

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Факультет робототехніки та приладобудування
Кафедра комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем

До захисту допущено:
Завідувач кафедри
_____ Надія БУРАУ
«__» _____ 2026 р.

**Дипломна робота
на здобуття ступеня бакалавра
за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно інтегровані системи та
технології в приладобудуванні»
спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
на тему: «Оптико-електронна система контролю процесу друку в 3D
принтері»**

Виконав :

студент 4 курсу, групи ПО-21

Дьорін Дмитро Дмитрович _____

Керівник:

Проф., д.т.н.,

Микитенко Володимир Іванович _____

Рецензент:

Проф., д.т.н.,

Туз Юліан Михайлович _____

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.

Студент _____

Київ – 2026

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»**

Інститут (факультет) Робототехніки та приладобудування
(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем
(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Освітньо-професійна програма Комп'ютерно-інтегровані системи та технології
в приладобудуванні
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

Надія БУРАУ
« » 2026 р.

ЗАВДАННЯ
на дипломну роботу студенту
Дьоріну Дмитру Дмитровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дипломної роботи Оптично-електронна система контролю процесу
друку в 3D принтері

Науковий керівник роботи Микитенко Володимир Іванович, д.т.н., професор,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від « » 2026 р. №

2. Термін подання студентом роботи «10» червня 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи:

1. В роботі мають бути розглянуті принципи створення деталей шляхом пошарового нанесення матеріалу та засоби технічної реалізації цих принципів.
2. Спосіб створення деталей - безперервний або конвеєрний друк.
3. Розроблювальний технічний засіб - програмно-апаратний комплекс контролю процесу пошарового формування виробу.
4. Склад програмно-апаратного комплексу контролю - телевізійна камера з блоком підсвічування, програмне забезпечення обробки сигналу камери.
5. Для конструювання оптично-електронної системи використати CAD-середовище SolidWorks.

4. Зміст роботи Вступ. 1. Огляд літературних джерел за темою роботи і обґрунтування способу підвищення точності та автоматизації процесу 3D-друку. 2. Вибір елементної бази оптично-електронної системи. 3. Енергетичний розрахунок. 4. Розрахунок точності. 5. Програмне забезпечення обробки сигналу камери. 6. Пропозиції щодо конструктивної реалізації оптично-електронної системи. 7. Результати тестування програмного забезпечення та апаратної частини системи. Висновки

5. Перелік ілюстративного та графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) демонстраційний матеріал представлений у форматі презентації PowerPoint (*.ppt)

6. Дата видачі завдання 15.04.2026

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Затвердження теми роботи	01.04.2026	
2.	Огляд літературних джерел за темою роботи	11.05.2026	
3.	Обґрунтування технічного рішення системи	13.05.2026	
4.	Розроблення функціональної схеми оптично-електронної системи	18.05.2026	
5.	Енергетичний розрахунок, розрахунок точності	21.05.2026	
6.	Розроблення конструкції оптично-електронної системи	28.05.2026	
7.	Розроблення програмного забезпечення	28.05.2026	
8.	Тестування розробленого програмно-апаратного комплексу	03.06.2026	
9.	Оформлення пояснювальної записки	04.06.2026	
10	Попередній захист	06.06.2026	
11	Оформлення презентації	10.06.2026	
12	Захист	16.06.2026	

Студент

(підпис)

Д. Д. Дьорін

(ініціали, прізвище)

Керівник дипломного проекту

(підпис)

В. І. Микитенко

(ініціали, прізвище)

АНОТАЦІЯ

У дипломному проєкті розглянуто питання розробки та модернізації оптично-електронної системи контролю процесу друку в 3D-принтері. Робота присвячена підвищенню точності, стабільності та автоматизації адитивного виробництва шляхом впровадження системи машинного зору та цифрової обробки зображень у процес пошарового формування виробу.

У першому розділі проведено аналіз сучасних адитивних технологій та конструкцій 3D-принтерів, що використовуються в автомобільній, медичній, аерокосмічній, будівельній та ювелірній галузях. Розглянуто особливості технології FDM-друку, існуючі методи контролю процесу друку та сучасні підходи до автоматизації адитивного виробництва. Проведено аналіз оптично-електронних систем контролю та визначено основні недоліки існуючих рішень.

У другому розділі виконано розрахунок параметрів оптично-електронної системи контролю. Розроблено математичну модель системи, визначено параметри камери, поля зору, фокусної відстані та просторової роздільної здатності. Проведено розрахунок освітленості робочої області, параметрів активного LED-освітлення, експозиції камери та співвідношення сигнал/шум. Також було проаналізовано існуючий прототип системи контролю та сформовано вимоги до модернізованої конструкції.

У третьому розділі виконано конструктивну розробку вузла оптично-електронної системи контролю з використанням CAD-середовища SolidWorks. Розроблено конструкцію кріплення відеомодуля, систему активного освітлення та елементи корпусу. Виконано моделювання деталей, проведено аналіз технологічності конструкції та розроблено комплект конструкторської документації. Також реалізовано програмне забезпечення системи контролю на базі мови C# та бібліотеки Emgu CV для автоматизованої обробки зображень і виявлення дефектів друку.

У роботі проведено тестування програмного забезпечення та дослідження ефективності системи контролю при різних параметрах друку. Отримані результати підтвердили можливість автоматичного виявлення дефектів у режимі реального часу, зменшення кількості браку та підвищення якості виготовлення деталей.

Розроблена система відповідає сучасним вимогам автоматизації виробництва, комп'ютерно-інтегрованих технологій та концепції Industry 4.0 і може бути використана в навчальних лабораторіях, дослідницьких комплексах та малосерійному виробництві.

Ключові слова: 3D-принтер, адитивні технології, оптично-електронна система, комп'ютерний зір, цифрова обробка зображень, автоматизація, машинний зір, FDM-друк, контроль якості, CAD-моделювання.

The diploma project considers the development and modernization of an optical-electronic monitoring system for the 3D printing process. The work is aimed at improving the accuracy, stability, and automation of additive manufacturing through the implementation of a machine vision system and digital image processing during the layer-by-layer formation of a product.

The first chapter presents an analysis of modern additive technologies and 3D printer designs used in the automotive, medical, aerospace, construction, and jewelry industries. The features of FDM printing technology, existing methods of print process monitoring, and modern approaches to the automation of additive manufacturing are considered. Optical-electronic monitoring systems were analyzed and the main disadvantages of existing solutions were identified.

The second chapter includes calculations of the parameters of the optical-electronic monitoring system. A mathematical model of the system was developed, and the parameters of the camera, field of view, focal length, and spatial resolution were determined. Calculations of the working area illumination, active LED lighting parameters, camera exposure, and signal-to-noise ratio were performed. An existing prototype of the monitoring system was also analyzed, and the requirements for the modern construction were formulated.

In the third chapter, the structural design of the optical-electronic monitoring unit was developed using SolidWorks CAD software. The design of the video module mounting system, active lighting system, and housing elements was created. The parts were modeled, the manufacturability of the structure was analyzed, and a set of engineering documentation was developed. Software for the monitoring system was also implemented using the C# programming language and the Emgu CV library for automated image processing and print defect detection.

The work includes software testing and research on the effectiveness of the monitoring system under various printing conditions. The obtained results confirmed the possibility of automatic defect detection in real time, reduction of defective products, and improvement of the quality of manufactured parts.

The developed system meets modern requirements for manufacturing automation, computer-integrated technologies, and the Industry 4.0 concept, and can be used in educational laboratories, research complexes, and small-scale production.

Keywords: 3D printer, additive technologies, optical-electronic system, computer vision, digital image processing, automation, machine vision, FDM printing, quality control, CAD modeling.

ЗМІСТ

ВСТУП	10
РОЗДІЛ 1 СУЧАСНИЙ СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ ВДОСКОНАЛЕННЯ 3D ПРИНТЕРІВ	12
1.1 Загальна характеристика 3D принтерів	12
1.2 Матеріали для 3D-друку	17
1.3 Порівняння характеристик приладів і технологій	20
1.4 Суть і види адитивних технологій	23
1.5 Основні параметри та точність 3D-друку	28
1.6 Переваги 3D принтерів	30
1.7 Недоліки 3D принтерів	32
1.8 Методи контролю якості в процесі 3D-друку	32
Висновки до розділу 1	35
РОЗДІЛ 2 РОЗРАХУНОК ОПТИЧНО-ЕЛЕКТРОННОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ПРОЦЕСУ 3D-ДРУКУ ТА РОЗРОБЛЕННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ	37
2.1 Загальна структура та принцип роботи системи	38
2.2 Вибір параметрів камер та зони контролю	44
2.3 Розрахунок похибки вимірювання та мінімального розміру дефекту	42
2.4 Розрахунок часу обробки зображення та відхилення шару	43
2.5 Розрахунок системи освітлення	44
2.6 Оцінка ефективності системи	44
2.7 Вибір камери, розрахунок контрасту зображення та продуктивності системи	45
2.8 Розрахунок точності визначення координат, параметрів освітлення та формування сигналу	46
2.9 Розрахунок оптично-електронної системи в активному режимі та відношення сигнал/шум	47
2.10 Аналіз існуючого прототипу оптично-електронної системи контролю та виявлення недоліків	48
2.11 Структура програмного забезпечення, логіка та алгоритм	52
2.12 Переваги та недоліки реалізованої системи	57
Висновки до розділу 2	60
РОЗДІЛ 3 КОНСТРУКТОРСЬКА РОЗРОБКА ОПТИЧНО-ЕЛЕКТРОННОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ПРОЦЕСУ 3D-ДРУКУ	62

3.1 Загальна концепція конструкції	62
3.2 Аналіз конструкції вузла	64
3.2.1 Аналіз вузла кріплення відеомодуля	64
3.2.2 Аналіз осьового фіксатора	66
3.2.3 Аналіз передньої кришки відеомодуля	67
3.2.4 Аналіз задньої кришки відеомодуля	68
3.2.5 Аналіз системи освітлення	68
3.2.6 Аналіз технологічності конструкції	69
3.3 Тестування програмного забезпечення оптично-електронної системи контролю	70
3.3.1 Дослідження впливу швидкості друку на точність контролю	71
3.3.2 Дослідження впливу освітленості на якість сигналу	72
3.3.3 Оцінка точності виявлення дефектів	73
3.3.4 Аналіз швидкодії програмного забезпечення	74
3.3.5 Висновки за результатами тестування	75
3.3.6 Апаратно-програмна реалізація системи контролю	76
3.3.7 Алгоритм роботи програмного забезпечення	77
3.3.8 Аналіз стабільності роботи системи	77
3.3.9 Оцінка ефективності модернізації	78
Висновки до розділу 3	79
ВИСНОВКИ	80
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	83
ДОДАТКИ	87

ВСТУП

В умовах стрімкого розвитку цифрових технологій, автоматизації виробничих процесів та впровадження концепції Industry 4.0 підготовка сучасних фахівців технічного профілю потребує оволодіння комплексними знаннями у сфері проєктування, автоматизованого виробництва, комп'ютерного моделювання, систем технічного зору та цифрової обробки інформації [1, 2]. Сучасний інженер повинен володіти навичками розробки нових технічних рішень, вміти використовувати програмні засоби автоматизованого проєктування, застосовувати сучасні методи дослідження та впроваджувати інноваційні технології у виробництво.

Важливим напрямком розвитку сучасної промисловості є впровадження комп'ютерно-інтегрованих технологій, які передбачають об'єднання процесів проєктування, підготовки виробництва, виготовлення продукції, контролю якості та автоматизованого керування обладнанням в єдину інформаційну систему [3, 4, 5, 6]. Використання CAD/CAM/CAE систем, автоматизованих систем керування, машинного зору та засобів цифрового контролю дозволяє значно підвищити ефективність виробництва, знизити кількість браку та мінімізувати вплив людського фактора на технологічний процес.

Особливе місце серед сучасних виробничих технологій займають адитивні технології, які дозволяють виготовляти деталі складної геометричної форми шляхом пошарового нанесення матеріалу [1, 2]. Одним із найбільш поширених пристроїв для реалізації таких технологій є FDM-принтер, який активно використовується в машинобудуванні, медицині, авіакосмічній галузі, будівництві та ювелірному виробництві [7, 8, 9, 10].

Попри значні переваги 3D-друку, під час процесу виготовлення виробів можуть виникати різноманітні дефекти: зміщення шарів, нерівномірна подача матеріалу, деформації, порушення геометричних параметрів виробу та інші технологічні відхилення. У більшості випадків контроль якості готового виробу

здійснюється вже після завершення друку, що призводить до втрати матеріалу, часу та енергетичних ресурсів.

Одним із перспективних напрямків вирішення даної проблеми є впровадження автоматизованих оптично-електронних систем контролю, які є складовою комп'ютерно-інтегрованого виробництва. Такі системи дозволяють відстежувати процес друку в режимі реального часу, автоматично виявляти дефекти, передавати інформацію до системи керування принтером та виконувати коригування параметрів друку без участі оператора. Використання відеокамер, систем освітлення, алгоритмів комп'ютерного зору та автоматизованої обробки зображень дає можливість реалізувати інтелектуальну автоматизацію процесу виготовлення деталей [3, 4, 11, 12, 13].

Актуальність даної роботи полягає у необхідності підвищення точності, продуктивності та рівня автоматизації процесу 3D-друку шляхом модернізації стандартного принтера за рахунок впровадження оптично-електронної системи контролю. Розроблена система повинна забезпечувати автоматичний контроль пошарового формування виробу, виявлення дефектів, передачу даних до керуючої системи та подальше автоматичне коригування процесу друку.

У межах дипломної роботи передбачається виконання аналізу існуючих технологій 3D-друку, розробка структури оптично-електронної системи контролю, проведення необхідних розрахунків параметрів камери, освітлення та точності системи, а також створення конструктивної моделі модернізованого вузла в CAD-середовищі SolidWorks з подальшим формуванням комплексу конструкторської документації [5, 6].

Таким чином, розробка оптично-електронної системи контролю процесу друку в 3D-принтері є актуальним напрямком розвитку адитивних технологій та відповідає сучасним вимогам автоматизації виробництва, цифрового контролю якості, комп'ютерно-інтегрованих технологій та концепції інтелектуального виробництва Industry 4.0.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ ВДОСКОНАЛЕННЯ 3D-ПРИНТЕРІВ

1.1 Загальна характеристика 3D-принтерів

3D-принтери є інноваційними технічними пристроями, що реалізують принципи адитивного виробництва і забезпечують створення тривимірних (3D) об'єктів на основі цифрових моделей шляхом пошарового формування матеріалу [1, 2, 7, 8]. На відміну від традиційних методів виготовлення, які базуються на видаленні зайвого матеріалу або деформації заготовки, 3D-друк передбачає поступове «нароощування», або «нашарування» виробу, що дозволяє досягати високого рівня точності та складності геометрії. Історично розвиток 3D-друку розпочався у другій половині XX століття, коли виникла потреба у швидкому прототипуванні виробів. Перші комерційні зразки 3D-принтерів з'явилися у 1980-х роках, і з того часу технологія зазнала значної еволюції — від вузькоспеціалізованих промислових установок до доступних настільних пристроїв, які активно використовуються як у професійній діяльності, так і в побуті.

Функціонування 3D-принтера базується на інтеграції апаратного та програмного забезпечення [7, 8, 9, 10]. Основним джерелом інформації є цифрова тривимірна модель, створена у середовищі автоматизованого проєктування. Після створення модель проходить етап обробки, під час якого вона оптимізується, масштабується та розбивається на велику кількість горизонтальних(подекуди вертикальних, залежно від способу друку та моделі принтера) шарів. Цей процес дозволяє перетворити складну геометричну структуру у набір команд, які може виконувати принтер.

Важливою складовою є програмне забезпечення для керування процесом друку, яке забезпечує генерацію траєкторій руху друкуючого елемента, регулювання температурних режимів, швидкості подачі матеріалу та інших параметрів. Завдяки цьому забезпечується узгоджена робота всіх компонентів пристрою.

Конструктивно 3D-принтери можуть мати різну будову, однак більшість із них включає такі основні елементи [7, 8, 9, 10]:

- джерело живлення;
- блок керування;
- каркас або раму, що забезпечує жорсткість конструкції;(рисунок 1.1)

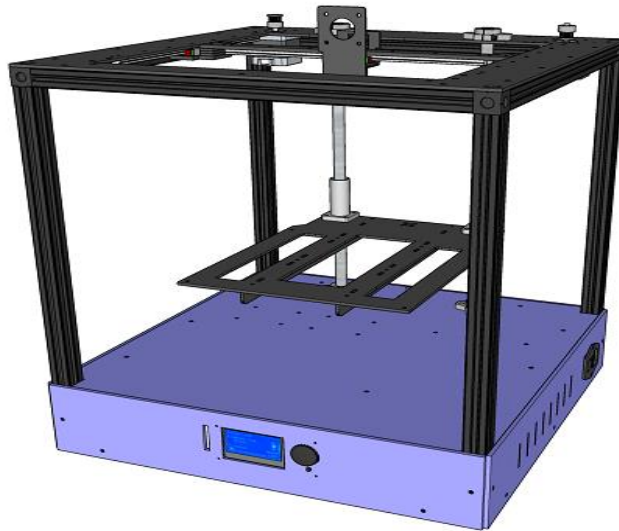


Рисунок 1.1 Каркас [2]

- робочу платформу (стіл), на якій формується виріб (рисунок 1.2)

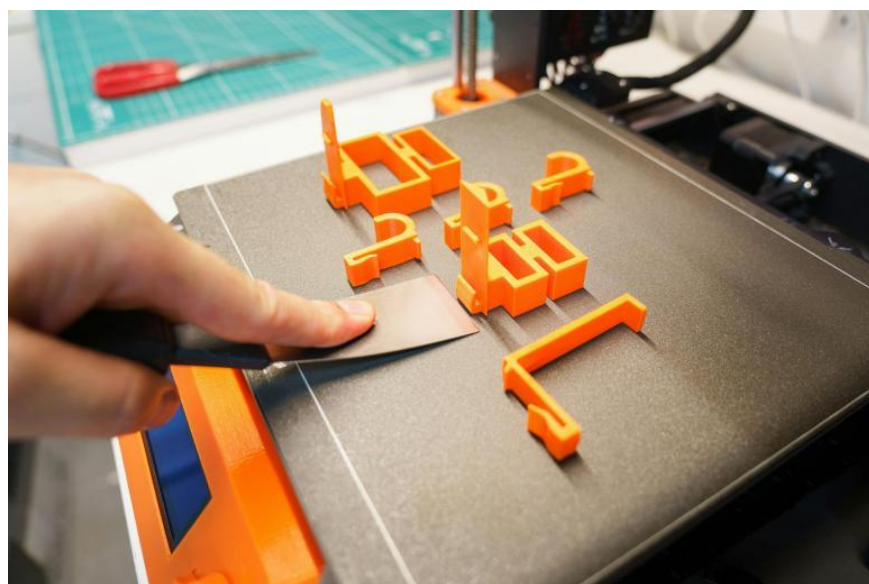


Рисунок 1.2 Робоча платформа [2]

- друкуючу головку або екструдер; (рисунок 1.3)

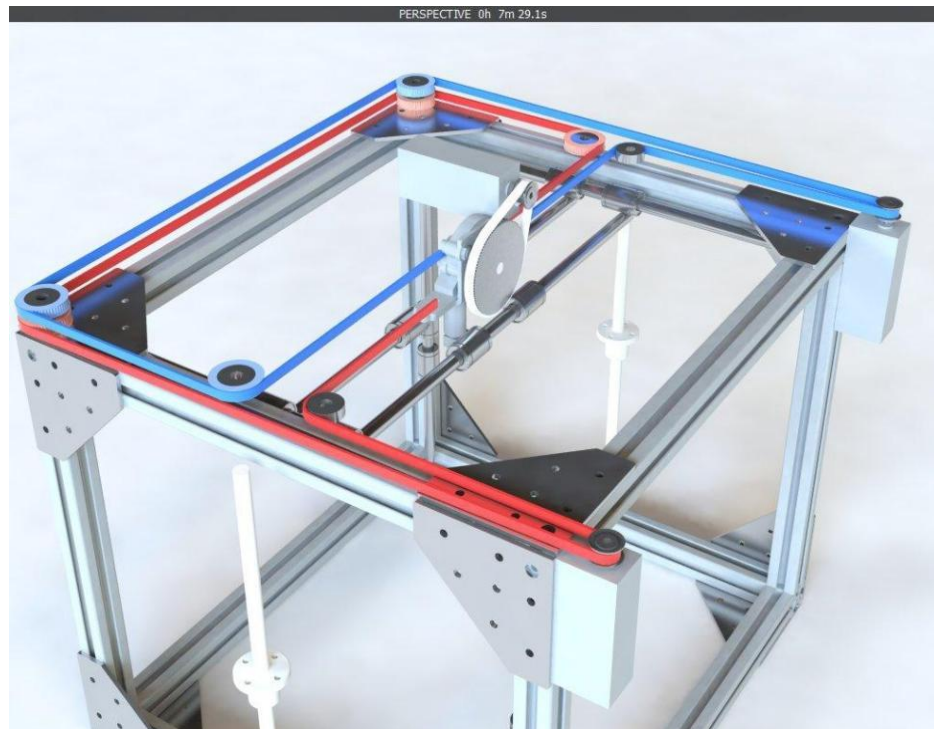


Рисунок 1.3 Система переміщення [2]

- систему переміщення (лінійні напрямні, ремені, гвинтові передачі) (рисунок 1.4)
- датчики контролю параметрів процесу.

