

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Навчально-науковий центр заочної форми навчання
(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

Розробка моделі контролю температури фотополімерного 3D-друку
(тема)

Виконав:

здобувач 2 року, групи КІТПВзм-23-1
Карпов В. О.
(прізвище, ініціали)

Спеціальності 174 Автоматизація,
комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми Освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Комп'ютерно-
інтегровані технологічні процеси і
виробництва
(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Замірець М. В.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту
Зав. кафедри КІТАР

(підпис)

Невлюдов І. Ш.

(прізвище, ініціали)

2025р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

ННЦ	заочної форми навчання
Кафедра	Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та роботехніки
Рівень вищої освіти	другий (магістерський)
Спеціальність	174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка
Тип програми	освітньо-професійна
Освітня програма	Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва
	(код і повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри КІТАР

(підпис)

« ____ » 20 ____ р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

Здобувачеві Карпову Вадиму Олександровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка моделі контролю температури фотополімерного 3D-друку

затверджена наказом по університету від "27" грудня 2024р. № 211 Стз.

2. Термін подання студентом роботи "29" січня 2025р.

3. Вихідні дані до роботи 3.1 Розробка моделі управління кроковим двигуном фотополімерного 3D принтера за допомогою ПІД регулятора;

3.2 Використання фотополімера з наступними властивості: густина 1195 г/см; питома теплоємність 2300 Дж/(кг*К); теплопровідність фотополімеру 0.22 Вт/(м*град);

3.3 Проведення моделювання у ПЗ MatLab;

3.4 Підтвердження стійкості розробленої системи за критеріями Найквіста;

3.4 Оформлення текстової документації – ДСТУ 3008-2015.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі 4.1 Вступ;

4.2 Аналіз предметної області;

4.3 Опис макету для проведення досліджень та причини нагріву фотополімерної смоли;

4.4 Проведення експериментальних досліджень;

4.5. 3 Розробка системи автоматичного керування кроковим двигуном за допомоги ПІД регулятора в ПЗ MatLab

4.6 Охорона праці;

4.7 Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій Демонстраційний матеріал представлений у форматі PowerPoint (*.ppt) – 16 с. формату А4

6. Консультанти розділів роботи

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технології фотополімерного 3D-друку та типу смол, які використовуються	25.11 – 30.11.24	виконано
2	Розробка кінематичної схеми макету для досліджень	01.12 – 12.12.24	виконано
3	Розробка системи автоматичного керування кроковим двигуном за допомоги ПД регулятора	13.12 – 31.12.24	виконано
4	Охорона праці	01.01 – 06.01.25	виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	07.01 – 10.01.25	виконано
6	Подання роботи на перевірку Інтернет-системою StrikePlagiarism	11.01 – 13.01.25	виконано
7	Подання роботи на рецензію	14.01 – 17.01.25	виконано
8	Подання роботи на підпис зав. кафедри	18.01 – 21.01.25	виконано
9	Подання кваліфікаційної роботи в ЕК	22.01.25	виконано

Дата видачі завдання 25 листопада 2024 р.

Здобувач _____
(підпис)

Керівник роботи _____
(підпис)

проф. Замірець М. В.
(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 66 с., 32 рис., 10 табл., 2 дод., 34 джерел.

РЕГРЕСІЙНА МОДЕЛЬ, ФАКТОРНИЙ АНАЛІЗ, ФОТОПОЛІМЕРНИЙ ДРУК, ФОТОПОЛІМЕРНІ СМОЛИ, LCD 3D-ДРУК.

Мета роботи – розроблення програмного забезпечення для підвищення ефективності підвищення якості деталей в процесі фотополімерного 3D-друку, за рахунок розробки системи автоматичного керування кроковим двигуном з використанням ПШБ регулятора.

Об'єкт дослідження – процеси адитивного виробництва об'ємних деталей при 3D-друці.

Предмет дослідження – технології фотополімерного 3D-друку з використанням різних типів смол.

Методи дослідження – аналіз існуючих аналогічних конструкцій та методи математичного моделювання в середовищі MatLab.

У роботі були проаналізовані області використання фото полімерного друку. Розглянуті види технологій 3D-друку, а саме SLA, DLP та LCD.

Проаналізовані різні марки фотополімерних смол, їх сфери застосування та технологічні характеристики. Був проведений факторний аналіз різних фотополімерних смол та побудована регресійна-кореляційна модель впливу фотополімерних смол при різних параметрах друку на збереження геометричних розмірів моделі.

Проведено виготовлення деталі з урахуванням отриманих відхилень по кожній осі X, Y та Z для збереження геометричного розміру моделі.

Отримані результати роботи можна віднести до цілі № 9. Промисловість, інновації та інфраструктура, а саме 9.4. Сприяти прискореному розвитку високо- та середньовисокотехнологічних секторів переробної промисловості, які

формується на основі використання ланцюгів «освіта – наука – виробництво» та кластерного підходу за напрямками: розвиток інноваційної екосистеми; розвиток інформаційнотелекомунікаційних технологій (ІКТ); застосування ІКТ в АПК, енергетиці, транспорті та промисловості; високотехнологічне машинобудування; створення нових матеріалів; розвиток фармацевтичної та біоінженерної галузей.

ABSTRACT

Explanatory note: 66 p., 32 fig., 10 tab., 2 app., 34 sources.

REGRESSION MODEL, FACTOR ANALYSIS, PHOTOPOLYMER PRINTING, PHOTOPOLYMER RESINS, LCD 3D PRINTING.

The purpose of the work is to develop software to improve the efficiency of improving the quality of parts in the process of photopolymer 3D printing, by developing an automatic stepper motor control system using the PIB regulator.

The object of the study is the processes of additive manufacturing of volumetric parts in 3D printing.

The subject of the study is photopolymer 3D printing technologies using different types of resins.

Research methods are an analysis of existing similar structures and methods of mathematical modeling in the MatLab environment.

The work analyzed the areas of use of photopolymer printing. Types of 3D printing technologies are considered, namely SLA, DLP and LCD.

Different brands of photopolymer resins, their areas of application and technological characteristics were analyzed. A factor analysis of different photopolymer resins was conducted and a regression-correlation model of the influence of photopolymer resins at different printing parameters on the preservation of the geometric dimensions of the model was constructed.

The part was manufactured taking into account the obtained deviations along each axis X, Y and Z to preserve the geometric dimensions of the model.

The results of the work can be attributed to goal No. 9. Industry, innovation and infrastructure, namely 9.4. Promote the accelerated development of high- and medium-high-tech sectors of the processing industry, which are formed on the basis of the use of the chains "education - science - production" and the cluster approach in the following

areas: development of an innovation ecosystem; development of information and telecommunications technologies (ICT); application of ICT in agro-industrial complex, energy, transport and industry; high-tech mechanical engineering; creation of new materials; development of the pharmaceutical and bioengineering industries.

Я, як студент ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

«26» січня 2025 р.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Karпов', written in a cursive style.

Карпов В. О.

ЗМІСТ

Перелік скорочень	11
Вступ	12
1 Аналіз предметної області	14
1.1 Технології фотополімерного 3D-друку.....	16
1.2 Аналіз фотополімерних смол.....	21
1.3 Висновки до першого розділу	27
2 Опис макету для проведення досліджень та причини нагріву фотополімерної смоли.....	28
2.1 Кінематична схема макету для досліджень Anycubic Photon Mono 4K.....	30
2.2 Електрична частина макету.....	32
2.3 Природа виникнення нагріву фото полімеру.....	37
2.4 Висновки до другого розділу.....	39
3 Проведення експериментальних досліджень.....	40
3.1 Математична модель контролю температури фотополімерного друку.....	40
3.2 Моделювання процесу теплообміну під час фотополімерного друку в ПЗ MatLab.....	46
3.3 Розробка системи автоматичного керування кроковим двигуном за допомоги ПІД регулятора в ПЗ MatLab.....	51
3.4 Висновки до третього розділу.....	55
4 Охорона праці	56
4.1 Аналіз умов праці на робочому місці	56
4.2 Промислова безпека на робочому місці	56
4.3 Виробнича санітарія і гігієна праці	57
4.4 Пожежна безпека приміщення	59

Висновки	61
Перелік джерел посилання	62
Додаток А Лістинг коду програми	66
Додаток Б Демонстраційний матеріал	71

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

БД – база даних;

ПЗ – програмне забезпечення;

DLP – digital light processing;

FDM – fused deposition modeling;

LCD – liquid crystal display;

MEMS – microelectromechanical systems;

SLS – sodium lauryl sulfate;

SLM – selective laser melting;

SLA – selective laser sintering.

ВСТУП

Розвиток адитивних технологій виробництва все більше стає поширеним в промисловості та повсякденному житті. Одним з найбільш універсальним та доступним для споживачів засобом для отримання об'ємних деталей складних форм є 3D-друк. На даний час за допомогою 3D-принтерів можливо виготовлювати деталі з пластика (FDM – друк), з металу (SLS/SLM – друк) та з фотополімеру (SLA, DLP та LCD – друк).

Фотополімерний 3D-друк, має ряд переваг, як: доступність, висока точність виготовлення деталей, простота технології та велика кількість безкоштовного програмного забезпечення. За рахунок цих переваг та особливостей технології, даний метод виготовлення можливо використовувати в багатьох сферах, як: ювелірне виробництво (створення майстер-моделей для лиття), стоматологи (створення протезів зубів), створення декоративних моделей для дизайну інтер'єру.

