготовлення яких методами субстративного виробництва (фрезерне, токарне виготовлення деталей) чи литтям під тиском є менш рентабельним.

Друковані деталі широко використовуються в наступних галузях:

- Автоматизоване чи автоматичне виробництво: враховуючи неабияку міцність друківаних деталей, широкий вибір матеріалу для друку та можливість додаткової постобробки для підвищення механіко-фізичних характеристик, друковані деталі все частіше стають незамінними в організації автоматизованого чи повністю автоматичного виробництва. Типовими деталями є: кронштейни, напрямні, каретки,

технологічні оснащення, малопотужні маніфольди, корпуси приладів тощо (Приклад деталі – рис. 1.1).



Рисунок 1.1. Друкований кронштейн

- Автоіндустрія: За допомогою 3D-друку дизайнери можуть створювати складні геометрії та індивідуальні деталі, адаптовані до конкретних моделей транспортних засобів або навіть індивідуальних уподобань клієнтів. Ця гнучкість забезпечує більше інновацій та більш персоналізовані транспортні засоби. Швидке створення прототипів прискорює процес розробки, дозволяючи інженерам ефективніше тестувати та вдосконалювати проекти. Завдяки цьому нові деталі та інновації можна швидше вивести на ринок. До того ж, через швидке та якісне прототипування, 3D-друк може значно знизити витрати на виробництво. Така економічна ефективність є особливо вигідною для виробництва невеликих партій або обмеженого випуску деталей, де традиційне виробництво було б непомірно дорогим. Використання технології 3D-друку в автоіндустрії дозволяє створювати легкі конструкції, які зберігають міцність і довговічність. Ця можливість є особливо вигідною у виробництві таких деталей, як кронштейни, кріплення та навіть складні вузли (Приклад деталі – рис. 1.2).



Рисунок 1.2. Друкований прототип маніфольда

- Ливарництво: оскільки вартість однієї друкованої деталі в переважній більшості випадків є дуже малою в порівнянні із виготовленням деталі із металевої заготовки, друковані деталі все частіше використовуються як для виготовлення форм для лиття у землю та пісок, так і для друку готових воскових форм для лиття. Типовими деталями є: корпусні деталі, що складно виготовити, деталі з друкованого воску для підготовки ливарних форм (Приклад деталі – рис. 1.3).

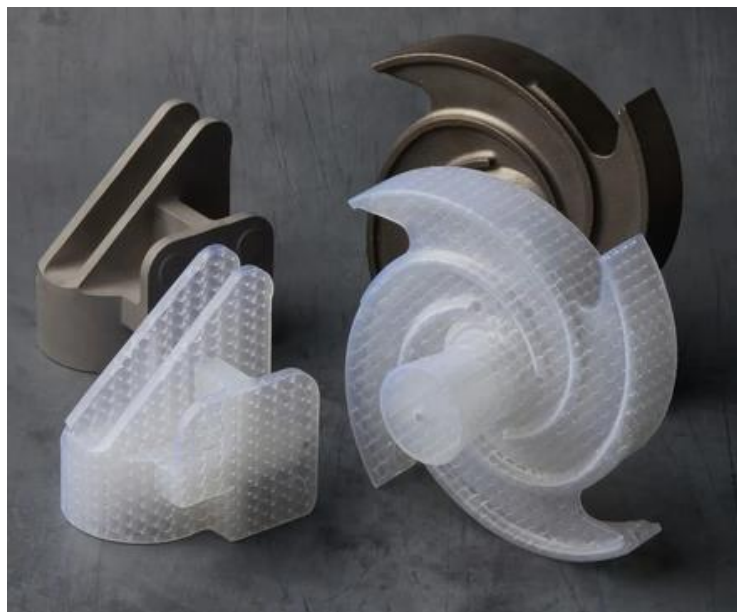


Рисунок 1.3. Друкована основа для підготовки ливарної форми
(попереду) та відлита у цю форму деталь (позаду)

- Медицина: з початку появи технологій 3D-друку на ринку, медична галузь мала найбільші темпи впровадження використання друківаних деталей у галузі. 3D-друк використовується для виготовлення індивідуальних імплантатів і пристроїв для медичного використання. Успішні операції з використанням друківаних деталей людського тіла включають імплантацію титанової тазової кістки, трансплантацію титанової нижньої щелепи з та, навіть, пластикову трахеальну шину. Також проводяться дослідження щодо методів біодруку для заміни втраченої тканини внаслідок артрити та раку. Типовими деталями є: ортодонтичні апарати, протези, металеві вставки, замінники кістки, підсилювальні елементи (Приклад деталі – рис. 1.4).



Рисунок 1.4. Друковані прототипи брекетів

- Авіоніка та космічна галузь: з моменту появи методу лазерного спікання металевого порошку, використання 3D-друку в авіоніці почало набирати стрімких обертів. Металеві деталі, на відміну від пластикових, можуть витримати вплив набагато більших потужностей та температур, внаслідок чого стало можливим прототипування корпусів реактивних двигунів та ракет без страху невдачі та необхідності витратити кошти на тестові спроби з використанням реальних зразків.

Типовими деталями є: корпуси двигунів, турбіни, вали та втулки (Приклад деталі – рис. 1.5) [9 - 14].

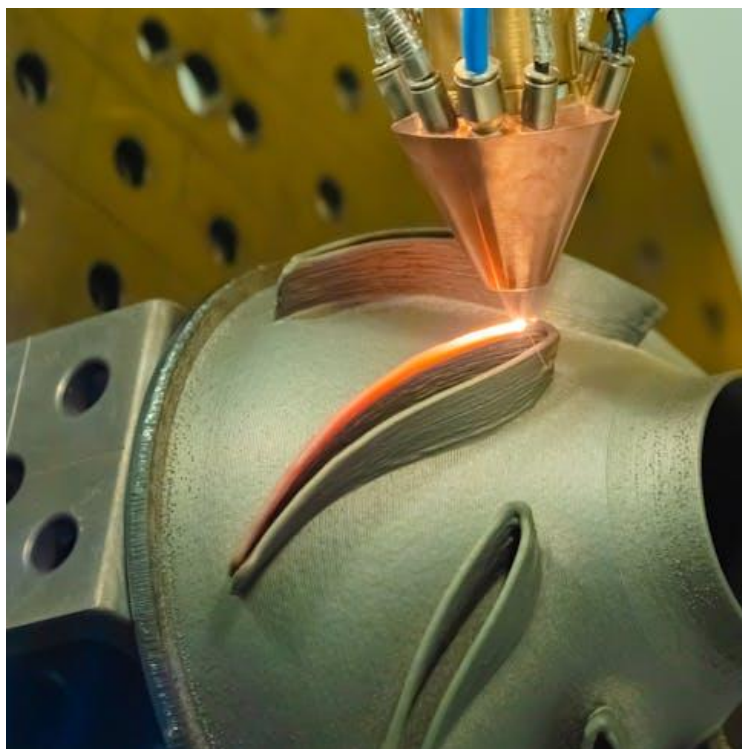


Рисунок 1.5. Процес 3D-друку складової турбіни

1.3. Огляд проблем поверхонь 3D-друкованих деталей

В процесі FDM 3D-друку зазвичай очікують одразу готову до використання та надточну деталь. Враховуючи, що більшість сучасних 3D-принтерів не потребують спеціального налаштування для початку своєї роботи, перші ітерації зазвичай виходять наближеними до ідеалу – вихідної CAD-моделі. Але, як і у випадку із металообробними верстатами, інструмент 3D-принтера, а в нашому випадку це друкарська головка, теж потребує догляду. Так само як затуплений різальний інструмент дає більші поверхневі похибки та меншу точність поверхонь, забруднення друкарської головки може викликати низку проблем в поверхнях друкованих деталей. Крім того, догляд за матеріалом та забезпечення відповідного навколишнього середовища для процесу FDM 3D-друку можуть мати значний вплив на кінцеві поверхні друкованої деталі. Найбільш розповсюдженими похибками друкованих поверхонь FDM методу є наступні:

1.3.1. Пере- та недоекструзія.

Переекструзія означає надмірну кількість матеріалу, що вичавлюється із сопла друкарської головки 3D-принтера на платформу. Ця проблема зазвичай пов'язана з неправильними налаштуваннями параметрів у 3D-принтерах, таких як температура та швидкість друку. Незважаючи на поширене явище, надмірне видавлювання часто супроводжується такими проблемами, як сочіння, плями, зайве павутиння та зминання, що впливає на розмір і якість надрукованого об'єкта. Варто зазначити, що майже всі 3D-принтери стикаються з цією проблемою, яка не пов'язана з конкретним обладнанням чи ниткою [15, 16].

Зворотнім чином в друкованих деталях виникає явище недоекструзії. Недоекструзія виникає, коли 3D-принтер не подає достатньо термопластику для нанесення запланованих шарів деталі. Це може призвести до появи прогалин, слабких структур і грубої форми поверхні. Недоекструзія може виникнути через різні фактори, такі як частково забите сопло, неправильні налаштування програми-слайсера, недостатній натяг нитки термопластику або зношений механізм подачі матеріалу. Це схоже на те, що в ручці закінчується чорнило під час письма; у принтера недостатньо матеріалу для проходження визначених шляхів, що призводить до неповного друку із видимими дефектами [17, 18]. На рис. 1.6 наведено порівняльне зображення деталей із недоекструзією, переекструзією та звичайної деталі.

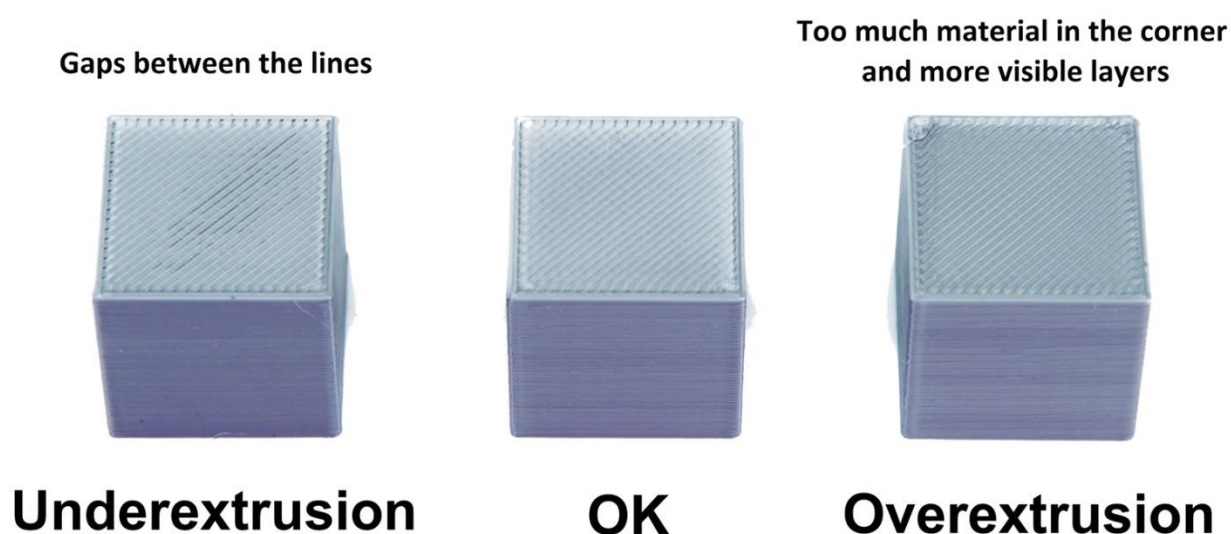


Рисунок 1.6. Проблеми недоекструзії та переекструзії.

1.3.2. Роз'єднання шарів

Як зазначалося вище, FDM 3D-друк означає нанесення розплавленого матеріалу шар за шаром. І якщо лінію матеріалу, що наноситься, можна вважати неперервною в межах площини XY, то під час зміни координати Z 3D-принтера починається друк уже нового шару. Якщо шари недостатньо добре з'єднуються між собою, кінцева частина може розколотися або розділитися, як показано на рис. 1.7. Найбільш поширеними причинами проблеми роз'єднання шарів є занадто низька температура друку, через яку недостатньо гарячі шари не встигають з'єднатися, та занадто велика відстань між шарами, внаслідок якої між двома шарами стає менше точок контакту [19, 20].



Рисунок 1.7. Роз'єднання шарів у друкованій деталі.

1.3.3. Ступінчаста поверхня (Ефект сходів)

Ефект сходів виникає внаслідок зміни геометрії між різними шарами, наприклад, апроксимації сферичної поверхні для можливості пошарового нанесення (рис. 1.8). Ефект сходів має негативний ефект на поверхні деталей, виконаних FDM методом 3D-друку. Небажаний і незадовільний результат виконання поверхонь полягає в тому, що кінцевий продукт має нижчу якість. Низька шорсткість надрукованого компонента запобігає використанню в місцях, де потрібна хороша поверхнева цілісність. Як результат – необхідна додаткова постобробка надрукованого виробу

шляхом шліфування та полірування його поверхні, що в свою чергу впливає на його механічні властивості. Така постобробка необхідна щоб гарантувати, що готовий друкований компонент може витримувати певний прогин або напругу в заданому діапазоні і що компонент не вийде з ладу, якщо він використовуватиметься протягом тривалого часу [21 – 26].

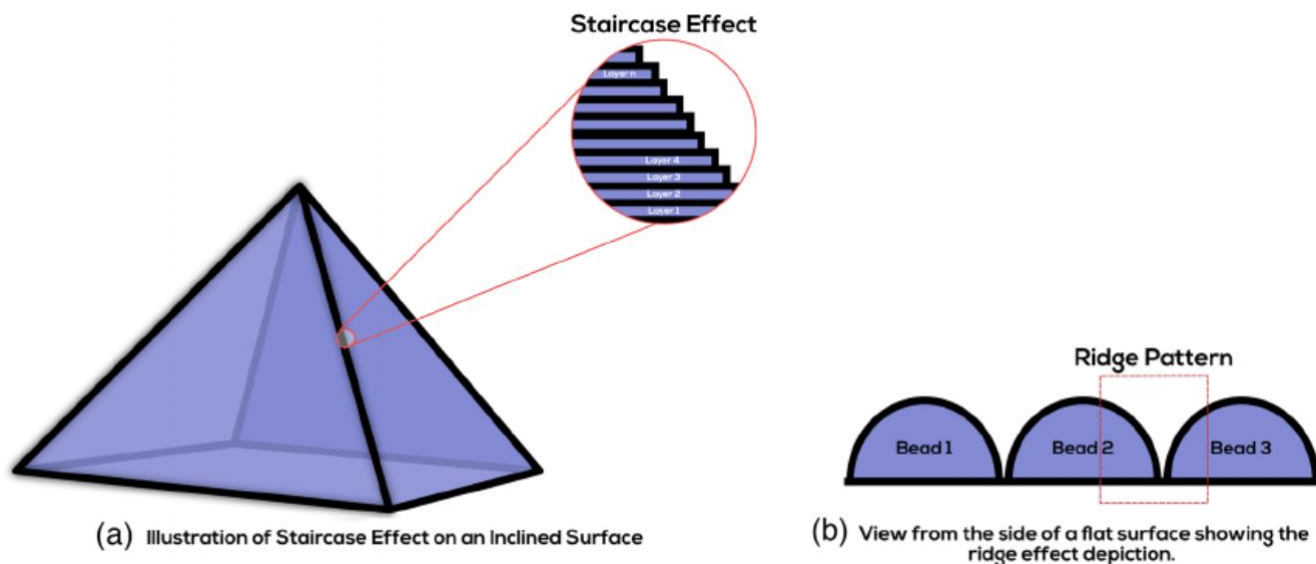


Рисунок 1.8. Ступінчатий ефект друківаних поверхонь.

1.4. Дослідження способів отримання точних поверхонь під час FDM 3D-друку

В даний час технологія FDM використовується для виготовлення деталей з винятковою якістю деталей, підвищеною продуктивністю, безпекою, дешевими виробничими витратами та скороченим часом 3D-друку [27]. Щоб задовольнити кожен шлях застосування, параметри процесу FDM потрібно налаштовувати індивідуально згідно з вимогами до застосування друківаних деталей.

Технологія FDM 3D-друку регулюється параметрами процесу, для простоти їх можна класифікувати як:

1. Пов'язані з екструдером;
2. Пов'язані з процесом;
3. Пов'язані із структурними параметрами.

Переваги вибору оптимального набору параметрів є досить вигідними, вибір відповідних параметрів процесу забезпечує високу точність розмірів виготовлених деталей, мінімізує втрати матеріалу, скорочує час виробництва та досягає зниження вартості виробництва кожної деталі [28].

Початковим етапом отримання деталі, виконаної 3D-друком, яка задовольняє усі розмірні та поверхневі допуски є, звичайно, вибір необхідного FDM 3D-принтера, а точніше – кінематики його роботи. 3D-принтери існують у різноманітних формах, кожна з яких має власні переваги та недоліки та потенційну якість друку. Два основні типи кінематики FDM 3D-принтерів - це декартові та Delta принтери [29].

1.4.1. Огляд Delta принтерів

3D-принтери з кінематикою Delta (рис. 1.9) все більш популярні завдяки ефективному використанню місця та швидкості друку. Вони мають фіксовану друкарську платформу, а екструдер переміщується за допомогою трьох двигунів. Оскільки друкарська головка розроблена таким чином, щоб бути максимально легкою, ці принтери мають вищу швидкість порівняно з декартовими принтерами [30]. Однак складний процес калібрування, спричинений складною навігацією в 3D-просторі Дельти, означає, що друкувати розмірно точні деталі нелегко. Крім того, Delta-принтери використовують виключно екструдер Боудена, що додатково обмежує їх застосування, наприклад, неможливість друкувати еластичними матеріалами та недостатній контроль пластикової нитки.

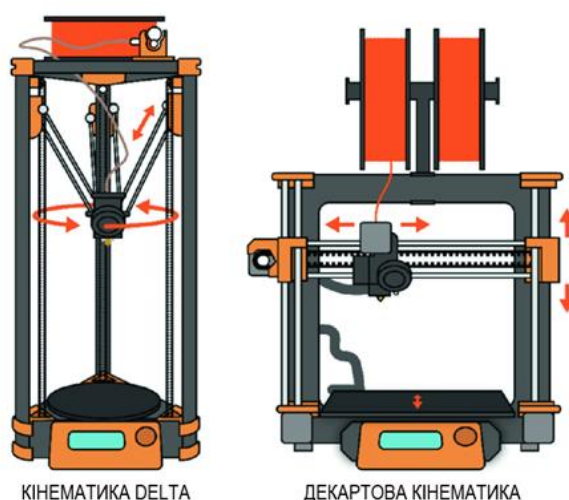


Рисунок 1.9. Види кінематик 3D-принтерів

1.4.2. Огляд декартових принтерів

На відміну від Delta-принтерів, декартові використовують три осі, X, Y та Z, для переміщення друкарської головки та, іноді, друкарської поверхні. Декартові 3D-принтери поділяються на два підтипи: стандартні декартові (рис. 1.6) та CoreXY (рис. 1.10).



Рисунок 1.10. Світлина 3D-принтера з декартовою кінематикою CoreXY

Стандартні декартові 3D-принтери є чи не найбільш розповсюдженими не тільки у побутовій, але й у промисловій сферах застосування, оскільки їхня порівняно низька дешевизна вкупі з простотою обслуговування та непоганою для звичайного прототипування швидкістю дозволяють об'єднувати такі 3D-принтери у складні поточкові системи, не зазнаючи сильних ударів по бюджету. Головним недоліком стандартних декартових 3D-принтерів є рухома друкарська платформа, яка водночас є горизонтальною віссю Y. Через постійні переміщення платформи деталь може зазнати впливу вібрацій, що вплине на якість кінцевої поверхні деталі, а високі і вузькі деталі можуть зазнати коливань і, навіть, впасти, що збільшує витрати на матеріал через брак друку [31].

На відміну від стандартних декартових, у принтерів CoreXY друкарська платформа рухається тільки по вертикальній вісі Z, що не тільки зводить нанівець переважну частину вібрацій та браку 3D-друку, а й дає змогу підвищити точність та якість поверхонь та загальну міцність деталі. Однак такі переваги не йдуть без значних недоліків, серед яких висока вартість 3D-принтера та складність у

обслуговуванні. Крім того, CoreXY-принтери поставляються одразу зібраними, що не тільки підвищує і без того високі витрати, а й додає можливість пошкодження компонентів 3D-принтера [32].

Висновки до розділу 1

1. У розділі 1 було виконано аналіз наукових робіт, наукових статей та існуючих технічних рішень за напрямком розвитку адитивних технологій, а саме – методу Fused Deposition Modelling (FDM). В процесі було визначено, в яких галузях ці технології набрали найбільш стрімкого розвитку, найбільш значущими стали автоматизація, автоіндустрія, ливарництво, медицина, авіоніка та космічна галузі.

2. Зроблено фокус на похибках поверхонь деталей, утворених FDM 3D-друком та описано їх вплив на кінцеву форму деталі. Серед них переекструзія, недоекструзія, розшарування та ступінчатий ефект. Також, проведено аналіз способів отримання точних друкованих поверхонь, в рамках якого було розглянуто основні типи кінематик FDM 3D-принтерів.

3. Для подальшого проведення дослідження було прийнято рішення використовувати 3D-принтер із декартовою кінематикою, а саме типу CoreXY, оскільки, згідно дослідження, точність виконання поверхонь деталей даним типом принтерів вища, ніж у інших.

На сьогодні існує небагато робіт, які докладно описують процеси постобробки друкованих деталей, більш того – сфокусованих на постобробці для методу FDM. Тому, тема дослідження та розробки автоматизованої системи постобробки друкованих деталей є актуальною.

РОЗДІЛ 2

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИНЦИПУ РОБОТИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ

Ґрунтуючись на описі проблем, зазначених в літературних джерелах, було поставлено завдання розробити автоматизовану систему керування процесами постобробки деталі, що щойно вийшла із 3D-друку. Дана система має мінімізувати людське втручання у процеси постобробки, при цьому має дозволяти гнучке налаштування для досягнення необхідних параметрів кінцевої деталі.