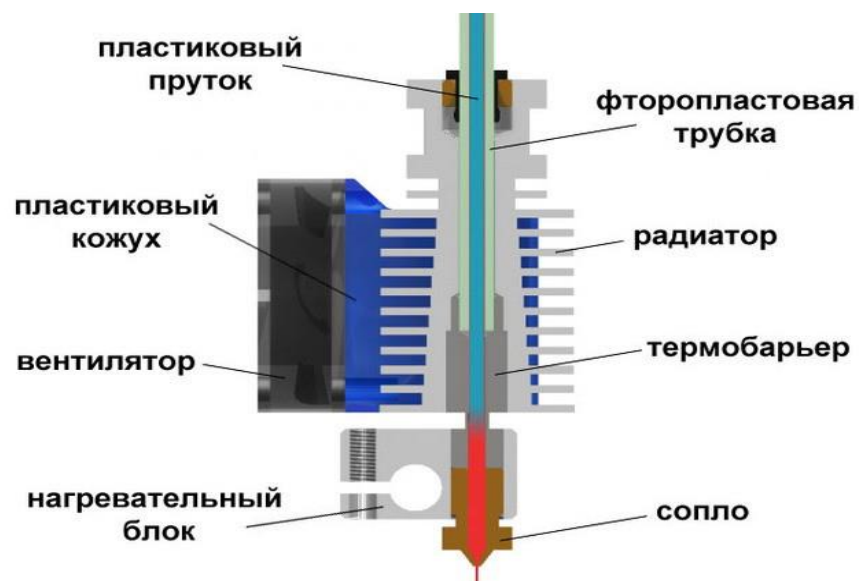


Рисунок 1.4 Экструдер [2]

Залежно від призначення та рівня складності, 3D-принтери поділяються на побутові (настільні), професійні та промислові [1]. Побутові моделі характеризуються відносною доступністю та простотою експлуатації, однак мають обмежені технічні можливості. Професійні та промислові системи, навпаки, відзначаються високою точністю, продуктивністю та можливістю роботи з широким спектром матеріалів, проте потребують значних фінансових витрат і спеціалізованого обслуговування.

Однією з ключових характеристик 3D-принтерів є точність друку, яка визначається товщиною шару та точністю позиціонування друкуючого елемента [1, 2, 10]. Чим менша товщина шару, тим вища деталізація виробу, але тим більше часу потребує процес виготовлення.

Іншими важливими параметрами є швидкість друку, об'єм робочої камери, тип використовуваного матеріалу, стабільність температурного режиму та наявність додаткових функцій (наприклад, автоматичного калібрування, чи надточного нанесення).

Матеріали, що застосовуються у 3D-друці, мають різноманітні фізико-хімічні властивості, що визначають сферу їх використання. Полімерні матеріали забезпечують легкість і простоту обробки, металеві — високу міцність і довговічність, а композитні дозволяють поєднувати переваги кількох матеріалів. Окрім цього, існують спеціалізовані матеріали, призначені для медичних, харчових або будівельних застосувань.

Процес 3D-друку включає не лише етап безпосереднього формування виробу, але й підготовчі та завершальні операції [3, 4]. До підготовчих належить створення та обробка 3D-моделі (наприклад, програма, що входить до навчальної програми КПП, SOLIDWORKS дає повний спектр до праці з створення та обробки моделей), вибір параметрів друку, підготовка обладнання.

Завершальні операції можуть включати очищення виробу, видалення підтримуючих структур, шліфування, фарбування або інші види постобробки.

Застосування 3D-принтерів охоплює широкий спектр галузей. У машинобудуванні вони використовуються для виготовлення прототипів і окремих

деталей, у медицині — для створення імплантатів, протезів та анатомічних моделей, у будівництві — для зведення конструкцій, в освіті — як інструмент навчання та розвитку інженерного мислення [7]. Також 3D-друк знаходить застосування у сферах мистецтва, дизайну, ювелірної справи та моди.

Окремої уваги заслуговують перспективи розвитку технології 3D-друку. Серед основних тенденцій можна виділити підвищення швидкості та точності друку, розширення спектру доступних матеріалів, інтеграцію з іншими цифровими технологіями (зокрема штучним інтелектом та Інтернетом речей), а також розвиток біодруку та будівельного друку. Очікується, що у майбутньому 3D-принтери відіграватимуть ще більш важливу роль у промисловому виробництві та повсякденному житті.

Таким чином, 3D-принтери є складними багатофункціональними системами, які поєднують сучасні досягнення в галузі механіки, електроніки, матеріалознавства та програмування. Їх використання відкриває нові можливості для створення продукції з унікальними властивостями, оптимізації виробничих процесів та впровадження інновацій у різних сферах діяльності людини.

Важливим аспектом функціонування 3D-принтерів є забезпечення стабільності процесу друку. Навіть незначні відхилення параметрів, таких як температура екструзії, швидкість переміщення або точність позиціонування, можуть призводити до появи дефектів у готовому виробі.

У зв'язку з цим сучасні 3D-принтери все частіше оснащуються системами моніторингу та контролю, які дозволяють відстежувати процес формування виробу в режимі реального часу. Це створює передумови для впровадження інтелектуальних систем контролю якості, зокрема оптично-електронних.

1.2 Матеріали для 3D-друку

Матеріали для 3D-друку є одним із ключових елементів, які визначають якість, міцність і функціональність готових виробів [14, 15]. Існує велике різноманіття матеріалів, кожен з яких має свої властивості та область застосування. Вибір матеріалу залежить від типу друку, обладнання та цілей проєкту.

Основні типи матеріалів для 3D-друку:

- PLA (Полілактид):

PLA — це один із найпопулярніших матеріалів для 3D-друку. Він виготовляється з біорозкладних матеріалів, таких як кукурудзяний крохмаль або цукрова тростина, що робить його екологічно чистим. Цей матеріал ідеально підходить для створення прототипів, декоративних виробів та навчальних моделей, оскільки він легкий у використанні, не потребує високих температур і практично не виділяє шкідливих речовин під час друку. PLA володіє високою точністю і є відмінним вибором для початківців. Однак, він не підходить для виробів, які мають витримувати високі температури, оскільки починає плавитися при 60–70°C [14, 15].

- ABS (Акрилонітрилбутадієнстирол):

ABS є ще одним популярним матеріалом, який відрізняється високою міцністю та термостійкістю. Він використовується для виготовлення деталей, що повинні витримувати механічні навантаження. Матеріал має більш складний процес друку, оскільки потребує вищих температур для екструзії (близько 210–250°C) та нагрітої платформи для уникнення деформації моделі. ABS широко використовується в автомобільній промисловості, для створення прототипів та функціональних деталей [14, 15].

- PETG (Поліетилентерефталат-гліколь):

PETG — це комбінація найкращих властивостей PLA та ABS. Він міцний, гнучкий, стійкий до впливу вологи та хімічних речовин. PETG добре підходить для виготовлення функціональних деталей, які будуть використовуватися на відкритому повітрі або піддаватимуться постійному навантаженню. Це чудовий вибір для створення прозорих деталей, оскільки матеріал має високий рівень прозорості [14, 15].

- TPU (Термопластичний поліуретан):

TPU — це гнучкий матеріал, який дозволяє створювати еластичні вироби. Він використовується для виготовлення предметів, які повинні мати певний рівень гнучкості, таких як чохли для телефонів, взуття або прокладки. Друк з TPU може бути більш складним через його властивість згинатися під час подачі матеріалу, тому для друку необхідно використовувати спеціальні налаштування принтера [14, 15].

- Фотополімери:

Фотополімери використовуються у 3D-принтерах, що працюють за технологіями SLA або DLP, де модель створюється шляхом затвердіння рідкої смоли під дією ультрафіолетового світла. Ці матеріали забезпечують високу точність і гладкість поверхні, що робить їх ідеальними для створення моделей із тонкими деталями. Фотополімери часто використовуються в медицині для виготовлення стоматологічних імплантів або в ювелірній справі для створення макетів прикрас [16].

- Нейлон:

Нейлон — це міцний та зносостійкий матеріал, який часто використовується для виготовлення функціональних механічних частин, шестерень та інструментів. Він відомий своєю високою стійкістю до тертя і здатністю витримувати великі навантаження. Нейлон вимагає більш високої температури для друку, що робить його менш доступним для початківців, але дуже популярним в інженерних та промислових застосуваннях [14, 15].

Переваги різних матеріалів:

- PLA: екологічний, легкий у використанні, підходить для простих та декоративних моделей.
- ABS: міцний, стійкий до температур, підходить для функціональних деталей.
- PETG: міцний, стійкий до вологи, чудовий вибір для функціональних виробів на відкритому повітрі.
- TPU: гнучкий, підходить для виготовлення еластичних виробів.

- Фотополімери: висока точність і гладкість поверхні, ідеальний для складних моделей з детальним дизайном.
- Нейлон: міцний, зносостійкий, підходить для функціональних механічних частин.

Загальний вигляд перелічених матеріалів для 3D-друку зображено на рисунку 1.5 [8].



Рисунок 1.5 Матеріали для 3D-друку

Слід зазначити, що вибір матеріалу безпосередньо впливає на параметри контролю якості [3, 14, 15]. Наприклад, прозорі матеріали ускладнюють процес візуального аналізу, тоді як темні або матові матеріали забезпечують кращу контрастність зображення.

Гнучкі матеріали, такі як TPU, можуть змінювати форму після нанесення, що ускладнює точне визначення геометричних параметрів. У свою чергу, фотополімери забезпечують високу точність, але потребують контролю процесу полімеризації.

Таким чином, при розробці системи контролю необхідно враховувати фізико-хімічні властивості використовуваного матеріалу.

1.3 Порівняння характеристик приладів і технологій

Сьогодні 3D-друк для багатьох людей став невід’ємною частиною життя. Із вузькоспеціалізованої та дорогої послуги він переростає у незамінного помічника для різних сфер діяльності. Завдяки 3D-друку можливі інновації та експерименти у сферах архітектури, медицини, поліграфії, а також у ювелірній справі, сувенірній продукції, функціональному тестуванню та ін.

Таблиця 1.1 Порівняльна характеристика приладів і технологій [1, 2, 7, 10, 16]

Галузь	Технологія	Точність	Матеріали	Основна задача	Вимоги до контролю
Автомобільна промисловість	FDM, SLS	середня	пластик, метал	швидкість, прототипи	геометрія
Ювелірна	SLA, DLP	дуже висока	фотополімер	деталізація	поверхня
Медицина	SLA, SLS	дуже висока	біоматеріали	індивідуалізація	дефекти
Аерокосмічна	SLM, DED	висока	метали	міцність	внутрішні дефекти
Будівництво	FDM (бетон)	низька	бетон	масштаб	адгезія шарів

Аналіз представлених технологій показує, що вимоги до систем контролю якості суттєво відрізняються залежно від сфери застосування. У високоточних галузях, таких як медицина та аерокосмічна промисловість, контроль повинен забезпечувати виявлення навіть мінімальних дефектів.

У зв’язку з цим актуальним є застосування автоматизованих систем контролю, здатних працювати в реальному часі та інтегруватися у процес друку без його зупинки.

У різних галузях промисловості застосовуються різні технології 3D-друку, що відрізняються за точністю, матеріалами та вимогами до контролю якості. Узагальнена порівняльна характеристика наведена в таблиці 1.1.

В автомобільній промисловості найбільш поширеними є технології FDM та SLS, які забезпечують середню точність і використовуються переважно для швидкого прототипування виробів із пластиків і металів (рисунок 1.6).

Основна увага приділяється контролю геометричних параметрів [7, 10].



Рисунок 1.6 3D-друк в автомобільній промисловості

Ювелірна галузь характеризується застосуванням високоточних технологій SLA та DLP, що дозволяють працювати з фотополімерами та досягати високого рівня деталізації. У цьому випадку ключовим є контроль якості поверхні виробу [16].

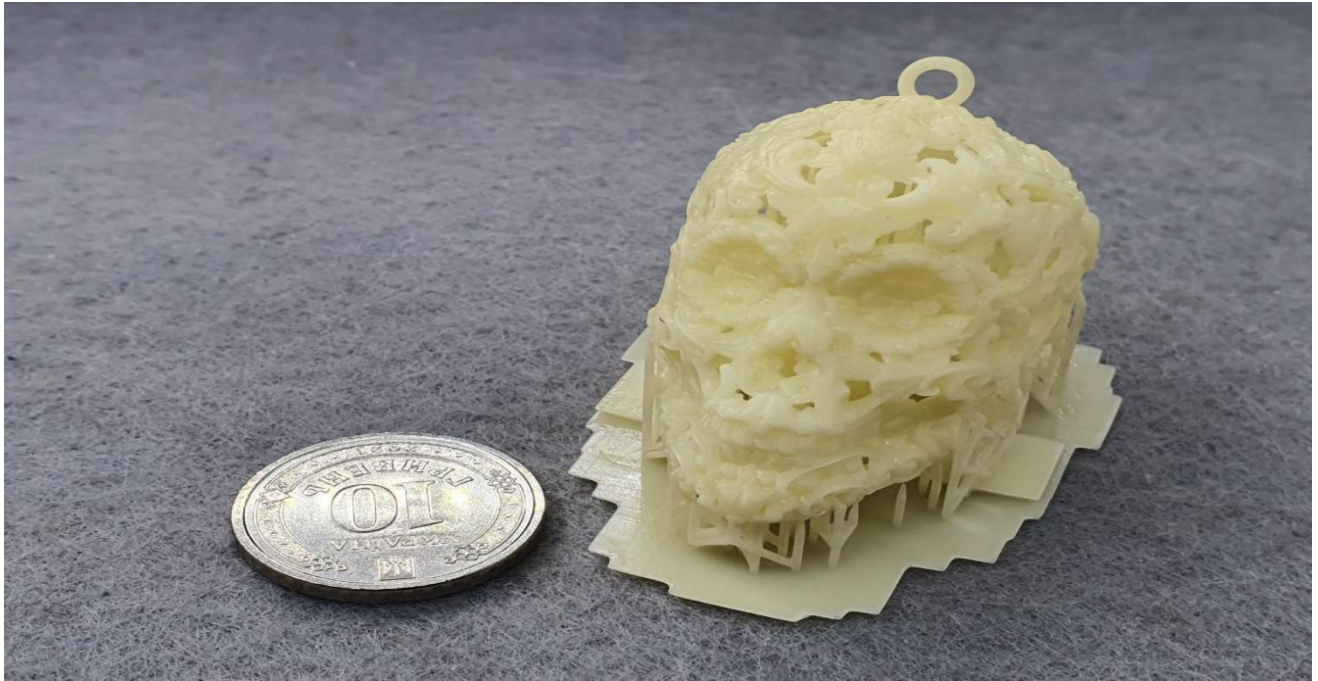


Рисунок 1.7 3D-друк в ювелірній промисловості

У медицині використовуються технології SLA та SLS із дуже високою точністю, що дозволяє виготовляти індивідуалізовані вироби з біоматеріалів. Особливу увагу приділяють виявленню дефектів, оскільки вони можуть впливати на безпеку пацієнтів [1, 2].

Аерокосмічна галузь застосовує технології SLM та DED, які забезпечують високу точність і використовуються для роботи з металами. Основними вимогами є забезпечення міцності виробів і контроль внутрішніх дефектів [1, 2].

У будівництві застосовується технологія FDM із використанням бетону, яка характеризується низькою точністю, але дозволяє створювати великомасштабні конструкції. Основна увага приділяється адгезії шарів.

Основні проблеми процесу 3D-друку

Незалежно від галузі застосування, для технологій адитивного виробництва характерні спільні проблеми, серед яких:

- дефекти формування шару;
- геометричні відхилення;
- перегрів або недостатній нагрів матеріалу;
- утворення тріщин та пористості.

Особливо критичними ці проблеми є для аерокосмічної та медичної галузей, де від якості виробу безпосередньо залежить безпека та надійність експлуатації.

Зазначені проблеми обумовлюють необхідність впровадження систем раннього виявлення дефектів. Виявлення помилок після завершення друку призводить до втрати матеріалів та часу, що є економічно не вигідним.

Рішенням цієї проблеми є використання систем in-situ моніторингу, які дозволяють контролювати процес формування виробу безпосередньо під час друку [3, 4, 11].

Сучасні підходи до контролю якості

Для вирішення зазначених проблем активно впроваджуються сучасні методи контролю процесу друку, зокрема:

- 3D-сканування безпосередньо під час друку;
- використання камер і лазерних систем (профілометрії);
- системи контролю в реальному часі (in-situ моніторинг).

Ці підходи дозволяють своєчасно виявляти дефекти та підвищувати якість готових виробів.

1.4 Суть і види адитивних технологій

Для виготовлення об'ємних моделей з пластику існує багато технологій. Останнім часом великого розвитку набули адитивні технології. Суть даного методу виготовлення деталей полягає в їх пошаровому створенні. Один шар матеріалу наноситься поверх іншого і за допомогою різних факторів шари спікаються формуючи одну суцільну деталь. Таким методом можливо створювати найрізноманітніші об'єкти, які через складну геометрію виготовити неможливо, або дуже дорого.

Для пластика розрізняють 5 основних технологій [1, 2, 10]:

- SLA – лазерна стереолітографія;
- SLS – селективне лазерне спікання;
- MJM – метод наплавлення з засвічуванням ультрафіолетом;

- DLP – метод наплавлення з засвічуванням звичайним світловим потоком;
- FDM – пошарова.

Розглянемо кожен метод послідовно і почнемо з SLA. Основу цього методу складають фотополімери – матеріали, які змінюють свої фізичні властивості від дії ультрафіолетового світла.

У момент початку вирощування деталі платформа розташовується під поверхнею рідкого фотополімера на глибині 0.05-0.13 мм. Вмикається ультрафіолетовий лазер, промінь якого направляють два дзеркала так, щоб він засвітив матеріал у формі першого шару бажаного об'єкта.

Після того, як перший шар кристалізувався платформа опускається і процес починається знову (рисунок 1.8).

Для завершення вирощування деталей відділяють від платформи та очищають від залишків формоутворюючої суміші.

Цей процес потрібно проводити дуже обережно, адже полімер кристалізувався ще не остаточно, тому після промивки виріб поміщають в ультрафіолетову камеру [16].

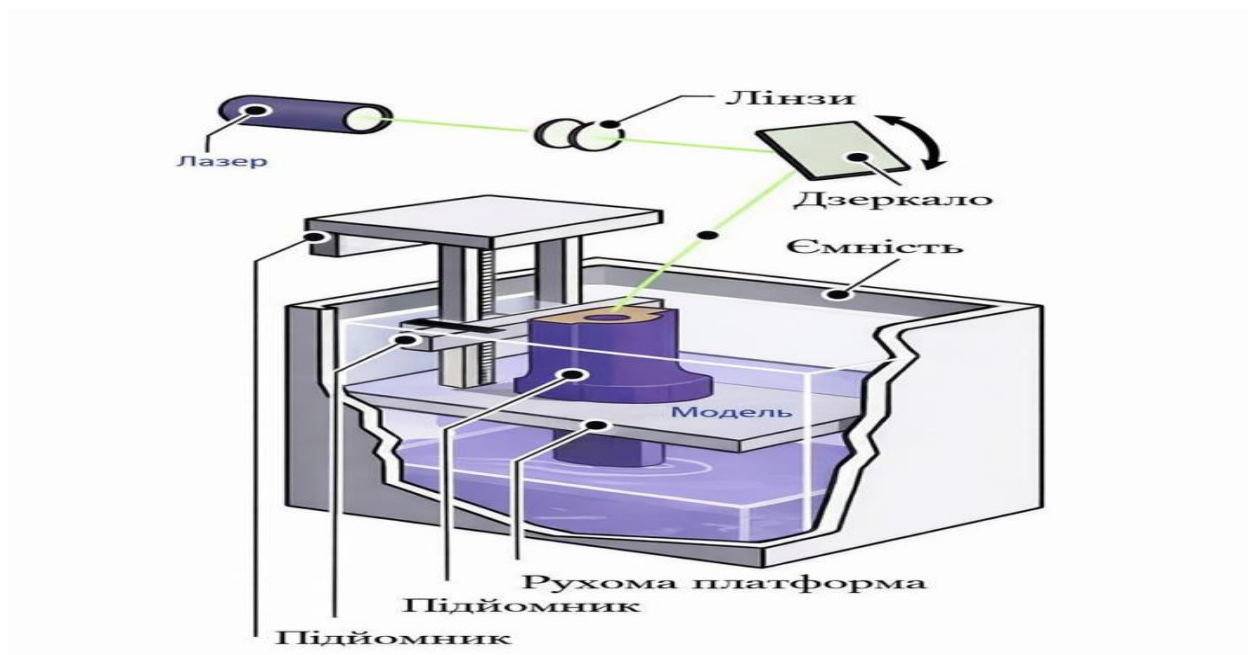


Рисунок 1.8 Метод SLA

Наступним розглянемо метод SLS. У якості матеріалу в даному методі використовується полімерний порошок (рисунок 1.9).

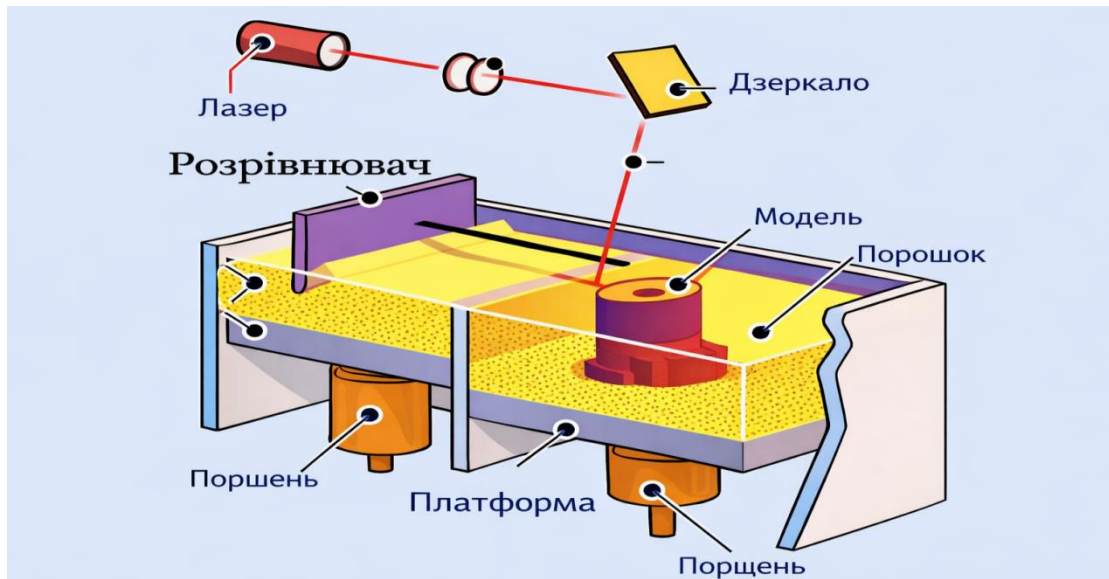


Рисунок 1.9 Метод SLS

Розподілювач наносить перший шар порошку на платформу. Лазер розплавляє порошок в необхідних місцях, платформа опускається і розподілювач наносить новий шар матеріалу. При спіканні другого шару він злипається з першим, утворюючи одну деталь. Так шар за шаром отримуємо необхідну модель. Після спікання її очищують від залишків порошку і зміцнюють поверхню виробу спеціальною рідиною [1, 2, 10].