Точність виготовлення деталей за цими технологіями залежить не тільки від технічних характеристик принтера, а і від властивостей фотополімерної смоли. Тому визначення впливу смол на збереження геометричних розмірів, є актуальною задачею при виготовленні моделі. У роботі буде описано сфери застосування фотополімерного 3D-друку, розглянуті види фотополімерного друку та проаналізовані марки фотополімерних смол, які зараз використовуються для створення деталей.

Мета роботи – розроблення програмного забезпечення для підвищення ефективності підвищення якості деталей в процесі фотополімерного 3D-друку, за рахунок розробки системи автоматичного керування кроковим двигуном з використанням ПІД регулятора.

Об'єкт дослідження – процеси адитивного виробництва об'ємних деталей при 3D-друці.

Предмет дослідження – технології фотополімерного 3D-друку з використанням різних типів смол.

Методи дослідження – аналіз існуючих аналогічних конструкцій та методи математичного моделювання в середовищі MatLab.

Методи дослідження – аналіз існуючих аналогічних конструкцій та методи математичного моделювання в середовищі MatLab.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз технології фотополімерного 3D-друку та типу смол, які використовуються ;
- провести розробку кінематичної схеми макету для досліджень;
- розробити математичну модель контролю температури фотополімерного друку;
- розробити процес теплообміну під час фотополімерного друку;
- розробити систему автоматичного керування кроковим двигуном за допомоги ПІД регулятора;
- провести теоретичні розрахунки стійкості системи;
- розглянути питання охорони праці;
- оформити кваліфікаційну роботу згідно стандарту ДСТУ 3008:2015 [1], а також з методичними вказівками з підготовки й оформлення кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 174 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка, освітньо-професійних програм: «Автоматизоване управління технологічними процесами», «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи».

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

Фотополімерні форми дозволяють відтворювати складні зображення з текстовими, штриховими та растровими елементами. Вони, у порівнянні з металевими формами, володіють більшою фарбовіддачею, що забезпечує отримання відбитків з підвищеною оптичною щільністю. Принцип отримання друкувальних елементів є ідентичним для всіх видів друку, крім трафаретного. При експонуванні через негатив під дією ультрафіолетових променів у шарі фотополімеру відбувається фотополімеризація й утворюються нерозчинні ділянки. Ці ділянки і є друкувальними елементами, на які пізніше наносять фарбу. У трафаретних друкарських формах нерозчинні ділянки є проміжними елементами, а ділянки, де фотополімери розчиняються, – друкувальними елементами [5].

Фотополімерні форми мають ряд переваг:

- процес виготовлення фотополімерних друкарських форм швидкий, доступний, дешевий;
- при їх використанні поліпшуються умови праці та не забруднюється довкілля;
- друкарські форми порівняно з іншими добре сприймають і віддають фарбу;
- використання фотополімерів значно скорочує витрати кольорових металів;
- форми стійкі до дії в'яжучих фарб і змивальних речовин;
- можуть відтворювати дрібні зображення на відбитку;
- мають високу стійкість деталей.

Завдяки цим перевагам, існує безліч сфер застосування фотополімерного 3D-друку. Це надзвичайно велика область, яка охоплює неймовірну кількість завдань, рисунок 1.1. Сюди можливо віднести:

- ювелірна справа(виготовлення майстер-моделей);

- медицина (стоматологія, протези зубів пломб і.т.д.);
- аерокосмічна промисловість(виготовлення лапасте для дорнів);
- машинобудування (створення корпусів та елементів вузлів);
- прототипування (розробка тестових моделей);
- макетування (створення моделей для архітектурних макетів);
- дизайн;
- сувенірна продукція.



а)



б)



в)



г)



д)



е)

а – ювелірна справа; б – стоматологія; в – аерокосмічна промисловість;
 г – машинобудування; д – прототипування; е – сувенірна продукція
 Рисунок 1.1. – Приклади використання фотополімерного 3D-друку

1.1 Технології фотополімерного 3D-друку

На сьогоднішній день технології друку фотополімерними смолами та порошковими матеріалами одні з найбільш популярних для точного прототипування в порівнянні з іншими технологіями адитивного виробництва, так як дозволяють виготовляти з високою точністю та деталізацією деталі різного призначення.

Існують декілька технологій засвічування полімеру в фотополімерних принтерах [5]. З них можна виділити три основних, рисунок 1.2:

- SLA – селективне лазерне спікання (Selective Laser Sintering);
- DLP – цифрова обробка світла (Digital Light Processing);
- LCD – рідко-кристалічний екран (Liquid Crystal Display).

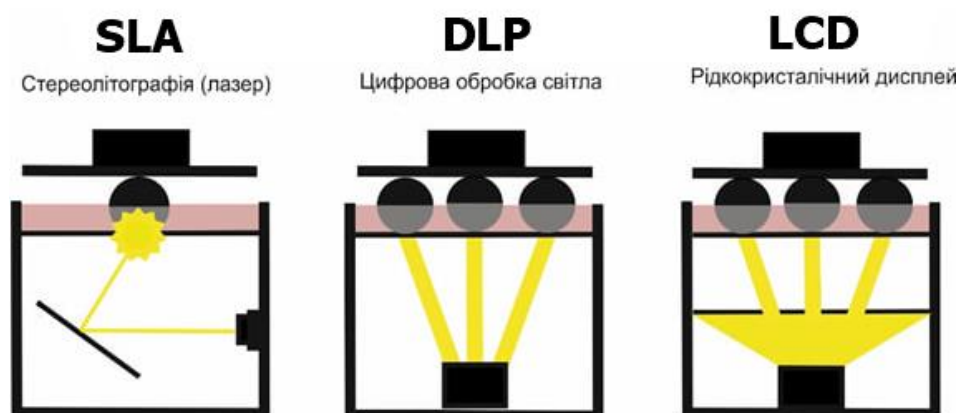


Рисунок 1.2 – Види фотополімерних технологій 3D друку

SLA технологія. Спосіб адитивного виробництва (3D-друку) під назвою "стереолітографія" полягає в послідовній полімеризації тонких шарів рідкого фото-чутливого полімеру променем ультрафіолетового лазера малої потужності. У робочій ємності 3D принтера розташована платформа, занурена в рідку смолу. Спочатку платформа знаходиться біля поверхні полімеру, покрита тонким шаром від 20 мікронів до 150 мікрон, на якому лазер починає формувати шар деталі [6].

Модель нарізується на тонкі шари, рівні роздільній здатності принтера по вертикальній осі. Створивши один шар, принтер занурює платформу на товщину нового шару моделі (від 10 мкм до 150 мкм) і створює наступний шар, рисунок 1.3.

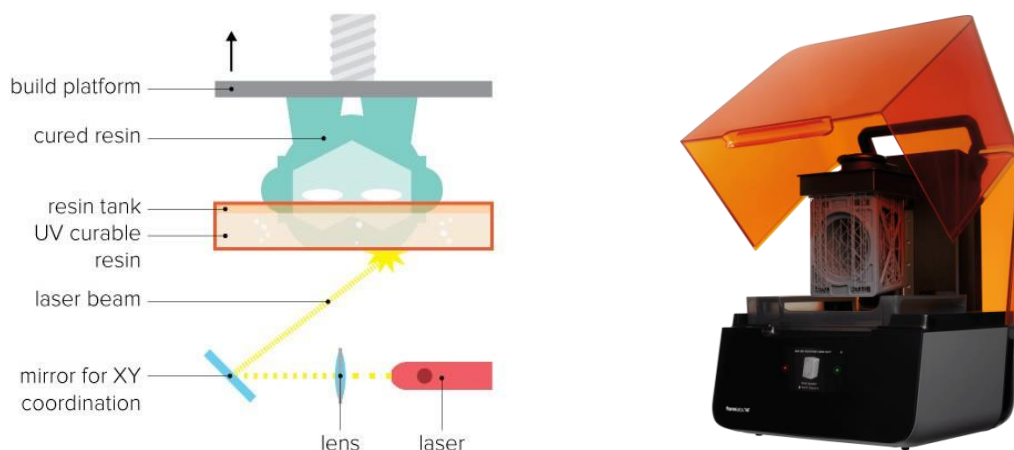


Рисунок 1.3 – Схема роботи SLA принтера

Під впливом лазера (його потужність може бути відносно невеликою – що робить принтер дешевше апаратів, що працюють з порошковими матеріалами SLS (SodiumLaurylSulfate) , SLM (Selective Laser Melting) і т.д.) полімер твердне, утворюючи стінки майбутнього виробу [6-7]. Таким чином, шар за шаром, створюється модель цілком. Якщо в ній є навісні елементи, то для них вибудовуються підтримки з того ж полімеру, які потім механічно видаляється. Підтримки в моделі передбачають та створюють в CAD-програмах на стадії проектування моделі.

Перевага такої технології: можливість побудови моделей великих розмірів; велика точність; можливість побудови моделей будь-якої форми та конструкції; низький процент втрати зайвого матеріалу; низький шум роботи [6].

Недоліки: використання фотополімеру, що є дорожче ніж інші матеріали; висока вартість самого принтеру; необхідність забезпечення високого класу

точності при побудові принтера, що забезпечить правильний кут виставлення дзеркала; необхідність точної механіки, що забезпечить знаходження ванни на рівні одного шару від поверхні до платформи; необхідність частого обслуговування принтера.

DLP технологія. Принцип роботи 3D принтерів, що використовують технологію 3D друку DLP схожий на роботу проектора [8]. Полімер переходить в тверду форму під дією світла (видимого спектру). Засвічується відразу весь шар.