2.1. Огляд роботи системи керування

Перед розробкою схеми необхідно визначити чітку послідовність дій процесу постобробки, від якої залежатиме кількість модулів, дія, яку вони виконуватимуть, порядок виконання дій, переходи між модулями, вплив людини-оператора та обладнання. В результаті огляду проблем процесу постобробки, було виділено чотири основних модуля:

1. Модуль очищення підтримок;
2. Модуль ШВР;
3. Модуль згладжування поверхонь;
4. Модуль нанесення покриття.

Модуль очищення підтримок виконує задачу зрізання матеріалу-підтримки шляхом контурного фрезерування спеціальним інструментом за траєкторією, заданою оператором в САМ-середовищі. Оскільки система братиме за основу CAD-модель деталі, яку необхідно отримати, приймаючи відскановану за допомогою LIDAR-сканера виготовлену деталь за заготованку, можна «відняти» матеріал підтримки від нашої деталі. Таким чином, різальний інструмент зніматиме тільки матеріал-підтримку, залишаючи поверхні деталі неушкодженими. До того ж, отвори отриманої деталі, які втратили допустиму циліндричність внаслідок 3D-друку, будуть оброблені до необхідної форми, оскільки нависання та зайвий матеріал буде видалено різальним інструментом. На рис. 2.1 наведено ескіз оснащення для модуля очищення підтримок.

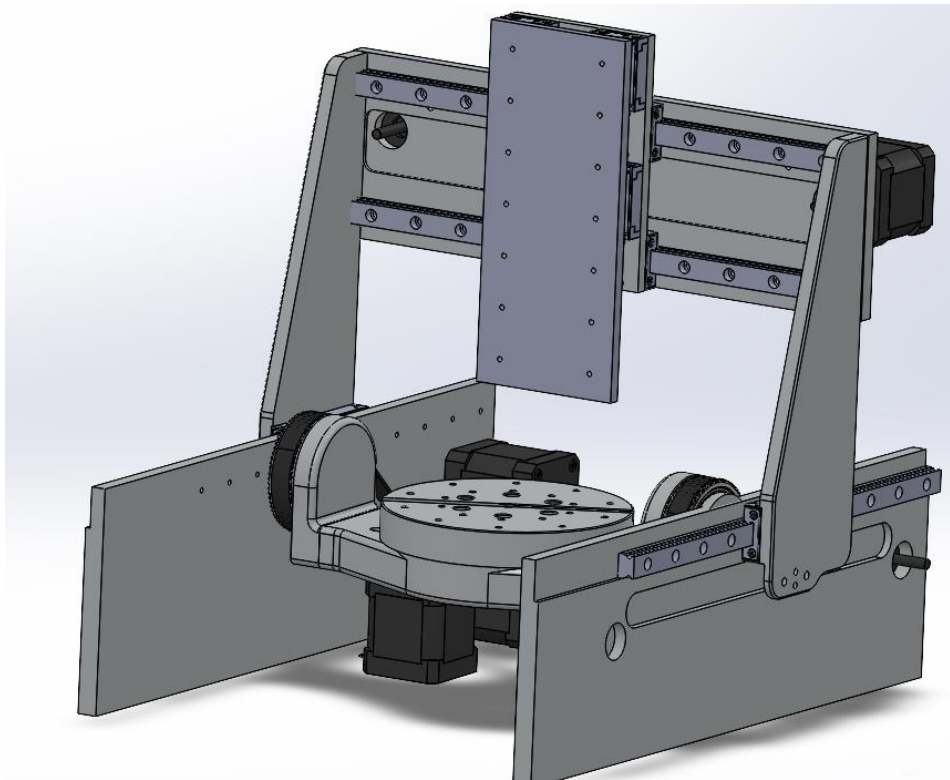


Рисунок 2.1. Ескіз оснащення для модуля очищення підтримок

Модуль ШВР виконує задачу перевірки деталей на відповідність початковій формі деталі, змодельованої в CAD-середовищі. Після встановлення деталі на платформу, відбувається фотосканування деталі для визначення габаритних та основних розмірів та наявності відхилень від розмірів або форми, вказаних у CAD-моделі. Після оброблення результатів фотосканування, програмне забезпечення приймає рішення:

- чи відповідає друкована деталь початковим параметрам
- чи забезпечена форма поверхні
- чи входять наявні на друкованій деталі розміри в поля допусків тощо.

У випадку значної невідповідності, браковану деталь доцільно переробити шляхом подрібнення на часточки, які в свою чергу можна повторно використати у виготовленні катушок із матеріалом. На рис. 2.2 наведено ескіз обладнання для модуля ШВР.

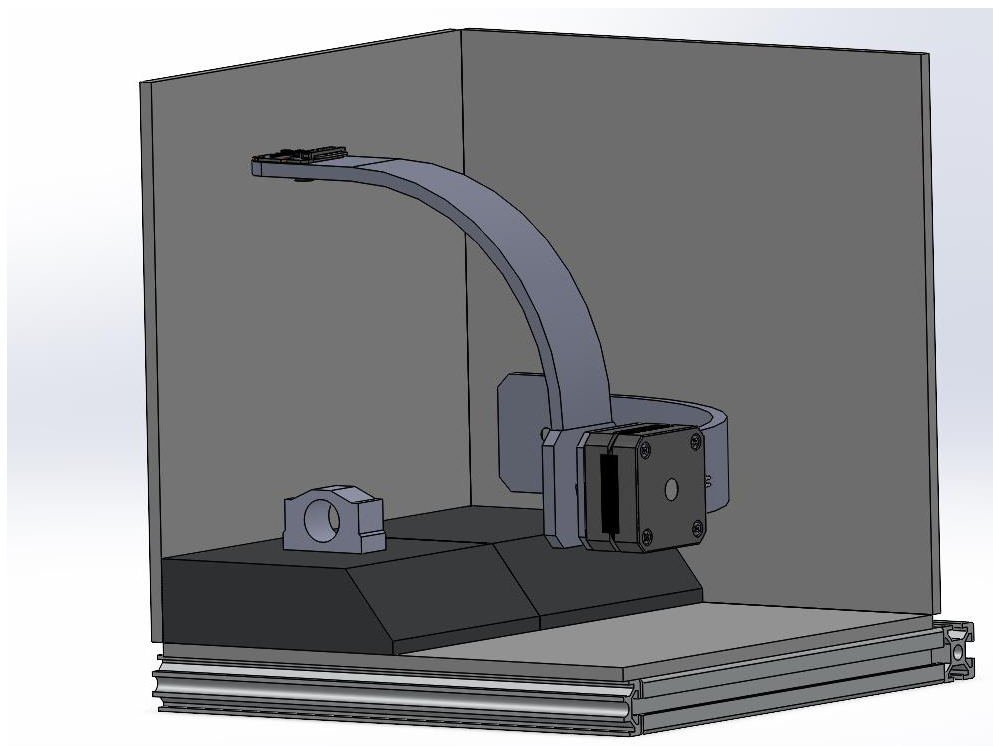


Рисунок 2.2. Ескіз обладнання модуля ШВР

Модуль згладжування поверхонь виконує задачу оброблення поверхонь деталі відповідно заданим параметрам поверхні. Для оброблення поверхонь використовуються наступні матеріали: абразиви (кварцевий пісок, кристалічний вуглець, скляний дріб, електрокорунд), хімічні речовини (ацетон, ізопропиловий спирт) та оброблення теплом (направлений фен, камера оброблення з підігрівом).

Після оброблення поверхні деталі позбавляються від відхилень хвилеподібної форми, що утворюється в процесі накладання шарів під час FDM 3D-друку. Крім того, оброблення деяких матеріалів хімічним або термічним способом (наприклад, ABS, ABS-PC чи PET-G) сприяє зміцненню зв'язків між шарами, що багатократно підвищує міцність деталі. На рис. 2.3. наведено приклад обладнання, яке застосовується в модулі згладжування поверхонь.

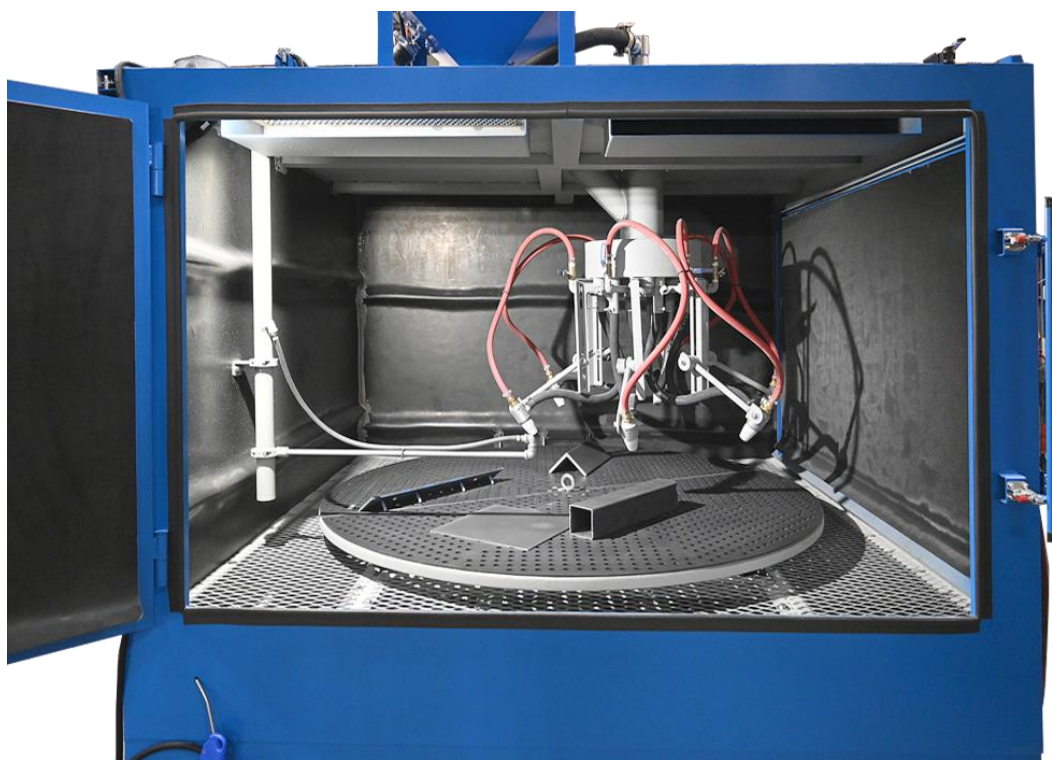


Рисунок 2.3. Приклад обладнання модуля згладжування поверхонь

Модуль нанесення покриття виконує задачу розпилення лакофарбових або покриттів іншого виду (цинкування, хромування деталей) задля захисту кінцевого виробу від зовнішніх чинників. Враховуючи мікротріщини, сколи та невеликі подряпини, які могли утворитися після проходження згладжування поверхонь деталі, зовнішні подразники, наприклад, ультрафіолетове випромінювання, вплив біологічних чинників, хімікатів та рідин, час життя деталі може значно зменшитися, що призведе до виходу з ладу вузла або машини, в якій ця деталь застосована. Розпилення виконується за допомогою робота-маніпулятора в ізолюваній камері, тому як і вплив людини-оператора на рівномірність нанесення мінімальний, так і зводиться нанівець вплив матеріалу аерозолі, що наноситься, на здоров'я оператора. Нанесення покриття аерозолевим методом забезпечує рівномірність шарів та допомагає закупорити найменші порожнини, що утворилися внаслідок 3D-друку або оброблення поверхонь. На рис. 2.4 наведено приклад обладнання, яке застосовується в модулі згладжування поверхонь.



Рисунок 2.4. Приклад обладнання модуля нанесення покриття

Після завершення циклу оброблення, деталь розміщується у лоток для готових деталей, де зберігається разом із усіма деталями партії. Браковані деталі, як і видалений матеріал з операцій очищенні підтримок виявлення пошкоджень, та згладжування поверхонь піддається повторній переробці, що дозволяє зменшити витрати на матеріал.

2.2. Розробка схеми роботи системи та технологічного процесу постобробки

На рис. 2.5 запропоновано схему роботи автоматизованої системи, яка включає в себе вищеописані модулі цієї системи. В даній схемі наведено поетапне використання модулів системи, а також вхідні та вихідні ступені постобробки друкованої деталі.

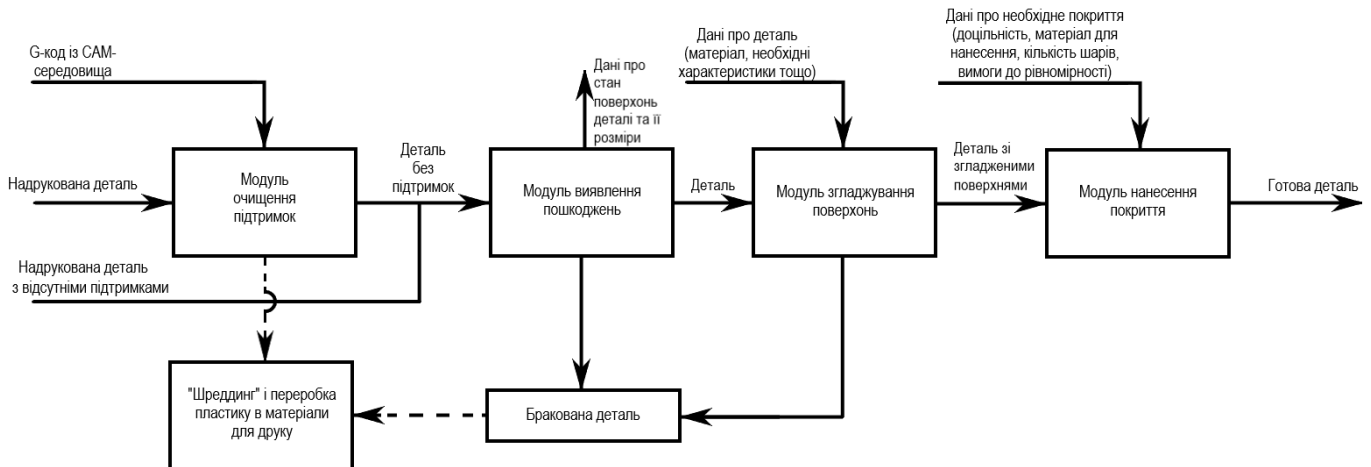


Рисунок 2.5. Схема роботи системи.

Пунктирними стрілками позначено відхід пластику, який утворився внаслідок зрізання підтримок або внаслідок відбракування друкованої деталі, для подальшого очищення та переробки у нові катушки пластику. Схема показує варіант розміщення загальної системи, однак забезпечена під час розробки гнучкість дозволяє використовувати систему без модулів, або кожен модуль окремо.

На основі цієї схеми можна розробити технологічний процес постобробки деталі типу «Корпус підшипника» із зазначенням обладнання, що буде використано.

На рис. 2.6 запропоновано технологічний процес роботи автоматизованої системи. В ньому показано переходи, інструмент, матеріали покриття та обробки поверхні, устаткування, яке необхідно в роботі системи.

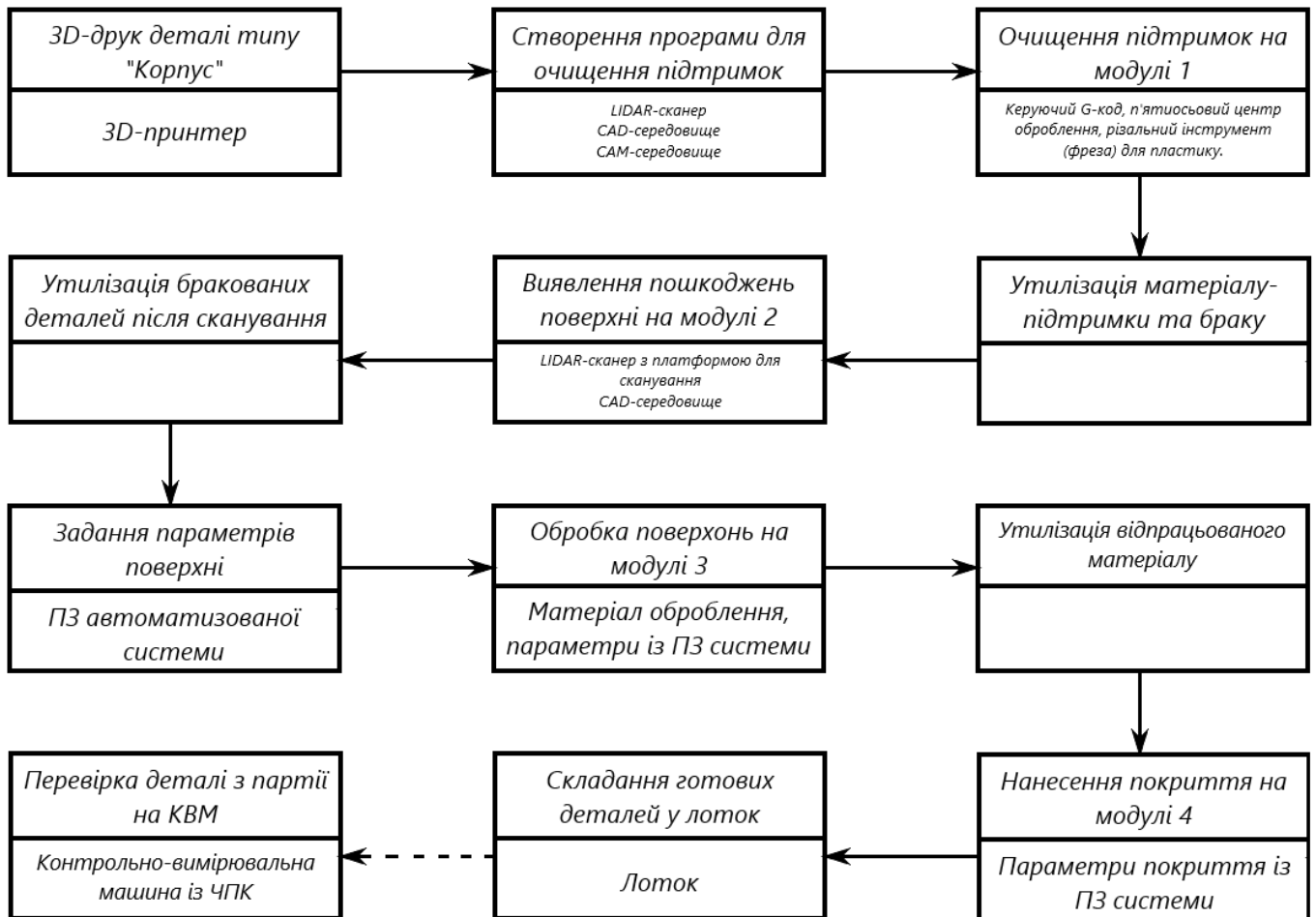


Рисунок 2.6. Технологічний процес автоматизованої системи постобробки.

Із технологічного процесу видно, що спочатку в якості вхідних даних виступає свіжонадрукована деталь, а саме – деталь типу «Корпус підшипника». Із попередньо підготовленої CAD-моделі самої деталі маємо інформацію про форму та основні розміри цієї деталі. Після подачі деталі до першого модуля, на основі аналізу наявності чи відсутності підтримок за допомогою різальних інструментів (переважно – швидкорізальні фрези) виконується оброблення поверхонь задля прибирання підтримок. Крім того, враховуючи негативні особливості друку підтримок, а саме груба поверхня у місці переходу підтримки в деталь, ці поверхні згладжуються, що позитивно впливає на кінцевий стан деталі, покращуючи її загальну якість. В процесі очищення зрізаний матеріал підтримки видаляється та накопичується у лотку відпрацьованого матеріалу для подальшої переробки на нові катушки із термопластиком. Крім того, якщо сама деталь і підтримки виконані з одного матеріалу (в переважній більшості випадків так і є), є доцільним виконати швидко

утилізацію браку (за його наявності) в процесі зрізання підтримок. Таким чином, не тільки зменшуються витрати на матеріал, а й оператор швидше отримує інформацію про наявність браку, що дозволяє підкорегувати саму CAD-модель деталі чи керуючу програму для друку.

Після переходу деталі в другий модуль, будучи надрукованою без підтримок або уже із зрізаними підтримками, відбувається швидкісне автоматизоване вимірювання габаритних розмірів, основних розмірів та відхилень від форми основних поверхонь деталі. Цей модуль також має можливість відбракувати друковану деталь, оскільки після попереднього модуля могли з'явитись розшарування чи інші пошкодження, які негативно вплинули на поверхню деталі. За відсутності браку, даний модуль подає в систему точні дані про розміри деталі, а також виконує перевірку входимості цих розмірів у поля допуску.

Для третього модуля – модуля згладжування поверхонь - спершу із системи беруться дані про стан та шорсткість критичних поверхонь. Також, модуль отримує вхідні дані про матеріал деталі та габаритні і основні розміри і, на основі цих даних, підбирає необхідні елементи для виконання оброблення поверхонь до належного стану. Оброблення поверхонь виконується в автоматизованому режимі, що забезпечує людину-оператора від ураження абразивними чи хімічними речовинами.

Після виконання згладжування поверхонь, деталі передаються до модуля нанесення покриття, який, на основі попередньо заданих у керуюче ПЗ системи, виконує розпилення аерозолів на друковану деталь у попередньо визначений алгоритмом його роботи послідовності. Після цього модуля деталь повністю оброблена, вона переміщується до лотка готових деталей. За необхідності, деякі деталі одинично перевіряються на відповідність кінцевим характеристикам за допомогою контрольно-вимірювальних машин (КВМ).

Як зазначалося в попередньому пункті, модулі автоматизованої системи можна виокремлювати з системи, якщо їхнє використання не є доцільним при постобробці тієї чи іншої деталі. Однак, на мою думку, модуль швидкого вимірювання розмірів є найголовнішим та найвпливовішим на якість виготовлення деталі, оскільки надає змогу оцінити, чи підійде друкована деталь у своєму поточному вигляді кінцевому

споживачеві та чи необхідно змінити параметри друку деталей, що слідує за прототипом задля зменшення відсотку браку в партії деталей. Враховуючи це, при виконанні роботи поставлено задачу докладно дослідити модуль ШВР, розробити його конструкцію та програмне забезпечення керування цим модулем.