МЖМ – технологія базується на багатоструменевій подачі воскового або фотополімерного матеріалу (рисунок 1.10). Друкуюча голова складається з багатьох (від 96 до 448) дрібних сопел. Проїжджаючи над платформою через певні сопла подається необхідна кількість матеріалу яка залишається на поверхні і полімеризується ультра фіолетовою (УФ) лампою. Для підтримок зазвичай використовують легкоплавкий віск який після завершення процесу виплавляють з моделі в спеціальній печі [1, 2].

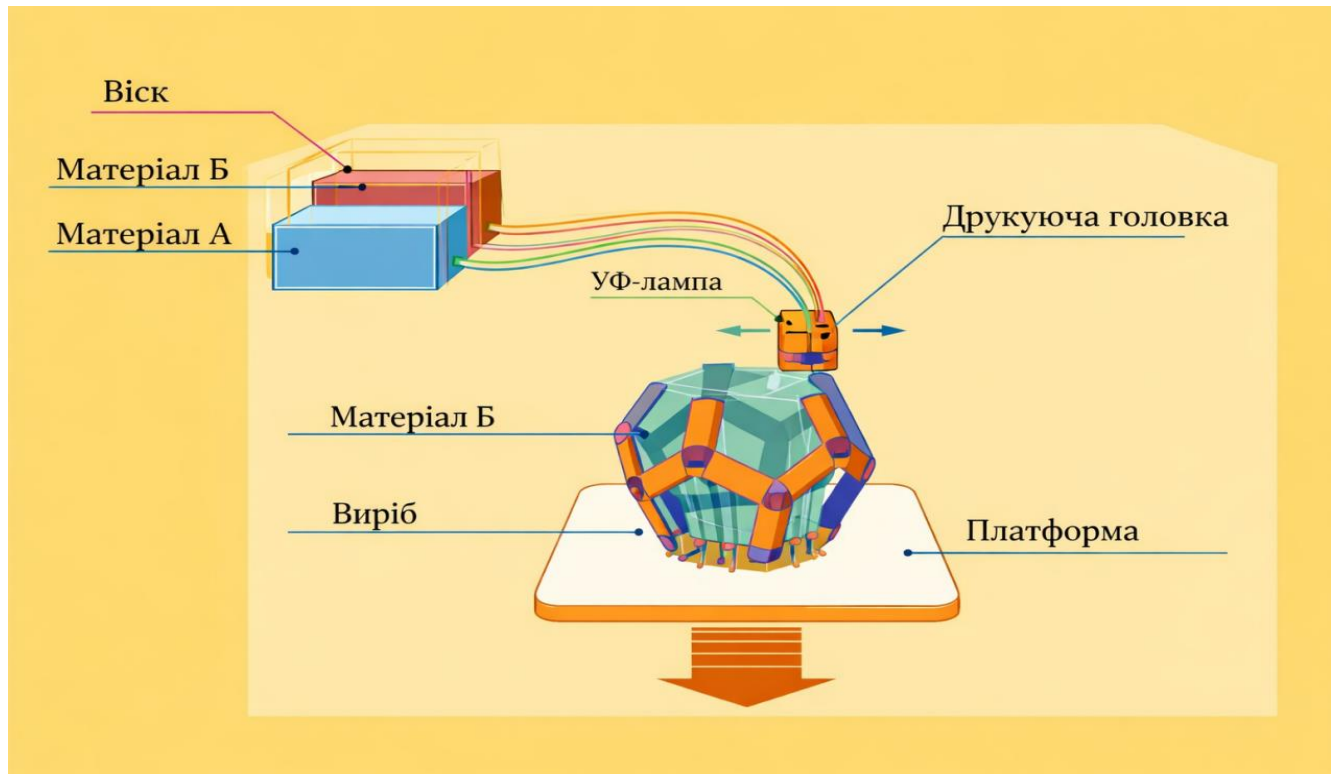


Рисунок 1.10 Технологія MJM

Технологія DLP схожа з SLA але має одну суттєву відмінність: для полімеризації вона використовує звичайне а не ультрафіолетове світло. Зараз поширеними є пристрої які використовують так званий "зворотній" DLP друк (рисунок 1.11). Вирощення деталі починається з тонкої плівки рідини між платформою і прозорим дном контейнера. Дзеркало та лінза переміщують тонкий промінь світла по поверхні платформи і тим самим кристалізують фотополімер.

Коли перший шар готовий платформа піднімається вище, між кристалізованим пластиком і прозорим дном знову затікає рідина і процес повторюється. Потрібно підмітити, що у якості джерела світла може використовуватись високорозрядний екран. На екран виводиться зображення перерізу у дзеркальному вигляді а від світла кристалізується полімер. Такий метод є значно швидший ніж SLA потребує мінімум рухомих елементів [16].

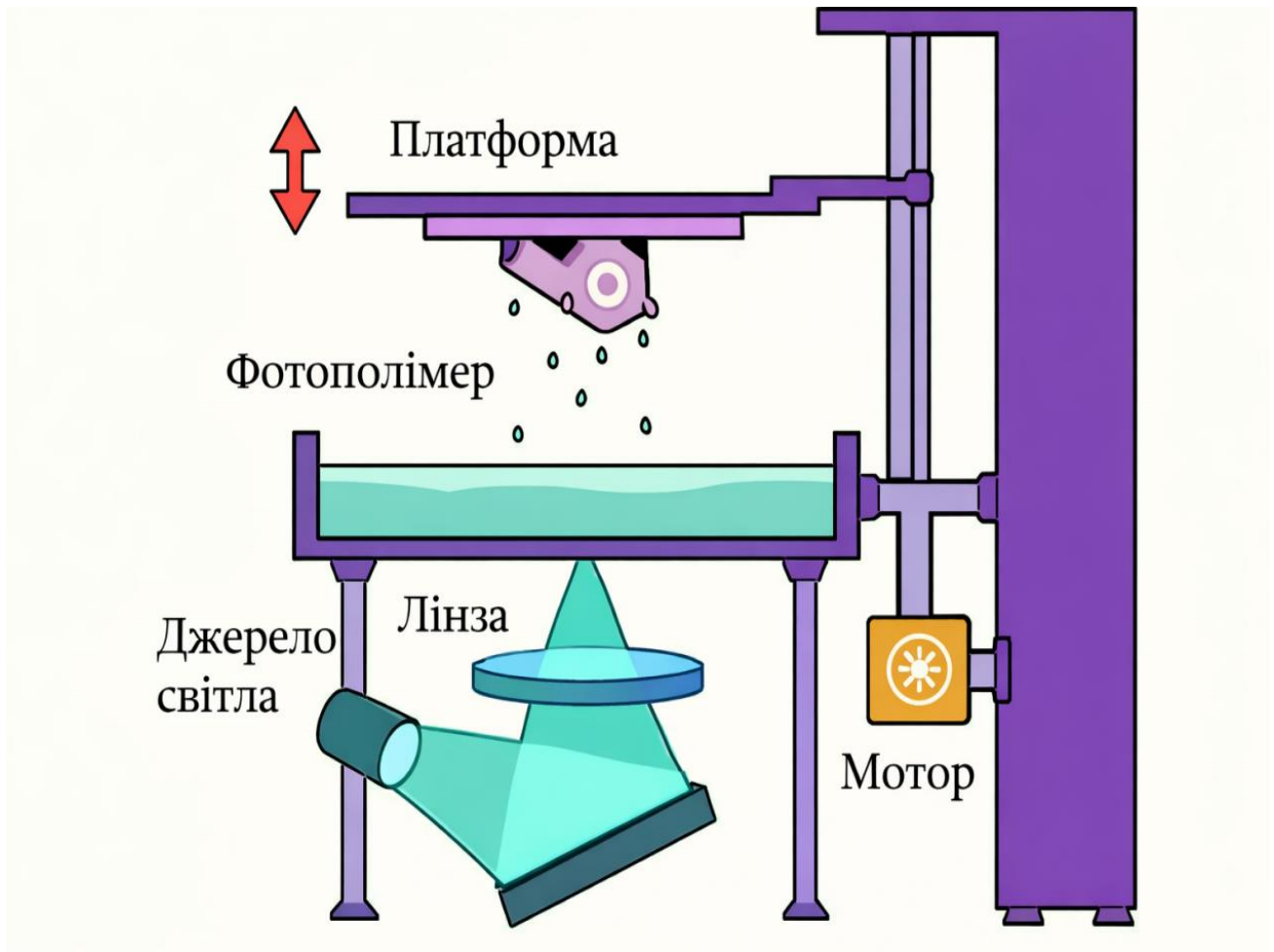


Рисунок 1.11 Технологія DLP

FDM – найпопулярніша технологія. Вона в якості матеріалу використовує пластикову нитку – філамент, який скручений в котушки. Філамент подається екструдером до нагрівальної камери, де розплавляється і витікає через сопло на стіл, де одразу застигає (рисунок 1.12).

У той час програма керує двигунами так, щоб траєкторія сопла утворила собою поперечний переріз фігури. Коли перший шар готовий стіл опускається на необхідну величину і починається створення наступного шару.

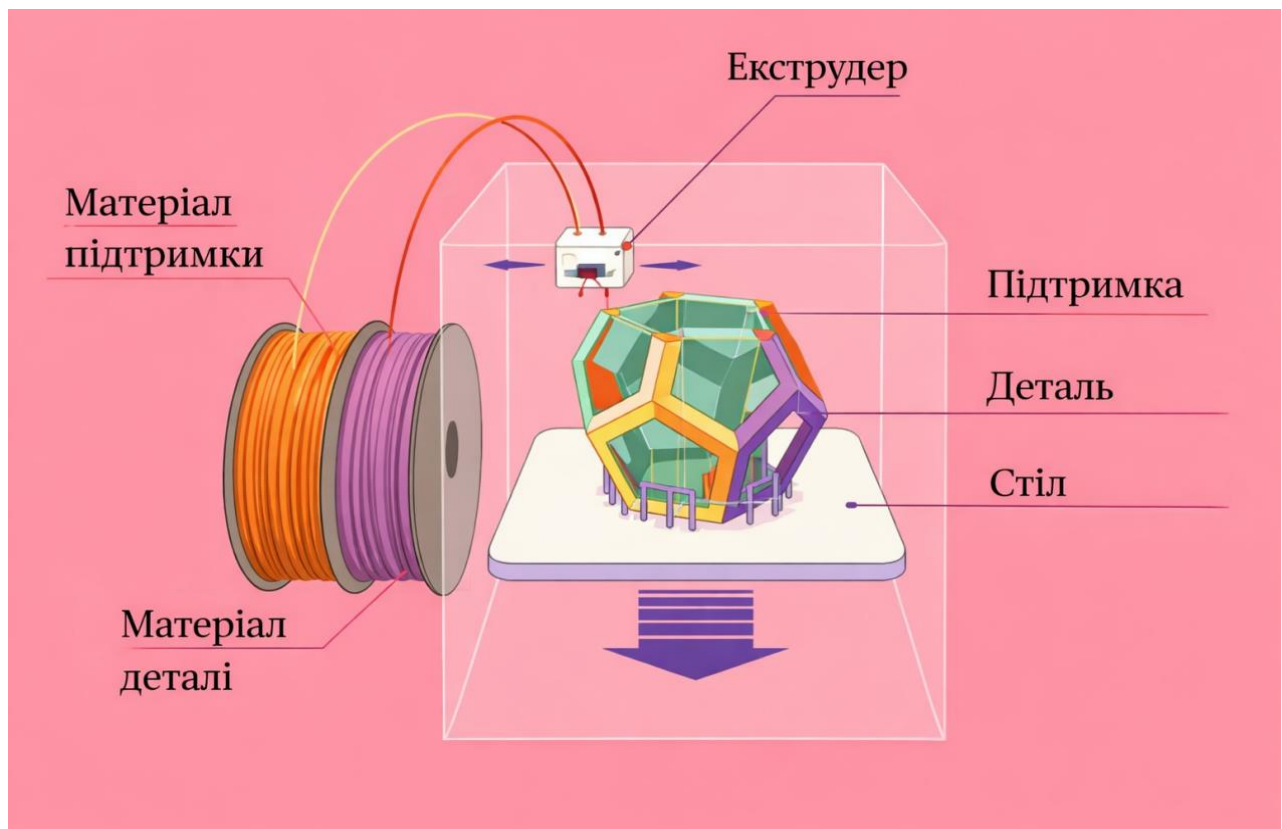


Рисунок 1.12 Технологія FDM

У якості підтримки використовують водорозчинний пластик. Поверхня об'єктів виготовлених таким способом ребриста з висотою виступів 0.1 – 1 мм, в залежності від параметрів принтера [7, 8, 9, 10].

1.5 Основні параметри та точність 3D-друку

Однією з ключових характеристик адитивного виробництва є точність виготовлення виробів, яка визначає відповідність отриманої деталі її цифровій моделі [1, 2]. Точність 3D-друку залежить від сукупності технологічних параметрів, конструктивних особливостей обладнання та властивостей матеріалів.

До основних параметрів, що впливають на точність друку, належать:

- товщина шару;
- діаметр сопла екструдера;
- швидкість друку;

- температура екструзії;
- точність позиціонування друкуючої головки;
- адгезія між шарами [7, 8, 10].

Вплив товщини шару

Товщина шару є одним із найважливіших параметрів, що визначає якість поверхні виробу. Зменшення товщини шару дозволяє досягти більш високої деталізації, проте збільшує тривалість друку.

Похибка позиціонування

Похибка позиціонування друкуючої головки визначає відхилення фактичного положення екструдера від заданого. Вона може виникати внаслідок механічних люфтів, неточності крокових двигунів або вібрацій.

Абсолютна похибка визначається як:

$$\Delta = |x_{real} - x_{measured}|,$$

де $x_{measured}$ - задане положення; x_{real} - фактичне положення [3].

Сумарна похибка друку

Загальна похибка виготовлення деталі є результатом накопичення похибок на кожному етапі друку. Її можна представити у вигляді:

$$\Delta_{total} = \Delta_{mechanical} + \Delta_{thermal} + \Delta_{material},$$

де $\Delta_{mechanical}$ - механічні похибки; $\Delta_{thermal}$ - температурні деформації; $\Delta_{material}$ - похибки, пов'язані з властивостями матеріалу [3, 17, 18].

Фактори, що впливають на точність

До основних факторів, що знижують точність 3D-друку, належать:

- нерівномірне охолодження матеріалу;
- деформація виробу (усадка);
- нестабільність температури;
- помилки калібрування принтера;
- вібрації конструкції.

Значення точності для контролю якості

Забезпечення високої точності є критично важливим для виробів, що використовуються в інженерних та медичних застосуваннях. Навіть незначні відхилення можуть призвести до порушення функціональності деталі.

У зв'язку з цим виникає необхідність використання систем контролю, які дозволяють оцінювати точність формування виробу безпосередньо в процесі друку [3, 4, 11].

1.6 Переваги 3D-принтерів

Переваги 3D-принтерів [14, 15]:

1. Швидкість виробництва деталі.

Складні по конфігурації моделі можна завантажити безпосередньо з CAD середовища і надрукувати всього за кілька годин.

У минулому виготовлення прототипу могло зайняти дні або навіть тижні. Тепер весь цей технологічний процес можна сміливо замінити роботою одного інженера, який надасть зразок через кілька годин [7, 8, 10].

На рисунку 1.13 нижче показаний процес 3D руку (червоний) в порівнянні з традиційним технологічним процесом (чорний).

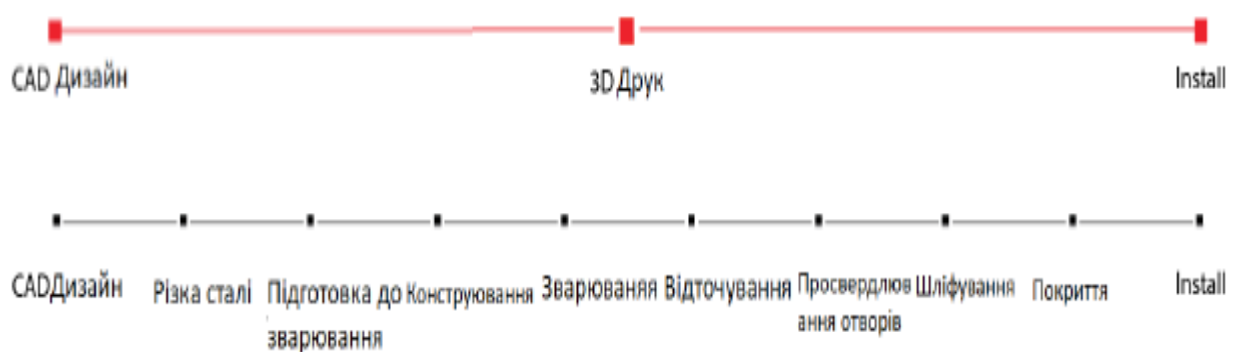


Рисунок 1.13 Процес 3D-друку в порівнянні з традиційним технологічним процесом

2. Вартість матеріалів.

Вартість матеріалів для 3D руку різниться для різних технологій друку. Наприклад, настільні FDM принтери використовують матеріали, які коштують

приблизно \$25-30 за кг, в той час як для SLA друку необхідно віддати близько \$150-200 за л. Наявність різних матеріалів ускладнює процес порівняння з класичними технологіями виробництва, але не робить його неможливим. Наприклад, нейлонові суміщі для SLA коштують близько \$70 за кг. Вартість матеріалу - основна складова виробництва, використовуючи 3D-друк [14, 15].

3. Вартість роботи обладнання.

Більшість настільних 3D принтерів використовують стільки ж електроенергії, скільки ноутбук або стаціонарний комп'ютер. Більш потужні, промислові принтери використовують більше енергії, але все одно робить їх ефективніше і менш ресурсоемними [14, 15].

4. Вартість фахівців.

Одне з основних переваг 3D-друку - низька вартість фахівців. Процес є повністю автоматизованим. У порівнянні з традиційним виробництвом, під час якого треба задіяти висококваліфікованих, навчених операторів, вартість фахівців для 3D друку є значно меншою [1, 2, 3].

5. Невеликі обсяги продукції.

3D-друк набагато вигідніше для невеликих обсягів. В основному, цей спосіб використовують для створення прототипів майбутніх виробів. Традиційні методи виробництва вступають в силу, коли виробляються деталі великих розмірів або запускається велика партія деталей.

6. Вироби складної форми.

У класичному виробничому процесі завжди є деякі обмеження, які слід враховувати. 3D-друк майже повністю знімає ці обмеження, тому що деталь, або виріб, формується шар за шаром [1, 2].

7. Різні сфери застосування.

Виходячи з того, що ніяких обмежень на конфігурацію деталі немає, основний концепт 3D-друку - це виготовлення одного виробу для одного завдання. Ця ідея особливо добре прижилася в медицині. Зараз на 3D принтері друкують протези індивідуальної конфігурації, зубні пломби, макети та імпланти.

8. Безвідходне виробництво.

Класичні методи обробки припускають виготовлення деталі з заготівлі, розмір якої більше кінцевого виробу. В результаті цього процесу формується стружка. Під час 3D-друку витрачається тільки та кількість матеріалу, яка є необхідною для виробництва. Крім того, багато матеріалів для 3D-друку можна переробити і використовувати повторно.

1.7 Недоліки 3D-принтерів

3D-принтери мають певні недоліки: [7, 8, 10, 15].

1. Принтери мають досить низьку продуктивність в порівнянні з традиційними литтям і штампуванням (через що 3D-друк не є конкурентоспроможним в масовому виробництві).

2. Технічні обмеження за розміром виробу.

3. Економічні обмеження за обсягом виробленої партії (як правило, до 100 штук).

4. Велика вартість промислових принтерів і витратних матеріалів, особливо якщо розглядати друк металом.

5. Якість і міцність виробів поступаються фрезеруванню і литтю з пластмаси.

Невеликі та провідні компанії, що професійно займаються прототипуванням, зазвичай поєднують 3D-друк з фрезеруванням (яке давно теж стало цифровим). А деякі поєднують 3D виробництво з литтям. Тривимірний друк краще підходить для виготовлення прототипів, а фрезерування - для виробництва невеликих і середніх серій. Фрезерування вигідне при випуску сотень виробів, але не справляється з складною геометрією, як 3D-друк.

1.8 Методи контролю якості в процесі 3D-друку

Якість виробів, отриманих методом адитивного виробництва, значною мірою залежить від стабільності технологічного процесу та точності формування кожного шару. У зв'язку з цим особливої актуальності набувають методи контролю якості, які дозволяють виявляти дефекти на ранніх етапах виготовлення.

Існуючі методи контролю можна умовно поділити на три основні групи:

1. Візуальний контроль [3, 4].

Візуальний контроль є одним із найпростіших методів і базується на використанні камер для спостереження за процесом друку. Він дозволяє виявляти такі дефекти:

- зміщення шарів;
- нерівномірне нанесення матеріалу;
- відшарування виробу від платформи.

Однак цей метод має обмежену точність і значною мірою залежить від людського фактора.

2. Оптично-електронний контроль [3, 4, 11, 12, 13].

Оптично-електронні системи контролю базуються на використанні цифрових камер та алгоритмів обробки зображень. Отримане зображення аналізується в реальному часі, що дозволяє автоматично виявляти відхилення від заданої геометрії.

Основні етапи роботи такої системи: [11, 12, 13, 19, 20, 21].

- Захоплення зображення шару;
- Попередня обробка (фільтрація шумів);
- Виділення контурів;
- Порівняння з еталонною моделлю;
- Виявлення дефектів.

Перевагами методу є висока точність та можливість автоматизації.

3. Лазерний та тепловий контроль [3, 4].

Ці методи застосовуються переважно у промислових установках. Лазерні системи дозволяють отримувати профіль поверхні з високою точністю, а тепловізійний контроль — відслідковувати температурний режим.

Таким чином, найбільш перспективним напрямком є використання оптично-електронних систем, які забезпечують баланс між точністю, вартістю та складністю реалізації. Саме цей підхід є доцільним для впровадження у рамках даної роботи.