Потік світла модулюється системою MEMS (Microelectromechanical systems) – мікромеханічними дзеркалами, які керується кожне окремо. Залежно від положення дзеркала, світло або проходить в дану точку шару, чи ні. Таким чином, машина має фіксоване логічне розширення – кількість точок по координатам XY. Їх фізичний розмір залежить від того, на якій відстані від джерела випромінювання в системі мікро-дзеркал перебуває модель, рисунок 1.4.



Рисунок 1.4 – Схема роботи DLP принтера

Недоліком даної технології є залежність від проектора, що встановлює робочу зону та точність по осі XY. Такі проектори мають високу ціну, що також є недоліком. Використання можливо лише з персонального комп'ютера або мікрокомп'ютера, що буде управляти проектором та платою управління. Може мати великі розміри при маленьких розмірах робочої зони, задля

забезпечення необхідної відстані від лінз проектора до ванни.

Перевагами є невелика, порівняно з SLA технологією, вартість. Потребує меншої точності виготовлення компонентів. Може мати велику швидкість друку за рахунок великої потужності лампи проектора [6].

LCD технологія. Принтер із засвіченням фотополімера світлодіодним УФ-матрицею з використанням в якості маски LCD-дисплея, рисунок 1.5.

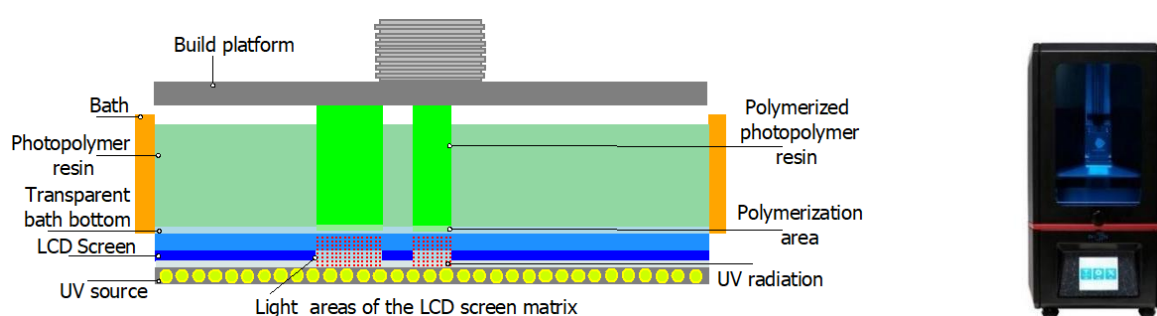


Рисунок 1.5 – Схема роботи LCD принтера

Фотополімер засвічується світлодіодною матрицею, зображення формується за рахунок LCD-дисплея, який покадрово виводить переріз формованої деталі. Якщо відмінності класичної SLA технології від DLP та LCD очевидні, то DLP і LCD-технології засвічування часто плутають, що невірно, тому що кожна з цих технологій має свої особливості, які впливають на можливості принтера, якість друку. У таблиці 1.1, наведено порівняння SLA, DLP і LCD технологій [9-10].

Недоліком даної технології є залежність робочої області від розміру екрана, точність залежить від екрана та його розміру, на сьогодні більше 10 дюймових екранів на ринку не має, також при такому екрані навіть з розширенням 8K менше ніж 50 мікрон розмір пікселя отримати неможливо. Також відносним недоліком є знаходження екрана безпосередньо під ванною. Ванна складається з алюмінієвого корпусу та плівки товщиною в 50-150 мкм, що при невеликих механічних пошкодженнях може пропускати фотополімерну смолу, яка буде потрапляти на екран та електроніку і призводити до

можливого загоряння чи пошкодження принтера [10].

Перевагами даної технології є невелика вартість, простота обслуговування та широкі можливості модернізації. Порівняно з технологією DLP, перевагою є відсутність спотворення зображення на робочій області. В результаті порівняння можливо зробити висновок, що ці три різновиди технології на сьогодні мають велику область використання, кожна з яких займає свою нішу в побуті та виробництві. Але технологія LCD на сьогодні має найбільший розвиток, завдяки чому має великий науковий інтерес в дослідженні та вдосконаленні технології та її використання.

Таблиця 1.1 – Порівняння SLA, DLP та LCD технологій

Технологія	Особливості
1. Розмір області друку по XY	
SLA	Не обмежений, чим вище область друку, тим нижче швидкість (променю треба встигнути «оббігти» велику площу.
DLP	Не обмежений, чим вище область друку, тим нижче швидкість друку і нижче роздільна здатність принтера.
LCD	Область друку жорстко прив'язана до розміру LCD-дисплея.
2. Швидкість друку	
SLA	Самий «повільний» з трьох технологій. Пов'язано це з послідовною засвіченням і низькою потужністю лазера.
DLP	Самий «швидкий», обумовлено високою потужністю проектора.
LCD	«Середній» по швидкості друку. Швидкість друку пов'язана з потужністю УФ-матриць. Потужність матриці збільшувати нескінченно не можна, тому що потужні матриці вимагають потужного охолодження, і починають «пробивати» «трафарет» з LCD-дисплея.
3. Паразитна засвічення по осі Z	
SLA	Мінімальна.
DLP	Максимальна. Висока засвічення пов'язана як з великою потужністю ламп проектора, так і з більшою часткою довгохвильового актинічного випромінювання в спектрі.
LCD	Середня.
4. Паразитна засвічення по XY	
SLA	Мінімальна.
DLP	При правильній наведенні на різкість – мінімальна, але вище, ніж у SLA.
LCD	Максимальна. Сильна паразитне засвічення пов'язана із засвіченням сусідніх пікселів за рахунок недосконалості фокусує системи УФ-матриці (точніше – з її повною відсутністю – світло на маску потрапляє під різними кутами). У майбутньому цей недолік, ймовірно, буде виправлений.
5. Фактори, що впливають на роздільну здатність (крім властивостей полімеру і товщини шару)	
SLA	1) Діаметр плями лазера і точність позиціонування плями. Типові значення від 100 мкм до 200 мкм (для плями лазера), від 40 мкм до 20 мкм (точність позиціонування). 2) 3D принтерах з технологією SLA можна друкувати, наприклад, об'єкти з дуже тонкими – вертикальними стінками товщиною всього 100 мікрон, горизонтальний шар – близько від 30 мкм до 50 мкм.
DLP / LCD	1) Розмір пікселя і точність наведення на різкість. Типове дозвіл 1920×1080, відповідно розмір пікселя залежить від області друку по XY. 2) Менше дозвіл в порівнянні з SLA принтерами, оскільки зображення в них формується через піксельну матрицю (від 33 мкм до 47 мкм), не дозволяє досягти більш плавних контурів деталі в порівнянні з SLA технології, рисунок 1.6.

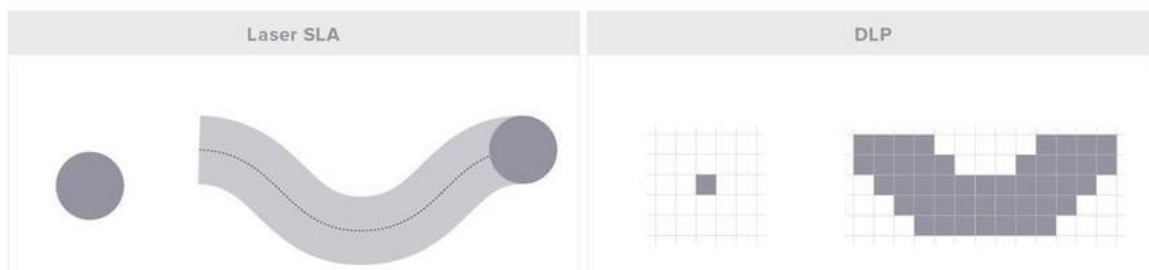


Рисунок 1.6– Роздільна здатність SLA та DLP/LCD

1.2 Аналіз фотополімерних смол

Основні матеріали для фотополімерного друку, є фотополімерна смола. Фотополімери – це високомолекулярні органічні речовини, молекули яких під дією світла при наявності ініціаторів «полімеризує» між собою і втрачають здатність розчинятися. Цей процес називається фотополімеризацією, рисунок 1.7.



Рисунок 1.7 – Фотополімерні смоли

На даний момент існує безліч виробників і марок фотополімерних смол [15]. Їх ціни обумовлені точністю друку і мінімально допустимою висотою шару, додатковими характеристиками.

Також їх можливо умовно поділити на такі види, як:

- стандартні смоли для порипування
- смоли для виплавлених моделей
- біо-сумісні смоли

- термо-стійкі смоли
- хімічно стійкі смоли
- механічно стійкі смоли

В таблиці 1.2 наведені характеристики смол, які найчастіше мають попит на ринку фотополімерного друку, для домашнього використання.

Таблиця 1.2 – Марки та характеристики фотополімерних смол

№	Назва смоли	Твердість по Шору, шкала D	Діапазон довжини хвилі полімеризації, нм	Коефіцієнт усадки, %	Час засвітлено шару, с	Час засвітлено базових шарів, с	Товщина шару, мкм	Ціна за літр, грн/л
1	Anycubic 405nm UV [11]	88	405	2,76 – 3,54	5	15	35	1400
2	Plexiwire Resin Basic [12]	73	405-450	3,04 – 3,82	7	20	35	880
3	MonoFilament Basic [13]	82	405-450	2,37 – 4,22	7	25	35	1320
4	FunToDo [14]	73	225-415	1,27 – 2,43	6	17	20	2463
5	Wanhao Castable [15]	74	395-420	1,16 – 3,14	8	15	35	1650
6	BlueCast CR3A [16]	70	400-410	3,74 – 4,82	4	9	10	5927,40
7	Elegoo 3D [17]	69	385-450	5,37 – 5,74	3	10	35	1283,37
8	Weistek [18]	90	385-410	2,38 – 3,02	7	15	50	972
9	Tevo [19]	80	380-420	3,53 – 4,22	8	12	50	1173,40

В ювенільній справі найчастіше використовуються смоли для виплавлених моделей, наприклад FunToDoСВабо MakerJuiceWaxcast [20-21], рисунок 1.8.