2.3. Дослідження модуля ШВР, аналіз його обладнання та устаткування

Згідно поставленої задачі на розробку модуля ШВР, має місце докладне дослідження можливостей модуля, принципу роботи, огляду взаємодії із загальною системою, розроблення алгоритму роботи.

Модуль ШВР – другий модуль у загальній системі автоматизованого керування процесами постобробки. Його головна суть – використання камери для виконання фотофіксації деталей, утворених 3D-друком, виконання перетворень над зображенням задля отримання розміру деталі у пікселях, виконання перерахунку у середовищі мікрокомп'ютера із пікселів у міліметри, перевірка на входження отриманих результатів у поля допуску розмірів деталі та надання оператору чи передача в автоматизовану систему інформацію про стан та розміри основних поверхонь деталі.

Модуль ШВР знаходиться в загальній АС на другій позиції. Це обумовлено наступними причинами:

- Немає сенсу проводити обміри деталі, якщо безпосередньо після друку вона буде із підтримками: оскільки через підтримки спотворюється форма деталі у камері, заздалегідь буде отримано хибні розміри.
- Після модуля видалення підтримок, якщо деталь початково була складної форми, існує можливість пошкодження поверхонь, тому є сенс одразу перевіряти деталь на відповідність у автоматизованому режимі.
- Один з варіантів розташування модуля ШВР – на позиції 4. Однак, в даному випадку модуль може використовуватися лише в якості замітника контрольно-вимірювальної машини. В такому випадку, якщо у деталі, що контролюється, буде виявлено брак, уся партія друкованих деталей може опинитися під загрозою масового відбракування.

Кінематика осей модуля ШВР зображена на рис. 2.7:

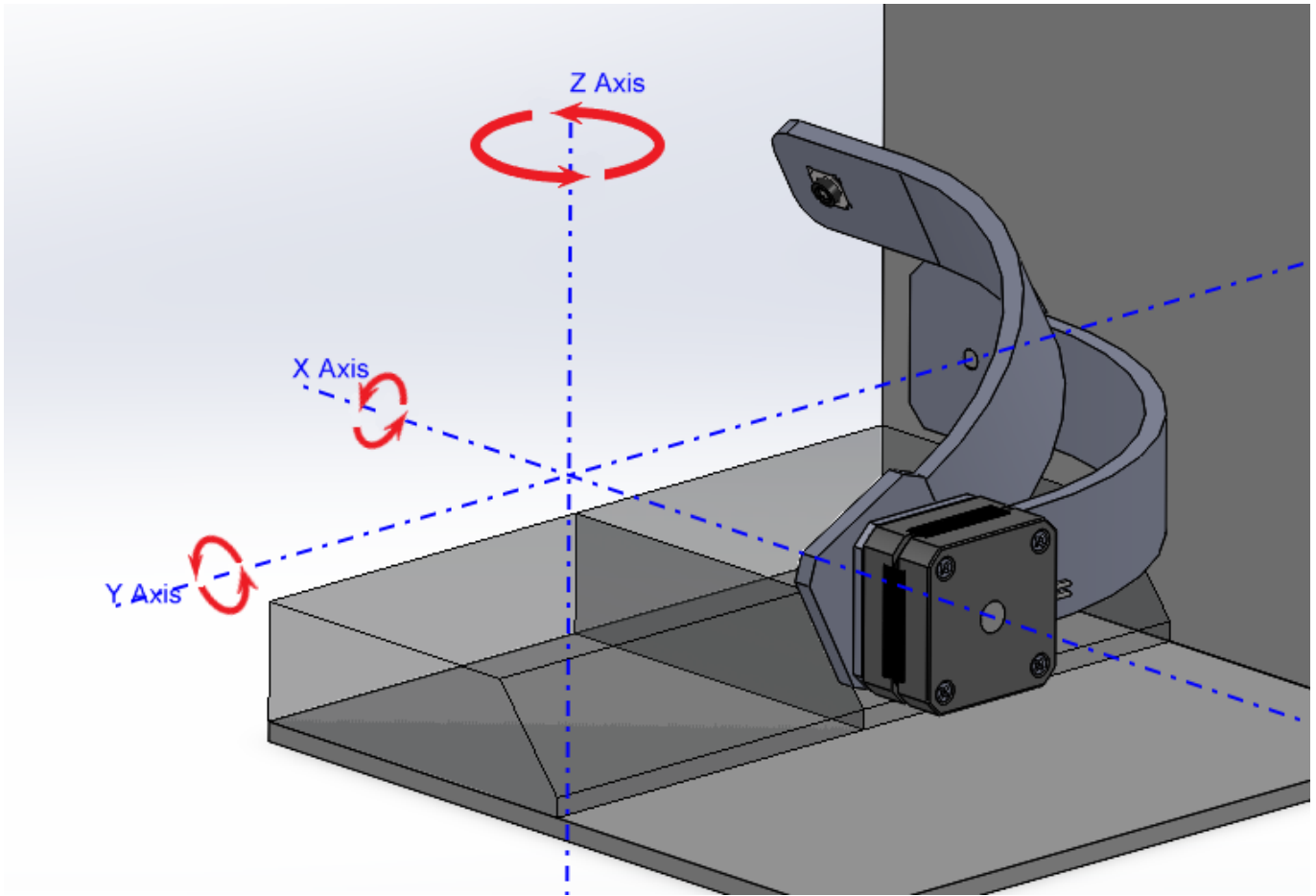


Рисунок 2.7. Кінематика та вісі модуля ШВР

Алгоритм роботи:

1. Початок роботи;
2. Програмне виставлення камери в точку 0;
3. Виконання фотофіксації в точці 0 (рис. 2.8);
4. Поворот камери за годинниковою стрілкою на 90° по вісі Z в точку 1;
5. Виконання фотофіксації в точці 1 (рис. 2.9);
6. Поворот камери проти годинникової стрілки на 180° по вісі Z та одночасний поворот за годинниковою стрілкою на 90° по вісі Y;
7. Виконання фотофіксації в точці 2 (рис. 2.10);
8. Виконання перерахунку розмірів у пікселях у розмір у міліметрах;
9. Порівняння із значеннями CAD-моделі;
10. Виведення в систему результат вимірювання.

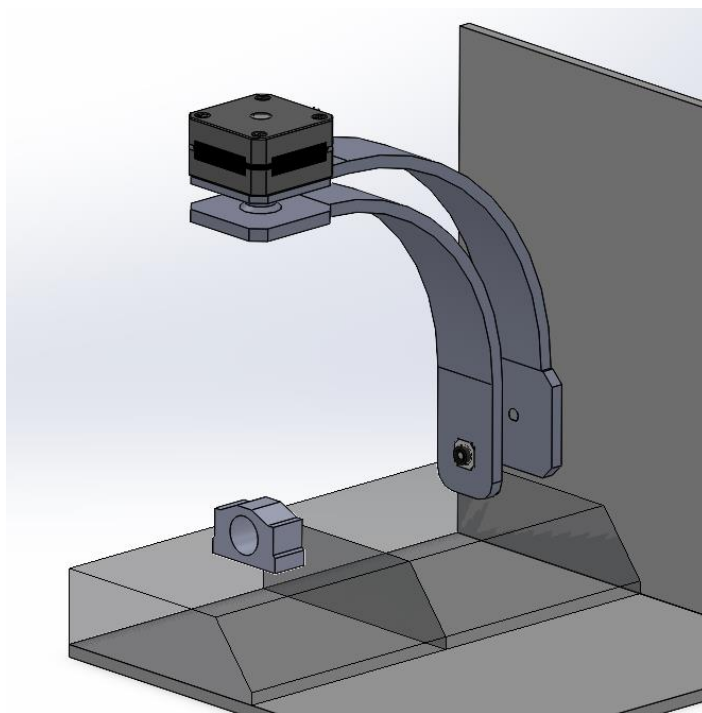


Рисунок 2.8. Точка фіксації 0

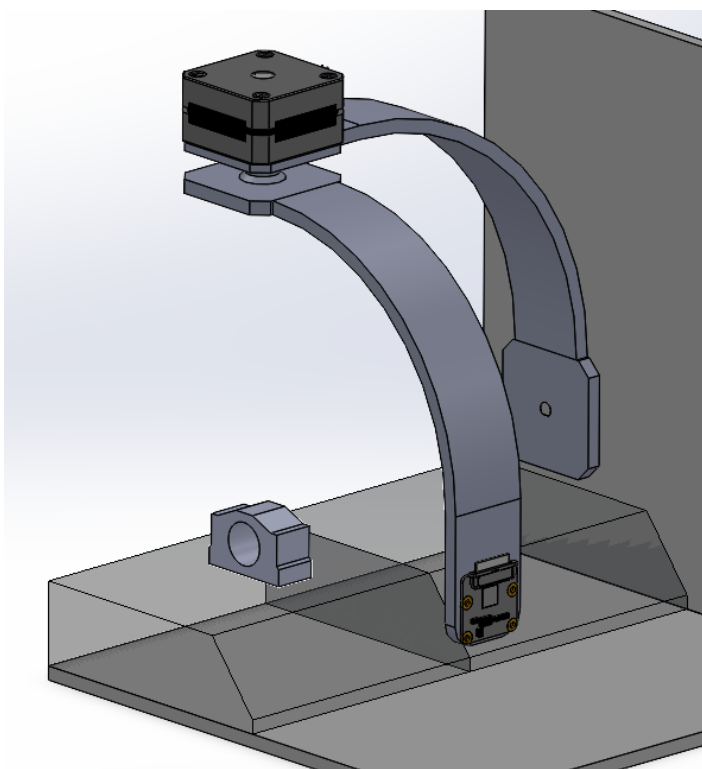


Рисунок 2.9. Точка фіксації 1

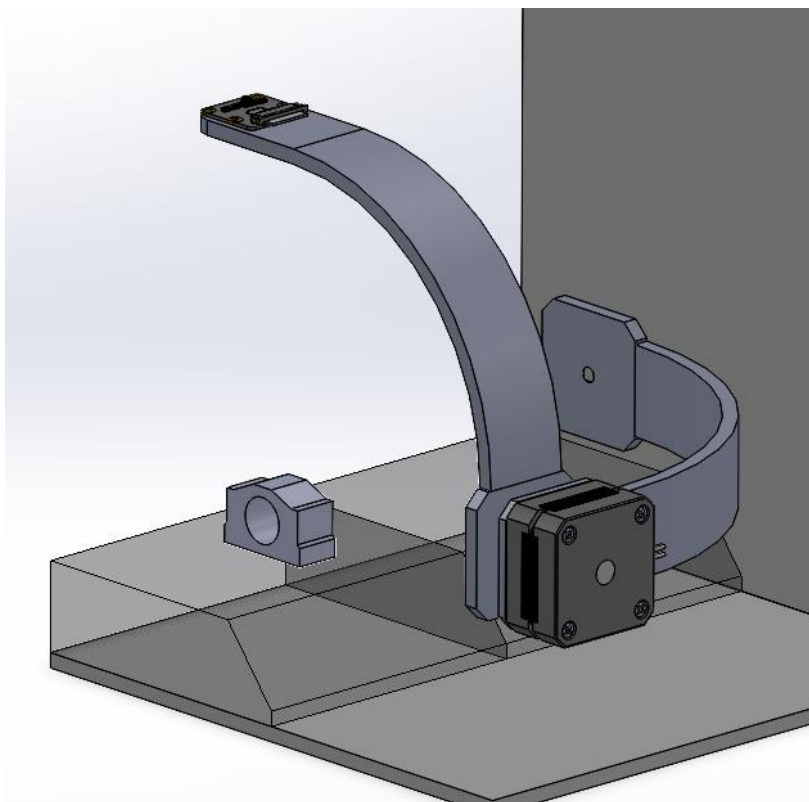


Рисунок 2.10. Точка фіксації 2

Загалом, оскільки даний модуль дуже нагадує контрольно-вимірювальні машини, наукових розробок за темою автоматизованої фотофіксації та вимірювання друкованих деталей майже немає. Натомість, для одинично друкованих деталей існує ряд проєктів друкарів-ентузіастів, у яких застосовується веб-камера для моніторингу за процесами 3D-друку [33], LIDAR-сканування звичайних деталей [34], лабораторні методи дослідження [35]. Окрім цього, програмне забезпечення OctoPrint, яке виступає у ролі веб-інтерфейсу, має можливість не тільки моніторингу за процесами 3D-друку, а й завчасного попередження про процес із можливими стоп-точками у випадку програмного виявлення серйозних похибок 3D-друку [36].

2.4. Методика визначення розмірів та недоліків форми на готовій деталі

Як і для швидкого прототипування пілотних моделей, так і для виконання одиничних та малосерійних замовлень, головними вимогами до друкованих деталей залишається точність поверхонь та їхня якість. У кожній галузі, в якій застосовується 3D-друк, поняття якості друкованої деталі різняться. Об'єктивно, головними параметрами FDM 3D-друку є дешевизна одної або партії деталей при високій

швидкості виготовлення та відносно точній відповідності параметрів до реального зразка або CAD-моделі.

Процес FDM 3D-друку забезпечує деталі зі значно вищою шорсткістю поверхні, ніж інші технології 3D-друку. Верхні шари (у Z-напрямку) зазвичай гофровані, а нижні шари гладкі, за умови відсутності матеріалу-підтримки у цій області (рис. 2.11). Поверхні без пор, на відміну від деталей, друкованих методом PBF (Powder Bed Fusion), в той же час, не такі скляні, як у деталей, друкованих методом SLA (Stereolithography). У місцях з матеріалом підтримки шорсткі поверхні пошкоджені і потребують корекції на етапі обробки. Обходом є використання розчинних (вода чи інші хімічні речовини, такі як лимонен) в якості матеріалу друку підтримок, які легко знімаються та забезпечують кращу якість [37].



Рисунок 2.11. Збільшене зображення деталі, друкованої методом FDM без постобробки.

В розділі 1 було описано проблему розшарування під час процесу FDM 3D-друку, або після виходу з друку деталі та її поступового охолодження. Але висота шару впливає не тільки на наявність похибки розшарування. В ідеальних умовах, висота шару теж впливатиме на параметри зовнішньої поверхні, а саме на шорсткість

та розміри. Через нерівномірне розтікання гарячого термопластику на попередній нанесений шар, зовнішня поверхня не матиме рівномірної форми. Поверхня друкованої деталі під збільшенням має хвиляподібну форму. Зменшення відстані між хвилями, тобто висоти шару в програмі-слайсері, дозволяє зробити налягання шарів більш щільним, що призводить до рівномірності поверхні. Це позитивно впливає на параметри шорсткості та розмірів поверхні друкованої деталі.

Швидкість процесу FDM 3D-друку також має значний вплив на характер поверхні деталі. Так само, як і швидкість та подача різального інструменту в токарних чи фрезерних верстатах, значення швидкості друкарської головки 3D-принтера, при некоректному виборі, може значно погіршити, або ж зруйнувати поверхні друкованої деталі. Значне підвищення швидкості також означає, що й термопластик, який до того ж необхідно розігріти із амбієнтної температури до температури друку, буде подаватися в сопло швидше. Через це, має місце нерівномірність прогріву нитки термопластика, що тягне за собою можливі пошкодження механізму екструзії, такі як забивання сопла, затирання або перелам нитки, недоекструзія у друкованій деталі.

У роботі [38] було проведено дослідження впливу швидкості на якість друкованих поверхонь, а саме було виміряно середній відсоток відхилення від заданого розміру поверхні відносно швидкості друку. Згідно графіку на рис. 2.12 тестові зразки зазнавали поверневого відхилення до 4.5% при швидкості 65мм/с та до 8.57% при менших швидкостях, що є незвичним результатом.

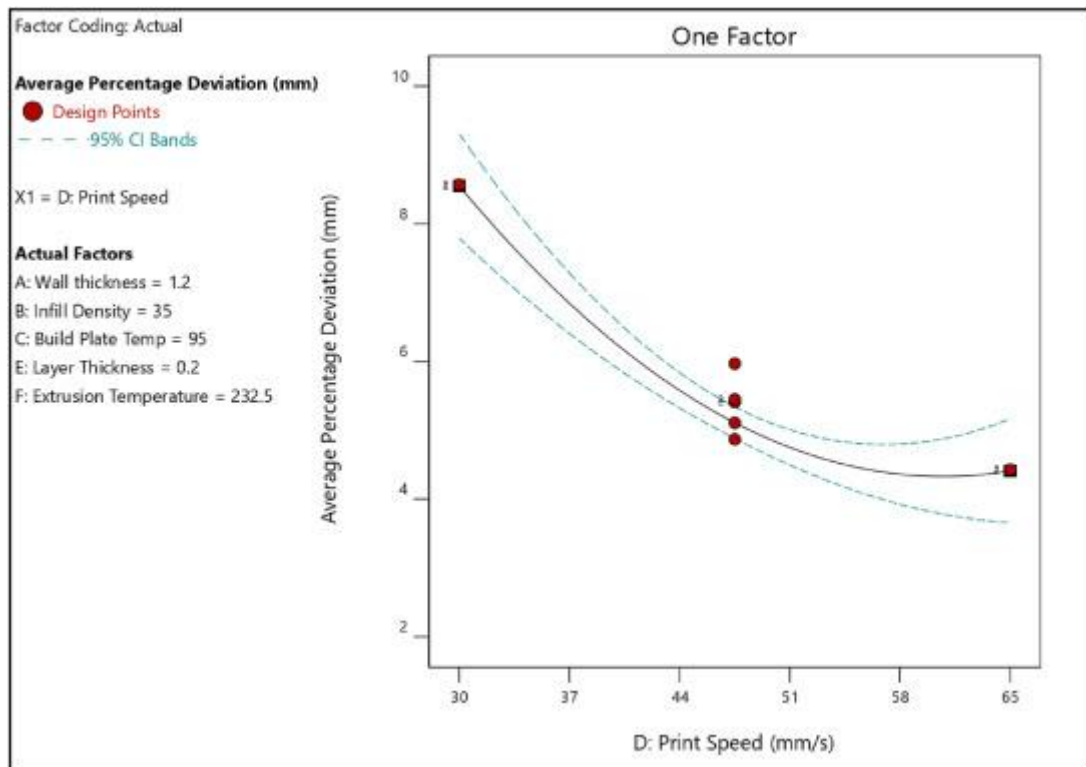


Рисунок 2.12. Вплив швидкості друку на відхилення надрукованих зразків

Схожі результати були помічені у роботі [39], де пояснюється, що як тільки швидкість зсуву перевищує критичне значення, збільшення швидкості зсуву зменшує набухання вичавлюваного матеріалу, тобто: вищі швидкості друку збільшують швидкість зсуву понад критичне значення, після якого розплавлений матеріал при осадженні не тече.

З результатів попередніх досліджень, збільшення швидкості друку та зменшення висоти шару призводять до більшої відповідності розмірів та меншому відхиленню від початкової CAD-моделі [38, 39].

Для друкованих деталей будь-якої форми в переважній більшості випадків ставлять одну умову – майже стовідсоткова відповідність моделі, з якої було виконано 3D-друк. Як і під час лиття пластикових виробів під тиском (наприклад, у термопластавтоматах), габарити друкованих деталей будуть відрізнятися від заданих у CAD-моделі і ніколи стовідсотково їй не відповідатимуть. Головним чинником є параметр усадки при нагріванні та поступовому охолодженні друкованих деталей. Параметр є різним для різних матеріалів та залежить від хімічного складу нитки для 3D-друку. В табл. 2.1 наведено параметри усадки для FDM-пластиків [40]:

Таблиця 2.1. Усадка різних FDM-пластиків

Матеріал	Усадка під час охолодження, %
PLA	0,3 – 0,5
ABS	0,7 – 1,6
PETG	0,2 – 1,0
Nylon 6-6	0,7 – 3,0
Nylon 12	0,7 – 2,0
ASA	0,4 – 0,7
PP	1,0 – 3,0
ABS/PC	0,5 – 0,7
PEEK	1,2 – 1,5

Усадка є дуже важливим параметром, оскільки для великогабаритних деталей поступове «стягнення» може не тільки вплинути на фінальну форму деталі, а й поставити під загрозу сам процес 3D-друку. Нерівномірне охолодження деталі може викликати так зване викривлення деталі, що спричинює розшарування самої структури деталі або ж відрив нижніх шарів деталі від друкарської поверхні. В будь-якому з цих двох випадків, викривлена деталь є бракованою, що спричинює додаткові витрати на матеріал та збільшує загальний час очікування однієї чи партії деталей.

У випадку успішного друку, деталь все ще потерпає від усадки, що спричинює загальне зменшення габаритів деталі. Для точних вузлів, така деталь може спричинити збої в роботі або ж вихід з ладу самого вузла, що може бути критичним при експлуатації такого обладнання.

Як підсумок, внаслідок аналізу впливу швидкості друку, товщини шару матеріалу, який наноситиметься, можна виділити зазначені параметри як вихідні дані для створення моделі, а значення розмірів, які розглядатимуться, відхилення від форми та усадку пластика – як вхідні дані. На основі даної моделі, в подальшому, керуюче ПЗ зможе видавати оператору або напряду в автоматизовану систему інформацію про деталь – чи відсутній брак внаслідок невідповідності розмірів, чи

розміри лежать в межах допуску, чи є сенс збільшувати масштаб перед початком друку для компенсації впливу усадки тощо.