Напрями модернізації систем контролю

У рамках даної роботи розглянуто декілька можливих варіантів удосконалення систем контролю 3D-друку:

1. Оптично-електронна система контролю шару

цей підхід базується на використанні камери, системи підсвітки та алгоритмів обробки зображень для аналізу кожного шару в процесі друку. Така система дозволяє:

- виявляти дефекти формування;
- контролювати висоту шару;
- визначати зміщення шарів.

Перевагами цього варіанту є відносна простота реалізації, наочність та відповідність тематиці дослідження.

2. Лазерний контроль геометрії (профілометрія)

Цей метод передбачає використання лазерної лінії та камери для побудови тривимірної моделі поверхні шару. Отримані дані дозволяють виконувати точний аналіз геометрії виробу. Цей підхід є більш складним і відповідає науковому рівню досліджень.

3. Комбінований контроль температури та візуальний контроль

Система включає термокамеру та оптичну камеру для аналізу процесу плавлення матеріалу. Особливо актуальна для металевих 3D-принтерів та застосувань в аерокосмічній галузі.

В якості напрямку модернізації 3D-принтера пропонується впровадження оптично-електронної системи контролю процесу друку, що забезпечує моніторинг формування кожного шару в реальному часі та дозволяє виявляти дефекти на ранніх етапах [3, 4, 12, 13].

Висновок до першого розділу

У першому розділі дипломної роботи було проведено аналіз сучасних адитивних технологій та конструкцій 3D-принтерів, які використовуються у

машинобудуванні, медицині, ювелірній, аерокосмічній та будівельній галузях. Встановлено, що найбільш поширеною технологією для виготовлення пластикових деталей є FDM-друк, який характеризується відносною простотою реалізації, низькою вартістю обладнання та широкими можливостями модернізації.

Під час аналізу сучасних систем 3D-друку було визначено, що одним із головних недоліків більшості існуючих принтерів є відсутність автоматизованого контролю процесу формування виробу в режимі реального часу. Це призводить до виникнення дефектів друку, перевитрати матеріалу, збільшення часу виробництва та зниження якості готових деталей.

Було розглянуто існуючі методи контролю процесу 3D-друку та встановлено, що найбільш перспективним напрямком є використання оптично-електронних систем контролю на основі відеокамер, систем активного освітлення та алгоритмів комп'ютерного зору. Використання таких систем дозволяє здійснювати автоматичний моніторинг процесу друку, виявляти дефекти на ранніх етапах та реалізувати елементи інтелектуального керування технологічним процесом.

У результаті аналізу було сформовано основні вимоги до модернізованої системи контролю:

- забезпечення високої точності контролю;
- стабільність роботи системи при вібраціях;
- можливість роботи в режимі реального часу;
- інтеграція з програмним забезпеченням 3D-принтера;
- автоматизоване виявлення дефектів;
- використання комп'ютерно-інтегрованих технологій виробництва.

Також було обґрунтовано доцільність використання оптично-електронної системи контролю як складової сучасних автоматизованих виробничих комплексів відповідно до концепції Industry 4.0.

Отримані результати аналізу стали основою для подальшого проектування конструкції системи, виконання розрахунків параметрів камери, освітлення та розробки програмного забезпечення автоматизованого контролю процесу 3D-друку.

РОЗДІЛ 2
РОЗРАХУНОК ОПТИЧНО-ЕЛЕКТРОННОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ
ПРОЦЕСУ 3D-ДРУКУ ТА РОЗРОБЛЕННЯ ПРОГРАМНОГО
ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Для забезпечення ефективного контролю процесу 3D-друку треба розробити та проаналізувати оптично-електронну систему, яка здійснює моніторинг

формування шарів у реальному часі. На початковому етапі виконується побудова спрощеної розрахункової моделі системи, що дозволяє визначити основні параметри її функціонування та оцінити точність контролю.

Оптично-електронна система включає джерело освітлення, об'єкт спостереження (зону друку), оптичну систему (об'єктив), фотоприймальний пристрій (матрицю камери) та блок обробки сигналу. Взаємодія цих елементів визначає якість отриманого зображення та достовірність результатів контролю.

У межах розрахункової моделі розглядається процес формування зображення, який включає освітлення об'єкта, відбиття світлового потоку від його поверхні, формування оптичного зображення об'єктивом та перетворення світлового сигналу в електричний сигнал на матриці камери. Основними параметрами, що підлягають розрахунку, є освітленість об'єкта, рівень сигналу на фотоприймальному елементі, просторова роздільна здатність системи та сумарна похибка вимірювання.

Розрахунок освітленості дозволяє визначити необхідні характеристики джерела світла для забезпечення достатнього контрасту зображення. Аналіз формування сигналу на матриці камери дає змогу оцінити рівень корисного сигналу та його відповідність вимогам подальшої цифрової обробки. Вибір параметрів камери, зокрема роздільної здатності, розміру пікселя та характеристик об'єктива, визначає точність просторових вимірювань.

На основі отриманих результатів виконується оцінка точності системи, яка включає похибки, зумовлені дискретністю зображення, оптичними спотвореннями та шумами електронних компонентів. Побудована модель дозволяє обґрунтувати вибір елементів оптично-електронної системи та підтвердити її придатність для виявлення дефектів у процесі пошарового формування виробів у 3D-принтері.

Таким чином, розрахункова модель є основою для подальшого визначення параметрів системи та оцінки її ефективності в умовах реального процесу 3D-друку.

2.1 Загальна структура та принцип роботи системи

Оптично-електронна система контролю процесу 3D-друку потрібна для моніторингу якості формування шарів у реальному часі. Основною задачею

системи є виявлення дефектів друку, таких як зміщення шару, порушення геометрії, пропуски матеріалу та нерівномірність структури.

Система складається з таких основних елементів [3, 4, 12, 13]:

- відеокамера;
- джерело освітлення;
- обчислювальний модуль;
- програмне забезпечення обробки зображень;
- блок порівняння з еталонною моделлю.

Принцип роботи полягає у захопленні зображення кожного сформованого шару, його обробці та порівнянні з еталонними даними, отриманими з G-code або CAD-моделі.

Джерело освітлення. Джерело освітлення забезпечує формування світлового потоку, необхідного для отримання контрастного зображення об'єкта. У системах технічного зору доцільно використовувати світлодіодні (LED) джерела світла, які характеризуються:

- стабільністю світлового потоку;
- довговічністю;
- низьким енергоспоживанням;
- можливістю формування направленого або дифузного освітлення.

Для зменшення тіней та забезпечення рівномірності освітлення застосовується кільцеве або розсіяне освітлення [17, 22, 23].

Об'єкт контролю. Об'єктом контролю є поверхня шару, що формується в процесі 3D-друку. Властивості поверхні, такі як колір, шорсткість, коефіцієнт відбиття, впливають на якість отриманого зображення та точність вимірювань.

Оптична система. Оптична система складається з об'єктива, який виконує функцію формування зображення об'єкта на світлочутливій матриці. Основними параметрами об'єктива є:

- фокусна відстань;
- світлосила;

- глибина різкості;
- рівень оптичних спотворень.

Правильний вибір об'єктива забезпечує необхідне поле зору та мінімізацію геометричних викривлень [3, 4, 17].

Відеокамера та її складові. Відеокамера є ключовим елементом системи, який перетворює оптичне зображення у цифровий сигнал.

Сучасні камери складаються з наступних основних компонентів [3, 4, 24, 25]:

- Об'єктив (формує зображення об'єкта на матриці та визначає масштаб і поле зору.

- Світлофільтри використовуються для:

- зменшення впливу стороннього освітлення;
- підвищення контрасту зображення;
- виділення необхідного спектрального діапазону.

- Фотоприймальна матриця (CMOS або CCD)

Перетворює світловий потік у електричний сигнал.

Основні характеристики:

- роздільна здатність;
- розмір пікселя;
- чутливість;
- рівень шуму.

CMOS-матриці є більш поширеними завдяки високій швидкодії та низькому енергоспоживанню [3, 4, 24].

- Аналого-цифровий перетворювач (АЦП)
- Перетворює аналоговий сигнал у цифрову форму для подальшої обробки
- Інтерфейс передачі даних

Забезпечує передачу зображення до обчислювального модуля (USB, Ethernet тощо).

- Блок обробки зображення виконує:
 - фільтрацію шуму;

- бінаризацію;
- виділення контурів;
- аналіз геометричних параметрів;
- порівняння з еталонною моделлю.

На рисунку 2.1 представлена розрахункова модель оптично-електронної системи контролю процесу 3D-друку. Камера розташована на відстані D від об'єкта спостереження та формує зображення з полем зору FOV, що охоплює всю робочу зону принтера. Просторова роздільна здатність визначається співвідношенням розміру зони контролю до кількості пікселів матриці камери.

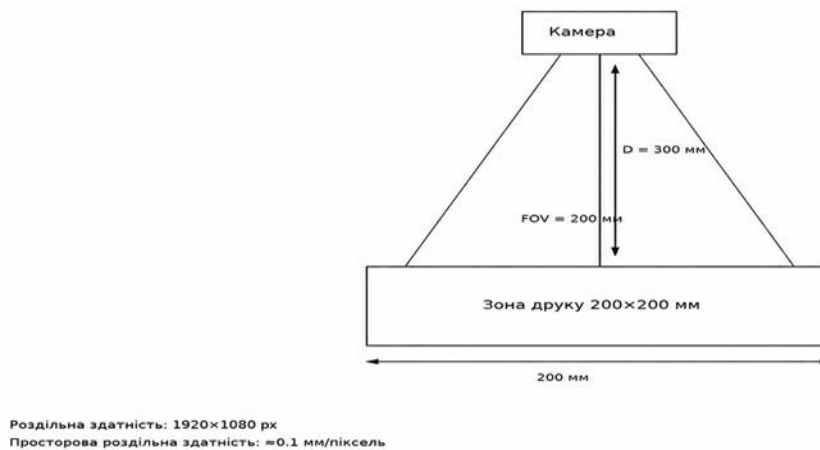


Рисунок 2.1 Розрахункова модель оптично-електронної системи контролю процесу 3D-друку

Схема розглядається як проекційна:

- камера формує 2D-зображення 3D-об'єкта
- кожному пікселю відповідає певна ділянка реального простору

Розмір зони контролю:

$$L = 200\text{мм.}$$

Роздільна здатність камери:

$$N = 1920 \text{ пікселів.}$$

Відстань до об'єкта:

$$D = 300 \text{ мм.}$$

Поле зору повинно покривати всю область друку:

$$FOV = 200 \text{ мм.}$$

Просторова роздільна здатність:

$$R = \frac{FOV}{N} = \frac{200}{1920} = 0,104 \text{ мм на піксель.}$$

Мінімальний розмір об'єкта:

$$d_{min} = 2 * R = 0.2 \text{ мм.}$$

Побудована розрахункова модель оптично-електронної системи дозволяє оцінити основні параметри контролю, зокрема поле зору, просторову роздільну здатність та похибки вимірювання. Отримані значення показують, що система здатна забезпечити виявлення дефектів розміром від 0,2 мм при загальній похибці вимірювання близько 0,15 мм.

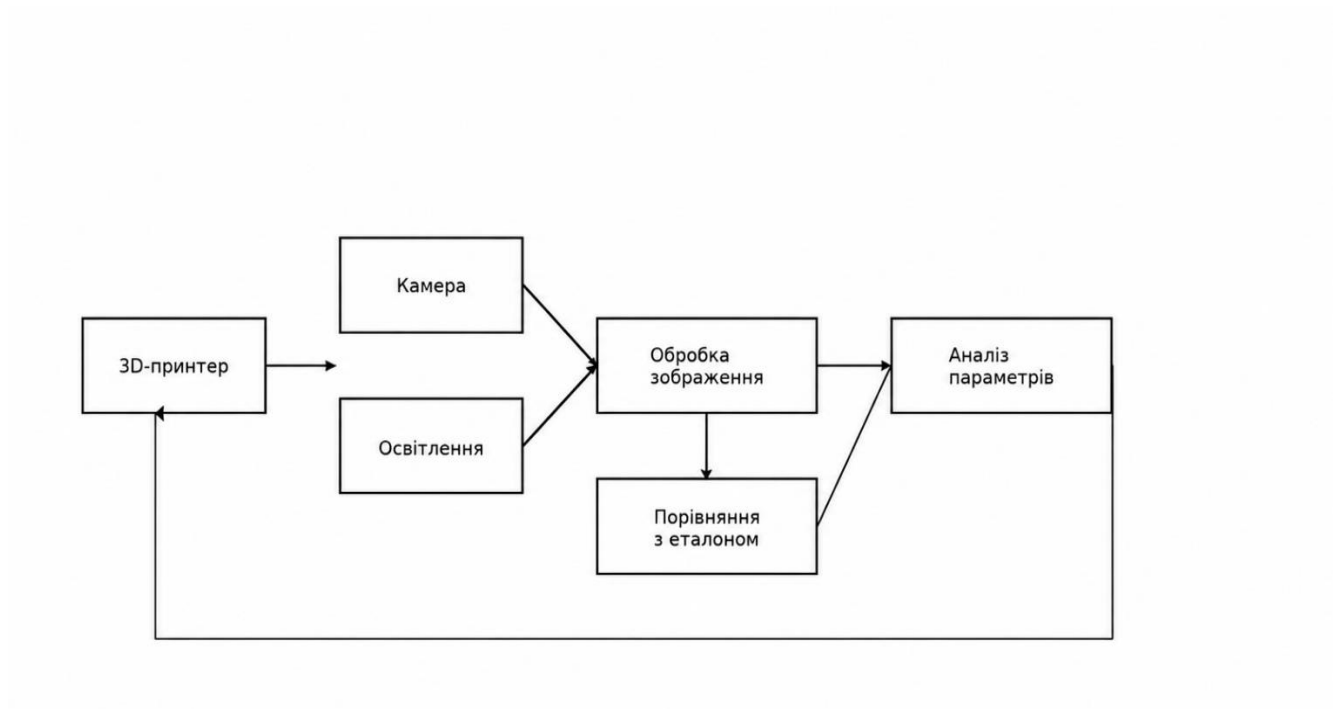


Рисунок 2.2 Функціональна схема оптично-електронної системи контролю процесу 3D-друку

Структурна схема включає 3D-принтер як об'єкт контролю, систему освітлення та камеру для отримання зображення, блок обробки зображення, модуль аналізу параметрів і блок порівняння з еталонною моделлю. Передбачено зворотний зв'язок, який дозволяє здійснювати корекцію процесу друку при виявленні дефектів.

2.2 Вибір параметрів камери та зони контролю

Для реалізації системи обирається цифрова камера з роздільною здатністю 1920×1080 пікселів [24, 25]. Зона контролю відповідає робочій області 3D-принтера і становить 200×200 мм.

Основною характеристикою є просторова роздільна здатність системи, яка визначається як відношення розміру області спостереження до кількості пікселів.

Розрахунок точності системи.

Точність залежить від:

- Частоти оновлення камери
- Поле зору
- Масштабу

Формула просторової роздільної здатності

$$R = FOV / N,$$

де R - роздільна здатність (мм на піксель); FOV - поле зору (мм); N - кількість пікселів.

Підставляючи значення:

$$R = 200 / 1920 \approx 0,104 \text{ мм/піксель.}$$

Отже, система здатна розрізняти деталі розміром приблизно 0,1 мм [17].

2.3 Розрахунок похибки вимірювання та мінімального розміру дефекту

Похибка вимірювання визначається роздільною здатністю системи:

$$\Delta = \pm R.$$

Після підстановки значення просторової роздільної здатності $R = 0,104$ мм/піксель отримуємо: $\Delta \approx \pm 0,10$ мм [3, 17].

Це значення є достатнім для контролю більшості дефектів FDM-друку, де товщина шару складає 0,1–0,3 мм.

Мінімальний розмір дефекту, який може бути виявлений системою, визначається як подвоєне значення просторової роздільної здатності:

$$d_{min} = 2R.$$

Підставляючи значення:

$$d_{min} = 2 \cdot 0,104 \approx 0,208 \text{ мм.}$$

Отже, система здатна стабільно виявляти дефекти розміром від 0,2 мм [3, 4].

2.4 Розрахунок часу обробки зображення та відхилення шару

Час обробки одного кадру визначається сумою часу виконання основних етапів:

$$t = t_1 + t_2 + t_3 + t_4,$$

де t_1 - захоплення зображення; t_2 - попередня обробка; t_3 - виділення контурів; t_4 - аналіз та порівняння.

Орієнтовні значення:

$$t_1 = 20 \text{ мс},$$

$$t_2 = 30 \text{ мс},$$

$$t_3 = 25 \text{ мс},$$

$$t_4 = 25 \text{ мс}.$$

Тоді

$$t = 20 + 30 + 25 + 25 = 100 \text{ мс}.$$

Отже, система здатна обробляти до десяти кадрів за секунду, що є достатнім для контролю процесу пошарового друку [11, 12, 13, 19, 20, 21].

Для оцінки якості шару використовується відносне відхилення площі:

$$\delta = |S - S_0| / S_0,$$

де S - площа поточного шару; S_0 - площа еталонного шару.

Граничне значення приймається:

$$\delta_{max} = 0,05 (5 \%).$$

При перевищенні цього значення формується сигнал про дефект [3, 19].

2.5 Розрахунок системи освітлення

Якість роботи оптично-електронної системи значною мірою залежить від умов освітлення. Для стабільного виділення об'єктів необхідно забезпечити рівномірне освітлення зони друку.

Освітленість визначається за формулою:

$$E = \Phi / S,$$

де E - освітленість, лк; Φ - світловий потік, лм; S - площа освітлювальної поверхні, м² [17].

Розрахунок

Площа зони контролю:

$$S = 0,2 \cdot 0,2 = 0,04 \text{ м}^2.$$

Необхідна освітленість для технічного зору:

$$E = 1000 \text{ лк.}$$

Тоді світловий потік:

$$\Phi = E \cdot S = 1000 \cdot 0,04 = 40 \text{ лм.}$$

Отже, для роботи системи достатньо джерела світла з потоком 40-100 лм. Але, також я б додав до цього напрацювання LED лампу (або кільце зі статичним світлом) або дифузне освітлення (заради того, щоб мінімізувати або прибрати факт тіней) [22, 23].

2.6 Оцінка ефективності системи

Ефективність системи визначається здатністю виявляти дефекти до завершення друку виробу.

Впровадження оптично-електронного контролю дозволяє:

- зменшити кількість браку;
- знизити витрати матеріалу;
- підвищити якість виробів;
- автоматизувати контроль процесу.

За рахунок раннього виявлення дефектів можливо зупинити процес друку, що зменшує втрати часу та ресурсів.

2.7 Вибір камери, розрахунок контрасту зображення та продуктивності системи

Для реалізації системи контролю необхідно обрати камеру, яка забезпечує достатню точність і швидкість.

Основні вимоги:

- роздільна здатність: не менше 1920×1080
- частота кадрів: ≥ 10 fps
- інтерфейс: USB
- підтримка OpenCV

Розрахунок поля зору

Поле зору залежить від фокусної відстані:

$$FOV = D * \frac{W}{f},$$

де D - відстань до об'єкта; W - ширина сенсора; f - фокусна відстань.

На мій вибір пала 3DO USB / Enclosure Camera Kit V2 Sony 4K камера або промислова камера Basler.

Обрана камера забезпечує необхідну роздільну здатність для виявлення дефектів від 0,1-0,2 мм [24, 25].

Розрахунок контрасту зображення. Для надійного виділення об'єктів важливий контраст між шаром і фоном.

Контраст визначається за формулою [3]:

$$K = \frac{(I_{max} - I_{min})}{(I_{max} + I_{min})},$$

де I_{max} - максимальна яскравість; I_{min} - мінімальна яскравість.

Тобто, якщо:

$$I_{max} = 200, I_{min} = 50,$$

$$K = \frac{200-50}{200+50} = 0.6.$$

Отже, контраст $K > 0.5$ є достатнім для стабільної бінаризації зображення.

Розрахунок продуктивності системи. Продуктивність визначається кількістю оброблених кадрів:

$$P = \frac{1}{t},$$

де t - час обробки одного кадру.

Розрахунок:

$$t = 0.1 \text{ с.}$$

$$P = \frac{1}{0.1} = 10 \text{ кадрів на секунду.}$$

Отже, система працює в реальному часі і підходить для пошарового контролю.

2.8 Розрахунок точності визначення координат, параметрів освітлення та формування сигналу

Похибка визначення координат центру об'єкта: [3, 17].

$$\Delta x = \frac{0.104}{\sqrt{12}} \approx 0.03 \text{ мм.}$$

Отже, система дозволяє визначати зміщення шару з точністю до 0.03 мм.

Для стабільної роботи системи технічного зору використовується світлодіодне (LED) кільцеве освітлення, яке забезпечує [17, 22, 23]:

- рівномірне освітлення
- відсутність тіней
- стабільність спектру

Приймаємо:

- світловий: $\Phi = 100 \text{ лм}$

- кут розсіювання: 120°

- відстань до об'єкта: $r = 0.3 \text{ м}$

- коефіцієнт використання світла: $\eta = 0.8$

2.9 Розрахунок оптично-електронної системи в активному режимі та відношення сигнал/шум

Активний режим роботи ОЕС

Оптично-електронна система контролю процесу 3D-друку працює в активному режимі, при якому об'єкт освітлюється штучним джерелом світла, а відбитий сигнал реєструється фотоприймальним пристроєм [17].

У цьому випадку процес формування сигналу включає:

- випромінювання світлового потоку джерелом;
- поширення світла до об'єкта;
- відбиття від поверхні;
- формування зображення об'єктивом;
- перетворення світлового сигналу у електричний сигнал матрицею.