а)



б)

а – фотополімерна смола FunToDo CB; б – фотополімерна смола MakerJuiceWaxcast

Рисунок 1.8 – Фотополімерні смоли для виплавлених моделей

Майстер-моделі з цих смол використовують для отримання литих металевих виробів. Перевагами таких смол є те, що в процесі вижигання майстер-моделі та заливки метала у форму, майже нема шлаку та полімеризована смола легко виплавляється і дозволяє металі заповнювати форму виробу, рисунок 1.9.



а)



б)

а – результати лиття фотополімерної смоли FunToDo CB; б – результати лиття фотополімерної смоли MakerJuiceWaxcast

Рисунок 1.9 – Приклади використання фотополімерних смол для лиття

Технічні характеристики смол для випалювання наведені в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Характеристики фотополімерних смол для лиття

Фотополімерна смола FunToDo CB		
№	Параметр	Значення
1	Твердість по Шору	73
2	Діапазон довжини хвилі полімеризації, нм	225 – 415
3	Товщина шару, мкм	50
4	Час засвітлено шару, с	5
5	В'язкість, МПа	1000
6	Усадка готового виробу, %	0,5
Фотополімерна смола MakerJuiceWaxcast		
№	Параметр	Значення
1	Твердість по Шору	70
2	Діапазон довжини хвилі полімеризації, нм	405
3	Товщина шару, мкм	25 – 50
4	Час засвітлено шару, с	10
5	В'язкість, МПа	1000
6	Усадка готового виробу, %	0,6

Anycubic Dental (Skin) Non-Castable(не випалювана) – фотополімерна смола, призначена спеціально для застосування в стоматологічних клініках, рисунок 1.10.

Основна відмінність цього фотополімеру від інших у тому, що він має найкращі показники чутливості та в'язкості, а також здатний швидко твердіти, не втрачаючи при цьому своєї стабільності через мінімальну усадку. Надруковані моделі відрізняються підвищеною міцністю та високою деталізацією, що дуже важливо у стоматологічному протезуванні[22].



Рисунок 1.10 – Фотополімерна смола Anycubic Dental (Skin) Non-Castable

Технічні характеристики смоли наведені в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 – Характеристики фотополімерної смоли Anycubic Dental (Skin) Non-Castable

№	Параметр	Значення
1	Твердість по Шору	80
2	Діапазон довжини хвилі полімеризації, нм	405
3	Товщина шару, мкм	50
4	Час засвітлено шару, с.	4
5	В'язкість, mPas	100 – 150
6	Усадка готового виробу, %	1,8 – 2,12
7	Гранична міцність, МПа.	42 – 62
8	Інтенсивність випромінювання, Лм	1600

Фотополімерна смола Anycubic plant-based ECOresin є екологічним біорозкладним фотополімером з низькою усадкою, рисунок 1.11.



Рисунок 1.11 – Фотополімерна смола Anycubic plant-based ECO resin

Цей фотополімер призначений для роботи з DLPLCD 3D принтерами, які полімеризують моделі довжиною хвилі 395-405 нанометрів: Anycubic лінійка Photon та Mono, Wanhao (D7, D7 Plus, D8, GR1) та іншими, що друкують за технологією стереолітографії (DLP) [23].

Смола має відмінну комбінацію твердості та міцності, низьку усадку, має високу швидкість полімеризації. Завдяки своїй плинності чудово відтворює дрібно деталізовані елементи об'єктів, забезпечує високоточне прототипування.

Особливості екологічної фотополімерної смоли Anycubic 405nm UV resin, ECO:

- біорозкладний фотополімер виготовлений із соєвої олії, без летких органічних сполук та без шкідливих хімічних речовин;
- підходить для більшості DLP LCD 3D-принтерів. Чутливий до ультрафіолетового випромінювання 355-405 нм;
- низька в'язкість смоли полегшує очищення принтера та моделі;
- смола стабільна у різних кліматичних умовах.

При роботі з будь-яким полімером для 3D-друку рекомендуємо дотримуватися запобіжних заходів: використовувати захисну маску і рукавички і уникати попадання смоли на шкіру і слизову. Технічні характеристики смоли наведені в таблиці 1.5.

Таблиця 1.5 – Характеристики фотополімерної смоли Anycubic plant-based ECO resin

№	Параметр	Значення
1	Діапазон довжини хвилі для полімеризації, нм	355 – 410
2	Коефіцієнт усадки, %	3,74 – 4,24
3	Подовження на розриві, %	11 – 20
4	Міцність на розтяг, МПа	59 – 70
5	Твердість повністю затверділого полімеру Шору	84 за шкалою D
6	В'язкість (25°C), mPas	300
7	Щільність, г/см ³	1,05 – 1,25
8	Товщина шару друку, мкм	від 35
9	Рекомендований час запікання шарів, с	6 – 10
10	Інтенсивність випромінювання, Лм	1600

1.3 Висновки до першого розділу

В даному розділі були проаналізовані сфери застосування фотополімерного 3D-друку, розглянуті технології SLA, DLP та LCD, їх переваги та недоліки. Зокрема були розглянуті види фотополімерних смол та їх особовості.

За результатами аналізу можливо виділити наступне, що збереження геометричних розмірів моделі при друці на сам перед залежить не тільки від обраної технології друку, а значною мірою від матеріалу для друку (фотополімер).

Основними характеристиками фотополімеру, які впливають на точність виготовлення деталі при 3D-друці є:

- час експонування шару (час дії УФ-випромінювання на фотополімер), с;
- товщина шару, мкм;
- довжина хвилі полімеризації, нм;
- інтенсивність випромінювання, Лм;
- коефіцієнт усадки фотополімеру, %.

Для кожного фотополімеру ці значення різні, тому дослідження впливу цих параметрів на модель, є актуальною задачею.

2 ОПИС МАКЕТУ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПРИЧИНИ НАГРІВУ ФОТОПОЛІМЕРНОЇ СМОЛИ

Для проведення досліджень був обраний фотополімерний 3D-принтер за технологією LCD Anycubic Photon Mono 4K [24], рисунок 2.1.



Рисунок 2.1 – Фотополімерний 3D-принтер AnycubicPhotonMono 4K

Цей принтер був обраний через те що, джерело УФ-випромінювання в даній моделі складає 405 нм, що підходить для більшості фотополімерних смол.

Також в ньому використовується монохромний РК-дисплей) для затвердіння смоли, що дозволяє:

- збільшити швидкість друку;
- підвищує точність виготовлення;
- дає високу роздільною здатністю друку (4K).

Область друку становить 132×80×65 мм. Дана модель дозволяє регулювати потужність УФ-випромінювання від 30% до 100% залежності від особливостей фотополімерної смоли та швидкості друку, що дозволяє отримувати якісніші моделі.

Anycubic Photon Mono 4K має роздільну здатність дисплея, яка керується за технологією MSLA (Masked Stereolithography). Роздільна здатність дисплею складає 3840×2400 пікселів.

Це дозволяє отримувати точніші результати друку порівняно з попередніми поколіннями LCD 3D принтерів (2K). При цьому термін експлуатації монохромного (чорно-білого) дисплея приблизно в 4 рази більше ніж у кольорового і становить близько 2000 годин.

Модель укомплектована паралельним джерелом світла для більш рівномірної експозиції, а також оснащена якісним блоком живлення для безперервної роботи та тривалого терміну служби. Матриця з кварцовими лінзами рівномірно розсіює УФ-промені, роблячи печатку ще більш точною по всій робочій площі екрана.

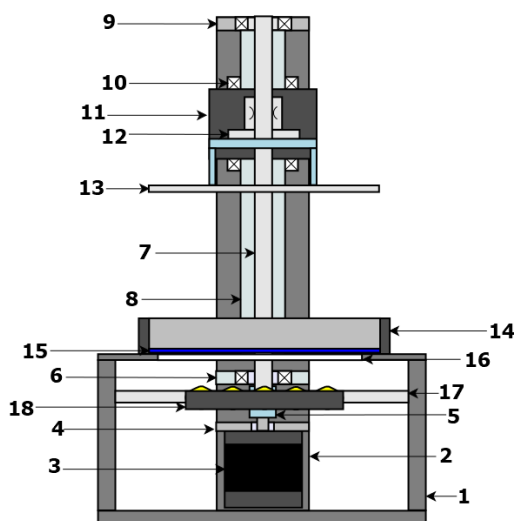
Технічні характеристики фотополімерного 3D-принтера Anycubic Photon Mono 4K наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Характеристики фотополімерного принтера Anycubic Photon Mono 4K

№	Характеристики	Значення
1	Технологія друку	LCD
2	Область друку, мм	132×80×65
3	LCD-дисплей роздільна здатність, піксел	3840×2400 (4K)
4	Товщина шарів, якими друкує принтер, мм	0,01 – 0,15
5	Максимальна швидкість друку, мм/годину	50
6	Довжина хвилі, нм	405
7	Підтримка моделей із програм	Anycubic Photon Worksop
8	Витратні матеріали (смоли якими можливо друкувати)	Фотополімерна смола Anycubic, Wanhao 405nm UV resin, Esun, та фотополімер з довжиною хвилі 405 nm: серія FunToDo, B9R-4-Yellow та ін.
9	Операційні системи	Windows XP, Windows Vista, Windows7, Windows8, Windows10, Linux, MacOS
10	Дисплей	Сенсорний
11	Інтерфейс підключення	USB
12	Вага, кг	6
13	Загальні розміри принтера, мм	270×192×365

2.1 Кінематична схема макету для досліджень Anycubic Photon Mono 4K

Кінематична схема макету для досліджень, являє собою стандартне інженерне рішення для фотополімерного 3D-принтера за технологією LCD. Кінематична схема наведена на рисунку 2.2.