2.5. Проведення апріорного експерименту для розробки моделі роботи

Перед створенням моделі роботи модуля ШВР за обраними у попередньому пункті параметрами необхідно провести експериментальні дослідження з використанням тестових зразків для визначення залежностей між вхідними та вихідними величинами. В якості тестового зразку в CAD-середовищі SolidWorks було спроектовано наступну деталь (рис. 2.13):

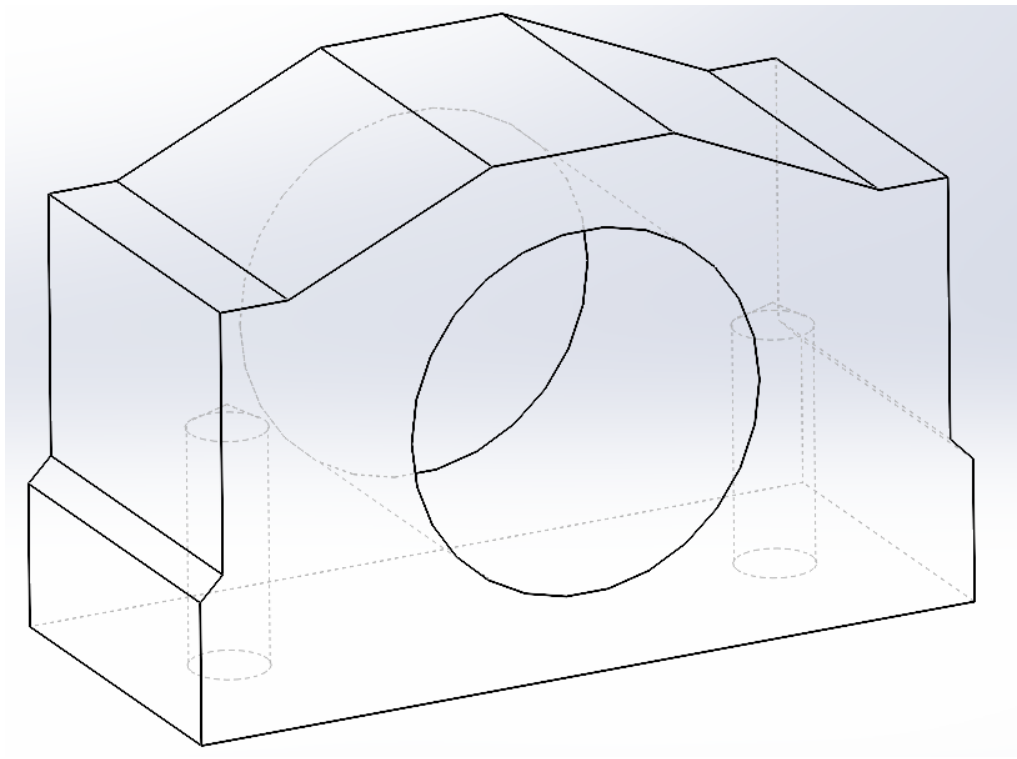


Рисунок 2.13. Деталь, створена у CAD-середовищі SolidWorks 2024.

Габарити CAD-моделі, основні та маса наведені у табл. 2.2, кресленик деталі наведено у додатку 1.

Таблиця 2.2. Характеристики CAD-моделі

Параметр	Значення параметру	Значення параметру з врахованою усадкою
Довжина, мм	34	33,694
Ширина, мм	15	14,865

Висота, мм	22	21,802
Діаметр центрального отвору, мм	15,3	15,1623
Діаметри нижніх кріпильних отворів, мм	3,3	3,2703
Маса деталі (ABS звичайний), г	7.47	7,4

Для проведення експерименту за отриманою CAD-моделлю необхідно виконати друк тестових зразків. Для якісного порівняння результатів, було виготовлено 8 зразків з різними параметрами, які безпосередньо матимуть вплив на відповідальні поверхні та габарити самої деталі – порядок друку стінок (Wall Ordering), швидкість друку та товщина друкованого шару.

Налаштування порядку друку стінок впливає на відповідність розмірів до вихідної моделі, так наприклад налаштування «Outside to Inside» забезпечує непроникність матеріалу зсередини деталі назовні, що підвищує точність розмірів, в той час як налаштування «Inside to Outside» підвищує міцність зв'язків між шарами, що унеможливорює розшарування всередині тіла деталі.

Друк тестових деталей виконано з допомогою FDM 3D-принтера із кінематикою CoreXY Creality K1C. Створення керуючих програм (G-код) для 3D-принтера було виконано у ПЗ «Creality Print» (рис. 2.14). Беручи до уваги, що і 3D-принтер, який розглядається і програма-слайсер одного й того ж виробника (Creality), то проблемами комунікації ПЗ та 3D-принтера можна знехтувати.

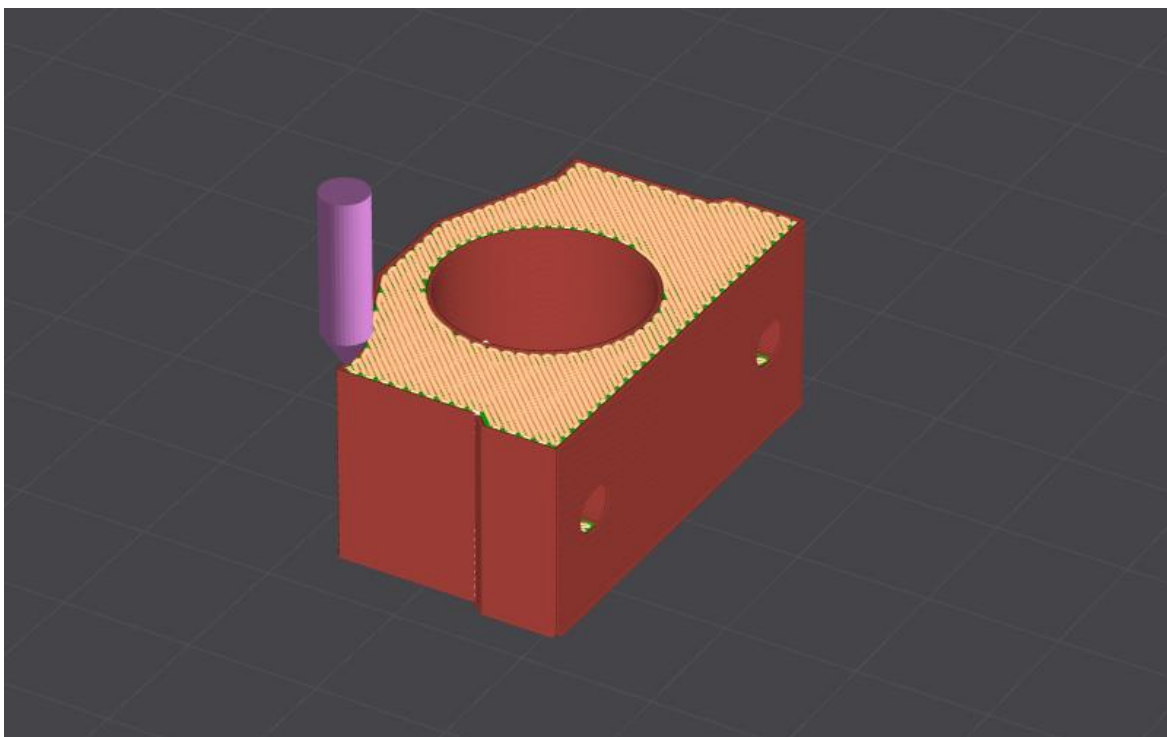


Рисунок 2.14. Орієнтація та слайсинг деталі для 3D-друку у ПЗ.

Деталі в програмному середовищі зорієнтовано таким чином, щоб мінімізувати відхилення від початкових розмірів будь-яких отворів, що знаходяться у деталі. Усього підготовано 8 різних програм для друку для оцінки залежностей вихідних результатів габаритних та основних розмірів від вхідних параметрів програми-слайсера. Друк зразків для дослідження виконувався за параметрами, наведеними у табл. 2.3.

Таблиця 2.3. Параметри друку тестових деталей

	Матеріал – Hyper ABS, значення усадки, % - 0,9							
Параметр “Wall Ordering”	Outside to Inside				Inside to Outside			
Швидкість друку, мм/с	300		150		300		150	
Товщина шару, мм	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1	0.2

Температура друкарської головки, температура поверхні та температура навколишнього середовища залишались незмінними, та становили 260 °C, 60 °C та 60 °C відповідно.

Після виконання 3D-друку було отримано 8 деталей типу «Корпус підшипника», які наведено на рис. 2.15 – 2.22.

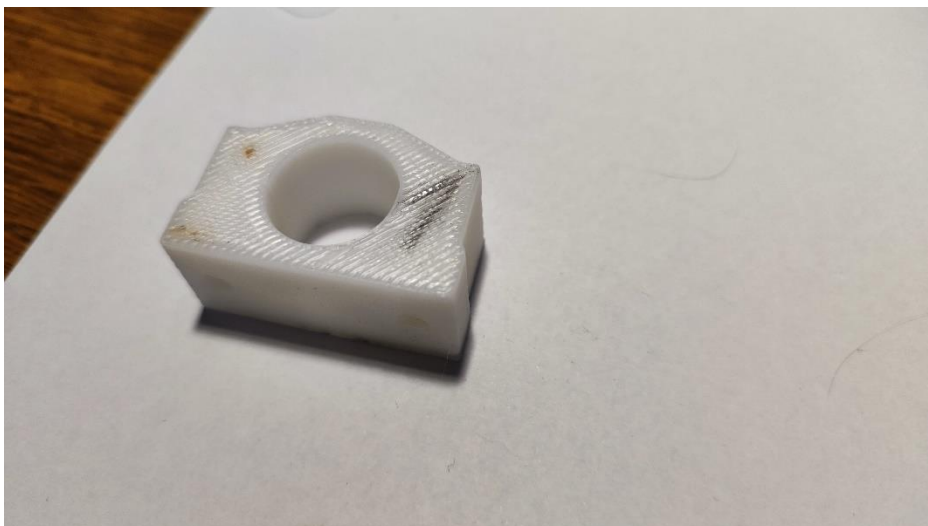


Рисунок 2.15. Тестовий зразок 1

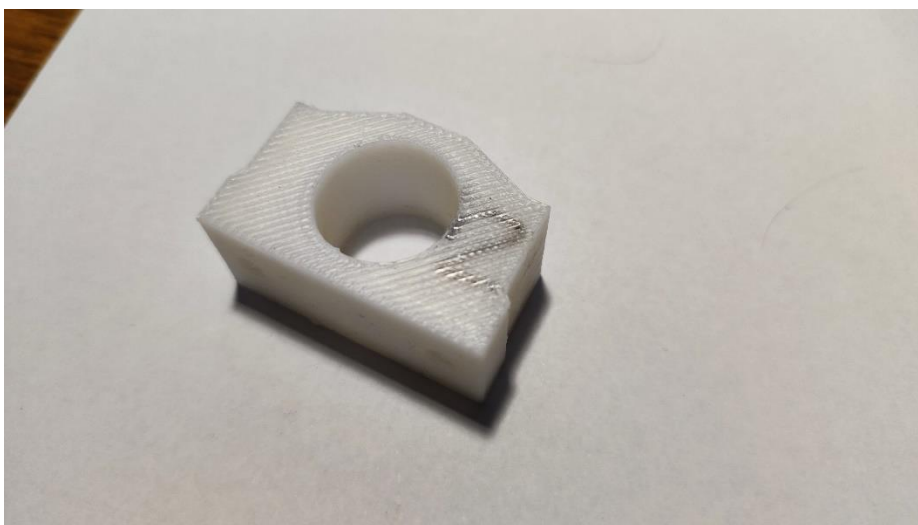


Рисунок 2.16. Тестовий зразок 2

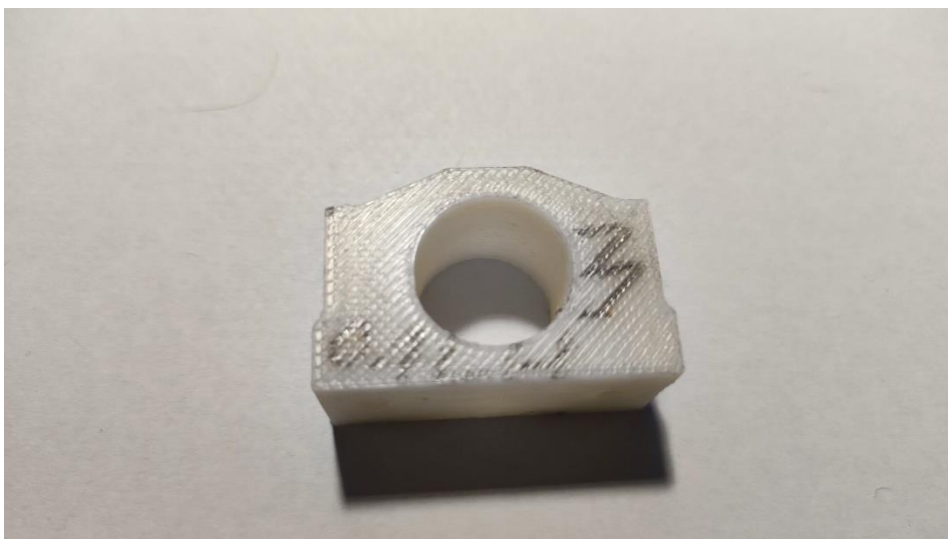


Рисунок 2.17. Тестовий зразок 3

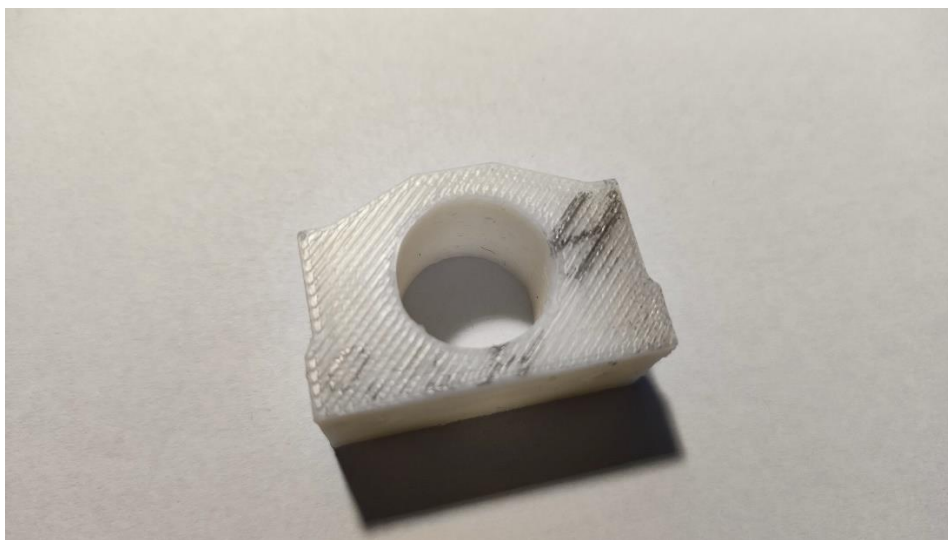


Рисунок 2.18. Тестовий зразок 4

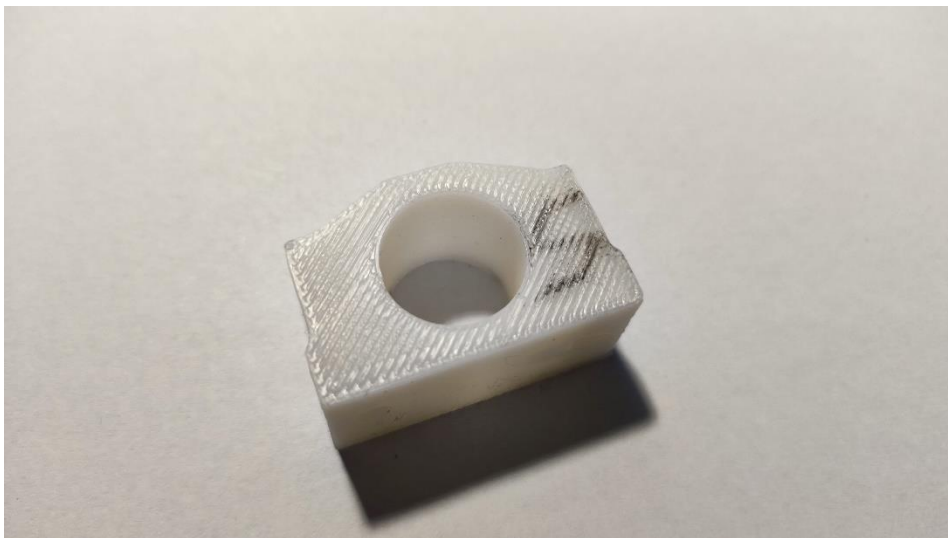


Рисунок 2.19. Тестовий зразок 5

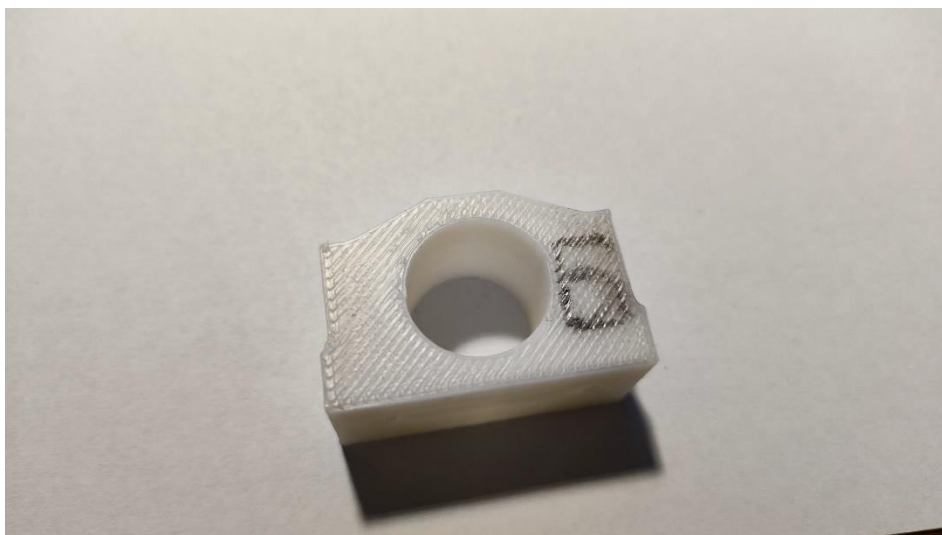


Рисунок 2.20. Тестовий зразок 6

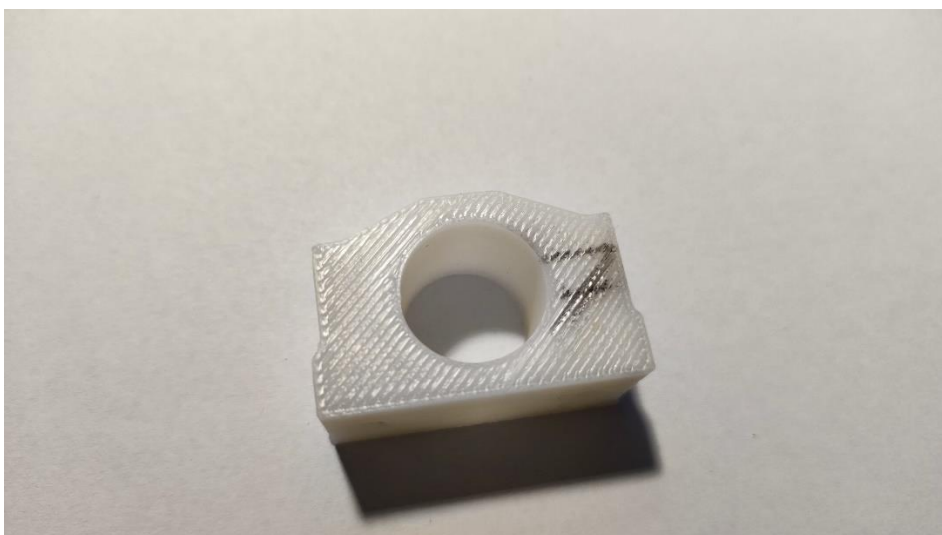


Рисунок 2.21. Тестовий зразок 7

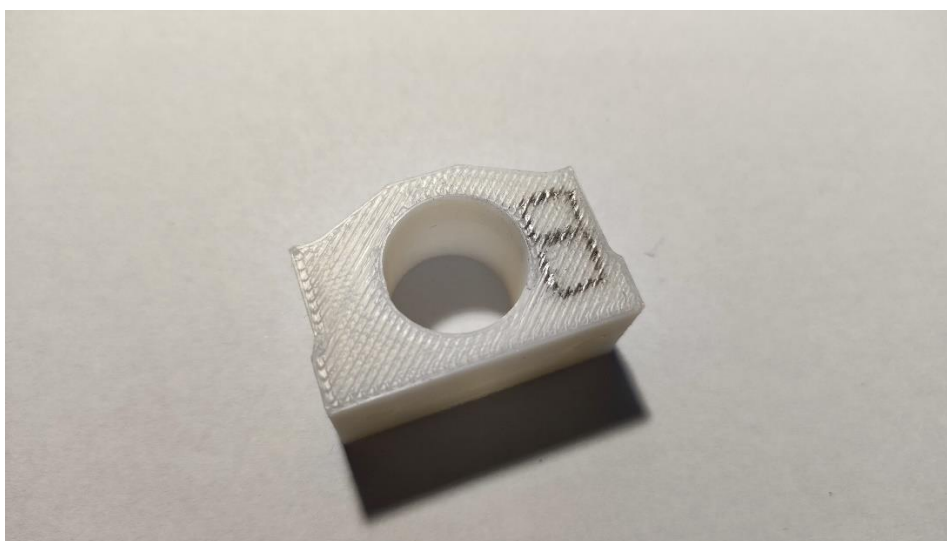


Рисунок 2.22. Тестовий зразок 8

Попередньо, було проведено візуальний огляд на наявні пошкодження та похибки. За виключенням незначного бруду на тестовому зразку 1, який не вплинув на досліджувані розміри, та незначної похибки типу “Elephant foot” у зразках 5 – 8, зразки виконані цілком у нормі. Однак, треба зазначити, що зразки 5 – 8 об’єднує налаштування порядку друку стінки “Inner wall to Outer wall”, хоча й невеликі розміри тестових зразків дозволили уникнути значних похибок нижніх шарів.

Отримані зразки підлягали вимірюванню габаритних та основних розмірів; за основний розмір було взято діаметр отвору для лінійного підшипника, значення наведено попередньо в табл. 2.3. Враховуючи характер отвору для підшипника, який виконується за допомогою 3D-друку, також для цього отвору було розраховано значення відхилення від круглості. Вимірювання було виконано з допомогою штангенциркуля МТ-1101060 з похибкою ± 0.02 мм та дискретністю 0.01 мм. Результати вимірювань для кожного зразка наведено в табл. 2.4.