$E = \Phi / (4\pi r^2)$ — освітленість об'єкта

$SNR = U_{\text{сигн}} / \text{Шум}$ — відношення сигнал/шум

$R = FOV/N$ — просторова роздільна здатність

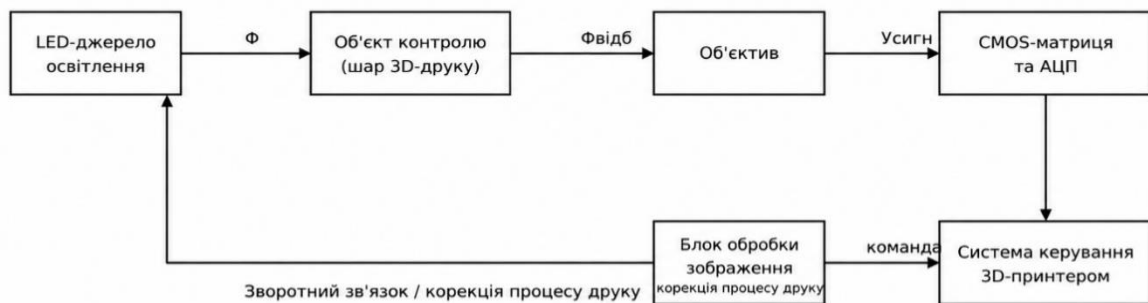


Рисунок 2.3 Структурна схема роботи оптично-електронної системи в активному режимі контролю процесу 3D-друку

На рисунку представлено принцип роботи оптично-електронної системи в активному режимі. Джерело освітлення формує світловий потік, який падає на поверхню шару виробу. Відбитий потік через оптичну систему потрапляє на CMOS-матрицю камери, де перетворюється в електричний сигнал. Отримані дані

передаються до блоку обробки зображення для виявлення дефектів друку. У разі виявлення відхилень формується сигнал керування для корекції процесу друку.

Розрахунок освітленості об'єкта. Освітленість поверхні визначається:

$$E = \frac{\Phi * \eta}{4\pi r^2},$$

де $\Phi = 500\text{лм}$ - світловий потік; $\eta = 0.8$ - коефіцієнт використання;
 $r = 0.3\text{м}$ - відстань.

Результат: $E \approx 353\text{лк}$.

Потік випромінювання, що надходить у камеру. Відбитий світловий потік визначається:

$$E_r = E * \rho,$$

де $\rho = 0.6$ - коефіцієнт відбиття пластику [17].

$$E_r \approx 353 * 0.6 \approx 212 \text{ лк}.$$

Потік, що потрапляє на матрицю. Потік, що потрапляє в об'єктив:

$$\Phi_{in} = E_r * S_{lens},$$

де S_{lens} - площа об'єктива.

Для об'єктива діаметром 5 мм:

$$S_{lens} = \frac{\pi d^2}{4} \approx 2 * 10^{-5} \text{ м}^2.$$

Результат:

$$\Phi_{in} \approx 212 * 2 * 10^{-5} \approx 0.0042 \text{ лм}.$$

Формування сигналу на матриці. Електричний сигнал пропорційний потоку:

$$U = k * \Phi_{in},$$

де $k = 100 \text{ В/лм}$.

Результат:

$$U \approx 0.42 \text{ В}.$$

Розрахунок шумів. У системі враховуються основні види шумів [18]:

- фотонний шум

- тепловий шум
- електронний шум

Сумарний шум:

$$N = \sqrt{N_1^2 + N_2^2 + N_3^2},$$

де фотонний шум: $N_1 = 0.02$ В; тепловий шум: $N_2 = 0.01$ В; електронний шум: $N_3 = 0.01$ В.

Результат:

$$N \approx \sqrt{0.0004 + 0.0001 + 0.0001} \approx 0.024 \text{ В.}$$

Розрахунок відношення сигнал/шум. Ключовий параметр системи визначається за формулою [18]:

Результат:

$$SNR \approx \frac{0.42}{0.024} \approx 17.5.$$

Потрібно також перевести у децибели, тож:

$$SNR_{db} = 20 \log_{10}(SNR).$$

$$SNR_{db} \approx 24.8 \text{ дБ.}$$

Аналіз результату

$SNR > 10$ — система працездатна

$SNR \approx 20\text{--}30$ дБ — нормальна якість

$SNR > 30$ дБ — висока точність

У нашому випадку:

- система працездатна і стабільна
- можливе подальше покращення (освітлення, камера)

Загальні положення. Експозиція визначає кількість світлової енергії, що потрапляє на матрицю камери за час зйомки. Вона залежить від освітленості об'єкта та часу витримки.

Основне співвідношення:

H — експозиція (лк * с).

E – освітленість(лк).

t – витримка (с).

Вихідні дані

Приймаємо:

Освітленість: $E = 353\text{лк}$ (з попередніх розрахунків)

Необхідна експозиція для CMOS: $H = 0.01\text{лк} \cdot \text{с}$

$$p = 2.8 \text{ мкм} \Rightarrow A = (2.8 \cdot 10^{-6})^2 \approx 7.84 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2.$$

$$\lambda = 550 \cdot 10^{-9} \text{ м}.$$

$$h = 6.63 \cdot 10^{-34}.$$

$$c = 3 \cdot 10^8.$$

Для нормальної роботи CMOS необхідно:

$$N \approx 10^4 \text{ фотонів}.$$

Звідси:

$$t = \frac{Nhc}{EA\lambda}.$$

Підставляємо:

$$t = \frac{10^4 \cdot 6.63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{350 \cdot 7.84 \cdot 10^{-12} \cdot 550 \cdot 10^{-9}}.$$

Результат:

$$t \approx 1.2 \cdot 10^{-4} \text{ с} = 120 \text{ мкс}.$$

Отримане значення:

- відповідає реальним камерам
- дозволяє уникнути розмиття
- забезпечує достатній сигнал

Розрахунок відношення сигнал/шум (SNR)

Фотонний шум підкоряється закону Пуассона:

$$N_{noise} = \sqrt{N}.$$

$$SNR = \sqrt{10^4} = 100.$$

У децибелах:

$$SNR_{db} = 20 \log_{10}(100) = 40 \text{ дБ}.$$

Динамічний діапазон визначається як:

$$DR = \frac{N_{max}}{N_{min}},$$

де $N_{max} = 3 * 10^4$ – насичення пікселя; $N_{min} = 10$ – межа чутливості.

$$DR = \frac{3*10^4}{10} = 3000.$$

У децибелах:

$$DR_{db} = 20 \log_{10}(3000) \approx 69.5 \text{ дБ}.$$

Проведений розрахунок показав, що при освітленості близько 350 лк, необхідна витримка камери становить приблизно 120 мкс для формування сигналу достатнього рівня. Розрахунок відношення сигнал/шум показав значення близько 40 дБ, що забезпечує високу якість зображення. Динамічний діапазон системи становить близько 70 дБ, що дозволяє ефективно реєструвати як слабкі, так і сильні сигнали, забезпечуючи надійний контроль процесу 3D-друку.

2.10 Аналіз існуючого прототипу оптично-електронної системи контролю та виявлення недоліків

Для оцінки особливостей практичної реалізації оптично-електронної системи контролю процесу 3D-друку було проведено аналіз існуючого експериментального прототипу, представленого на рисунку 2.4.

Цей прототип являє собою систему зовнішнього кріплення відеомодуля та елементів підсвітки, встановлених на рамі FDM 3D-принтера.



Рисунок 2.4 Прототип конструкції

Основною задачею аналізу є визначення конструктивних, оптичних та експлуатаційних недоліків існуючого рішення з метою подальшої модернізації системи та підвищення ефективності автоматизованого контролю процесу друку.

Під час аналізу було встановлено, що конструкція прототипу реалізує базову функцію спостереження за робочою областю принтера, однак має низку недоліків, які можуть негативно впливати на точність роботи системи комп'ютерного зору та стабільність процесу контролю.

Аналіз конструктивного виконання. Відеомодуль закріплений на друкованому пластиковому кронштейні консольного типу, який встановлюється на вертикальній стійці принтера. Подібна схема кріплення є простою у виготовленні та дозволяє швидко інтегрувати систему в конструкцію принтера, однак має недостатню жорсткість.

Під час роботи принтера виникають механічні коливання, викликані:

- переміщенням друкувальної головки;
- роботою крокових двигунів;
- інерційними навантаженнями;
- вібраціями рами.

Оскільки камера встановлена на консольному елементі значної довжини, навіть незначні вібрації можуть призводити до:

- зміщення зображення;
- втрати різкості;
- появи шумів;
- помилок алгоритмів розпізнавання дефектів.

Недостатня жорсткість конструкції є одним із головних недоліків прототипу, оскільки точність роботи оптично-електронної системи безпосередньо залежить від стабільності положення камери.

Крім того, у конструкції відсутні елементи демпфування вібрацій, що додатково погіршує стабільність формування зображення.

Аналіз розташування камери. Камера встановлена збоку від робочої області принтера, що призводить до появи перспективних спотворень зображення. При такому розташуванні:

- частина поверхні виробу може перекриватися елементами принтера;
- виникають нерівномірні масштаби зображення;
- погіршується точність визначення геометричних параметрів.

Особливо критичним цей недолік є при аналізі дрібних дефектів друку та контролі точності пошарового формування виробу.

Для підвищення точності системи доцільно використовувати центральне або регульоване розташування камери з можливістю точного налаштування кута огляду.

Аналіз системи освітлення. У прототипі використовується локальна LED-підсвітка, встановлена безпосередньо біля відеомодуля. Аналіз показав, що така схема освітлення не забезпечує рівномірного світлового потоку по всій області контролю.

Основними недоліками системи освітлення є:

- утворення локальних пересвічених зон;
- виникнення тіней;

- залежність якості зображення від зовнішнього освітлення;
- нерівномірний розподіл яскравості.

Нерівномірність освітлення негативно впливає на роботу алгоритмів цифрової обробки зображення та може призводити до хибного визначення дефектів.

Також у конструкції відсутні:

- розсіювач світла;
- світлофільтри;
- елементи екранування паразитного світла.

Це знижує якість формування оптичного сигналу та погіршує співвідношення сигнал/шум системи.

Аналіз кабельного підключення. У прототипі кабелі живлення та передачі даних розташовані відкрито, без використання спеціальних кабельних каналів або захисних елементів. Це може призводити до:

- механічного пошкодження кабелів;
- виникнення електромагнітних завад;
- випадкового зміщення камери;
- зниження надійності системи.

Для промислового або тривалого використання така конструкція є недостатньо технологічною.

Аналіз технологічності конструкції. Попри простоту виготовлення, конструкція має ряд недоліків з точки зору технологічності:

- відсутність модульності;
- складність точного регулювання положення камери;
- обмежені можливості модернізації;
- недостатній захист електронних компонентів.

Також конструкція не забезпечує швидкого демонтажу та повторного калібрування системи.

Аналіз інтеграції в автоматизовану систему. Прототип виконує лише функцію візуального спостереження та не реалізує повноцінний автоматизований контур керування процесом друку. У конструкції відсутні:

- система автоматичного аналізу дефектів;
- інтеграція з системою керування принтером;
- механізми автоматичної корекції параметрів друку;
- замкнений контур керування.

Таким чином, існуючий прототип не відповідає повною мірою сучасним вимогам комп'ютерно-інтегрованих технологій та концепції Industry 4.0.

У результаті проведеного аналізу було встановлено, що існуючий прототип оптично-електронної системи контролю має ряд конструктивних, оптичних та експлуатаційних недоліків, які обмежують точність та ефективність контролю процесу 3D-друку.

Основними недоліками системи є:

- недостатня жорсткість кріплення камери;
- відсутність демпфування вібрацій;
- нерівномірне освітлення робочої області;
- наявність перспективних спотворень;
- відсутність захисту електронних компонентів;
- недостатня інтеграція в автоматизовану систему керування.

На основі проведеного аналізу було сформовано вимоги до модернізованої конструкції оптично-електронної системи контролю, яка повинна забезпечувати:

- підвищену жорсткість;
- стабільне освітлення;
- точне позиціонування камери;
- автоматизований контроль процесу друку;
- інтеграцію в комп'ютерно-інтегровану систему виробництва.

2.11 Структура програмного забезпечення, логіка та алгоритм

Програмна частина буде реалізована мовою C# [26] із використанням бібліотеки OpenCV.

Основні функції:

- захоплення відео з камери
- обробка зображення
- аналіз шару
- порівняння з еталоном
- виявлення дефектів

Логіка роботи програми. Алгоритм роботи:

- Захоплення кадру з камери
- Попередня обробка
- Бінаризація
- Виділення контурів
- Обчислення площі
- Порівняння з еталоном
- Вивід результату

Алгоритм роботи програмного забезпечення

В Додатку А. Програмний код наведено дійсний та робочий код програми, який діє згідно з алгоритмом та виконує функції, про які наведено нижче.

В Додатку В. Алгоритм роботи програмного коду наведено блок-схему алгоритму роботи програмного забезпечення оптично-електронної системи контролю процесу 3D-друку.

Розроблений алгоритм забезпечує автоматизовану обробку відеопотоку з камери у режимі реального часу та дозволяє контролювати якості формування шару під час друку.

На початковому етапі виконується ініціалізація відеокамери та запуск захоплення кадрів із робочої області 3D-принтера. Після отримання поточного кадру здійснюється його попередня обробка, яка включає:

- перетворення кольорового зображення у відтінки сірого;
- фільтрацію шумів за допомогою Gaussian Blur [20];
- Бінаризацію [21] зображення методом порогової обробки.

Попередня обробка дозволяє зменшити вплив шумів, підвищити контрастність зображення та виділити область надрукованого шару для подальшого аналізу.

Після бінаризації виконується пошук контурів об'єкта за допомогою функції FindContours [19] бібліотеки OpenCV. Отримані контури використовуються для визначення геометричних параметрів шару та обчислення сумарної площі області друку.

Наступним етапом алгоритму є порівняння отриманої площі з еталонним значенням. Для цього обчислюється відносне відхилення між поточним та еталонним значенням площі.

Якщо величина відхилення перевищує допустимий поріг, система формує повідомлення про виявлення дефекту друку. У протилежному випадку формується повідомлення про нормальний стан шару та коректність процесу друку.

Після завершення аналізу кадру результати відображаються оператору, а система переходить до обробки наступного кадру. Цикл роботи повторюється безперервно до завершення процесу друку або зупинки програми користувачем.

Розроблений алгоритм забезпечує [3, 4, 11]:

- автоматизований контроль процесу друку;
- виявлення дефектів у режимі реального часу;
- можливість інтеграції в комп'ютерно-інтегровані системи виробництва;
- підвищення точності та стабільності адитивного виробництва.

Запропонований підхід дозволяє реалізувати елементи інтелектуального моніторингу процесу 3D-друку відповідно до сучасних вимог автоматизації та концепції Industry 4.0.

Можливе розширення коду

1. Також, можна визначати центр мас, що дозволить знаходити перекося та аналізувати зсуви.

```
static System.Drawing.Point GetCenter(VectorOfPoint contour)
{
    var moments = CvInvoke.Moments(contour);
    int cx = (int)(moments.M10 / moments.M00);
    int cy = (int)(moments.M01 / moments.M00);

    return new System.Drawing.Point(cx, cy);
}
```

2. Візуалізація дефектів

```
CvInvoke.DrawContours(frame, contours, -1, new MCvScalar(0, 0, 255), 2);
```

Червоний контур буде виступати позначкою дефекта для яснішого розуміння

3. Автоматичне збереження помилок

```
if (deviation > threshold)
{
    CvInvoke.Imwrite("defect.jpg", frame);
}
```

2.12 Переваги та недоліки реалізованої системи

Переваги:

- контроль у реальному часі
- автоматичне виявлення дефектів
- простота реалізації
- можливість масштабування

Недоліки:

- залежність від освітлення
- обмежена точність камери

- можливі помилки при складній геометрії

Висновок до другого розділу

У другому розділі дипломної роботи було виконано розробку та розрахунок параметрів оптично-електронної системи контролю процесу 3D-друку. На основі проведеного аналізу визначено структуру системи, обґрунтовано вибір основних елементів та виконано необхідні інженерні розрахунки.

Було сформовано математичну модель оптично-електронної системи та визначено основні параметри контролю, зокрема:

- поле зору камери;
- фокусну відстань об'єктива;
- просторову роздільну здатність;
- точність визначення дефектів;
- параметри експозиції;
- співвідношення сигнал/шум.

У процесі розрахунків було визначено оптимальні параметри відеокамери та системи освітлення для забезпечення стабільного формування зображення в умовах роботи 3D-принтера. Проведений розрахунок освітленості показав, що використання активного LED-освітлення забезпечує необхідний рівень яскравості та зменшити вплив зовнішнього освітлення на якість роботи системи.

Також було виконано аналіз активного режиму роботи оптично-електронної системи та проведено розрахунок співвідношення сигнал/шум, який підтвердив можливість отримання стабільного відеосигналу з достатньою контрастністю для реалізації алгоритмів комп'ютерного зору.

Під час аналізу існуючого прототипу системи були виявлені основні недоліки:

- недостатня жорсткість кріплення камери;
- нерівномірність освітлення;
- вплив вібрацій;
- відсутність автоматизованого керування;

- недостатня інтеграція в комп'ютерно-інтегровану систему виробництва.

На основі проведених досліджень були сформовані вимоги до модернізованої конструкції оптично-електронної системи контролю та визначені основні напрямки її вдосконалення.

Отримані результати розрахунків підтвердили можливість реалізації автоматизованої системи контролю процесу 3D-друку з використанням сучасних засобів машинного зору, цифрової обробки зображень та комп'ютерно-інтегрованих технологій. Розроблена система забезпечує необхідну точність контролю, стабільність роботи та можливість інтеграції у сучасні автоматизовані виробничі комплекси.

РОЗДІЛ 3

КОНСТРУКТОРСЬКА РОЗРОБКА ОПТИЧНО-ЕЛЕКТРОННОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ПРОЦЕСУ 3D-ДРУКУ

3.1 Загальна концепція конструкції

Розроблена оптично-електронна система контролю процесу 3D-друку призначена для автоматизованого моніторингу процесу формування виробу в реальному часі та є складовою комп'ютерно-інтегрованої системи виробництва [3, 4, 12, 13]. Основною метою створення даної конструкції є підвищення точності друку, зменшення кількості браку, забезпечення стабільності технологічного процесу та реалізація елементів інтелектуальної автоматизації в адитивному виробництві.

Конструкція системи розроблялась з урахуванням особливостей роботи FDM 3D принтера та необхідності інтеграції додаткових засобів контролю без суттєвого ускладнення базової конструкції принтера [1, 2, 7, 10]. Основною особливістю запропонованого рішення є поєднання механічних елементів кріплення, системи освітлення, відеомодуля та програмних засобів цифрової обробки зображень у єдину автоматизовану систему контролю.

Загальна концепція роботи системи полягає у безперервному спостереженні за процесом пошарового формування виробу за допомогою відеокамери. Під час друку система освітлення формує стабільний світловий потік у зоні друку, що забезпечує рівномірне освітлення поверхні виробу незалежно від зовнішніх умов.

Таким чином, розроблена система реалізує принципи замкненого контуру автоматичного керування, де результати контролю безпосередньо впливають на подальший технологічний процес. Це дозволяє віднести систему до класу комп'ютерно-інтегрованих виробничих систем, що відповідають сучасній концепції Industry 4.0.

При розробці конструкції особлива увага приділялась таким вимогам:

- забезпечення достатньої жорсткості вузла кріплення камери;
- мінімізація вібрацій під час роботи принтера;
- можливість регулювання положення камери;

- забезпечення необхідного поля зору;
- простота монтажу та обслуговування;
- модульність конструкції;
- можливість інтеграції з різними моделями 3D-принтерів.

Конструктивно система складається з декількох основних вузлів:

- відеомодуля;
- оптичної системи;
- системи освітлення;
- кронштейна кріплення;
- корпусних елементів;
- системи керування та обробки даних.

Для реалізації системи контролю було обрано відеомодуль високої роздільної здатності з CMOS-матрицею та USB-інтерфейсом передачі даних (детальна характеристика камери наведена нижче). Використання цифрової камери дозволяє отримувати зображення високої якості та виконувати автоматизовану обробку даних у реальному часі.

Оптична система включає об'єктив із розрахованою фокусною відстанню, який забезпечує необхідне поле зору та просторову роздільну здатність системи. Параметри оптичної системи були визначені у другому розділі на основі розрахунків поля зору, глибини різкості та точності контролю.

Для забезпечення стабільного формування зображення в конструкції використовується система активного LED-освітлення. Використання активного режиму роботи ОЕС дозволяє зменшити вплив зовнішнього освітлення, підвищити контрастність зображення та покращити точність роботи алгоритмів комп'ютерного зору.

Механічна частина конструкції була спроектована в середовищі SolidWorks із використанням параметричного моделювання [5, 6]. Це дозволило виконати перевірку взаємного розташування елементів, оцінити габаритні параметри системи, забезпечити сумісність деталей.

При проектуванні також враховувались принципи технологічності та ремонтпридатності конструкції. Усі елементи мають просту геометричну форму та можуть бути виготовлені із застосуванням адитивних технологій або стандартних методів механічної обробки. Модульний принцип побудови забезпечує можливість швидкої заміни окремих компонентів та подальшої модернізації системи.

Запропонована конструкція дозволяє реалізувати автоматизований контроль процесу друку без значного збільшення вартості обладнання, що є важливим фактором для використання системи у навчальних лабораторіях, малосерійному виробництві та дослідницьких комплексах.

3.2 Аналіз конструкції вузла

Розроблений вузол оптично-електронної системи контролю призначений для забезпечення точного розташування елементів системи відносно робочої області принтера.

Згідно зі кресленням загального вигляду, конструкція складається з таких основних елементів [27]:

- вузла кріплення відеомодуля.
- осьового фіксатора,
- передньої кришки відеомодуля,
- задньої кришки відеомодуля,
- елементів кріплення,
- системи LED-підсвітки,
- відеомодуля та електронних компонентів.

3.2.1 Аналіз вузла кріплення відеомодуля

Основним несучим елементом конструкції є вузол кріплення відеомодуля [27]. Цей елемент виконує функцію механічної фіксації камери та забезпечує стабільність її положення відносно робочої поверхні принтера. (Додаток Г. Вузол кріплення відеомодуля)

Під час роботи 3D-принтера можуть виникати механічні вібрації, пов'язані з переміщенням друкувальної головки та роботою крокових двигунів [7, 8, 10]. Наявність навіть незначних коливань може призводити до погіршення якості зображення, появи шумів та помилок у роботі алгоритмів комп'ютерного зору [3, 4]. Саме тому конструкція кронштейна повинна забезпечувати достатню жорсткість та мінімальний прогин.

Вузол кріплення має компактну форму та складається з основної опорної пластини, ребер жорсткості та монтажних отворів (рисунок 3.1). Геометрія деталі була вибрана таким чином, щоб забезпечити:

- мінімальну масу,
- достатню механічну міцність,
- зручність монтажу,
- можливість регулювання положення камери.