1 – корпус верстата; 2 – вертикальна направляюча; 3 – кроковий двигун Nema 17A1,7A 17HS4401 вертикальної осі; 4 – кронштейн двигуна;
 5 – муфта ходового гвинта; 6 – нижня опора ходового гвинта;
 7 – ходовий гвинт; 8 – рельсова лінійна направляюча вертикальної осі;
 9 – верхня опора ходового гвинта; 10 – каретка вертикальної осі;
 11 – кронштейн вертикальної осі; 12 – гайка ходового гвинта;
 13 – платформа для друку; 14 – ванна; 15 – плівка дно ванни;
 16 – LCD матриця; 17 – кронштейн для УФ-лампи; 18 – УФ-лампа

Рисунок 2.2 – Кінематична схема макету для досліджень

Принтер складається з корпусу «1» до якого приєднана вертикальна направляюча «2». За переміщення моделі при друці на новий шар відповідає ходовий гвинтовий T8 «7», з діаметром 10 мм та кроком різьби 2 мм [25]. Для цього до вертикальної осі «2» в низу та верху встановлюються опори ходового

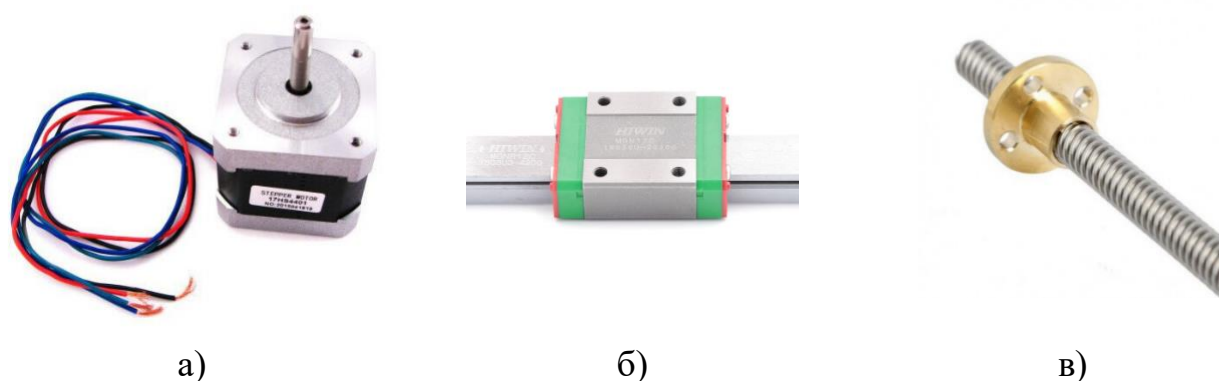
гвинта «6» та «9». Між опорами розташована лінійна направляюча MGN12«8» на якій знаходиться каретка MGN12H«10» [26]. Ця каретка з'єднана з кронштейном вертикальної осі «11».

До кронштейну вертикальної осі «11» встановлюється платформа для друку «13» з робочою площею 132×80 мм. Для переміщень платформи в низ та гору до кронштейну вертикальної осі встановлюється гайка ходового гвинта «12», через яку проходить ходовий гвинт «7». Обертання гвинта відбуваються за допомогою крокового двигуна Nema 17A1,7A 17HS4401 «3» [27], вал якого з'єднаний до гвинта за допомогою муфтою гвинта «5».

За допомогою цієї передачі платформа може переміщатися в гору або в низ до ванни з фотополімером «14». Дно ванни виконано з прозорої плівки «15» товщиною 0,15 мкм. Плівка прилягає до LCDматриця «16», тим самим захищаючи його поверхню від пошкоджень та від контакту з фотополімерною смолою. LCD екран створює форму шару для друку.

Для експонування зображення шару через LCDекрана, використовується УФ-лампа «18», яка кріпиться до корпусу за допомогою кронштейну УФ-лампи «17».

На рисунку 2.3, наведені механічні компоненти макету.



а – кроковий двигун Nema 17A 1.7A 17HS4401; б – рельсова лінійна направляюча MGN12 з кареткою MGN12H; в – ходовий гвинтовий Т8 та ходова гайка

Рисунок 2.3 – Механічні компоненти макету

2.2 Електрична частина макету

Електронна складова макету для дослідження на базі Anycubic Photon Mono 4K наведена на рисунку 2.4.

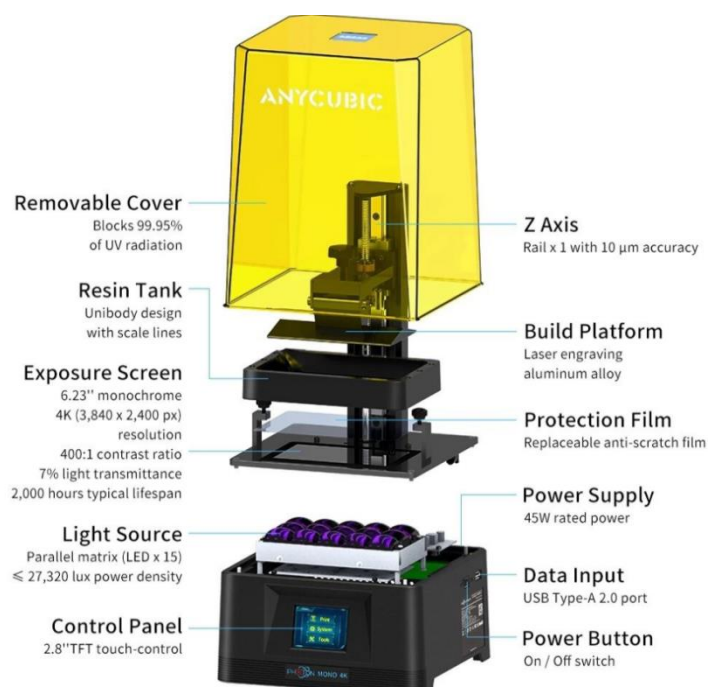


Рисунок 2.4– Компонівка електроніки в Anycubic Photon Mono 4K

В якості плати для управління використовується спеціальна материнська плата Anycubic Photon MonoV0.05 на базі мікроконтролера ANLOGICEF2L45L614B, рисунок 2.5 [28]. Ця плата предназначена для фотополімерних LCD 3D-принтерів, в ній спроектовані основні роз'єми та елементи необхідні для таких принтерів, а саме:

- роз'єм для підключення LCD матриці;
- роз'єм для підключення УФ-діодів;
- роз'єм для підключення крокових двигунів;
- роз'єм для підключення датчиків положення платформи (End-Stop);
- роз'єм для підключення сенсорного дисплея;
- роз'єми для живлення;
- USB порт;

– кнопка On/Off.

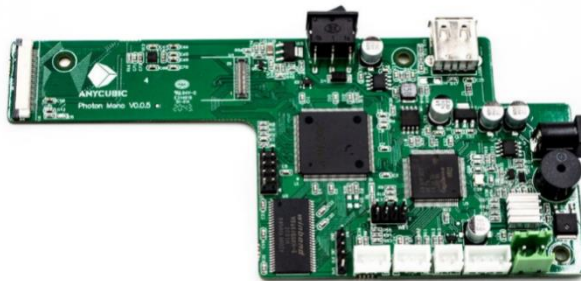


Рисунок 2.5 – Материнська плата Anycubic Photon Mono V0.05

LCD матриця теж від виробника фірми Anycubic. Матриця має роздільну здатність дисплея, яка керується за технологією MSLA (Masked Stereolithography) [29]. Роздільна здатність дисплею складає 3840×2400 пікселів. Матриця підключається до материнської плати за допомогою двох шлейфів та плати перехідника, рисунок 2.6.