Таблиця 2.4. Виміряні параметри експериментальних деталей

Номер зразка	Розмір А, мм	Розмір Б, мм	Розмір В, мм	Діаметр отвору підшипника, мм	Відхилення від круглості, мкм
1	33.68	21.90	15.03	15.32	100
2	33,82	22,02	15,10	15,38	150
3	33,79	21,88	14,96	15,20	75
4	33,81	21,95	15,00	15,34	100
5	33,75	22,00	15,13	15,26	75
6	34,10	21,92	15,16	15,36	150
7	33,70	22,03	15,08	15,24	75
8	33,71	21,91	15,08	15,41	200

З огляду на поля допуску, які задано у стандарті EN 22768-1, необхідно порівняти отримані дані, чи вони входять у вибрані поля. Таким чином, буде отримано один найточніший результат друкованого тестового зразка, основні параметри друку якого слугуватимуть «еталоном» для розробки моделі роботи модуля ШВР та визначення залежностей.

Згідно стандарту маємо наступні поля допуску (табл. 2.5):

Таблиця 2.5. Допустимі відхилення для лінійних розмірів (EN 22768-1)

Клас точності		Допустимі відхилення в межах заданих розмірів, мм							
Мітка	Назва	До 3	3 - 6	6 - 30	30 - 120	120 - 400	400 - 1000	1000 - 2000	Понад 2000
f	fine	±0,05	±0,05	±0,1	±0,15	±0,2	±0,3	±0,5	----

2.6. Розробка моделі роботи модуля ШВР на основі отриманих експериментальних даних

За результатами проведеного експерименту можна розробити модель роботи, яка представлятиме залежності між вхідними та вихідними даними модуля. Модель буде мати в собі набір наступних параметрів:

Вхідні:

- Вихідні параметри програми-слайсера
- Обміряні розміри друкованої деталі

Та вихідні:

- Результат аналізу керувальним ПЗ

Не зважаючи на невелику кількість вхідних параметрів, модель роботи модуля ШВР, яка буде в подальшому застосована при розробленні програмного забезпечення, дозволить швидко визначити шукані відхилення від параметрів, якщо такі існуватимуть.

Схема моделі виглядатиме наступним чином (рис. 2.23):

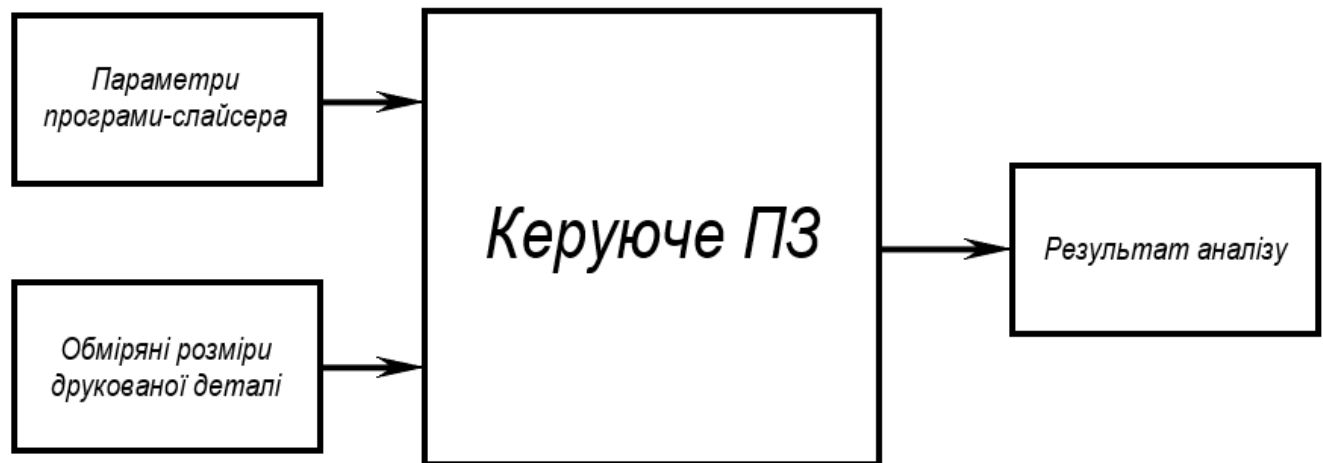


Рисунок 2.23. Схема моделі.

Оптимізація умов та режимів процесу 3D-друку залежить від незліченної кількості вхідних параметрів, основними з яких є швидкість виходу готової деталі з друку та відповідність деталі до характеристик її CAD-моделі. Враховуючи загальну невизначеність у необхідних для кожної конкретної деталі показниках якості, вважатимемо, що для даного конкретного випадку ми намагатимемося максимізувати відповідність розмірів деталі, при цьому з найменшими витратами часу.

Для подання в програмне забезпечення модуля ШВР алгоритму, який відповідатиме за визначення входимості у поля допуску, розроблено наступне співвідношення:

Нехай маємо X_1, X_2, X_3 – габаритні розміри друкованої деталі (Д x Ш x В), у мм, D – діаметр отвору підшипника, dX_1, dX_2, dX_3, dD – значення відповідних розмірів CAD-моделі із урахуванням відхилень в меншу сторону, DX_1, DX_2, DX_3, DD – значення відповідних розмірів CAD-моделі із урахуванням відхилень в більшу сторону. Тоді маємо наступні співвідношення:

$$\left\{ \begin{array}{l} (dX_1 < X_1 < DX_1) \cup (dX_2 < X_2 < DX_2) \cup (dX_3 < X_3 < DX_3) \cup (dD < D < DD) \\ (X_1 > DX_1) \cap (X_2 > DX_2) \cap (X_3 > DX_3) \cap (dD > D) \\ (dX_1 > X_1) \cap (dX_2 > X_2) \cap (dX_3 > X_3) \cap (DD > D) \\ (X_1 \gg DX_1) \cap (X_2 \gg DX_2) \cap (X_3 \gg DX_3) \cap (dD \gg D) \end{array} \right.$$

Співвідношення 1: повна входимість у поля допуску усіх розмірів – в даному випадку розміри друкованої деталі входять у поля допуску для заданої деталі, тому деталь не є бракованою.

Співвідношення 2: бодай один з розмірів виходить за верхню межу полей допуску – деталь також не є бракованою, але потребуватиме дообробки за допомогою модуля згладжування, наприклад, за допомогою термальної обробки.

Співвідношення 3: бодай один з розмірів виходить за нижню межу полей допуску – деталь є бракованою, оскільки подальша постобробка не передбачає додавання матеріалу для збільшення розмірів. За невеликих значень виходу за нижню межу поля допуску має сенс збільшення температури друку, зміна порядку друку стінок або перевірка друкарської головки 3D-принтера на несправність. Також, є доцільним збільшення масштабу деталі у програмі-слайсері задля компенсації температурної усадки.

Співвідношення 4: бодай один з розмірів значно виходить за верхню межу полей допуску – деталь є бракованою, оскільки система не передбачає подальше зняття великого шару матеріалу. Є доцільним збільшити кількість стінок деталі, зменшити масштаб деталі, збільшити швидкість друку або зменшити температуру сопла друкарської головки. Значний вихід за верхню межу полей допуску може свідчити про переекструзію, в разі чого необхідно перевірити друкарську головку на несправність механізму подачі термопластику.

Висновки до розділу 2

1. В розділі було описано роботу загальної системи, розроблено схему та технологічний процес роботи. Пріоритетом визначено розроблення модуля ШВР, проведено аналіз цього модуля, розроблено алгоритм роботи. Проведено експериментальне дослідження друкованих деталей, на його основі створено модель роботи для обґрунтування залежностей між вхідними параметрами процесу 3D-друку та вихідними параметрами розмірів отриманих деталей.

2. На основі цих досліджень поставлено задачу розробити модуль ШВР – його апаратну та програмну частини – та провести експериментальне дослідження

цього модуля із використанням попередніх тестових зразків для оцінювання його роботи.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА МОДУЛЯ ШВИДКОГО ВИМІРЮВАННЯ РОЗМІРІВ

В розділі 3 описано процес розроблення модуля ШВР. Обґрунтовано вибір обладнання модуля та програмного забезпечення для написання коду програми. Проведено аналіз роботи розробленого модуля шляхом тестування на попередньо надрукованих зразках, що використовувалися у при проведенні експерименту у розділі 2.

3.1. Вибір методів та устаткування для розробки модуля ШВР

Перед початком розробки апаратної та програмної частини модуля ШВР необхідно визначити алгоритм взаємодії компонентів модуля. Як було зазначено, головною задачею цього модуля є перевірка деталей на відповідність початковій формі деталі, змодельованої в CAD-середовищі. За параметри контролю буде прийнято габаритні розміри деталі (висота, ширина та товщина), а також діаметр центрального отвору, який служить переходом системи отвір - вал. За вхідну інформацію також буде взято відповідні розміри початкової CAD-моделі та відхилення, визначені згідно EN 22768-1 f, зазначені в табл. 2.2 та 2.5 відповідно.

Оскільки необхідно, щоб модель була обміряна не тільки з однієї сторони, а, як мінімум, з двох чи трьох, залежно від типу деталі, має доцільність використання трьохвимірної компоновки апаратного устаткування. Цього можна досягти за допомогою використання крокових моторів разом із підходящими драйверами. Їхньою задачею буде переміщення камери в задані програмно контрольні точки, у яких відбуватиметься подальша фотофіксація.

На рис. 3.1 наведено алгоритм роботи модуля ШВР.

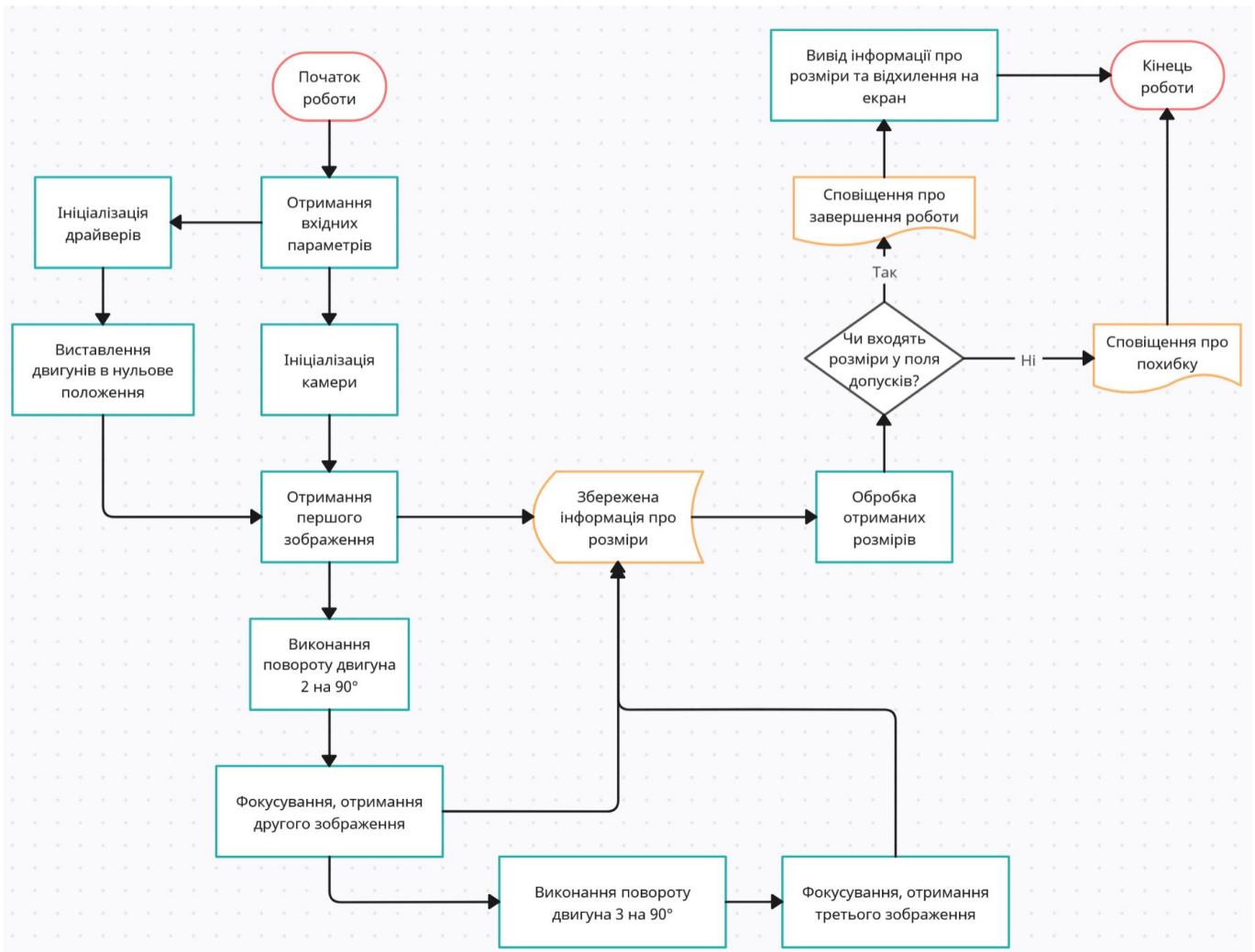


Рисунок 3.1. Алгоритм роботи модуля ШВР

В запропонованому алгоритмі роботи модуля бачимо послідовність переходів, переміщень камери та процесів збереження та обробки даних. Початком роботи є старт мікрокомп'ютера та отримання вхідних параметрів, таких як габаритні та основні розміри CAD-моделі. Після отримання стартових значень, відбувається ініціалізація драйверів крокових двигунів, які, отримавши координати нульового положення із програмного забезпечення, виводять усі двигуни в початкове положення – точку 0. Дана точка також слугує точкою виконання першої фіксації розмірів.

Паралельно із ініціалізацією крокових двигунів відбувається запуск камери для фотофіксації. Після виведення усіх двигунів у точку 0, програма виконує фокусування камери за допомогою спеціальних бібліотек та виконує фотофіксацію

деталі, що вимірюється. Деталь має входити у вікно області інтересу, оскільки це безпосередньо впливає на здатність коректного отримання зображення.

Після фотофіксації програма виконує переведення пікселів у розміри згідно раніше визначеному методу (описано у розділі 2), записує ці розміри у внутрішню пам'ять та передає драйверам крокових двигунів виконати поворот у точку 1. Так само, як і на початку, камера фокусується, після чого робить фотофіксацію деталі. Дані про розміри поверхонь, що підлягають вимірюванню, переводяться із пікселів у міліметри та передаються у систему, після чого програма знову, керуючи драйверами моторів, переводить камеру у точку наступної, фінальної, фотофіксації – точку 2. алгоритм фотофіксації залишається незмінним, після отримання зображення дані про виміряні розміри заносяться у внутрішню пам'ять, після чого робота апаратного середовища припиняється.

Після завершення отримання розмірів деталі, програма виконує перевірку на відповідність розмірам, які задано на початку роботи, та виводить результат роботи на екран. Для випадку використання модуля поза автоматизованою системою, який розглядається в цій роботі, кінцем роботи програми є або отримання сповіщення про похибку – невідповідність виміряних розмірів до необхідних, або отримання сповіщення про завершення роботи із результатами вимірювання. Після завершення роботи оператором може бути подана команда виконати обміри ще раз, у випадку сумнівів у коректності роботи.

У випадку, коли модуль ШВР не є кінцевим під час використання системи, деталь або відбраковується, у випадку критичної невідповідності до розмірів CAD-моделі, або передається в наступний модуль, перед цим сповістивши оператора системи про результат дослідження. Деталі із невеликим відхиленням не відбраковуються, оскільки можуть бути додатково оброблені вручну за необхідності, або оброблені у модулі модулем згладжування поверхонь.

3.2. Розробка апаратного устаткування модуля ШВР

Для виконання обміру деталі модулем ШВР необхідно розробити його апаратне устаткування. Апаратне устаткування модуля ШВР має на меті стати загальною

компоновкою керувального мікрокомп'ютера, камери для отримання зображень об'єкта дослідження, рами для нерухомого закріплення обладнання та крокових двигунів із відповідними драйверами для виконання контролю кроків. Крім того, відповідно до необхідної для драйвера напруги було обрано блок живлення, який забезпечує живлення 24 V DC при підключенні до мережі 220 V AC 50 Hz

Для розробки тестового концепту модуля ШВР було обрано наступні компоненти (табл. 3.1):

Таблиця 3.1. Перелік покупних компонентів тестового модуля ШВР

№	Назва компонента	Кількість, шт
1	Мікрокомп'ютер Raspberry Pi 5	1
2	Драйвер крокового двигуна TB6600 4.0A	2
3	Кроковий двигун NEMA17 17HS4023 0.7A	2
4	Камера Pi Camera Module 3	1
5	Блок живлення MeanWell 24 V 350 W	1

В таблиці не наведено перелік кріпильних елементів (гвинти, шайби, Т-гайки), елементи рами (параметри алюмінієвої екструзії) та деталі, які необхідно виготовляти (облицювання, підставки для тестової деталі тощо).

В табл. 3.2 – 3.6 наведено основні характеристики обраних у табл. 3.1 компонентів:

Таблиця 3.2. Характеристики мікрокомп'ютера Raspberry Pi 5 [41]

Назва параметру	Значення
Процесор	Broadcom BCM2712 2.4GHz quad-core 64-bit Arm Cortex-A76 CPU
Відеоядро	VideoCore VII GPU, supporting OpenGL ES 3.1, Vulkan 1.2

Передача зображення	Dual 4Kp60 HDMI® display output with HDR support
Оперативна пам'ять	4 GB
Операційна система	Pi OS
Живлення	5A/5V DC via USB-C

Таблиця 3.3. Характеристики драйвера крокового двигуна TB6600 [42]

Назва параметру	Значення
Вхідний струм	0 – 5.0 A
Максимальна потужність	160 Вт
Допустима напруга живлення	VCC (DC 9 – 42 V)
Мікрокроки	1, 2/A, 2/B, 4, 8, 16
Кількість керованих двигунів	1

Таблиця 3.4. Характеристики крокового двигуна NEMA17 17HS4023 [43]

Назва параметру	Значення
Діаметр валу	5 мм
Габарити (без валу)	42 x 42 x 23 (Д x Ш x В, мм)
Допустима напруга живлення	12 V, 24 V
Струм	0.7 A / фаза
Сила утримання	14 Н/см
Кут кроку	1.8 ± 5%

Таблиця 3.5. Характеристики камери Pi Camera Module 3 [44]

Назва параметру	Значення
Камера	Back-illuminated, stacked CMOS 12-megapixel Sony IMX708 image sensor
Фокусування	Phase Detection Autofocus (PDAF) for rapid autofocus
Роздільна здатність	До 11.9 Мпкселів
Розмір пікселя	1.4 x 1.4 нм
Фокусна відстань	4.74 мм
Діагональний кут зору	75°
Горизонтальний кут зору	66°
Вертикальний кут зору	41°

Таблиця 3.6. Характеристики БЖ MeanWell [45]

Назва параметру	Значення
Вихідне живлення	24 V DC
Вихідна потужність	350 W
Вхідне живлення	180 V AC – 264 V AC
Довжина	215 mm
Ширина	115 mm
Висота	30 mm
Маса	760 g

Розробку деталей, вузлів та складальної одиниці модуля було виконано у CAD-програмному забезпеченні DS SolidWorks 2024. Загальний вигляд спроектованого тестового модуля наведено на рис. 3.2:

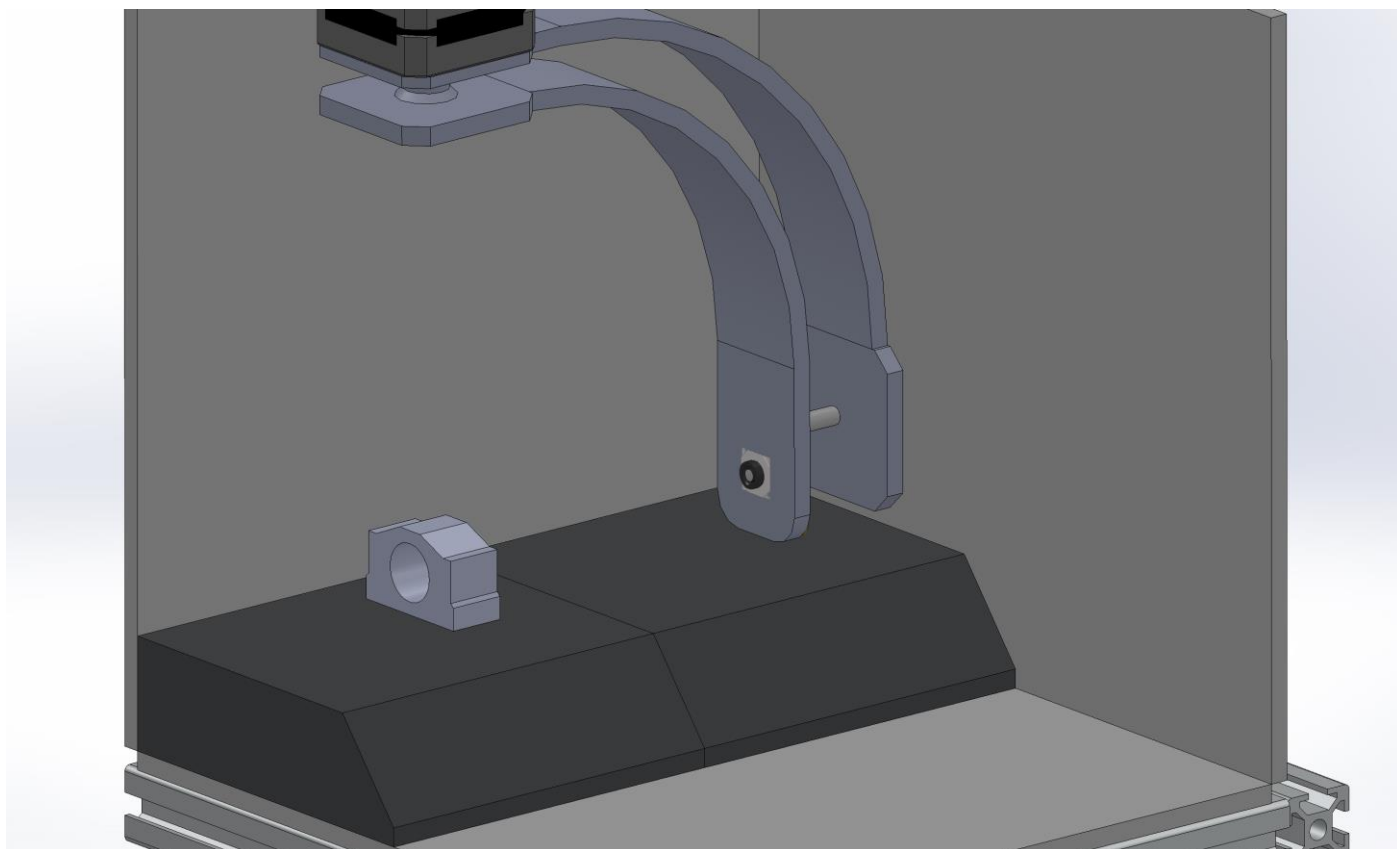


Рисунок 3.2. Вигляд тестового модуля ШВР у розрізі

Кресленик складальної одиниці модуля ШВР наведено у додатку 2.