Для зменшення впливу вібрацій у конструкції передбачено використання жорсткого з'єднання з рамою принтера та мінімальну довжину консолі кріплення [24, 25].

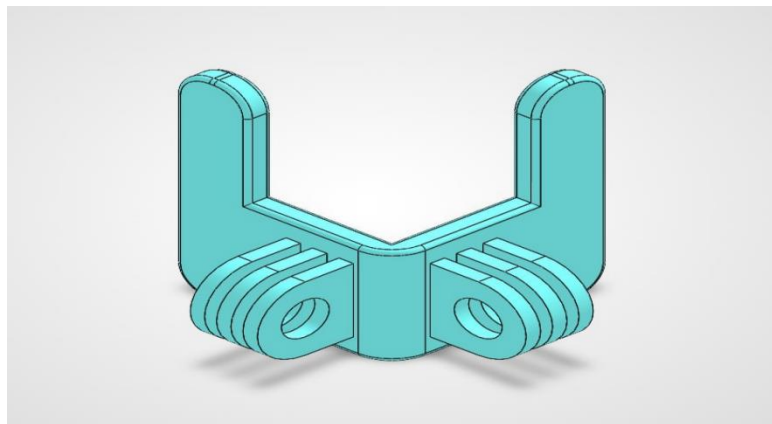


Рисунок 3.1 Вузол кріплення відеомодуля
(Середовище Solidworks)

3.2.2 Аналіз осьового фіксатора

Осьовий фіксатор призначений для регулювання та фіксації положення відеомодуля у просторі [27]. Цей елемент забезпечує можливість налаштування кута нахилу камери та її точного позиціонування відносно зони друку.

Необхідність використання регулювання пояснюється тим, що різні моделі принтерів можуть мати відмінні геометричні параметри робочої області, висоту друкувальної головки та розміщення напрямних елементів.

Конструкція осьового фіксатора забезпечує:

- плавне регулювання положення,
- надійну фіксацію після налаштування,
- компенсацію незначних монтажних похибок,
- можливість повторного налаштування системи.

Використання осьового фіксатора також спрощує процес калібрування системи машинного зору, що є важливим елементом автоматизованого контролю процесу друку (рисунок 3.2) [3, 4].

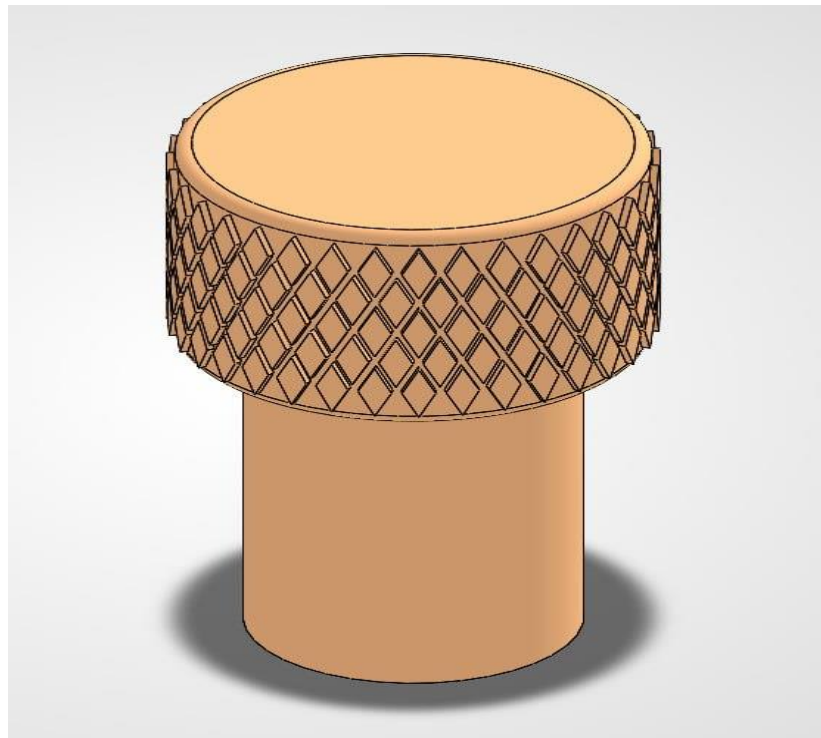


Рисунок 3.2 Осьовий фіксатор
(Середовище Solidworks)

3.2.3 Аналіз передньої кришки відеомодуля

Передня кришка виконує одразу декілька функцій [22, 23, 27]:

- захист об'єктива та матриці камери;

- кріплення системи LED-освітлення;
- обмеження попадання паразитного світла;
- формування жорсткості корпусу.

У конструкції передбачено центральний отвір для об'єктива камери, а також посадкові місця для світлодіодів системи підсвітки. Розташування LED-елементів навколо об'єктива забезпечує рівномірне освітлення робочої області та мінімізувати утворення тіней(рисунок 3.3) [17, 22, 23].

Особливістю конструкції є використання активного освітлення, що дозволяє реалізувати активний режим роботи оптично-електронної системи (Додаток Е. Передня кришка відеомодуля). Це значно підвищує стабільність формування зображення та зменшує залежність системи від зовнішніх умов освітлення. (Для зменшення внутрішніх відбиттів внутрішня поверхня кришки може мати матове або темне покриття.)

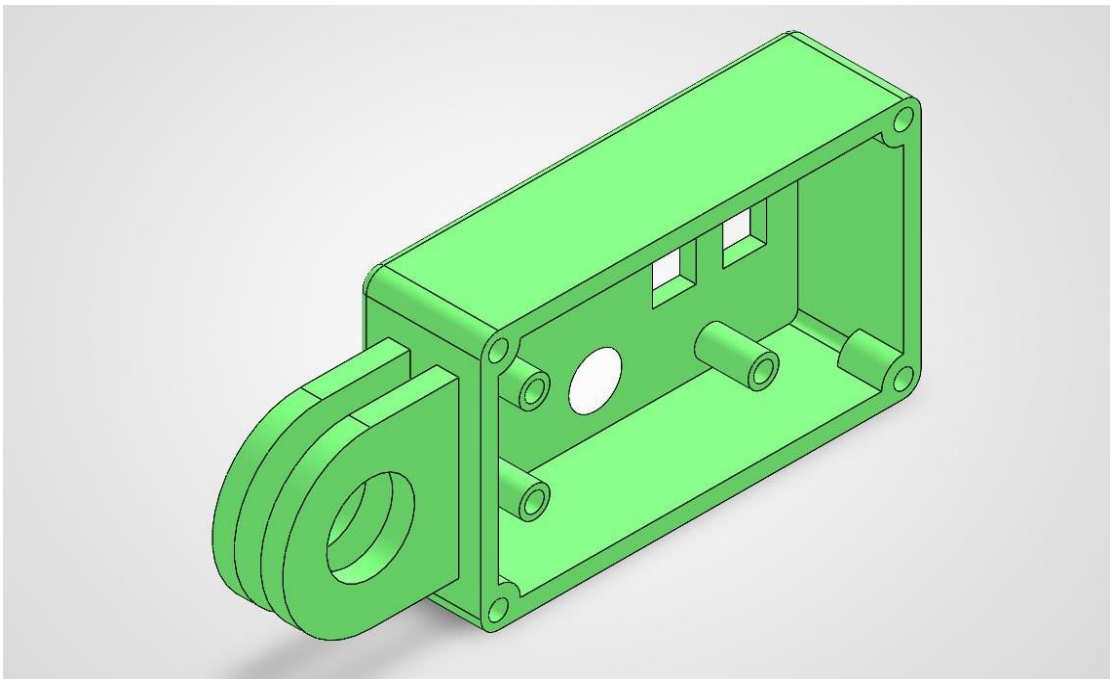


Рисунок 3.3 Передня кришка відеомодуля
(Середовище Solidworks)

3.2.4 Аналіз задньої кришки відеомодуля

Задня кришка виконує захисну та монтажну функції [27].

Вона забезпечує:

- захист електронних компонентів;
- фіксацію кабелів;
- захист від пилу;
- механічну жорсткість корпусу.

У конструкції передбачено отвори для підключення USB-кабелю камери та кабелів живлення системи освітлення (рисунок 3.4) [22, 23, 24, 25, 27]. Також конструкція забезпечує можливість швидкого доступу до електронних компонентів у процесі обслуговування або модернізації системи. (Додаток Д. Задня кришка відеомодуля)

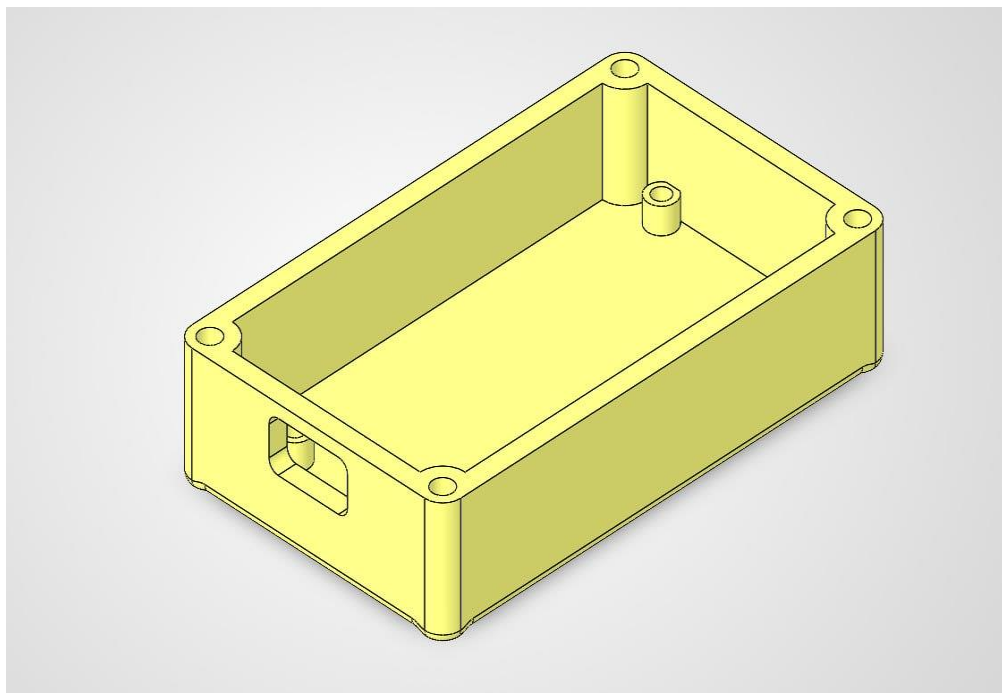


Рисунок 3.4 Задня кришка відеомодуля
(Середовище Solidworks)

3.2.5 Аналіз системи освітлення

Для забезпечення стабільної роботи системи контролю в конструкції використовується LED-підсвітка на основі RGB-світлодіодів [22, 23]. Система освітлення забезпечує необхідний рівень освітленості робочої області та формує рівномірний світловий потік у зоні друку (рисунок 3.5).

Використання активного освітлення дозволяє:

- підвищити контрастність зображення;

- покращити точність виявлення дефектів;
- зменшити вплив зовнішнього освітлення;
- забезпечити стабільність роботи алгоритмів комп'ютерного зору.

Система освітлення є складовою автоматизованої оптично-електронної системи контролю та інтегрується із системою керування принтером.

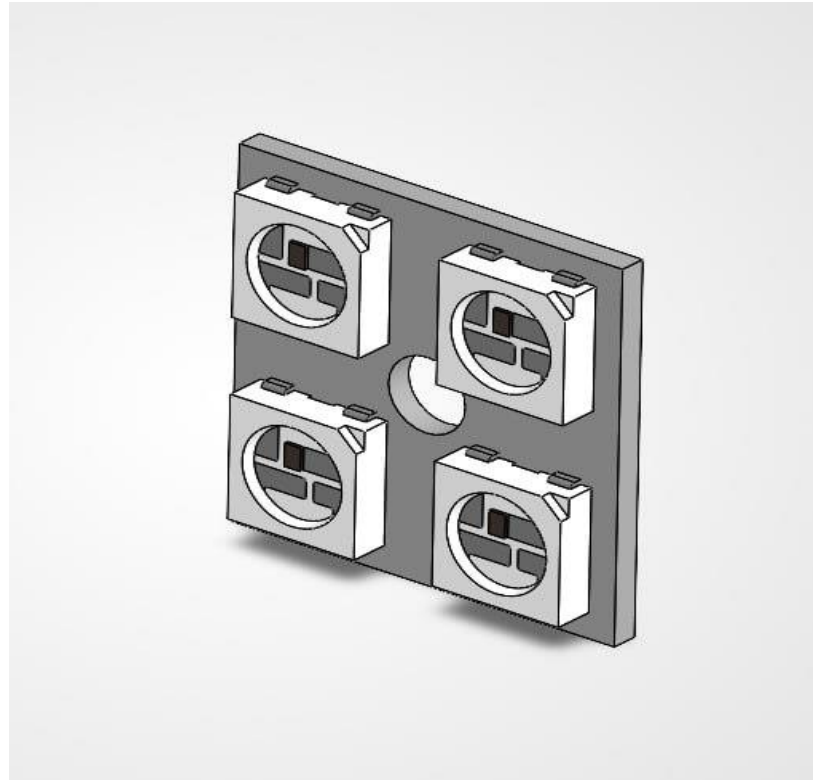


Рисунок 3.5 Система освітлення
(Середовище Solidworks)

3.2.6 Аналіз технологічності конструкції

Під час проєктування вузла враховувались вимоги технологічності та ремонтопридатності конструкції. Основна частина деталей має просту геометричну форму та може бути виготовлена із застосуванням адитивних технологій без необхідності використання складного обладнання [1, 2, 5, 6].

Конструкція забезпечує:

- простоту виготовлення;
- мінімальну кількість деталей;
- легкість складання;

- зручність обслуговування;
- можливість модернізації.

Завдяки використанню параметричного моделювання у середовищі SolidWorks було забезпечено високу точність взаємного розташування елементів конструкції та можливість швидкого внесення змін у модель [5, 6].

Таким чином, розроблений вузол оптично-електронної системи контролю забезпечує необхідну точність позиціонування камери, стабільність роботи системи машинного зору та можливість інтеграції в автоматизовану комп'ютерно-інтегровану систему керування процесом 3D-друку [3, 4, 5, 6]. (Додаток Є. Креслення загального вигляду)

3.3 Тестування програмного забезпечення оптично-електронної системи контролю

Для перевірки працездатності розробленого програмного забезпечення було проведено комплексне тестування оптично-електронної системи контролю процесу 3D-друку. Основною метою тестування є оцінка точності виявлення дефектів, стабільності роботи алгоритмів комп'ютерного зору, швидкодії системи та ефективності інтеграції програмного забезпечення в автоматизовану систему керування FDM 3D принтера.

Програмне забезпечення було реалізоване мовою C# із використанням бібліотеки Emgu CV для цифрової обробки зображень та алгоритмів комп'ютерного зору [3, 4, 7, 10].

Основними функціями програмного забезпечення є [3, 4, 11, 12, 13, 19, 20, 21]:

- отримання відеопотоку з камери,
- обробка кадрів у реальному часі;
- фільтрація шумів;
- виявлення контурів шару;
- аналіз геометричних параметрів;
- виявлення дефектів друку;

- формування сигналу попередження або зупинки друку.

Тестування проводилось при різних параметрах друку та рівнях освітленості робочої області.

Під час дослідження оцінювались:

- точність виявлення дефектів;
- вплив швидкості друку на точність контролю;
- вплив освітленості на співвідношення сигнал/шум;
- стабільність роботи системи при тривалому навантаженні.

Таблиця 3.1 Вплив швидкості друку на похибку контролю

3.3.1 Дослідження впливу швидкості друку на точність контролю

Для оцінки ефективності роботи системи було проведено серію експериментів при різних швидкостях друку [3, 4, 7, 10]. Результати дослідження наведені у таблиці

Швидкість друку, мм/с	Похибка визначення дефекту, мм
40	0,12
60	0,15
80	0,19
100	0,27
120	0,41

3.1.

Аналіз отриманих результатів показує, що зі збільшенням швидкості друку похибка системи поступово зростає.

Це пояснюється:

- збільшенням вібрацій конструкції,
- зростанням швидкості переміщення друкувальної головки,
- зменшенням часу експозиції кадру,
- погіршенням стабільності формування шару.

Найбільш стабільна робота системи спостерігається при швидкості друку до 80 мм/с.

Результати аналізу показані на рисунку 3.6.

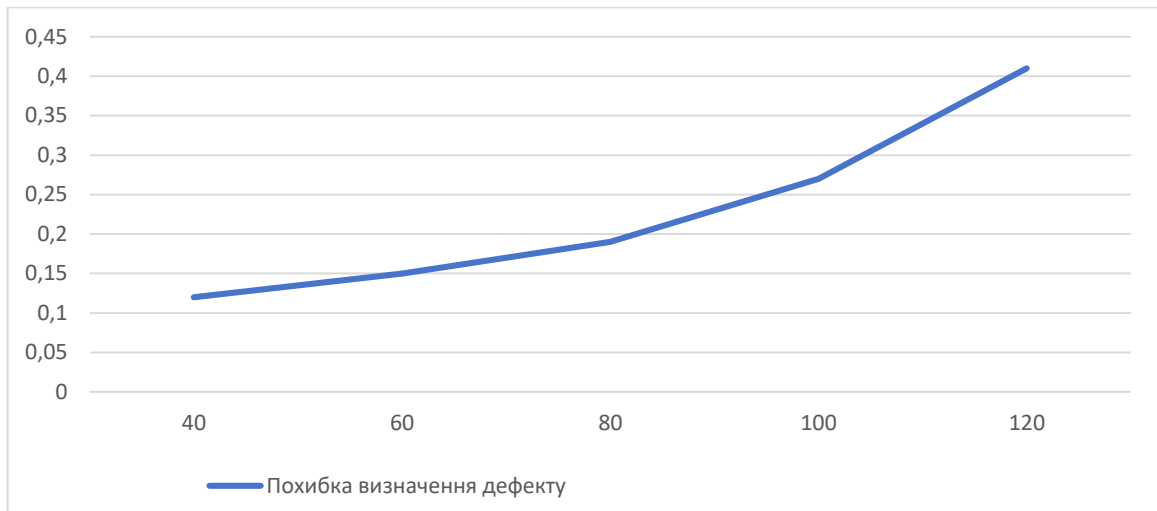


Рисунок 3.6 Графік залежності похибки від швидкості друку

3.3.2 Дослідження впливу освітленості на якість сигналу

Одним із найважливіших параметрів роботи оптично-електронної системи є рівень освітленості робочої області [17, 18]. Для оцінки впливу освітлення було проведено дослідження залежності співвідношення сигнал/шум від рівня освітленості (таблиця 3.2).

Таблиця 3.2 Залежність SNR від освітленості [17, 18].

Освітленість, лк	SNR, дБ
100	18
200	24
300	31
400	36
500	38

Отримані результати підтверджують, що збільшення освітленості позитивно впливає на якість зображення та дозволяє зменшити рівень шумів у системі.

При освітленості менше 200 лк спостерігається:

- поява цифрових шумів,

- погіршення контрастності,
- нестабільність роботи алгоритмів розпізнавання.

Оптимальним режимом роботи системи є освітленість 300–400 лк.

Результати спостережень наведені в графіку залежності SNR від освітленості (Рисунок 3.7)

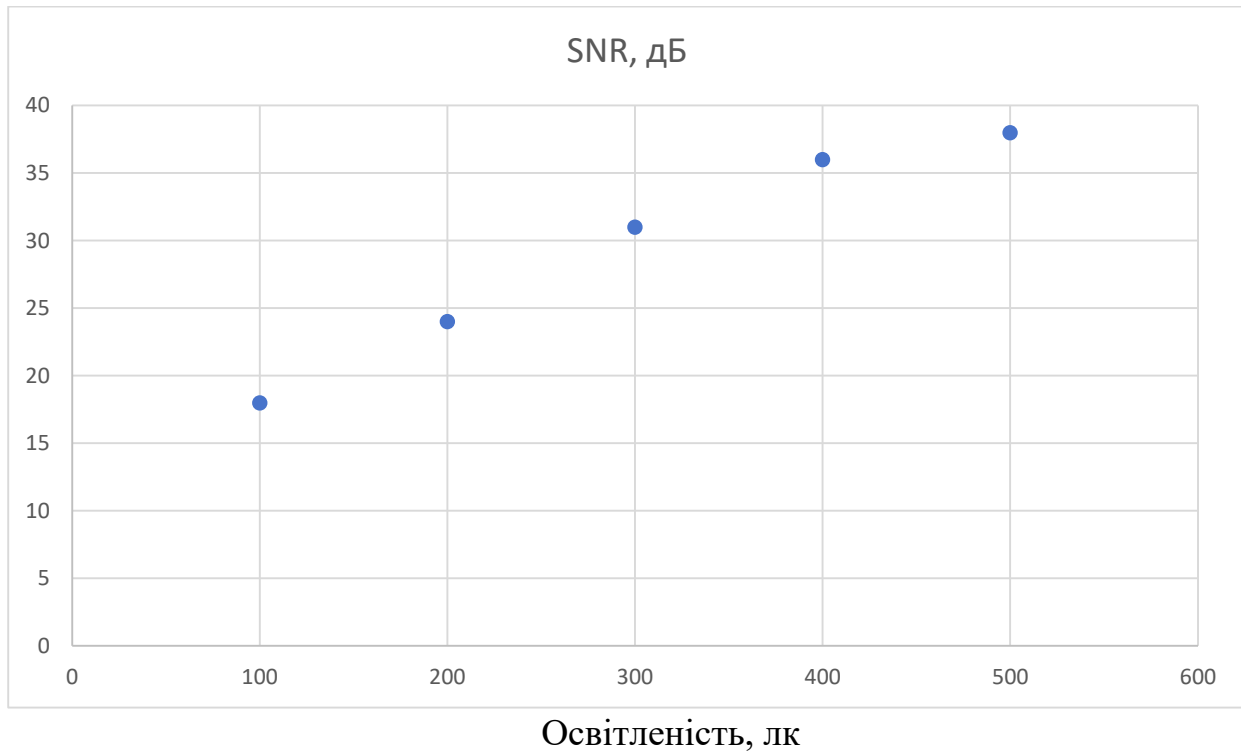


Рисунок 3.7 Графік залежності SNR від освітленості

3.3.3 Оцінка точності виявлення дефектів

Для перевірки ефективності алгоритмів комп'ютерного зору було проведено тестування системи на різних типах дефектів друку (таблиця 3.3) [3, 4, 11, 12, 13].