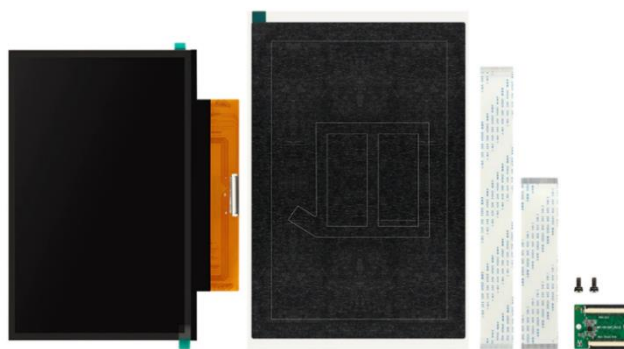
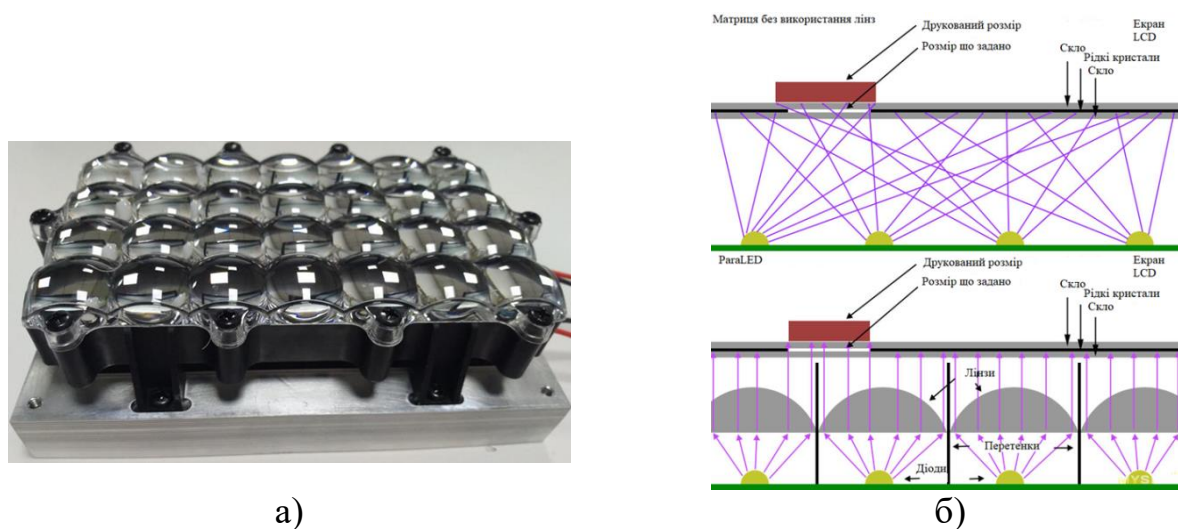


Рисунок 2.6 – LCD матриця Anycubic Photon Mono 4K

В якості джерела УФ-випромінювання в даній моделі використовується світлодіодна матриця з використанням кварцових лінз–ParaLED, яка має кут розсіювання випромінювання 15° . Для використання даної матриці потрібно 50 В напруги та 1.5 А струму. Системи ParaLED більш поширена за рахунок надійності в порівнянні з системами засвітлення зі світлодіодною матрицею та фокусаторо.

В результаті друку багатьох моделей було визначено, що дана система дає менше паразитного засвітлення, рисунок 2.7. Встановлений радіатор, що має поперечні пластини, що краще відводять тепло [30].



а – світлодіодна матриця ParaLED; б – порівняння системи ParaLED та звичайні світлодіоди з фокусатором.

Рисунок 2.7 – Світлодіодна матриця ParaLED

Взаємо дія з макетом виконуються через сенсорний дисплей MKS TFT24, рисунок 2.8. В таблиці 2.2 наведені характеристика сенсорного дисплея [31].

Таблиця 2.2 – Характеристики сенсорного дисплею MKS TFT24

№	Параметр	Значення
1	Розмір дисплея, мм	87×50
2	Colorful сенсорний екран, дюйми	2,4
3	Формат файлу	Gcode
4	Мікропроцесор	32 біт STM32
5	Масштабований модуль	WIFI / автоматичне вимкнення / визначення рівня сигналу / визначення потужності / зовнішній зовнішній зчитувач
6	Підтримка картки	SD



Рисунок 2.8 – Сенсорний дисплей MKS TFT24

Для живлення принтеру використовуються зовнішній блок живлення 12 В на 45 Вт, рисунок 2.9.



Рисунок 2.9 – Блок живлення для Anycubic Photon Mono 4K

В таблиці 2.3 наведені характеристика блоку живлення.

Таблиця 2.3 – Характеристики блоку живлення

№	Параметре	Значення
1	Вхідна напруга, В	220 AC
2	Вихідна напруга, В	12 DC
3	Вихідна сила струму, А	6
4	Потужність, Вт	45
5	Розміри, мм	115×60×35
6	Вага, кг	0,4

Для визначення положення платформи використовуються два оптичні датчики верхній (на верху вертикальної осі) та нижній (в низу вертикальної осі), рисунок 2.10.



Рисунок 2.10 – Оптичний датчик End-Stop

В таблиці 2.4 наведені характеристика оптичного датчика End-Stop.

Таблиця 2.4 – Параметри оптичного датчика

№	Параметр	Значення
1	Точність позцінування, мм	0,1
2	Сила струму, А	2
3	Потужність, Вт	360
4	Розміри, мм	32×10×20

Внутрішня компоновка Anycubic Photon Mono 4K наведена на рисунку 2.11.



Рисунок 2.11 – Компоновка електроніки Anycubic Photon Mono 4K

2.3 Природа виникнення нагріву фотополімеру

Для розробки системи контролю температури фотополімерної смоли, необхідно визначити параметрів експонування моделі, які впливають на нагрів, а саме:

- час засвічення смоли;
- інтенсивність випромінювання максимальна;
- довжина хвилі випромінювання;
- товщина базового шару.

Незалежно від обраної технології фотополімерного 3D друку можливо виділити основні чинники, які впливають на відхилення геометричних розмірів моделі. Для зручності їх можливо розділити на дві групи:

- 1) параметри налаштування експонування шарів моделі;
- 2) фізико-хімічні властивості фотополімерної смоли.

До параметрів налаштування належать вже ті значення, які були розглянуті. Фізико-хімічні властивості фотополімерної смоли, обумовлені її хімічним складом, котрі впливають на характеристики моделі та збереження геометричних розмірів в процесі друку. До них відносять:

- коефіцієнт усадки смоли, %;
- довжина хвилі поляризації, нм;
- коефіцієнт теплопровідності, Вт/м².

Якщо більш детально переглянути принцип роботи фотополімерних технологій, то можливо побачити певну закономірність. У всіх цих трьох технологіях використовується випромінювання світла, енергія якого іде не тільки на полімеризацію потрібних ділянок фотополімеру, а і на нагрів самої фотополімерної смоли, а саме на температурний коефіцієнт об'ємного розширення матеріалу (ТКОР).

ТКОР матеріалу (α) визначає, як змінюється його об'єм при зміні температури. Він вимірюється в одиницях 1/°C (або 1/K) і показує, на скільки одиниць зміниться об'єм матеріалу при зміні температури на 1 градус Цельсія

(або 1 кельвін).

Математично температурний коефіцієнт об'ємного розширення виражається наступною формулою 3.2.

$$\alpha = (\Delta v/v_0)/\Delta T, \quad (3.2)$$

де α – температурний коефіцієнт об'ємного розширення; ΔV – зміна об'єму матеріалу; V_0 – початковий об'єм матеріалу; ΔT – зміна температури.

Температурний коефіцієнт об'ємного розширення може бути різним для різних матеріалів. Вплив ТКОР в процесі побудови шару моделі є дуже суттєвим, бо при перегріві смоли збільшується коефіцієнт розширення матеріалу. Це відображається на геометричні відхилення шарів моделі, так же сильно як і перезасвітлення шарів, рисунок 2.12.

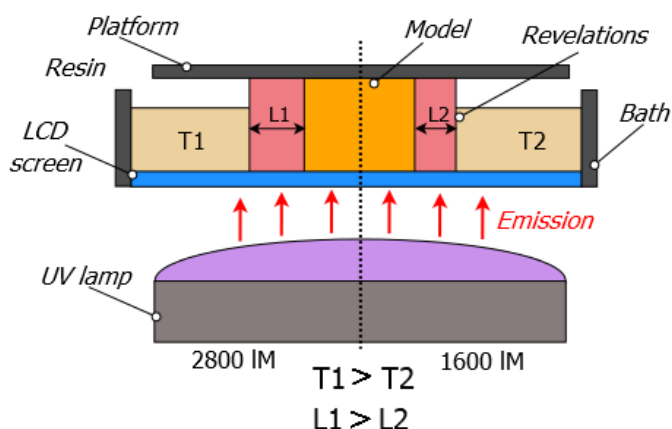


Рисунок 2.12 – Принцип впливу ТКОР в процесі експонування моделі

Таким чином можливо розглянути, що всі ці параметри певною мірою прямо впливають на температуру нагріву смоли в процесі друку, а тим самим на ТКОР.

Процес нагріву фотополімерної смоли та виникнення ТКОР з фізичної точки зору можливо розглянути як задачу з тепло-обміном тришарової стінки.

Враховуючи особливості фотополімерного 3D-друку за технологією LCD, розглянемо тришарову стінку, рисунок 2.13, що складається з трьох щільно

прилеглих один до одного шарів із товщинами: d_1 (товщина LCD екрану); d_2 (товщина плівки); d_3 (товщина рідкої фотополімерної смоли).

Кожен шар характеризується своєю постійною теплопровідністю λ_1 , λ_2 і λ_3 відповідно.

Відомі також температури зовнішніх поверхонь t_1 і t_4 . Тепловий контакт між шарами – ідеальний, без зазорів і відповідно без повітряних прошарків, температури в місцях контакту шарів позначаємо t_2 і t_3 .

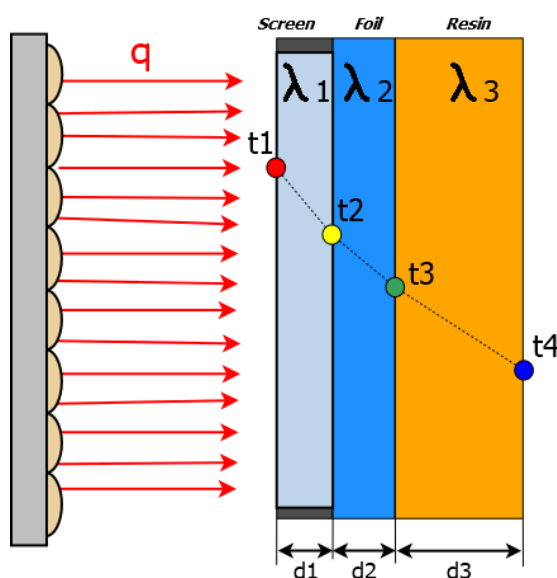


Рисунок 2.13 – Тепло-обмін в процесі фотополімерного LCD 3D-друку

Таким чином дослідження температурних впливів в процесі фотополімерного 3D-друку є актуальною задачею.