Модуль складається із наступних деталей: мікрокомп'ютера 1, драйверів двигуна 2, крокових двигунів 3, камери 4, двох підставок для зразка 5, дуги великої 6, дуги малої 7, алюмінієвої рами модуля 8 та кріпильних виробів. Загальні габарити тестового модуля складають 350 мм х 250 мм х 250 мм.

Для використання модуля необхідно встановити деталь, що досліджується, на одну з підставок 5 таким чином, щоб камера була направлена на деталь. Після встановлення, рухаючи камеру по контрольним точкам переконатись, що на екрані, до якого підключено мікрокомп'ютер 1, деталь, що вимірюється, потрапляє у зону дослідження. Перед запуском модуля необхідно впевнитись у відсутності всередині модуля інших предметів окрім досліджуваного зразка.

Після початку сканування у програмному забезпеченні модуля, драйвери крокових двигунів 2 подають імпульси на крокові двигуни 3, що спричинює зміну їх положення. Подачею та таймінгами імпульсів керує безпосередньо розроблене програмне забезпечення. Процедура обміру виконується за алгоритмом, попередньо наведеним на рис. 3.1.

Після завершення сканування, програмно забезпечено повернення кута крокових двигунів модуля ШВР у стартове положення (точка 0), після чого на екрані буде показано результат обмірів.

3.3. Розробка керувального програмного забезпечення модуля ШВР

Разом із апаратним забезпеченням модуля ШВР, необхідно розробити та протестувати його програмне забезпечення.

Програмне забезпечення модуля ШВР складається з двох основних частин: частина переміщення/повороту та частина вимірювання. Частина переміщення/повороту відповідає за переміщення та поворот камери за допомогою крокових двигунів. Сигнали, які мікрокомп'ютер подаватиме на драйвери крокових двигунів, забезпечуватимуть рух самого крокового двигуна. Частина вимірювання відповідає за фотофіксацію камерою друкованої деталі, яка досліджується, морфологічну обробку зображення, перерахунок розміру деталі з пікселі у міліметри та подання оператору інформації про виміряні параметри.

Алгоритм обробки зображення виглядає наступним чином (рис. 3.3):

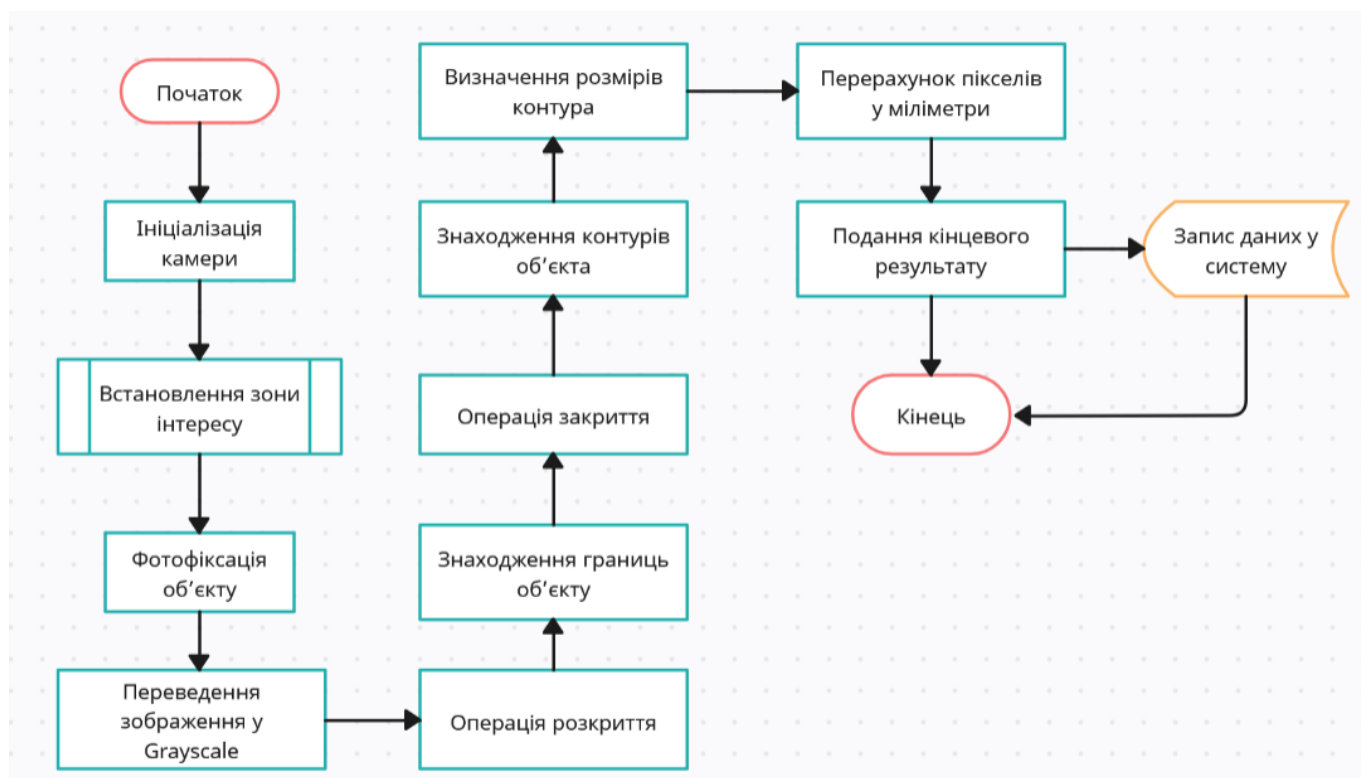


Рисунок 3.3 Алгоритм обробки зображення.

Для обробки зображення, знаходження контурів та позбавлення від небажаних артефактів під час фотофіксації було застосовано бібліотеку OpenCV, а саме такі функції та методи як `cvtColor`, `Canny`, `Opening`, `Closing`.

Функція `cvtColor` полягає у перетворенні зображення з одної кольорової гамми у іншу. Переведення із різнобарвного (RGB/BGR) стару у чорно-білий (GRAY) необхідне, оскільки на чорно-білому зображенні набагато простіше знаходити контури, ніж на різнобарвному. Зайві кольорові канали придушуються, що дає змогу зробити межі шуканого об'єкту точнішими для подальшої фіксації.

Наступним кроком після перетворення зображення у чорно-біле є операція розкриття (`Opening`). Операція розкриття у OpenCV складається із двох більш простих операцій – ерозії (`Erosion`) та дилатації (`Dilation`), та є послідовним обробленням зображення спочатку ерозією, а потім дилатацією. Операція розкриття полягає у видаленні шуму із зображення – спочатку ерозія «видаляє» непотрібні точки та артефакти із зображення, а після цього дилатація повертає зображення у початковий стан, але із витертими артефактами (рис. 3.4) [46].



Рисунок 3.4. Операція розкриття

У випадку фотофіксації модуля ШВР, операція розкриття позбавляє зображення від точок та артефактів на поверхні, де знаходиться деталь.

Наступною виконується функція Canny. Canny – один з основних інструментів у OpenCV, дозволяє визначити контури шуканого об’єкта. Функція була винайдена у 1986 р. Джоном Ф. Кенні, та докладно описана у його праці “A computational approach to edge detection” [47]. Функція Canny є алгоритмом із декількома етапами, якими є операції видалення шуму, із застосуванням Гаусівського фільтра із ядром 5x5, визначення інтенсивності градієнту, застосовуючи ядро Собеля (Sobel kernel), та видалення небажаних пікселів, які не становлять границю об’єкта (рис. 3.5) [48].

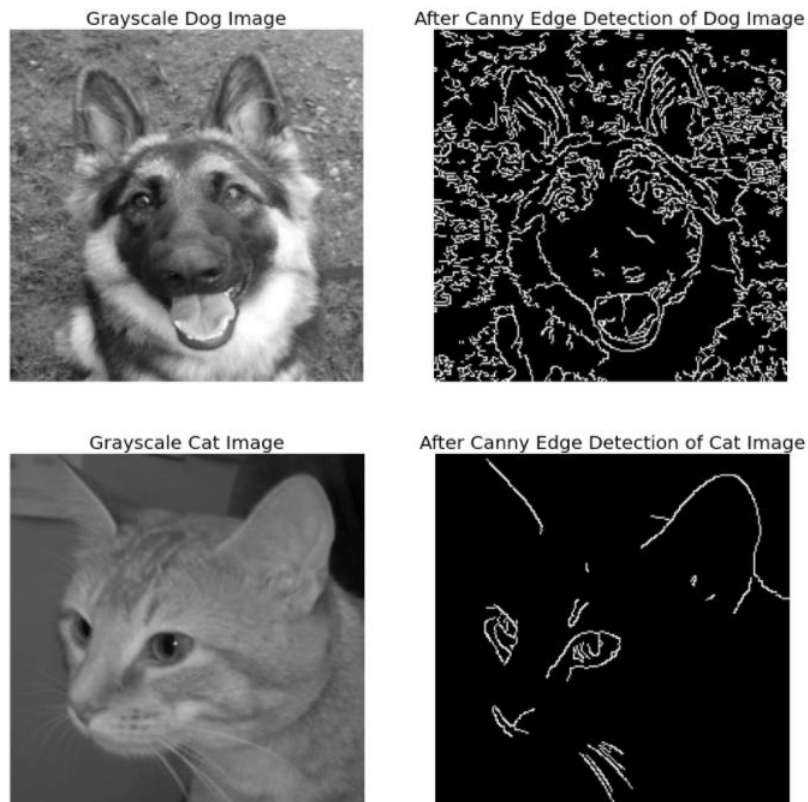


Рисунок 3.5. Використання методу Canny на чорно-білих зображеннях

Останньою функцією оброблення зображення є функція закриття (Closing). Як і функція розкриття, закриття теж складається із базових ерозії та дилатції, однак у закритті вони виконуються у зворотньому порядку. Спочатку дилатція збільшує межі нашого зображення, закриваючи щілини та прогалини у фото об'єкта, після чого ерозія повертає зображення без артефактів всередині об'єкта у попередній розмір (рис. 3.6) [46].



Рисунок 3.6. Операція закриття

Під час оброблення зображення за допомогою ПЗ модуля ШВР над зображенням деталі теж виконуються ці операції. На рис.3.7 показано послідовне перетворення різнокольорового зображення у контурне.

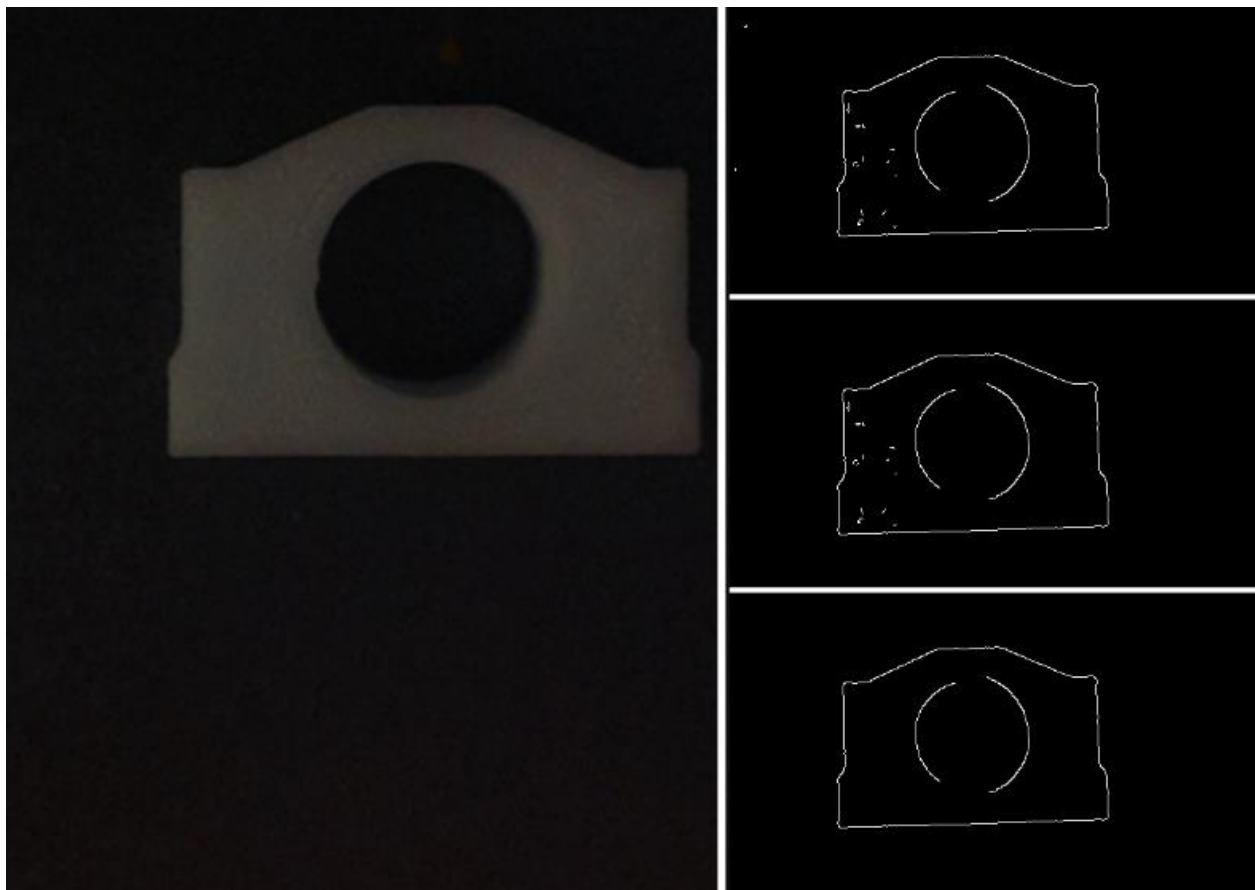


Рисунок 3.7. Перетворення зображення друкованої деталі.

Після виконання перетворень зображення, програма розраховує розміри зображення у пікселях. Для цього застосовується функція `cv2FindContours`, яка знаходить та визначає розміри у пікселях граничної рамки контурів об'єкта. Оскільки у нашому випадку (рис. 3.7) границі нашої деталі уже визначено методами `Canny`, `Opening` та `Closing`, гранична рамка буде застосована якнайточніше.

Після знаходження розмірів граничної рамки у пікселях, необхідно виконати їх перерахунок у міліметри. Для цього, за допомогою об'єкта, точні розміри у міліметрах якого заздалегідь відомі, наприклад, шкала металевої лінійки від 0 до 100мм, необхідно знайти коефіцієнт переводу пікселів у міліметри. На відстані 150 мм камеру було зафіксовано у нерухомому положенні та зображення відцентровано відносно фокусу камери задля зменшення спотворення зображення. Після цього, було застосовано схожі до попередніх методів засоби `OpenCV` для визначення довжини прямої, нанесеної від поділки 0 лінійки до поділки 100. В кінці, було отримано коефіцієнт 7.42, який показує, що на відстані 150мм від камери, 1 міліметр об'єкта відповідає 7.42 пікселям на його зображенні.

Отримавши розміри граничної рамки деталі із функції `cv2FindContours`, виконується перерахунок розмірів у пікселях на розміри у міліметрах. Інформація про виміряні розміри подається у консоль (рис. 3.8) та зберігається у глобальних змінних, що дозволяє автоматизованій системі отримати дані про розміри у будь-який момент. Схожим чином виконується і детекція та обміри отвора підшипника, тільки якщо у детекції габаритної рамки була використана маска прямокутника, то у випадку отвора застосовані маски кола.

```
Press 'c' to capture an image for measurement. Press 'q' to quit.
Capturing and processing the image
Object's sizes are as follows:  33.82749326145552 mm x 22.911051212938006 mm
Image captured and processed
```

Рисунок 3.8. Консоль програмного середовища із отриманими розмірами

Висновок до розділу 3:

1. В розділі було описано процес аналізу та розроблення модуля швидкого вимірювання розмірів.

2. На основі експерименту та розробленої моделі роботи модуля було створено алгоритми роботи модуля та програмного забезпечення, обрано апаратне застосування та створено CAD-модель модуля ШВР.

3. Також, було розроблено програмне забезпечення модуля ШВР, яке виконує детекцію та вимірювання розмірів деталі, яка досліджується.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЄКТУ

У четвертому розділі представлено аналіз та розробку стартап-проєкту «АСК – 3Д Постобробка». Проєктування було виконане спираючись на аналіз моєї системи та огляду схожих розробок у розділах 1 та 2.

4.1. Опис ідеї проєкту

Ідея проєкту полягає у розробці компонентів гнучкої автоматизованої системи контролю процесами постобробки 3Д-друкованих деталей та впровадженні її на довільне виробництво. Система у повному своєму складі розрахована на виробництва малої та середньої потужності, які активно використовують технологію FDM 3D-друку. Окремі модулі цієї системи також можуть стати в нагоді і побутовим користувачам FDM 3D-принтерів. Так, наприклад, модуль ШВМ, який було докладно розглянуто у попередніх розділах, може допомогти при обмірах корпусних деталей складної форми та надати розгорнутий аналіз сканування, що дозволяє зекономити час та витрати у випадку подальшого виявлення браку. У табл. 4.1. зображено зміст ідеї проєкту з наведеними напрямками використання АСК.

Таблиця 4.1. Опис ідеї стартап-проєкту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигода для користувача
Автоматизована система керування процесами постобробки деталей, утворених 3D-друком	Побутове користування	Збільшення швидкості постобробки одиничних деталей
	Автоіндустрія	Можливість замінити серійні деталі із металів такими ж деталями із пластику без втрат продуктивності
	Ливарництво	Точність виявлення недоліків поверхонь ливарних форм
	Медицина	Зменшення часу на переналаштування обладнання під кожну друковану деталь
	Авіоніка	Автоматизація виходу уже

		оброблених ключових деталей без необхідності втручання оператора
--	--	--

Таким чином, маємо можливість імплементувати на підприємстві, що розглядається, автоматизовану систему для допомоги в процесах адитивного виробництва, яка легко інтегрується, є гнучкою та забезпечує не тільки зручність та швидкість користування, а й розширює сферу застосування друкованих деталей, яким, за допомогою розглянутої системи, можна надати додаткових характеристик.

Для оцінки основних характеристик проекту у порівнянні із потенційними конкурентами проводимо наступні дії:

1. Встановлюємо набір техніко-економічних характеристик ідеї;
2. Проводимо аналіз ринку для визначення потенційних товарів/концепцій конкурентів;
3. Наводимо характеристику даного проекту та продукції конкурентів;
4. Проводимо порівняння показників, класифікуючи їх за наступними категоріями:
 - а) Показники з гіршими значеннями ідеї (W - слабкі точки);
 - б) Показники з аналогічними результатами (N - нейтральні точки);
 - с) Показники, де ідея виявляється кращою (S - сильні точки).

Таблиця 4.2. Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№	Техніко економічні характеристики ідеї	Товари/концепції конкурентів				W	N	S
		Мій проєкт	Конкурент 1 Formlabs	Конкурент 2 PostProcess	Конкурент 3 AMT			
1.	Вартість	Середня	Середня	Висока	Висока	-	+	-
2.	Простота	Середня	Висока	Середня	Низька	-	+	-

	використання							
3.	Сумісність з іншим обладнанням	Висока	Низька	Середня	Середня	-	-	+
4.	Гнучкість у розширенні	Висока	Висока	Середня	Низька	-	+	-
5.	Інтуїтивний програмний інтерфейс	Середня	Висока	Середня	Висока	+	-	-
6.	Варіативність постобробки	Середня	Низька	Середня	Низька	-	-	+
7.	Швидкість обробки даних	Середня	Висока	Низька	Середня	-	+	-
8.	Простота інтеграції у виробництво	Висока	Висока	Середня	Середня	-	-	+
9.	Торгова марка	Відсутня	Наявна	Наявна	Наявна	+	-	-

Після проведення порівняльного аналізу отримано висновок про слабкі, нейтральні та сильні сторони ідеї продукту, що розроблюється. Встановлено, що продукт має низку переваг над конкурентами, що дозволить продукту стати конкурентоспроможним під час його виходу на ринок. Ці переваги слушно буде використати при подальшому проєктуванні маркетингової стратегії та позиціонування продукту.

Також, необхідно провести технологічний аудит ідеї, який необхідний для оцінки можливостей проєкту. Результати даного аудиту наведено у табл. 4.3.

Таблиця 4.3. Технологічна здійсненність ідеї проекту

№	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Автоматизація зрізання підтримок деталей	Розробка модуля видалення підтримок, його програмного забезпечення та реалізація інтегрування в систему	Докладно описана, необхідно розробити	Доступні
2	Автоматизація перевірки деталей на відповідність полям допуску	Розробка модуля швидкого вимірювання розмірів, його програмного забезпечення та реалізація інтегрування в систему	Розроблено самостійно	Доступні
3	Автоматизація приведення поверхонь до заданого стану	Розробка модуля нанесення покриття, його програмного забезпечення та реалізація інтегрування в систему	Докладно описана, необхідно розробити	Доступні
4	Автоматизація розпилення захисного покриття на оброблену деталь	Розробка модуля нанесення покриття, його програмного забезпечення та реалізація інтегрування в систему	Докладно описана, необхідно розробити	Доступні
Розроблене окремо програмне забезпечення у складі із іншими модулями утворює єдину систему.				