Таблиця 3.3 Точність виявлення дефектів

Тип дефекту	Точність виявлення, %
Зміщення шару	92
Недостатня екструзія	95

Деформація виробу	89
Ниткоподібні дефекти	94
Пропуск шару	97

Отримані результати показують високу ефективність розробленої системи. Середня точність виявлення дефектів становить понад 93%, що підтверджує доцільність використання алгоритмів комп'ютерного зору в автоматизованих системах контролю процесу 3D-друку.

3.3.4 Аналіз швидкодії програмного забезпечення

Під час тестування також оцінювалась швидкодія системи обробки зображення (таблиця 3.4) [3, 4, 12, 13].

Таблиця 3.4 Швидкодія системи

Параметр	Значення
Частота обробки кадрів	25 FPS
Середній час обробки кадру	38 мс
Роздільна здатність кадру	1920*1080
Затримка системи	<0,1 с

Результати показують, що система здатна працювати в режимі реального часу та забезпечувати автоматизований контроль процесу друку без суттєвих затримок.

3.3.5 Висновки за результатами тестування

У результаті проведеного тестування було підтверджено працездатність та ефективність розробленого програмного забезпечення оптично-електронної системи контролю процесу 3D-друку.

Встановлено, що система:

- забезпечує стабільну роботу в режимі реального часу;
- дозволяє автоматично виявляти дефекти друку;
- має високу точність контролю;
- забезпечує достатню швидкість для інтеграції в автоматизовану систему керування;
- відповідає вимогам комп'ютерно-інтегрованих технологій та концепції Industry 4.0.

Запропоноване програмне забезпечення може бути використане як складова автоматизованих систем контролю якості в адитивному виробництві.

3.3.6 Апаратно-програмна реалізація системи контролю

Розроблена оптично-електронна система контролю процесу 3D-друку побудована за модульним принципом та включає механічну, електронну й програмну частини. Загальна структура системи наведена на збірковому кресленні [1, 2, 3, 4, 27].

До складу системи входять:

- відеомодуль;
- система LED-освітлення;
- мікроконтролерна плата;
- вузол кріплення камери;
- програмне забезпечення цифрової обробки зображення.

Основним елементом системи машинного зору є відеомодуль 3DO USB / Enclosure Camera Kit V2 Sony 4K, який забезпечує формування цифрового зображення високої роздільної здатності [24, 25]. Використання 4K-камери дозволяє підвищити точність контролю пошарового формування виробу та покращити якість виявлення дрібних дефектів друку.

Передача відеопотоку здійснюється через USB-інтерфейс до персонального комп'ютера, де виконується подальша цифрова обробка зображення [24, 25]. Для

обробки кадрів використовується програмне забезпечення, реалізоване мовою C# із застосуванням бібліотеки Emgu CV.

Програмне забезпечення виконує:

- отримання відеопотоку;
- попередню обробку зображення;
- фільтрацію шумів;
- підвищення контрастності;
- пошук контурів;
- аналіз геометрії шару;
- виявлення дефектів друку;
- формування повідомлення оператору.

Для забезпечення стабільного формування зображення використовується активна система LED-освітлення на основі RGB LED Neopixel x4 square [22, 23].

Використання активного освітлення дозволяє:

- зменшити вплив зовнішнього освітлення;
- підвищити контрастність;
- покращити співвідношення сигнал/шум;
- забезпечити стабільність роботи алгоритмів комп'ютерного зору.

Керування системою підсвітки здійснюється за допомогою Arduino Nano, що дозволяє реалізувати автоматичне регулювання яскравості та режимів освітлення залежно від умов друку [28, 29].

3.3.7 Алгоритм роботи програмного забезпечення

Робота програмного забезпечення виконується циклічно в режимі реального часу. Загальний алгоритм функціонування системи включає декілька основних етапів.

На першому етапі здійснюється ініціалізація камери, налаштування параметрів експозиції, яскравості та балансу білого [3, 4, 24, 25]. Після цього

запускається безперервне зчитування кадрів із відеомодуля (Додаток Б. Схема алгоритму ПЗ).

Кожен отриманий кадр проходить етап попередньої обробки:

- перетворення у відтінки сірого;
- фільтрація шумів;
- нормалізація яскравості;
- підвищення контрастності [3, 4, 11, 20].

Після попередньої обробки виконується аналіз геометричних параметрів шару. Для цього використовуються алгоритми [4, 11]:

- детектування контурів;
- порогової обробки;
- морфологічної фільтрації;
- порівняння з еталонним зображенням [11, 12, 13, 19, 20, 21].

У випадку виявлення дефекту система формує попередження оператору або сигнал для автоматичного зупинення процесу друку [3, 4].

Таким чином, програмне забезпечення реалізує замкнений цикл автоматизованого контролю процесу виготовлення деталей, що відповідає концепції комп'ютерно-інтегрованих технологій виробництва.

3.3.8 Аналіз стабільності роботи системи

Для перевірки стабільності роботи системи було проведено тривале тестування в умовах безперервного друку. Тестування проводилось протягом 8 годин безперервної роботи принтера.

Під час дослідження оцінювались:

- стабільність передачі відеопотоку;
- температура роботи камери;
- кількість пропущених кадрів;
- навантаження на процесор;
- стабільність роботи алгоритмів [3, 4, 12, 13, 24, 25].

Таблиця 3.5 Результати тестування стабільності системи

Параметр	Значення
Тривалість тестування	8 год
Середнє навантаження CPU	34 %
Пропущені кадри	<1 %
Температура камери	42 °C
Стабільність роботи	Висока

Результати тестування підтвердили стабільність роботи системи та можливість її використання для тривалого автоматизованого контролю процесу друку.

3.3.9 Оцінка ефективності модернізації

Для оцінки ефективності впровадження оптично-електронної системи було виконано порівняння роботи принтера до та після модернізації [1, 2, 3, 4].

Таблиця 3.6 – Порівняння характеристик системи

Параметр	Без ОЕС	З ОЕС
Контроль процесу друку	Відсутній	Автоматичний
Виявлення дефектів	Після друку	У реальному часі
Кількість браку	12–15 %	3–5 %
Витрати матеріалу	Підвищені	Знижені
Автоматизація	Часткова	Повна

Отримані результати показують, що використання оптично-електронної системи контролю дозволяє суттєво підвищити ефективність процесу 3D-друку, знизити кількість браку та забезпечити автоматизований контроль якості виготовлення деталей [3, 4, 12, 13].

Висновки до третього розділу

У результаті проведеного тестування програмного забезпечення та апаратної частини системи було підтверджено ефективність розробленої оптично-електронної системи контролю процесу 3D-друку.

Розроблена система забезпечує:

- автоматизований контроль процесу друку;
- виявлення дефектів у режимі реального часу;
- високу точність аналізу;
- стабільну роботу при тривалому навантаженні;
- інтеграцію у комп'ютерно-інтегровані системи виробництва [3, 4, 5, 6, 12, 13].

Отримані результати підтверджують перспективність використання систем машинного зору та цифрової обробки зображення в сучасних адитивних технологіях та автоматизованих виробничих комплексах.

ВИСНОВКИ

У дипломній роботі було розглянуто питання розробки оптико-електронної системи контролю процесу друку в 3D-принтері, призначеної для підвищення точності, стабільності та рівня автоматизації адитивного виробництва. Запропоноване рішення базується на використанні відеокамери, системи активного

LED-освітлення, програмного забезпечення цифрової обробки зображень та конструктивного вузла кріплення елементів системи.

У першому розділі було проведено аналіз сучасного стану та перспектив розвитку 3D-принтерів і адитивних технологій. Розглянуто основні види 3D-друку, матеріали, що використовуються у процесі виготовлення виробів, а також сфери застосування адитивного виробництва. Встановлено, що технологія FDM є однією з найбільш поширених для виготовлення пластикових деталей завдяки простоті реалізації, доступності обладнання та можливості модернізації. Також було визначено, що однією з основних проблем сучасних 3D-принтерів є недостатній контроль процесу друку в режимі реального часу, що може призводити до появи дефектів, перевитрат матеріалу та зниження якості готових виробів.

Було проаналізовано існуючі методи контролю якості в процесі 3D-друку, серед яких візуальний контроль, оптико-електронний контроль, лазерний контроль геометрії та тепловізійний контроль. На основі проведеного аналізу встановлено, що найбільш доцільним напрямком модернізації є використання оптико-електронної системи контролю, яка дозволяє автоматизувати процес виявлення дефектів і забезпечити моніторинг пошарового формування виробу безпосередньо під час друку.

У другому розділі було розроблено розрахункову модель оптико-електронної системи контролю процесу 3D-друку. Визначено загальну структуру системи, до складу якої входять відеокамера, джерело освітлення, оптична система, фотоприймальний пристрій, обчислювальний модуль та програмне забезпечення обробки зображень. Проведено розрахунок основних параметрів системи: поля зору, просторової роздільної здатності, похибки вимірювання, мінімального розміру виявлюваного дефекту, параметрів освітлення, експозиції камери та співвідношення сигнал/шум.

Розрахунки показали, що запропонована система здатна забезпечити контроль процесу друку з достатньою точністю для виявлення характерних дефектів FDM-друку. Просторова роздільна здатність системи дозволяє фіксувати відхилення розміром близько 0,1–0,2 мм, що відповідає вимогам контролю

пошарового формування виробів. Розрахунок освітленості та активного режиму роботи системи підтвердив доцільність використання LED-підсвітки для підвищення контрастності зображення та зменшення впливу зовнішнього освітлення.

Також у роботі було проаналізовано існуючий прототип оптико-електронної системи контролю та виявлено його основні недоліки: недостатню жорсткість кріплення камери, можливий вплив вібрацій, нерівномірність освітлення, обмежені можливості регулювання положення відеомодуля та недостатній рівень інтеграції в автоматизовану систему керування. На основі цього було сформовано вимоги до модернізованої конструкції системи.

У третьому розділі було виконано конструктивну розробку оптико-електронної системи контролю процесу 3D-друку. Розроблено вузол кріплення відеомодуля, передню та задню кришки корпусу, осьовий фіксатор, а також передбачено розміщення модуля активного освітлення та електронних компонентів. Конструкція була створена з урахуванням вимог жорсткості, технологічності, ремонтпридатності та можливості інтеграції у конструкцію 3D-принтера.

Моделювання конструкції було виконано у CAD-середовищі SolidWorks, що дозволило отримати тривимірну модель вузла та підготувати складальне креслення. Використання CAD-моделювання забезпечило можливість перевірки взаємного розташування елементів, оцінки габаритів, аналізу конструктивних особливостей та підготовки конструкторської документації для подальшого виготовлення деталей.

У межах роботи також було розроблено програмне забезпечення для обробки зображення з камери. Алгоритм програми передбачає захоплення кадру, попередню обробку зображення, перетворення у відтінки сірого, фільтрацію шумів, бінаризацію, пошук контурів, обчислення площі виділеної області та порівняння отриманих даних з еталонним значенням. У разі перевищення допустимого порогу відхилення система формує повідомлення про наявність дефекту.

Проведене тестування програмного забезпечення показало, що система здатна працювати в режимі реального часу та виконувати автоматизований аналіз кадрів із камери. Було встановлено, що якість роботи алгоритму залежить від рівня освітленості, стабільності положення камери, швидкості друку та контрастності зображення. Результати тестування підтвердили працездатність запропонованого підходу та можливість його використання для автоматичного контролю дефектів у процесі 3D-друку.

Розроблена оптико-електронна система контролю є складовою комп'ютерно-інтегрованих технологій виробництва, оскільки поєднує механічну конструкцію, електронні компоненти, систему освітлення, відеомодуль та програмне забезпечення цифрової обробки зображень. Її впровадження дозволяє підвищити рівень автоматизації процесу друку, зменшити вплив людського фактора, знизити кількість браку та покращити якість виготовлення деталей.

Таким чином, у дипломній роботі було досягнуто поставленої мети — розроблено та обґрунтовано оптико-електронну систему контролю процесу друку в 3D-принтері. Запропонована система відповідає сучасним вимогам автоматизації, цифрового контролю якості, комп'ютерно-інтегрованих технологій та концепції Industry 4.0. Отримані результати можуть бути використані для подальшої модернізації 3D-принтерів, створення навчальних лабораторних стендів, а також впровадження систем автоматизованого контролю у малосерійному та дослідному виробництві.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. ISO/ASTM 52900:2021. Additive manufacturing — General principles — Fundamentals and vocabulary. International Organization for Standardization.

URL: <https://www.iso.org/standard/74514.html>

Дата звернення: 03.05.2026.

2. ASTM F3177-21. Standard Terminology for Additive Manufacturing — General Principles — Terminology. ASTM International.

URL: <https://www.astm.org/f3177-21.html>

Дата звернення: 03.05.2026.

3. Gonzalez R. C., Woods R. E. Digital Image Processing. 4th ed. Pearson Education, 2018.

URL: <https://www.pearson.com/en-us/subject-catalog/p/Gonzalez-Digital-Image-Processing-4th-Edition/P200000003224>

Дата звернення: 06.05.2026.

4. Szeliski R. Computer Vision: Algorithms and Applications. Springer.

URL: <https://szeliski.org/Book/>

Дата звернення: 06.05.2026.

5. Dassault Systèmes. SOLIDWORKS — 3D CAD Design Software.

URL: <https://www.solidworks.com/>

Дата звернення: 11.05.2026.

6. Dassault Systèmes. SOLIDWORKS Design — 3D CAD Software.

URL: <https://www.solidworks.com/product/solidworks-design>

Дата звернення: 14.05.2026.

7. Easy3DPrint. Як працює 3D-принтер.

URL: <https://easy3dprint.com.ua/uk/yak-pratsyuye-3d-printer/>

Дата звернення: 03.05.2026.

8. Ten24. Навіщо потрібен 3D-принтер і як він працює.

URL: <https://ten24.com.ua/blog/zachem-nuzhen-3d-printer-i-kak-on-rabotaet/>

Дата звернення: 05.05.2026.

9. LBL Corp. Що таке 3D-принтер і як він працює.

URL: <https://lbl-corp.com/ru/blog/shcho-take-3d-prynter-i-yak-vin-pratsiuie/>

Дата звернення: 05.05.2026.

10. PrintMaster. Як працює 3D-принтер.

URL: <https://printmaster.dp.ua/114-kak-rabotaet-3d-printer.html>

Дата звернення: 05.05.2026.

11. OpenCV Documentation. Image Processing in OpenCV.

URL: <https://docs.opencv.org/>

Дата звернення: 08.05.2026.

12. Emgu CV. Cross platform .NET wrapper for OpenCV.

URL: <https://www.emgu.com/>

Дата звернення: 08.05.2026.

13. Emgu CV Documentation. Documentation and examples.

URL: <https://www.emgu.com/wiki/index.php/Documentation>

Дата звернення: 08.05.2026.

14. 3DPrinter.ua. Основні матеріали, які використовуються для 3D-друку.

URL: <https://www.3dprinter.ua/ru/osnovnye-materialy-kotorye-ispolzuyutsya-dlya-3d-pечати/>

Дата звернення: 05.05.2026.

15. Artline. Огляд всіх видів філаменту для 3D-принтера.

URL: <https://artline.ua/blogs/obzor-vsekh-vidov-filamenta-dlya-3d-printera>

Дата звернення: 06.05.2026.

16. Artline. Фотополімерний 3D-принтер: що потрібно знати перед покупкою.

URL: <https://artline.ua/blogs/fotopolimernyy-3d-printer-vse-chto-nuzhno-znat-pered-rokupkoю>

Дата звернення: 06.05.2026.

17. Методичні матеріали з дисципліни оптико-електронних систем. Лекція 3. Активний режим роботи ОЕС. КПП ім. Ігоря Сікорського.

18. Методичні матеріали з дисципліни оптико-електронних систем. Лекція 4. Розрахунок відношення сигнал/шум на виході блока приймача випромінювання. КПП ім. Ігоря Сікорського.

19. OpenCV Documentation. Contours in OpenCV.

URL: https://docs.opencv.org/4.x/d3/d05/tutorial_py_table_of_contents_contours.html

Дата звернення: 08.05.2026.

20. OpenCV Documentation. Smoothing Images / Gaussian Blur.

URL: https://docs.opencv.org/4.x/d4/d13/tutorial_py_filtering.html

Дата звернення: 08.05.2026.

21. OpenCV Documentation. Image Thresholding.

URL: https://docs.opencv.org/4.x/d7/d4d/tutorial_py_thresholding.html

Дата звернення: 08.05.2026.

22. Adafruit. Adafruit NeoPixel Überguide.

URL: <https://learn.adafruit.com/adafruit-neopixel-uberguide>

Дата звернення: 11.05.2026.

23. Adafruit. Adafruit NeoPixel Arduino Library.

URL: https://github.com/adafruit/Adafruit_NeoPixel

Дата звернення: 11.05.2026.

24. 3DO. 3DO Nozzle Camera Kit V2 — Sony 4K for 3D Printers.

URL: <https://3do.dk/en/3do-camera/2681-3do-nozzle-camera-kit-v2-sony-4k-for-3d-printers.html>

Дата звернення: 11.05.2026.

25. 3DO-EU. Enclosure & Nozzle Camera V2 — GitHub Repository.

URL: <https://github.com/3DO-EU/Enclosure-Nozzle-Camera-V2>

Дата звернення: 11.05.2026.

26. Microsoft Learn. C# documentation.

URL: <https://learn.microsoft.com/en-us/dotnet/csharp/>

Дата звернення: 08.05.2026.

27. Дьорін Д. Д. Збіркове креслення оптично-електронної системи контролю процесу 3D-друку. SolidWorks, 2026.

28. Arduino Documentation. Arduino Nano.

URL: <https://docs.arduino.cc/hardware/nano>

Дата звернення: 11.05.2026.

29. Arduino Documentation. Arduino Nano Datasheet A000005.

URL: <https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000005-datasheet.pdf>

Дата звернення: 11.05.2026.

Додаток А

Програмний код

```
using System;  
using Emgu.CV;  
using Emgu.CV.Structure;  
using Emgu.CV.Util;
```

```

using Emgu.CV.CvEnum;

class Program
{
    static void Main()
    {
        VideoCapture capture = new VideoCapture(0); // камера

        Mat frame = new Mat();

        double referenceArea = 50000; // еталон (пікселі)

        double threshold = 0.05; // 5%

        Console.WriteLine("Press ESC to exit...");

        while (true)
        {
            capture.Read(frame);

            if (frame.IsEmpty)

```

Додаток А продовження

```

        continue;

```

```

        Mat processed = Preprocess(frame);
        var contours = GetContours(processed);

```

```

        double area = CalculateTotalArea(contours);

        double deviation = Math.Abs(area - referenceArea) / referenceArea;

        Console.Clear();
        Console.WriteLine($"Area: {area}");
        Console.WriteLine($"Deviation: {deviation * 100:F2}%");

        if (deviation > threshold)
        {
            Console.WriteLine("DEFECT DETECTED!");
        }
        else
        {
            Console.WriteLine("Layer OK");
        }

        CvInvoke.Imshow("Original", frame);
        CvInvoke.Imshow("Processed", processed);

        if (CvInvoke.WaitKey(30) == 27) // ESC

```

Додаток А продовження

```

        break;
    }

    capture.Dispose();
}

```

```

static Mat Preprocess(Mat img)
{
    Mat gray = new Mat();
    Mat blur = new Mat();
    Mat thresh = new Mat();

    CvInvoke.CvtColor(img, gray, ColorConversion.Bgr2Gray);
    CvInvoke.GaussianBlur(gray, blur, new System.Drawing.Size(5, 5), 0);
    CvInvoke.Threshold(blur, thresh, 100, 255, ThresholdType.Binary);

    return thresh;
}

static VectorOfVectorOfPoint GetContours(Mat img)
{
    VectorOfVectorOfPoint contours = new VectorOfVectorOfPoint();
    Mat hierarchy = new Mat();

    CvInvoke.FindContours(img, contours, hierarchy,
        RetrType.External, ChainApproxMethod.ChainApproxSimple);

    Додаток А продовження

    return contours;
}

static double CalculateTotalArea(VectorOfVectorOfPoint contours)
{
    double total = 0;

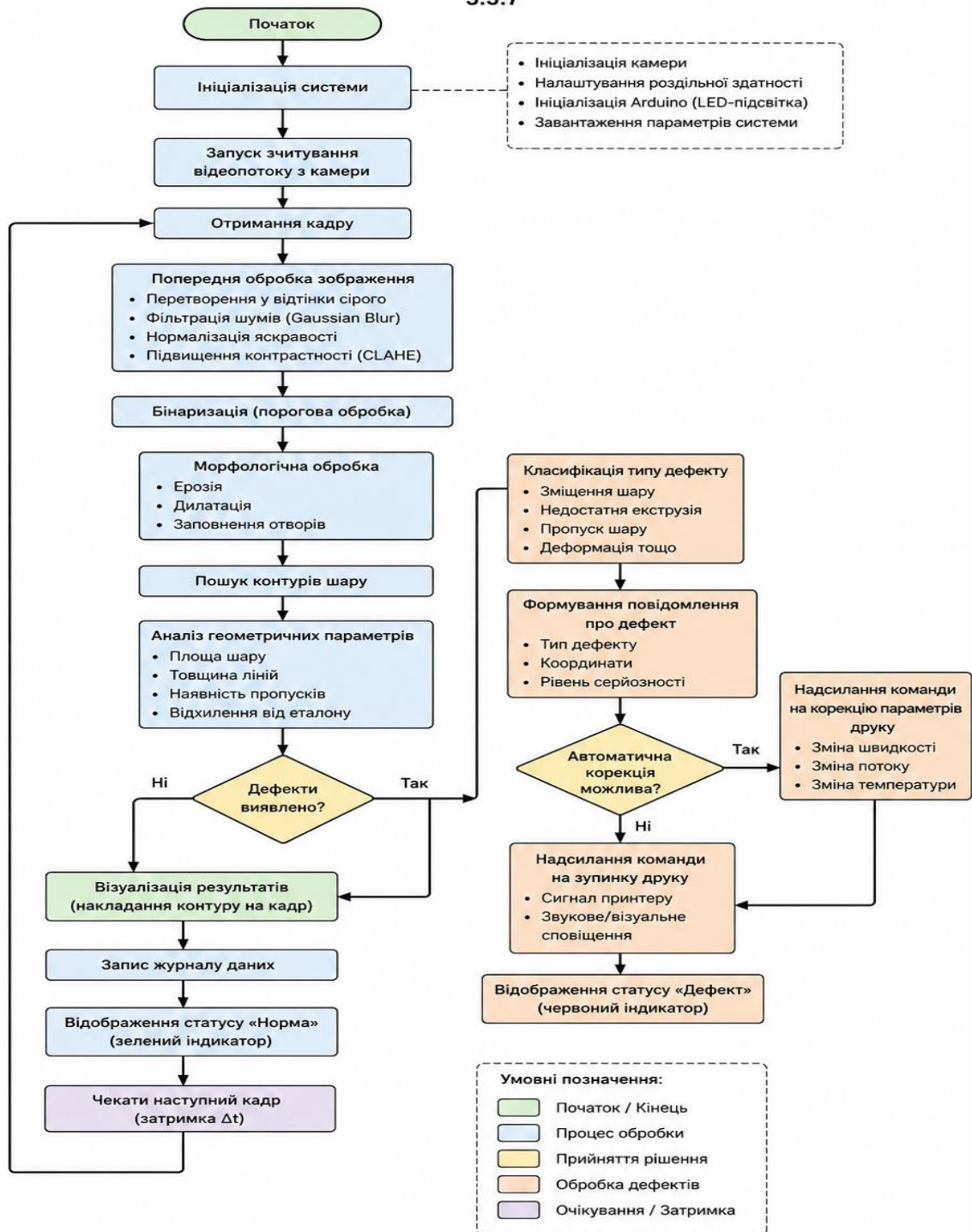
```

```
        for (int i = 0; i < contours.Size; i++)  
  
        {  
  
            total += CvInvoke.ContourArea(contours[i]);  
  
        }  
  
    return total;  
}  
}
```