2.4 Висновки до другого розділу

В даному розділі був розглянут макет для проведення досліджень Anycubic Photon Mono 4K. Розглянуті його характеристика та особливості. Була описана кінематика та принцип дії даного верстата з ЧПУ (числове програмне управління).

Особлива увага була приділена до його електронній складовій, бо в залежності від роздільної здатності LCD матриці, кількості пікселів та типу

джерела УФ-випромінювання, можуть безпосередньо вплив на відхилення геометричних розмірів моделі при друці.

За результатами аналізу можливо виділити наступне, що даний фотополімерний 3D-принтер Anycubic Photon Mono 4K, підходить для проведення досліджень за рахунок:

- високої роздільної здатності;
- можливості регулювати інтенсивність випромінювання;
- довжині хвилі встановленому на ньому УФ-матриці, 405 нм.

3 ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Математична модель контролю температури фотополімерного друку

Контроль температури важливий аспект технологічного процесу фотополімерного друку. Контролюючи температури можливо відслідковувати полімеризацію шару фотополімера. Для моделювання контролю температури необхідно визначити основні чинники, що впливають на температуру фотополімеру у ванній.

Першим основним чинником є потужність УФ світлодіодній матриці. Матриці на фотополімерних принтерів можуть мати різну потужність випромінювання, від 40 Вт до 80 Вт. В конструкції світлодіодних матриць використовуються фокусуєчі лінзи та лінзи Френеля для зменшення розсіювання УФ випромінювання.

Другим чинником є відстань УФ джерела до екрану. Чим менша відстань, тим більше тепла передається в область друку.

Третім чинником є теплові ефекти такі залежать від типу екрану. Монохромний екран має більший коефіцієнт пропускання УФ випромінювання ніж повнокольоровий. Також теплові ефекти залежать від ступені прозорості фторопластової плівки, її товщини та наявності дефектів на її поверхні, що заважають проходженню УФ випромінювання, що призведе до збільшення температури на її поверхні.

Четвертим чинником, що призводить до зміни температури в процесі друку є процес полімеризації, яка супроводжується виділенням тепла.

П'ятим чинником що впливає на температуру є температури навколишнього середовища та матеріал із якого зроблена ванна. Ванна може бути виготовлена з алюмінію або пластика, які мають різну теплопровідність, що буде значно впливати на температуру фотополімера в процесі друку.

Таким чином для виконання моделювання необхідно визначити, які чинники найбільше впливають на температуру в процесі друку деталей. Визначити залежність між інтенсивністю випромінювання та швидкістю полімеризації, побудувати основну формулу для моделювання процесу, визначити чисельні значення окремих факторів та вплив кожного фактора на кінцеву температуру. Визначити властивості матеріалів, їх теплопровідність, коефіцієнт поглинання та оптичні властивості.

Також для моделювання необхідно визначити основне рівняння моделі по якій буде виконуватися моделювання процесу в ПЗ Matlab.

Основним рівнянням за яким можливо виконати моделювання процесу нагріву фотополімеру є рівняння теплопровідності, яке визначено далі:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T + Q_{\text{полімеризації}} + Q_{\text{випромінювання}} - Q_{\text{відвід}}, \quad (3.1)$$

де: ρ – густина матеріалу, кг/м³;

c_p – питома теплоємність, Дж/кг*°С;

k – коефіцієнт теплопровідності, Вт/м°С;

T – температура, К;

$Q_{\text{полімеризації}}$ – теплова потужність екзотермічної реакції, Вт/м³;

$Q_{\text{випромінювання}}$ – енергія, що поглинається від УФ випромінювання,

Вт/м³; $Q_{\text{відвід}}$ – тепловідвід через алюмінієву ванну та навколишнє середовище, Вт/м³;

Наступним рівнянням є закон поглинання світла:

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x}, \quad (3.2)$$

де: $I(x)$ – інтенсивність світла на відстані x , Вт/м²;

I_0 – початкова інтенсивність, Вт/м²; μ – коефіцієнт поглинання, м⁻¹.

Для розрахунку початкової інтенсивності використовується формула:

$$I_0 = \frac{P}{4\pi d^2}, \quad (3.3)$$

де P – потужність джерела УФ випромінювання.

Для визначення тепла, яке виділяється в процесі полімеризації використовується наступна формула;

$$Q_{\text{полімеризації}} = \Delta H R_p, \quad (3.4)$$

де ΔH – тепловий коефіцієнт реакції, Дж/моль; R_p – швидкість полімеризації, що залежить від інтенсивності світла; Для визначення швидкості полімеризації використовується наступна формула:

$$R_p = k_1 I_{\text{лок}}, \quad (3.5)$$

де: k_1 – кінетична константа реакції.

Для розрахунку тепловідводу через ванну та навколишнє середовище використовується наступна формула:

$$Q_{\text{відвід}} = h_{\text{ванни}}(T - T_{\text{ванни}}) + h_{\text{навк}}(T - T_{\text{навк}}), \quad (3.6)$$

де: $h_{\text{ванни}}$ – коефіцієнт тепловіддачі від алюмінієвої ванни, Вт/м²;

$T_{\text{ванни}}$ – температура ванни, К;

$h_{\text{навк}}$ – коефіцієнт тепловіддачі від навколишнього середовища, Вт/м²;

$T_{\text{навк}}$ – температура навколишнього середовища.

Початкова температура має наступний вигляд:

$$T(x, y, z, t=0) = T_{\text{навк}}, \quad (3.7)$$

Таким чином на поверхні фотополімера виникає тепловіддача в навколишнє середовище.

Для використання вищевказаних формул для моделювання процесу нагріву, їх було вдосконалено з додаванням факторів, які впливають на процес нагріву.

Таким чином вищевказані формули набули наступного вигляду:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T + Q_{\text{пол}} + Q_{\text{світла}} + Q_{\text{тепла}} - Q_{\text{відвід}}, \quad (3.8)$$

де: $Q_{\text{світла}}$ – тепло, що поглинається фотополімером за рахунок УФ випромінювання;

$Q_{\text{тепла}}$ – тепло від світлодіодної матриці, що передається через екран; $Q_{\text{відвід}}$ – тепловідвід через ванну та навколишнє середовище.

Для розрахунку тепла, що передається фотополімеру від екрана використовується наступна формула:

$$Q_{\text{мат}} = \frac{\varepsilon \sigma A_{\text{LED}} T_{\text{LED}}^4}{d^2}, \quad (3.9)$$

де ε – коефіцієнт здібності випромінювати світлодіодами;

σ – постійна Больцмана (5.67×10^{-8} Вт/м²К⁴);

A_{LED} – площа активної поверхні матриці, м²;

T_{LED} – температура матриці, К;

d – відстань від світлодіодної матриці до екрана, м.

Таким чином енергія тепла від LED матриці розподіляється між нагріванням екрану та безпосереднім впливом на фотополімер.

Для визначення тепла, що поглинається екраном використана наступна формула:

$$Q_{\text{екран}} = \alpha_{\text{екран}} Q_{\text{мат}}, \quad (3.10)$$

де: $\alpha_{\text{екран}}$ – коефіцієнт поглинання екрана, що залежить від матеріалу екрана.

Для визначення тепла, що передається через екран використовується наступна формула:

$$Q_{\text{тепло}} = \frac{k_{\text{екран}}}{d_{\text{екран}}} (T_{\text{екран}} - T_{\text{полімер}}), \quad (3.11)$$

де $k_{\text{екран}}$ – теплопровідність матеріалу екрана;

$d_{\text{екран}}$ – товщина екрана;

$T_{\text{екран}}$ – температура екрану;

$T_{\text{полімер}}$ – температура фотополімера.

Таким чином рівняння теплопередачі для екрана буде мати наступний вигляд:

$$\rho_{\text{екран}} c_{p,\text{екран}} \frac{\partial T_{\text{екран}}}{\partial t} = k_{\text{екран}} \nabla^2 T_{\text{екран}} + Q_{\text{мат}} - Q_{\text{теплопередачі}}, \quad (3.12)$$

Формула $Q_{\text{теплопередачі}}$ має наступний вигляд:

$$Q_{\text{теплопередачі}} = h_{\text{екран}} (T_{\text{екран}} - T_{\text{полімер}}) \quad (3.13)$$

В подальшому було проведено комп'ютерне моделювання в ПЗ MatLab.

3.2 Моделювання процесу теплообміну під час фотополімерного друку в ПЗ MatLab

Для моделювання процесу в ПЗ MatLab було визначено основні параметри, згідно яких проводиться моделювання нагріву під час друку.

Так як зараз основним типом матриці у фотополімерних принтерах є ParaLED, тоді для моделювання взято характеристика саме цього типу матриць. Матриця ParaLED зображено на рисунку 3.1.



Рисунок 3.1 – Матриця ParaLED

Її потужність становить 80 Вт, розміри цієї матриці становлять 160x90 мм. Робоча температура такої матриці згідно заявлених характеристик становить 77 градусів. Зазвичай такі матриці знаходяться на відстані 90 мм від екрану для рівномірного розподілення УФ випромінювання рівномірно по всій площі екрану.