На підставі аналізу можна зробити висновок, що для повної розробки автоматизованої системи, необхідні технології наявні і знаходяться у вільному доступі. Оскільки використання окремих модулів системи є довільним, в подальшому необхідно лише розробити апаратне та програмне устаткування окремого модуля із додатковою можливістю компонування обраних кінцевим користувачем модулів у єдину систему для забезпечення повної сумісності та гнучкості у процесах налаштування.

Далі буде розглянуто ринкові перспективи, які можливо використати для успішного запуску проєкту. Даний аналіз дасть змогу спланувати напрямки росту та розвитку проєкту, пропозиції конкурентів, запити та вимоги кінцевого споживача, а також потенційні ризики.

Спершу необхідно дослідити та охарактеризувати потенційний ринок даного стартап-проєкту. Результати наведено у табл. 4.4.

Таблиця 4.4. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проєкту

№	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	4 основні компанії, близько 4-6 - другорядні
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	п/а
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Повільний зріст
4	Наявність обмежень на вхід	Патентування розробок та технологій, низький попит
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Сертифікація згідно стандартів ISO, ANSI, EN, ДСТУ
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	24%

Згідно проведених аналізів можна встановити, що не дивлячись на низький попит на готову систему постобробки у кінцевого споживача, динаміка ринку, тим не менш, демонструє повільне зростання, що дає зелене світло для входження проєкту.

Крім того, через новизну та малу вивченість технологій, немає ускладненої процедури сертифікації готового продукту, що значно спрощує «життя» продукту на конкурентному ринку. Враховуючи вищезазначене, у продукту є достатній потенціал виходу на національний та/або міжнародний ринок при використанні ефективної стратегії його розвитку.

У табл. 4.5 наведено оцінку ключових факторів для визначення попиту на продукт. Дані фактори формують поведінку кінцевого користувача відносно нашого продукту та його основні вимоги. В таблиці описано характеристику споживача, надано перелік базових вимог до продукту.

Таблиця 4.5. Характеристика потенційних споживачів стартап-проєкту

№	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Автоматизація постобробки друкованих деталей	Малосерійні виробництва галузей автоіндустрії та ливарництва	Побоювання використання не перевірених технологій	Наявність вагомих результатів впровадження
2	Стан кінцевої друкованої деталі	Галузі ливарництва, медицини, автоматизації, авіоніки без вимог по кількості продукції.	Побоювання використання друкованих деталей на зміну металевим	Результати досліджень друкованих деталей на міцність
3	Інтеграція систем контролю у наявне виробництво	Великі промислові підприємства	Небажання великих змін у виробничих процесах	Простота інтеграції у виробничий процес

З аналізу можна зробити висновок, що первинну цільову аудиторію становлять підприємства інженерних галузей – авіоніки, автомобілебудування, автоматизації,

ливарництва, які займаються переважно одиничним або малосерійним випуском продукції, причому усі ці підприємства впроваджують або уже впровадили технології адитивного виробництва. Звісно, використання даного проєкту не виходить без потенційних загроз та можливостей. В табл. 4.6 та 4.7 наведено перелік факторів загроз та факторів можливостей відповідно, їхній зміст та можливу реакцію компанії.

Таблиця 4.6. Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1.	Ринкова конкуренція	Зростання конкуренції серед компаній, що пропонують схожі рішення	Розробка унікальних характеристик продукту
2.	Запровадження окремих процесів стандартизації	Посилення вимог до змісту продукту та кінцевого виробу	Заміна складових продукту надійнішими компонентами, калібрування програмного забезпечення на зразках
3.	Ланцюги постачання	Нестабільність каналів постачання виробник-споживач	Налагодження кооперації із постачальниками компонентів та транзитними компаніями
4.	Технічні неполадки	Збої у комунікації всередині системи та між системою і виробництвом	Впровадження нормоконтролю системи та регулярного відлагодження програмного забезпечення
5.	Неточність даних	Невірне налаштування обладнання для контролю якості	Тестування та відлагодження обладнання за спеціальними еталонами

Таблиця 4.7. Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1.	Ріст використання адитивних технологій	Підвищення об'єму друкованих деталей у складі кінцевої продукції	Активний маркетинг, розміщення реклами про проєкт
2.	Технічні та наукові виставки	Демонстрація нових можливостей адитивного виробництва	Участь у виставках, демонстрація роботи системи
3.	Лінійність виходу друкованих деталей на виробництві	Зменшення часу на переналадку завдяки виготовленню однієї і тієї ж деталі.	Налагодження системи для зменшення часу операцій та переходів
4.	Інноваційність продуктів	Розробка на замовлення клієнта	Створення персоналізованих рішень за запитами клієнтів
5.	Підтримка готового продукту	Надання кваліфікованих консультацій	Введення служби підтримки з експертами у галузі

Аналіз ринку показав, що він характеризується олігополістичною структурою – ринком керує невелика кількість ключових компаній-гравців. Щодо характеру конкуренції, то вона відбувається в межах однієї галузі (адитивне виробництво). В табл. 4.8 наведено дослідження ринку на предмет конкуренції.

Таблиця 4.8. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Властивості конкурентного середовища	Як проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Тип конкуренції: олігополія	В галузі присутні декілька великих компаній, які контролюють ринок	Розробка стратегії конкурентоспроможності

2. За рівнем конкурентної боротьби: міжнародний	Незначна національна конкуренція з огляду на малу кількість гравців, висока глобальна конкуренція.	Відповідність стандартам якості, представлення результатів роботи на наукових та технічних виставках, конференціях
3. За галузевою ознакою: внутрішньогалузева	Конкуренція між компаніями однієї галузі, які пропонують схожі технології	Пошук унікальних ринкових ніш та спеціалізація
4. Конкуренція за видами товарів: товарно-видова	Продукти різних компаній в цілому виконують однакові функції, але обслуговують різні технології адитивного виробництва	Зосередження на сфері FDM-технологій адитивного виробництва задля укріплення в ніші
5. За характером конкурентних переваг: нецінова	Відбувається конкуренція на рівні якості та функціоналу кінцевого продукту, а не лише за ціною	Ставка на поглиблення функціоналу та забезпечення безвідмовності його роботи
6. За інтенсивністю: марочна	Компанії-конкуренти пропонують подібний продукт	Створення та підтримка власного бренду

На основі проведеного аналізу конкурентного середовища можна зробити висновок, що задля збереження конкурентоспроможного статусу необхідно сфокусуватися на якості кінцевого продукту та поглибленні його функціональних характеристик. Спроба зайняти інші прошарки при недостатній готовності початкового продукту може стати фатальною для конкурентоспроможності проєкту.

Після цього необхідно провести більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі, який буде наведено табл. 4.9. Під час цього аналізу необхідно ідентифікувати основних і потенційних конкурентів, охарактеризувати постачальників та клієнтів, визначити можливі товари-замінники продукту. Оскільки стартап-проєкт системи, що розглядається, перебуває у стадії попереднього проєктування, дані оцінки будуть орієнтовними.

Таблиця 4.9. Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Складові аналізу	На ринку рідко з'являються нові компанії-гравці, які пропонують альтернативні рішення	Існують багато компаній, які пропонують послуги адитивного виробництва та ручної постобробки	Розширений набір апаратного взаємозамінного забезпечення, яке можливо підлаштувати під конкретну мету	Основними клієнтами є мало- та середньопотужні виробництва	Надання переваги ручній постобробці не зважаючи на кількість деталей у партії
Висновки	Через малий попит на схожі системи та недостатню впевненість у продуктивності кінцевого продукту, поява нових конкурентів малоімовірна	Галузь адитивного виробництва має дуже стрімкий розвиток, що потенційно стимулює розробки у даному напрямку	Постачальники не диктують умови роботи на ринку	Клієнти прагнуть отримати точну друковану деталь або партію деталей	Зменшення відсотку автоматизації у процесах адитивного виробництва зменшує привабливість пропозиції

В табл. 4.10 розглянуто та охарактеризовано ключові аспекти, що впливають на конкурентоспроможність продукту.

Таблиця 4.10. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, щороблять фактор для порівняння конкурентних проєктів значущим)
1	Влучність використання	Через велику кількість методів адитивного виробництва (FDM, SLA, SLS тощо) та недостатню кількість відповідних системи постобробки, конкурентоспроможність продукту буде вища, сфокусувавшись попередньо на одному методі
2	Зворотній зв'язок	Технічна підтримка користувачів згідно функціоналу чи неполадок системи
3	Висока якість оброблюваних деталей	Висока якість, здавалося б, крихких пластикових деталей підвищить впевненість у продукті
4	Гнучкість	Можливість гнучкого переналаштування під будь-яку деталь та будь-який тех.процес на підприємстві може збільшити впевненість у продукті
5	Простота в експлуатації	Розробка простого у застосуванні та обслуговуванні апаратного та програмного забезпечення може підвищити привабливість продукту

У табл. 4.11 наведено порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проєкту.

Таблиця 4.11. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проєкту

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали1- 20	Рейтинг товарів-конкурентіву порівнянні з розробкою						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Влучність використання	14						+	
2	Зворотній зв'язок	10				+			
3	Висока якість	12					+		
4	Гнучкість	12					+		
5	Простота в експлуатації	9				+			

Грунтуючись на аналізах, представлених в табл. 4.10 та 4.11, робимо висновок, що успіх системи, що розглядається, буде залежати від декількох ключових факторів конкурентоспроможності. Особливу увагу слід звернути на покращення гнучкості системи та якості деталей, що виходять з постобробки, оскільки це дасть змогу обійти конкурентів та закріпитися на ринку без втрат потенційних клієнтів.

В табл. 4.12 наведено SWOT-аналіз системи, де було визначено її ключові переваги та недоліки, а також можливості та ризики, які надають компанії-конкуренти. На базі даного аналізу можна розробити план виходу стартап-проекту на ринок та його безперешкодне утримання в ньому.

Таблиця 4.12. SWOT-аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: Гнучкість використання обладнання; Висока сумісність; Простота інтеграції в тех.процес.	Слабкі сторони: Складність виконання персоналізованої системи; Наявність деталей з високою вартістю.
Можливості: Спрощення системи завдяки вилученню модулів; Вихід на міжнародний ринок; Розширення функціоналу на нові типи адитивного виробництва; Тренд на автоматизацію виробництва; Збільшення попиту на друковані деталі.	Загрози: Мала впевненість в продукті; Зростання загрози входу в галузь нових конкурентів; Нові технології на ринку; Залежність від стабільності постачальників.

В табл. 4.13 представлено аналіз ринкового впровадження та визначення оптимальної стратегії для ринкової поведінки стартап-проекту.

*Таблиця 4.13. Альтернативи ринкового
впровадження стартап-проєкту*

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Стратегія розповсюдження продукту через участь у конференціях та виставках	Висока – враховуючи популярність технологій адитивного виробництва, виставки та конференції дають змогу презентувати готовий продукт та його роботу потенційним клієнтам	3 – 6 місяців
2	Стратегія партнерства із невеликими 3D-майстернями задля просування продукту	Середня – залежить від необхідності майстерень до випуску серій друкованих деталей	6 – 12 місяців
3	Стратегія партнерства із масштабними виробництвами	Низька/середня – залежить від ступеню впровадження адитивного виробництва у технологічні процеси виготовлення вузлів.	6 – 18 місяців

4.2. Розробка ринкової стратегії та маркетингової програми стартап-проєкту

У цьому пункті буде розглянуто аналіз та розробку ринкової стратегії, що передбачає детальний опис груп цільової аудиторії продукту. Результати даного опису наведено в табл. 4.14

Таблиця 4.14. Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Державні підприємства	Низька	Низький	Не інтенсивна	Складна
2	Приватні підприємства	Середня	Високий	Середня	Середня
3	Приватні особи	Середня	Середній	Не інтенсивна	Легка
Які цільові групи обрано: Під час аналізу потенційних груп споживачів було прийнято рішення сфокусуватися на співпраці з приватними підприємствами та приватними особами.					

Як видно з табл. 4.14 цільовими партнерами було обрано приватні підприємства та приватних осіб. Перші, швидше за все, тільки починають впроваджувати на підприємство технології адитивного виробництва на серійному рівні, але вони не бояться інновацій у цьому напрямку через конкуренцію в їхній галузі, тому готові вкластися в даний продукт. Останні ж навпаки, активно користуються АМ-технологіями, але не поспішають використовувати автоматизовані системи постобробки через одиничність виготовлення виробів.

Після ідентифікації цільових споживачів необхідно розробити базову стратегію розвитку стартап-проекту для виходу на ринок. Результат даної розробки наведено в табл. 4.15.

Таблиця 4.15. Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проєкту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1	Вихід на ринок через партнерство	Фокус на FDM- технологіях адитивного виробництва	Стрімке розповсюдження обраної технології, можливість зручної постобробки усіх популярних матеріалів	Диверсифікація – створення окремих рішень під різні автоматизовані виробництва

Обрана стратегія диверсифікації через різні стадії впровадження АМ-процесів у контексті автоматизованого виробництва серед потенційних споживачів. Ключовими конкурентоспроможними позиціями в даному випадку стануть технологічність, гнучкість та точність системи.

Наступним етапом необхідно виконати вибір стратегії поведінки. Результат наведено в табл. 4.16.

Таблиця 4.16. Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проєкт «першопроходцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
1	Ні	Компанія намагатиметься шукати нових споживачів	Компанія буде зосереджена на пошуку власних рішень, але не виключено запозичення ідей та розробок конкурентів	Стратегія займання й утримання ніші постобробки на ринку FDM АМ- технологій

Із цього аналізу можна побачити, що задля ефективного проникнення на ринок та утримання в ньому ніші, компанія намагатиметься вдосконалити базовий продукт

власними рішеннями, іноді спираючись на уже наявні дослідження та розробки «першопроходців» галузі та сумісних галузей, при цьому не вочевидь копіюючи їх.

Далі необхідно визначити стратегію позиціонування (наведена в табл. 4.17), оскільки вона визначатиме позицію стартап-проєкту на потенційному ринку.

Таблиця 4.17. Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проєкту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проєкту (три ключових)
1	Максимальна подібність обробленої деталі до 3D-моделі, покращення поверхневих характеристик	Стратегія диверсифікації	Менша загальна вартість, зручність та гнучкість впровадження, локальна необізнаність про товари конкурентів	Інновації в постобробці адитивного виробництва Впровадження друкованих деталей у серійне виробництво Підвищення продуктивності та зменшення собівартості

Розроблена ринкова стратегія для даного стартап-проєкту показує, що його основними асоціаціями стануть кінцева якість оброблюваної деталі, інновативність у галузі АМ-виробництва та впровадження серійних технологій 3D-друку.

4.3. Розробка маркетингової програми та бізнес моделі стартап-проєкту

Під час створення маркетингової програми спершу необхідно визначити ключові переваги концепції товару, який отримає споживач. Їх наведено в табл. 4.18.

*Таблиця 4.18. Визначення ключових переваг
концепції потенційного товару*

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Точність оброблення друкованих деталей	Забезпечення точного оброблення, нанесення захисного покриття та надання зворотного зв'язку про стан деталі на усіх стадіях постобробки	Висока точність оброблення та можливість додаткового зворотного зв'язку
2	Зручність експлуатації	Зручний інтерфейс	Зручність у використанні та обслуговуванні
3	Вартість	Нижча вартість в порівнянні з аналогами конкурентів	Збільшення кількості потенційних клієнтів

За допомогою цього аналізу можна побачити головні переваги потенційного товару. Видно, що основні потреби споживачів першочергово зосереджені на отриманні точного та якісного результату оброблення друкованих деталей за низькою вартістю системи. При цьому значним бонусом є зручність у експлуатації даної системи. Завдяки забезпеченню цих характеристик, стартап-проект, який розглядається, здатен відповідати основним вимогам клієнтів, що позитивно впливає на його стан на ринку.

В табл. 4.19 наведено опис трирівневої маркетингової моделі товару.

Таблиця 4.19. Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Автоматизована система керування процесами постобробки деталей, утворених 3D-друком		
II. Товар реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	Якість вихідної деталі	Нм	Тх
	Швидкість постобробки	Нм	Тх
	Вартість системи	М	Е

	Зворотній зв'язок	Нм	Ор
	Надійність роботи	М	Тл
	Якість: згідно ДСТУ 2752-94		
	Пакування: Окреме пакування модулів у ящики для безпечного транспортування та готовності до роботи «з коробки»		
	Марка: АСК – 3D Постобробка		
III. Товар із підкріпленням	До продажу: консультація з замовником, ознайомлення з процесом роботи, калібрування		
	Після продажу: технічна підтримка, оновлення, розширення та спрощення функціоналу, адаптація системи під специфічні вимоги замовника.		
Товар буде захищено за допомогою авторського права .			

Дана трирівнева модель дозволяє отримати загальні відомості про ідею проєкту, його головні властивості, уявлення про реальне виконання проєкту, забезпечення підтримки життєдіяльності товару і захист товару від копіювання. Аналіз даної моделі показує, що товар у його задумі відповідатиме реальному продукту, який отримає клієнт.

В табл. 4.20 наведено результати розроблення цінової політики, яка дозволить визначити межі цін на товар у порівнянні із товарами конкурентів.

Таблиця 4.20. Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1	Від 120 тис. грн	190 тис. – 458 тис. грн	Високий	30 тис. – 45 тис. грн

В результаті аналізу цін товарів-конкурентів було визначено адекватні цінові межі товару, щоб він мав можливість конкурувати із товарами-аналогами та

товарами-замінниками. при цьому, товар даної цінової категорії буде доступнішим для більшої кількості потенційних споживачів.

Після визначення цінової політики необхідно визначити та сформувати систему збуту. Результати наведено в табл. 4.21

Таблиця 4.21. Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
	Приватні підприємства та приватні особи, які займаються FDM 3D-друком у малих та середніх масштабах (не одиничне виробництво)	Поставка готового до встановлення обладнання, навчання роботи, технічне обслуговування	Ринок України, міжнародні ринки	Прямий продаж

Дана система збуту показує напрямки, їх глибину, функції та специфіку каналів постачання готової системи або окремих модулів до клієнта. Така система дозволить компанії ефективно постачати товар клієнту, паралельно пропонуючи технічну підтримку та навчання роботи за обладнанням, що позитивно вплине на зацікавленість інших потенційних споживачів.

Останньою складовою маркетингової програми є розробка концепції маркетингових комунікацій. Головна її мета – за допомогою визначених попередньо основи для позиціювання та специфіку поведінки клієнтів розробити стратегію залучення потенційних споживачів.

Таблиця 4.22. Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
	Бажання виконувати серійні замовлення, пошук автоматизованих рішень для його реалізації	Конференції, наукові та технічні виставки, онлайн-маркетплейси, таргетована реклама	Швидкість, точність, економічність	Переконати потенційного споживача про переваги автоматизованої постобробки	Акцент уваги на перевагах автоматизації АМ-процесів – швидкість, надійність, точність за невелику ціну без втрат якості

Висновком виконання пункту 5 стала готова маркетингова програма, яка включає концепції товару, збуту, просування та попередній аналіз можливостей ціноутворення.

Насамкінець, стартап-проект потребує розроблення бізнес-моделі для визначення ключових точок проєкту: партнерів, виду діяльності, ресурсів тощо. Результати наведено в табл. 4.23.

Таблиця 4.23 – Бізнес-модель

Ключові партнери	Ключові види діяльності	Ціннісна пропозиція	Відносини з клієнтами	Сегменти користувачів
Приватні підприємства, приватні особи	Виготовлення, встановлення та налагодження системи або окремих модулів	Можливість швидкої та автоматизованої постобробки друкованих деталей із можливостями	Технічна підтримка, гарантійне обслуговування системи.	Малі та середні підприємства галузей автомобілебудування, автоматизації, авіоніки, медицини, ливарництва, які

	Ключові ресурси програмне забезпечення, апаратне забезпечення	зворотного зв'язку про наявність браку, нанесенням захисних покриттів та покращенню поверхневих характеристик деталі	Канали збуту Власний сайт, онлайн-маркетплейси, конференції, наукові та технічні семінари та виставки.	використовують АМ-технології.
Структура витрат Витрати на виготовлення, витрати на технічне обслуговування, витрати на підтримку сайту та рекламу.		Джерела доходів Продаж продукту, технічна підтримка.		

Отже, дана бізнес-модель допоможе створити гарний напрямок розвитку зв'язків між нашою компанією й потенційними клієнтами. Завдяки цій моделі компанія буде мати можливість залучати більше партнерів, розширювати канали продажів, забезпечити ефективність та безперебійність постачання даної системи покупцям, що дозволить не тільки задовольняти нагальні потреби ринку, а й збільшувати свій статус на ринку, що матиме позитивний вплив на залучення фінансів.

Висновки до розділу 4

Метою розділу 4 стало проектування та розробка стартап-проекту для розробки «Автоматизована система контролю процесами постобробки деталей, утворених 3D-друком». Підбиваючи підсумки виконання розділу, можна сказати, що, не дивлячись на невеликий попит на системи схожого типу, входження проекту на ринок матиме високий потенціал. Аналіз ринку показав, що динаміка ринку демонструє повільне зростання, що позитивно впливає на входження проекту в ринкове середовище. Крім того, компанії, які починають активніше застосовувати технології адитивного виробництва, приводячи їх у малосерійний обсяг, будуть мати вищу готовність до використання даного продукту. Враховуючи вищезазначене, у стартап-проекті є достатній потенціал виходу на національний та/або міжнародний ринок при використанні ефективної стратегії його розвитку.

Ключовими факторами успіху проекту є використання сучасних технологій та здатність забезпечити точність постобробки, яка не поступається, а місцями й перевершує існуючі аналоги. За результатами порівняння сильних і слабких сторін проекту, а також SWOT-аналізу, було визначено, що стартап-проект має сильні конкурентні переваги, які дозволяють йому зайняти перспективну нішу в галузі адитивного виробництва методом FDM. Крім того, при подальшому розвитку сильних сторін, цей проект матиме сили обійти потенційних конкурентів.

Для проекту було проведено аналіз та розроблено стратегію ринкової поведінки. Було проведено аналіз потенційних користувачів даною системою та визначено пріоритетних клієнтів – приватні підприємства та приватні особи. Для виходу проекту на ринок було розроблено стратегії розвитку та конкурентної поведінки, які допоможуть проекту закріпитися на ринку.