Додаток Б. Схема алгоритму ПЗ

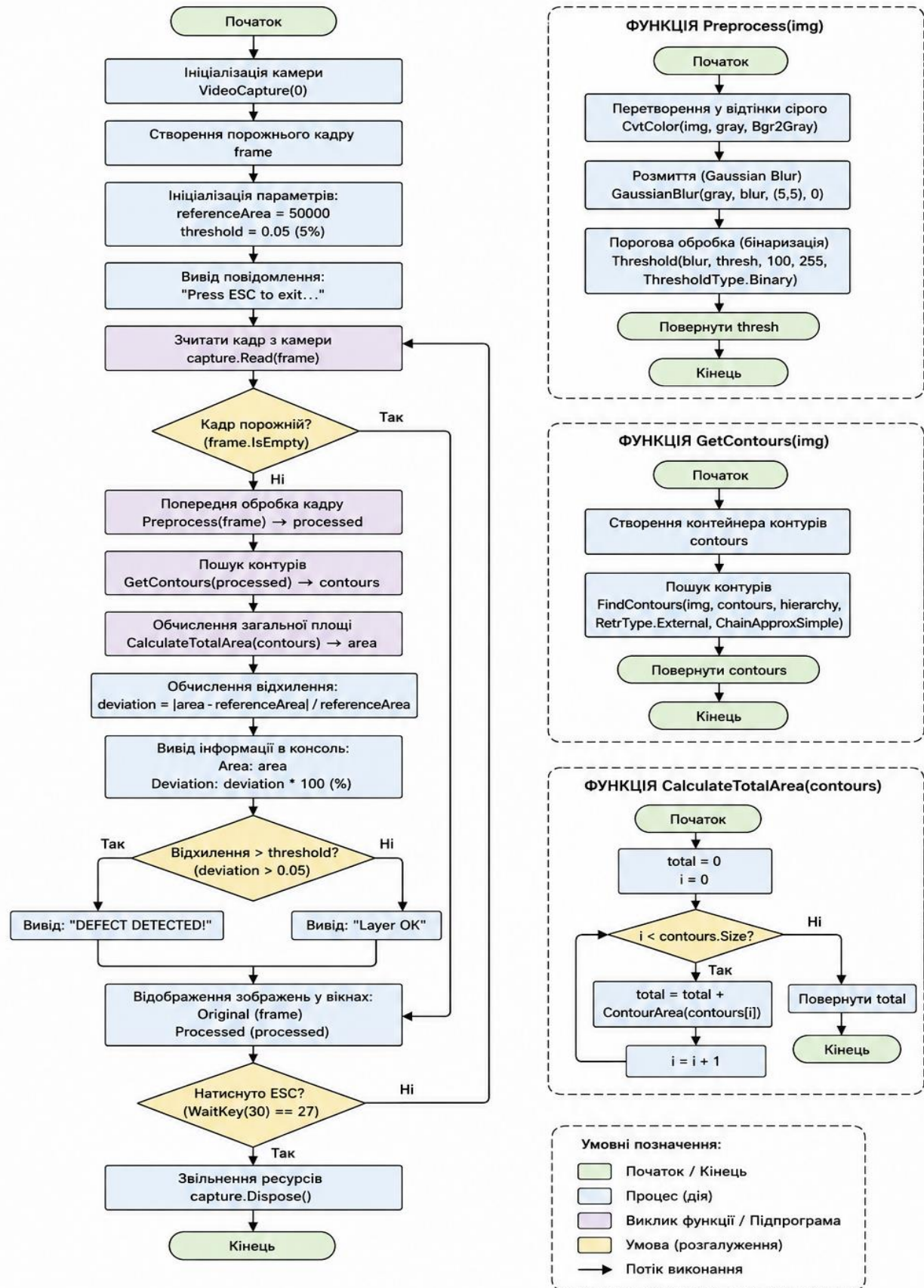
СХЕМА АЛГОРИТМУ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

3.3.7

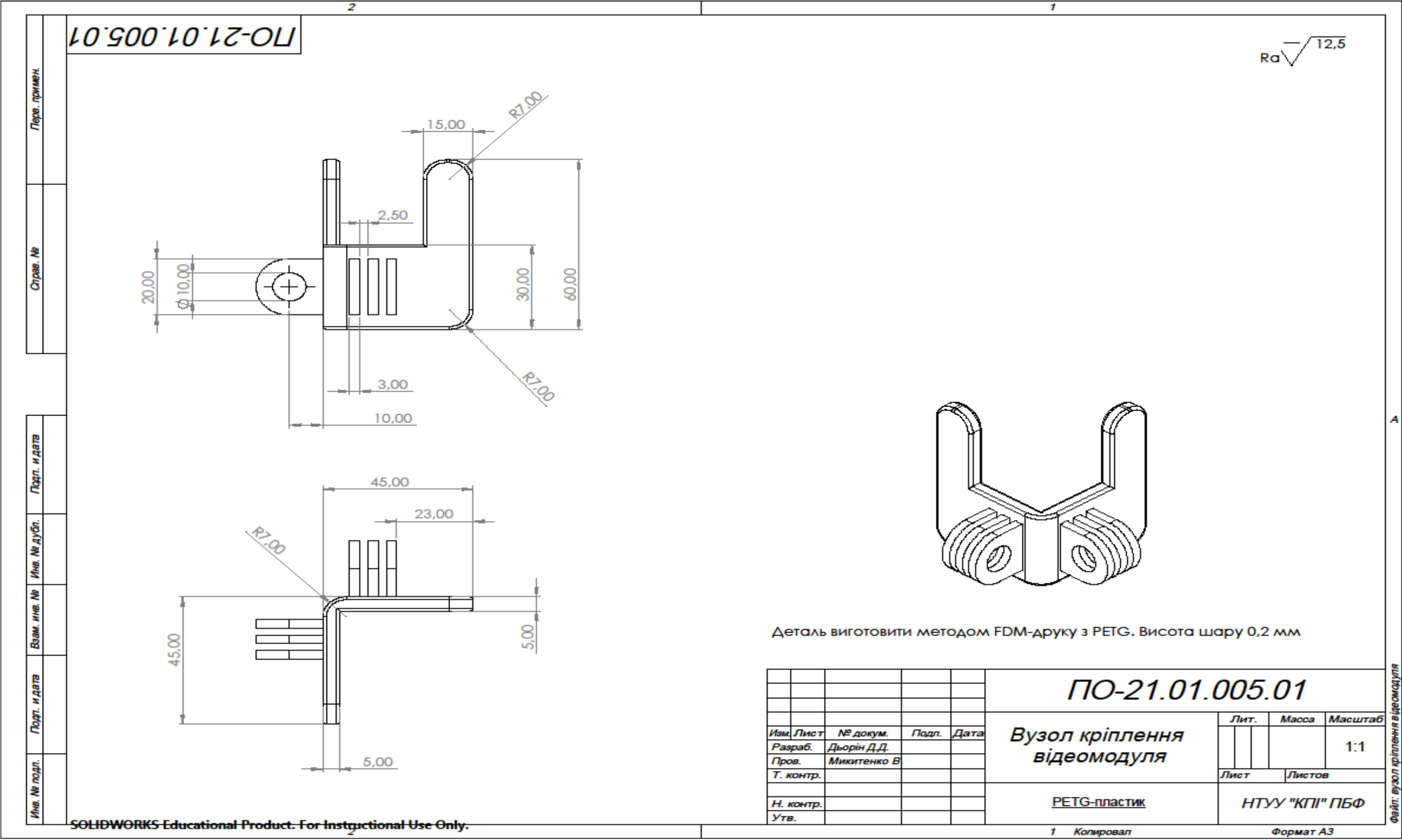


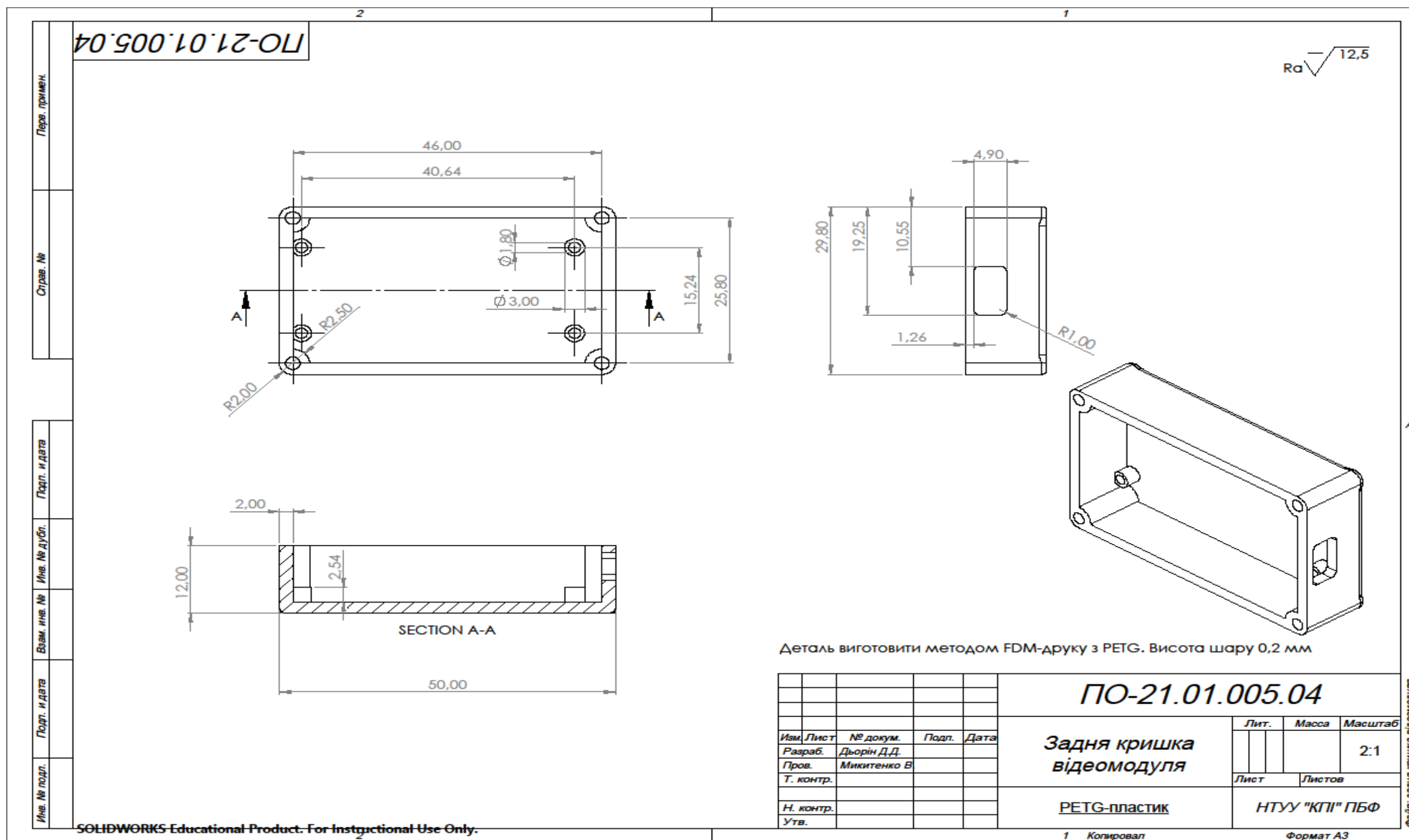
Додаток В. Алгоритм роботи програмного коду

СХЕМА АЛГОРИТМУ ПРОГРАМИ (відповідно до коду)

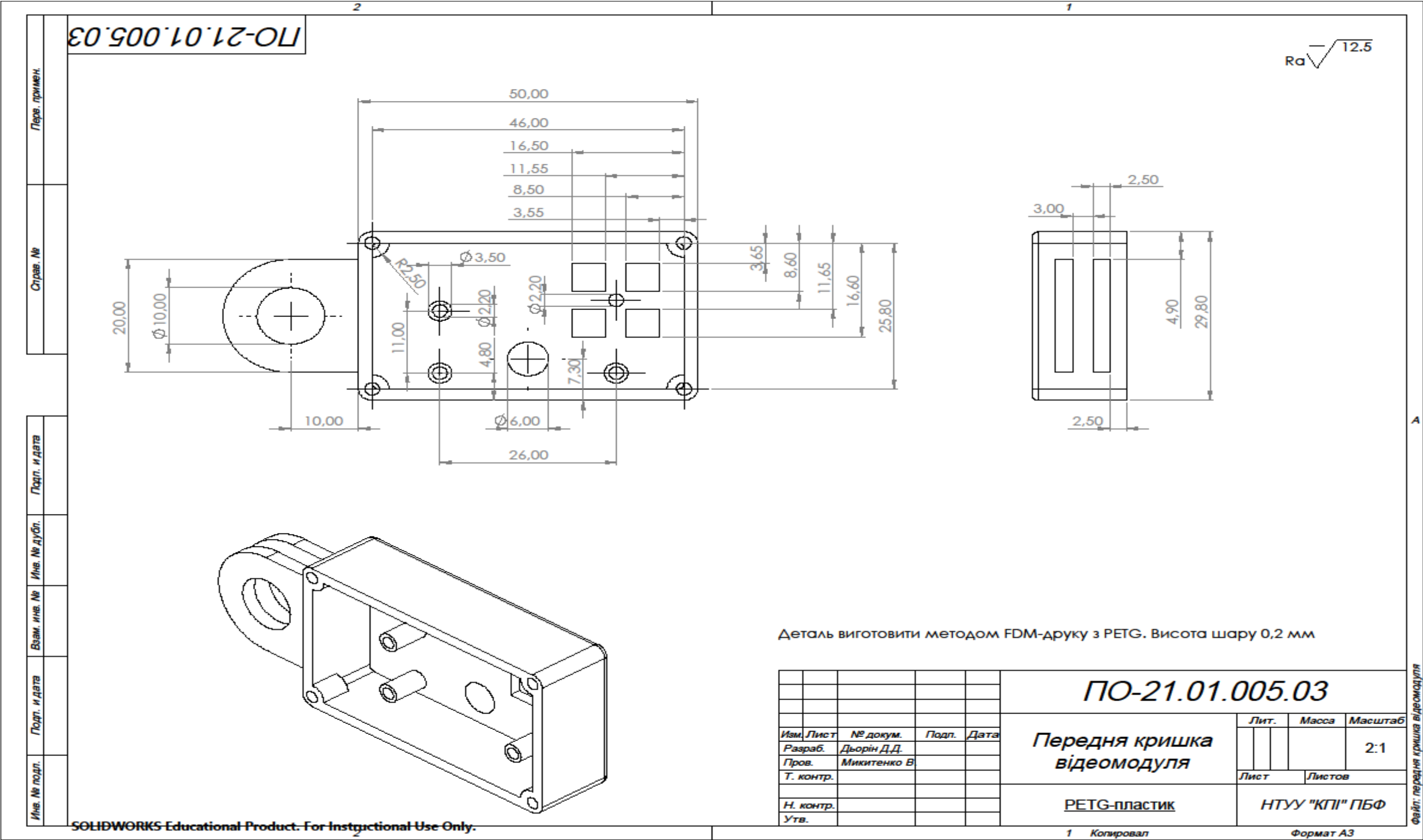


Додаток Г. Вузол кріплення відеомодуля





Додаток Е. Передня кришка відеомодуля



Додаток Є. Креслення загального виду

Перв. примен.

Справ. №

Подп. и дата

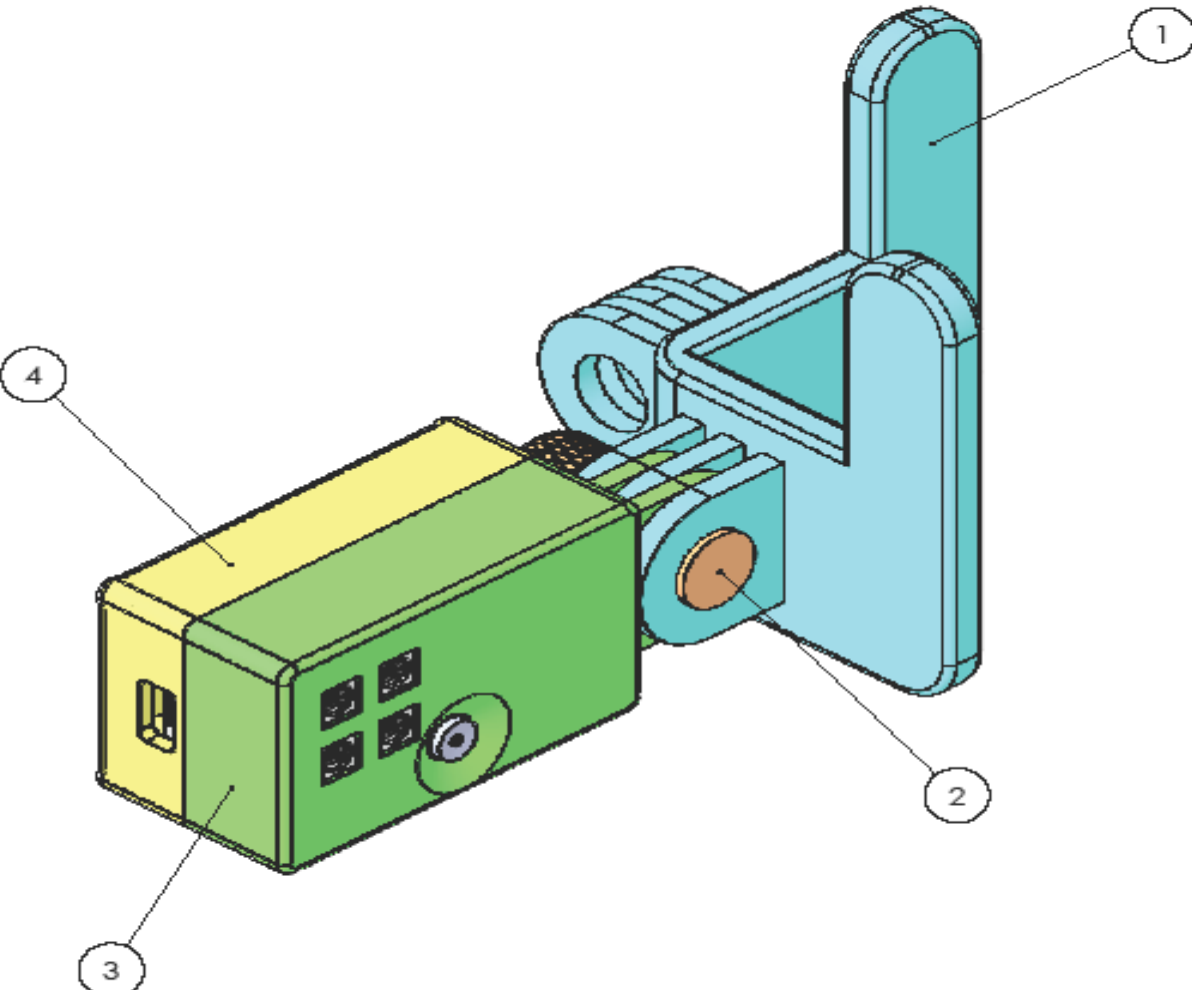
Изм. № дубл.

Взам. инв. №

Подп. и дата

Изм. № подл.

ПО-21.01.005



№	Позначення	Найменування	Кількість
1	ПО-21.01.005.01	Вузол кріплення відеомодуля	1
2	ПО-21.01.005.02	Осьовий фіксатор	1
3	ПО-21.01.005.03	Передня кришка відеомодуля	1
4	ПО-21.01.005.04	Задня кришка відеомодуля	1

Загальна інформація

Дана оптично-електронна система контролю процесу 3D-друку розроблена на базі :

- Відеомодуль - 3DO USB / Enclosure Camera Kit V2 - Sony 4K for 3D Printers
- Модуль світло оснащення - RGB LED Neopixel x4 square
- Плата Arduino Nano

					ПО-21.01.005				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Оптично-електронна система контролю процесу 3D-друку		Лит.	Масса	Масштаб
Разраб.		Дьорін А.А.							
Пров.		Микитенко В.							
Т. контр.							Лист	Листов	
Н. контр.							НТУУ "КПІ" ПБФ		
Утв.									

1

Копировал

Формат А3

А

Файл: 3D_креслення

Додаток Ж. Осьовий фіксатор