Підсумовуючи, проект має великий потенціал до запровадження у автоматизованих підприємствах, які впроваджують або уже користуються технологіями FDM 3D-друку для виконання малосерійних або серійних замовлень. Низький рівень обізнаності про товари конкурентів, перспективи зростання галузі та попит на якісні друковані товари дозволяють проекту закріпитися в ніші ринку, а покращення його переваг та вчасне і влучне усунення недоліків роблять подальше

впровадження ще більш успішним.

ВИСНОВКИ ДО ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ

1. В дипломній роботі проаналізовано метод FDM 3D-друку та процеси постобробки деталей, утворених цим методом.
2. Проведено аналітичний огляд наукових тез, наукових статей, праць та існуючих технічних рішень з напрямку FDM 3D-друку, забезпечення якості друкованої деталі, постобробки друкованих деталей та автоматизації процесів постобробки.
3. Визначено актуальність розроблення автоматизованої системи керування процесами постобробки друкованих деталей на основі актуальності та використання АМ-технологій у різних галузях.
4. Проведено аналіз похибок поверхонь друкованих деталей та порівняно різні кінематики 3D-принтерів, що існують на ринку, що дало змогу визначити оптимальний підхід до розроблення експерименту та друку тестових зразків.
5. Розроблено схему та технологічний процес автоматизованої системи керування. Покроково описано процес її роботи, охарактеризовано модулі системи. Отримано завдання на розроблення модуля ШВМ. Проведено докладний опис цього модуля, визначено принцип його роботи, наведено посилання на схожі дослідження.
6. Проведено експеримент із використанням тестових зразків, надрукованих на 3D-принтері із обраною попередньо кінематикою CoreXY для визначення вхідних та вихідних параметрів, а також залежностей між ними. Це дало змогу розробити модель роботи модуля ШВР, яка застосована під час розроблення апаратної та програмної частин модуля.
7. На основі отриманих результатів проведення експерименту, взявши за основу розроблену модель, створено блок-схему алгоритму роботи, яка стала основою для розроблення апаратної та програмної частин модуля ШВР.
8. Після розроблення та отримання готового програмного забезпечення модуля, дане ПЗ було протестовано на експериментальних зразках, використаних під

час проведення експериментального дослідження. Порівняно результати, отримані внаслідок ручного вимірювання поверхонь та програмного.

9. На основі попередніх досліджень проведено аналіз та розроблення стартап-проєкту «АСК – 3Д Постобробка». Проєктування було виконане, спираючись на аналіз системи та огляду схожих розробок, наведених у розділах 1 та 2.

Список використаних джерел

- [1] Sauramo H., *The proliferation of a new market disruptive innovation: case personal 3D printers*. Master's Degree, Aalto, Aalto University School of Business, 2014.
- [2] Esmaeilian B., Behdad S., Wang B., *The evolution and future of manufacturing: A review*. Режим доступу: URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2016.03.001>
- [3] LinkedIn, *What are the most important 3D printing automation innovations*. Стаття. URL: <https://www.linkedin.com/advice/0/what-most-important-3d-printing-automation-innovations#post-processing-automation>
- [4] SolidPrint3D, *Post-Processing 3D Prints: Manual vs Automated Finishing*. Стаття. URL: <https://www.solidprint3d.co.uk/post-processing-3d-prints-manual-automated/>
- [5] Crump S. S., Stratasys Inc. *Apparatus and method for creating three-dimensional objects*. United States patent US 5121329. 1992 Jun 09.
- [6] Y. Zhuk, T. Klotchko, «Comparison of 3D-printed parts' quality using printers with “CoreXY” and “DELTA” kinematics», *Bull. Kyiv Polytech. Inst. Ser. Instrum. Mak.*, вип. 68(2), 2024.
- [7] LinkedIn, *Future Trends in Post-Processing Techniques for 3D Printing*. Стаття. URL: https://www.linkedin.com/pulse/future-trends-post-processing-techniques-3d-printing-v13dprinting-m94fc?trk=article-ssr-frontend-pulse_more-articles_related-content-card
- [8] S. K. Papurelli, S. S. Desai, “A Comprehensive Review of Additive Manufacturing (3D Printing): Processes, Applications and Future Potential”, *American Journal of Applied Sciences*, 244-272, 2019.
- [9] Xometry, *10 Applications and Examples of 3D Printing Uses*, Стаття. URL: <https://www.xometry.com/resources/3d-printing/applications-of-3d-printing/>
- [10] Raise3D, *3D Printing Applications: 12 Industries and Examples*, Стаття. URL: <https://www.raise3d.com/blog/3d-printing-applications/>
- [11] AMFG, *Industrial Applications of 3D Printing*, Стаття. URL: <https://amfg.ai/industrial-applications-of-3d-printing-the-ultimate-guide/>

- [12] In3DTec, *The Future of Automotive Parts*, Стаття, URL: <https://www.in3dtec.com/the-future-of-automotive-parts-how-3d-printing-is-transforming-the-industry/>
- [13] Qian Y., Hanhua D., Jin S., Jianhua H., Bo S., Qingsong W., Yusheng S., A Review of 3D Printing Technology for Medical Applications, Режим доступу: URL: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.07.021>
- [14] 3DWithUs, *3D Printing in Medicine – Applications in Healthcare*, Стаття. URL: <https://3dwithus.com/3d-printing-in-medicine>
- [15] AnkerMake, *3D Printer Over Extrusion*, Стаття. URL: <https://www.ankermake.com/eu-en/blogs/printing-guides/3d-printer-over-extrusion>
- [16] 3Dnatives, *What Is Over-Extrusion and How Can It Be Avoided?* Стаття, URL: <https://www.3dnatives.com/en/what-is-over-extrusion-1407234/>
- [17] Wevolver, *How to Fix Under Extrusion: Maintenance and Print Settings*, Стаття, URL: <https://www.wevolver.com/article/under-extrusion>
- [18] BCN3D, *How to fix Underextrusion*, Стаття, URL: <https://support.bcn3d.com/knowledge/underextrusion>
- [19] Simplify3D, *Layer Separation and Splitting*, Стаття, URL: <https://www.simplify3d.com/resources/print-quality-troubleshooting/layer-separation-and-splitting/>
- [20] All3DP, *3D Print Layer Separation: 8 Tips to Avoid Delamination*, Стаття, URL: <https://all3dp.com/2/3d-print-delamination-tips-tricks-to-avoid-layer-separation/>
- [21] Mathew, Amal & Kishore, S Ram & Tomy, Anchil & Sugavaneswaran, Manivannan & Scholz, Steffen & Elkaseer, Ahmed & Wilson, Vincent & A, John Rajan. (2023). Vapour polishing of fused deposition modelling (FDM) parts: a critical review of different techniques, and subsequent surface finish and mechanical properties of the post-processed 3D-printed parts. *Progress in Additive Manufacturing*. 8. 1-18. 10.1007/s40964-022-00391-7.
- [22] AinMaidin N, Rahman MHA, Ahmad MN, Osman MH, Wahid MK, Firdaus MS, Halyani MY, Razali MZA (2018) A prototype development of anti-hunchback device. *J Mech Eng SI* 5(1):192–209

- [23] Hossain MS, Espalin D, Ramos J, Perez M, Wicker R (2014) “Improved mechanical properties of fused deposition modeling manufactured parts through build parameter modifications”. *J Manuf Sci Eng* 136(6):061002
- [24] Lee CS, Kim SG, Kim HJ, Ahn S-H (2007) Measurement of anisotropic compressive strength of rapid prototyping parts. *J Mater Process Technol* 187:627–630
- [25] Sood AK, Ohdar RK, Mahapatra SS (2009) Improving dimensional accuracy of fused deposition modelling processed part using grey Taguchi method. *Mater Design* 30(10):4243–4252
- [26] Upcraft S, Fletcher R (2003) The rapid prototyping technologies. *Assembly Autom* 23(4):318–330
- [27] Mohamed, Omar A., Syed H. Masood, and Jahar L. Bhowmik. "Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects." *Advances in manufacturing* 3 (2015): 42-53.
- [28] Dey, Arup, and Nita Yodo. "A systematic survey of FDM process parameter optimization and their influence on part characteristics." *Journal of Manufacturing and Materials Processing* 3.3 (2019): 64.
- [29] Top3DShop, *3D Printers with Different Kinematics: Comparison, Advantages and Disadvantages*, Стаття, URL: <https://top3dshop.com/blog/3d-printer-kinematics-explained>
- [30] Fargo3DPrinting, *How to Choose Between Cartesian and Delta 3D Printers*, Стаття. URL: <https://www.fargo3dprinting.com/choose-cartesian-delta-3d-printers/>
- [31] Laivunas L., Vytautas G., Research of dimensional accuracy and surface quality dependency on printing speed of FDM 3D printed parts. Master’s Final Degree Project, Kaunas, 2019
- [32] 3DDistributed, *CoreXY Kinematics*, Стаття. URL: <https://3ddistributed.com/corexy-3d-printer/corexy-kinematics/>
- [33] 3ders, *Measuring 3D objects using only a camera and video projector*, Стаття. URL: <http://www.3ders.org/articles/20120815-measuring-3d-objects-using-only-a-camera-and-video-projector.html>

[34] Instructables, *How to Scan Objects Into 3D Models W/ Camera for Free*, Стаття. URL: <https://www.instructables.com/How-to-Scan-Objects-Into-3D-Models-W-Camera-for-Fr/>

[35] Nedev, Svetlozar & Ivanova, Vladislava. (2006). Web camera as a measuring tool in the undergraduate physics laboratory. EUROPEAN JOURNAL OF PHYSICS Eur. J. Phys. 27. 1213-1219. 10.1088/0143-0807/27/5/020.

[36] OctoPrint, Програмне Web-середовище. URL: <https://octoprint.org/>

[37] XOmetry, *Surface Roughness In 3D Printing*, Стаття. URL: <https://xometry.pro/en-eu/articles/3d-printing-surface-roughness/>

[38] Krishna M. A., Pritish S., Dinesh B., Prairit S., Harshal V., Ritam V., "Analyzing the Impact of Print Parameters on Dimensional Variation of ABS specimens printed using Fused Deposition Modelling (FDM)", Sensors International, Volume 3, 2022, 100149, ISSN 2666-3511, Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.sintl.2021.100149>

[39] Brydson J. A., "Flow properties of polymer melts", Godwin in association with the Plastics and Rubber Institute 2nd ed, 1981, Режим доступу: <https://cir.nii.ac.jp/crid/1130282272052675200>

[40] Filament2Print, *Shrinkage of parts in 3D printing and Warping*, Стаття. URL: <https://filament2print.com/en/blog/warping-contractions-3d-printing>

[41] Raspberry Pi, "Raspberry Pi 5", *Datasheet*, Веб-сторінка. URL: <https://datasheets.raspberrypi.com/rpi5/raspberry-pi-5-product-brief.pdf>

[42] "TB6600 Stepper Motor Drive", *Technical Specification*, Веб-сторінка. URL: <https://makerhardware.net/knowledge-base/electronics/tb6600-stepper-motor-driver/>

[43] "NEMA17 17HS4023", *Technical Specification*, Веб-сторінка. URL: https://www.laskakit.cz/user/related_files/73231_1624_ps_1199sm-17hs4023-etc.pdf

[44] Raspberry Pi, "Raspberry Pi Camera Module 3 Standard", *Datasheet*, Веб-сторінка. URL: <https://datasheets.raspberrypi.com/camera/camera-module-3-product-brief.pdf>

[45] MeanWell, "Power Supply24 V 350 W", *Technical Specification*, Веб-сторінка. URL: <https://www.makerstore.com.au/product/power-supply-24v-350w/>

[46] OpenCV, Morphological Transformations, *Library Documentation*, Веб-сторінка. URL: https://docs.opencv.org/4.x/d9/d61/tutorial_py_morphological_ops.html

[47] J Canny. 1986. A Computational Approach to Edge Detection. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 8, 6 (June 1986), 679–698. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.1986.4767851>

[48] OpenCV, Canny Edge Detection, *Library Documentation*, Веб-сторінка. URL: https://docs.opencv.org/4.x/da/d22/tutorial_py_canny.html

[49] Жук Я. Б., Ключко Т. Р. Дослідження впливу барвника на механічні властивості термопластику PLA в технології FDM 3D-друку / Я. Б. Жук., Т. Р. Ключко // Збірник наукових праць XVII Науково-практична конференція для студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування», 14-15 травня 2024 р. м. Київ, - К.: К.: ПБФ, КПП ім. Ігоря Сікорського, Центр учбової літератури. – 2024. – С. 113 – 116.

[50] Гавриш, О. А., Бояринова К. О., Копішинська К. О. Розробка стартап проектів. Конспект лекцій: навчальний посібник для студентів спеціальностей 151 – «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» та 152 – «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»; КПП ім. Ігоря Сікорського. Електронні текстові данні (1 файл: 2,88 Мбайт). Київ : КПП ім. Ігоря Сікорського, 2019. 188 с. URL: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/29447>

[51] Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс]: Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 28 с.

[52] Жук Я. Б., Ключко Т. Р. Автоматизована система керування процесами постобробки деталей, утворених 3D-друком / Я. Б. Жук, Т. Р. Ключко // XX Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених “Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні”, 04-05 грудня 2024 р. – К.: ПБФ, КПП ім. Ігоря Сікорського. – 2024. – С. 92 - 97

Додатки

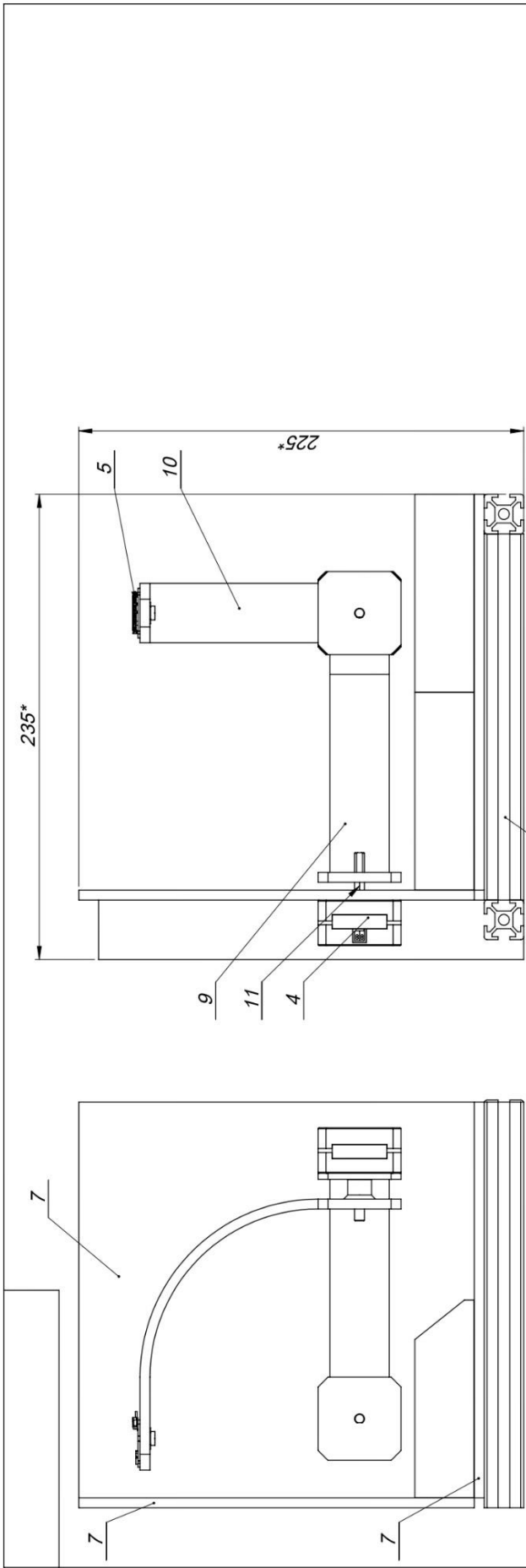
ДОДАТОК 1.
КРЕСЛЕНИК ТЕСТОВОГО ЗРАЗКА.

Перв. застосує.		Довід. №			
Підпис та дата		Підпис та дата			
Інв. № дубл.		Інв. №			
Взам. інв. №		Взам. інв. №			
Підпис та дата		Підпис та дата			
Інв. № ориг.		Інв. №			

1. Невказані розміри згідно 3D-моделі
2. Невказані відхилення згідно EN 22768-1
3. Відхилення внаслідок теплової усадки термопластику: +0, -0.9%

Змн.Арк.	№ докум.	Підп.	Дата	ЗРАЗОК ТЕСТОВИЙ	Літ.	Маса	Масштаб
Розроб.	Жук Я. Б.		18.11.2024				2:1
Перев.	Клочко Т. Р.						
Т.контр.							
Нач. КБ							
Н.контр.				Термопластик Hyper-ABS	Аркуш	Аркушів 1	
Утв.	Клочко Т. Р.				ПБФ, КПІ		

ДОДАТОК 2.
КРЕСЛЕНИК СКЛАДАЛЬНОЇ ОДИНИЦІ ТЕСТОВОГО МОДУЛЯ ШВР



*Розміри для довідок

- 1. Компоненти 2 та 3 не показано, знаходяться поза складальною одиницею
- 2. Кріпильні елементи не показано

Bill of Materials				
№	Назва	Кількість, од		
1	Блок живлення MeanWell	1		
2	МК Raspberry Pi 5	1		
3	Драйвер крокового двигуна TB6600	2		
4	Кроковий двигун NEMA 17	2		
5	Камера Pi Camera 3	1		
6	Рама модуля нижня	1		
7	Облицювання	3		
8	Стенд деталі	2		
9	Арка зовнішня	1		
10	Арка внутрішня	1		
11	Муфта перехідна	2		
Змн.Арк.	№ докум.	Підп.	Дата	Літ.
Розроб.	Жук Я. Б.		06.12.2024	Маса
Перев.	Клочко Т. Р.			Масштаб
Т.контр.				1:2
Модуль швидкого вимірювання розмірів - ескізний проєкт Кресленник складальний				Аркуш
Згідно матеріалів деталей				Аркушів 1
Н.контр.				ПБФ, КПІ
Утв.	Клочко Т. Р.			Формат А3

Інв. № опр.	Підпис та дата	Взам. інв. №	Інв. № дубл.	Підпис та дата
-------------	----------------	--------------	--------------	----------------

АСЕМ

Копіював

ДОДАТОК 3.
ПРОГРАМНИЙ КОД СЕГМЕНТУ ОБМІРУ РОЗМІРІВ МОДУЛЯ ШВР

```

import cv2
import numpy as np
from picamera2 import Picamera2, Preview
import time

# Функція обробки зображення
def process(image, roi=None):
    if roi:
        x_start, y_start, x_end, y_end = roi
        img = image[y_start:y_end, x_start:x_end]

    # Знаходження границь об'єкту
    gray = cv2.cvtColor(img, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
    kernel = cv2.getStructuringElement(cv2.MORPH_RECT, (5, 5))
    opening = cv2.morphologyEx(gray, cv2.MORPH_OPEN, kernel)
    edges = cv2.Canny(gray, 50, 150) #Edge detection
    closing = cv2.morphologyEx(edges, cv2.MORPH_CLOSE, kernel)

    # Find contours
    contours, _ = cv2.findContours(edges_cleaned, cv2.RETR_EXTERNAL,
cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)

    pixel_per_mm = 7.42
    for contour in contours:
        x, y, w, h = cv2.boundingRect(contour)
        if 20 < w < 50:
            reference_pixels = w
            cv2.rectangle(img, (x, y), (x + w, y + h), (0, 255, 0), 2)
            break
    for contour in contours:
        ((x, y), radius) = cv2.minEnclosingCircle(contour)

```

```

circularity_threshold = 0.85
contour_area = cv2.contourArea(contour)
circle_area = np.pi * (radius ** 2)
circularity = contour_area / circle_area

```

```

if circularity > circularity_threshold:

```

```

    diam_mm = (2 * radius) / pixel_per_mm

```

```

    center = (int(x), int(y))

```

```

    radius_int = int(radius)

```

```

    cv2.circle(img, center, radius_int, (0, 0, 255), 2)

```

```

    cv2.putText(img, f"Діаметр: {diameter_mm:.1f} mm", (int(x - radius), int(y -
radius - 10)),

```

```

    cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX, 0.5, (0, 0, 255), 2)

```

```

else:

```

```

    x, y, w, h = cv2.boundingRect(contour)

```

```

    width_mm = w / pixel_per_mm

```

```

    height_mm = h / pixel_per_mm

```

```

    cv2.rectangle(image, (x, y), (x + w, y + h), (255, 0, 0), 2)

```

```

    cv2.putText(image, f"{width_mm:.1f} mm x {height_mm:.1f} mm", (x, y - 10),

```

```

    cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX, 0.5, (255, 0, 0), 2)

```

```

    print("Об'єкт має наступні габарити: ", width_mm, "mm x", height_mm, "mm")

```

```

return img

```

```

picam2 = Picamera2() # Ініціалізація камери

```

```

picam2.configure(picam2.create_preview_configuration())

```

```

picam2.start()

```

```

roi_x_start, roi_y_start = 100, 100 # Визначення зони інтересу

```

```

roi_x_end, roi_y_end = 600, 500

```

```

print("Натисніть 'с' для початку вимірювання.")

```

```
while True:
```

```
    frame = picam2.capture_array()
```

```
    cv2.rectangle(frame, (roi_x_start, roi_y_start), (roi_x_end, roi_y_end), (0, 255, 0), 2)
```

```
    cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX, 0.6, (0, 255, 0), 2)
```

```
    cv2.imshow("Відеозображення", frame)
```

```
    picam2.set_controls({"AfMode": 1, "AfTrigger": 0})
```

```
    key = cv2.waitKey(1) & 0xFF
```

```
    if key == ord('c'): # Фокусування і фотофіксація
```

```
        picam2.set_controls({"AfTrigger": 1})
```

```
        time.sleep(1)
```

```
        print("Обробка зображення")
```

```
        frame = picam2.capture_array()
```

```
        roi = (roi_x_start, roi_y_start, roi_x_end, roi_y_end)
```

```
        processed_image = process(frame, roi=roi)
```

```
        print("Об'єкт виміряно")
```

```
        cv2.waitKey(0)
```

```
        break
```

```
cv2.destroyAllWindows()
```

```
picam2.stop()
```