В якості екрану для розрахунку моделі було взятий монохромний екран, який забезпечує максимальну пропускну здатність УФ випромінювання. Використовуючи такий тип екранів час експонування фотополімеру з

використанням ParaLED досягає 2.5 секунд для звичайних шарів та 20 секунд для базових шарів.

В якості фотополімера було взяти базовий фотополімер виробника Anycubic, що має наступні властивості:

- густина фотополімеру 1195 г/см³;
- питома теплоємність 2300 Дж/(кг*К);
- теплопровідність фотополімеру 0.22 Вт/(м*град);

В якості матеріалу ванни було вибрано алюміній через його високу здатність відводити тепло.

Алюміній має наступні характеристики:

- густина алюмінію становить 2700 кг/м³;
- питома теплоємність алюмінію становить 900 Дж/(кг*К);
- теплопровідність алюмінію становить 237 Вт/(м*К);

Для дослідження була взята температура навколишнього середовища 23°C і переведено в Кельвіни. Таким чином температура навколишнього середовища 296.15 К.

Наступним етапом є написання коду для моделювання температури в процесі друку в ПЗ MatLab.

Першим етапом моделювання було визначення вхідних даних в якості змінних для їх подальшого використання в процесі моделювання. Параметри LED-матриці:

- P_LED = 100; % (потужність LED-матриці, Вт);
- T_LED = 350; % (температура матриці, К);
- A_LED = 0.01; % (площа LED, м²);
- d = 0.1; % (відстань від LED до екрану, м);
- sigma = 5.67e-8; % (стала Стефана-Больцмана);
- epsilon_LED = 0.9; % (коефіцієнт випромінювання);
- alpha_screen = 0.7; % (поглинання екраном);
- alpha_vat = 0.5; % (поглинання тепла ванною).

Параметри екрану:

- $\rho_{\text{screen}} = 2500$; % (густина екрану, $\text{кг}/\text{м}^3$);
- $c_{\text{p_screen}} = 800$; % (питома теплоємність екрану, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$);
- $k_{\text{screen}} = 1.2$; % (теплопровідність екрану, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$);
- $d_{\text{screen}} = 0.005$; % (товщина екрану, м).

Параметри фотополімеру:

- $\rho_{\text{polymer}} = 1200000$; % (густина, $\text{кг}/\text{м}^3$)
- $c_{\text{p_polymer}} = 2300$; % (питома теплоємність, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$)
- $k_{\text{polymer}} = 0.2$; % (теплопровідність, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$)

Параметри ванни:

- $\rho_{\text{vat}} = 2700$; % (густина алюмінію, $\text{кг}/\text{м}^3$);
- $c_{\text{p_vat}} = 900$; % (питома теплоємність алюмінію, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$);
- $k_{\text{vat}} = 237$; % (теплопровідність алюмінію, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$);
- $d_{\text{vat}} = 0.04$; % (товщина алюмінієвої ванни, м).

Умови навколишнього середовища:

- $T_{\text{env}} = 296,15$; % (температура навколишнього середовища, К);
- $h_{\text{env}} = 10$; % (коефіцієнт теплообміну із середовищем, $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$);
- $h_{\text{vat}} = 50$; % (коефіцієнт теплообміну ванни, $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$).

Час експонування:

- $\text{exposure_time} = 2,5$; % (час експонування одного шару, с);
- $\text{pause_time} = 2$; % (час паузи між експонуваннями, с).

Наступним етапом моделювання є визначення параметрів моделювання.

Параметри моделювання:

- $N_x = 100$; % (кількість точок за просторовими координатами (x));
- $N_z = 100$; % (кількість точок за просторовими координатами (z));
- $L_x = 0.1$; % (розмір області за x, м);
- $L_z = 0.1$; % (розмір області за z, м);
- $dx = L_x / N_x$; % (крок за просторовими координатами (x));
- $dz = L_z / N_z$; % (крок за просторовими координатами (z));
- $dt = 0.01$; % (крок за часом, с);

– $Nt = 1000$; % (кількість часових кроків).

Визначення початкової температури в залежності від температури навколишнього середовища. Ініціалізація температурних полів:

– $T_{\text{polymer}} = T_{\text{env}} * \text{ones}(Nx, Nz)$; % (температура фотополімеру);

– $T_{\text{screen}} = T_{\text{env}}$; % (початкова температура екрану);

– $T_{\text{vat}} = T_{\text{env}}$; % (початкова температура ванни).

Далі було розраховано теплової енергії від світлодіодної матриці.

Розрахунок теплової енергії від LED:

– $Q_{\text{LED}} = P_{\text{LED}}$; % (теплова енергія від LED задається через потужність);

– $Q_{\text{screen}} = \alpha_{\text{screen}} * Q_{\text{LED}}$; % (частина тепла, поглинута екраном);

– $Q_{\text{vat}} = \alpha_{\text{vat}} * Q_{\text{LED}}$; % (частина тепла, поглинута ванною).

Основна частина програми яка використовує вище вказані формули для розрахунку результатів моделювання. Основний цикл моделювання, Додаток А.

Для візуалізації результатів побудовано 2 графіка в залежності від часу.

Код для побудови графіків наведено в Додаток Б.

В результаті моделювання було отримано два графіка, згідно яких можливо визначити яким чином в процесі друку змінюється температура.

Графіки зображені на рисунку 3.2.

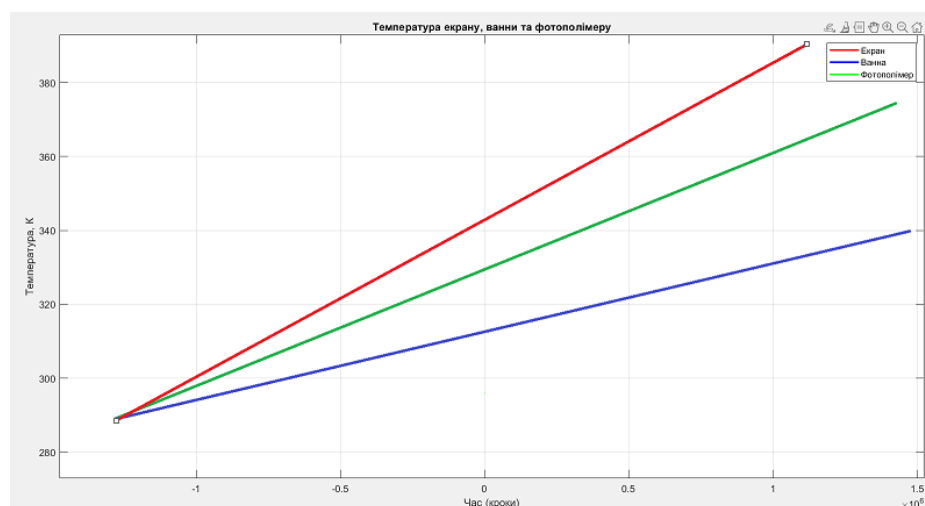


Рисунок 3.2 – Графік розподілу температури ванни, екрану та фотополімеру в процесі друку

Наступним графіком є розподілення температури на початку друку. Графік зображений на рисунку 3.3.

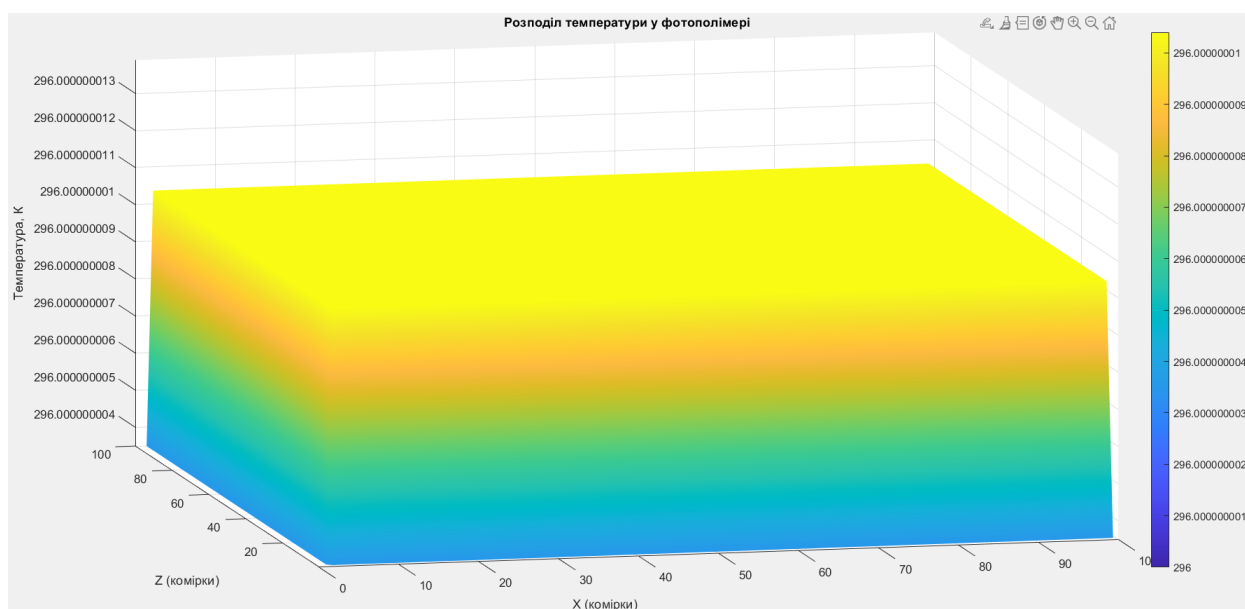


Рисунок 3.3 – Графік розподілу температури на початку друку

Середня температура фотополімеру, зображена на рисунку 3.4.

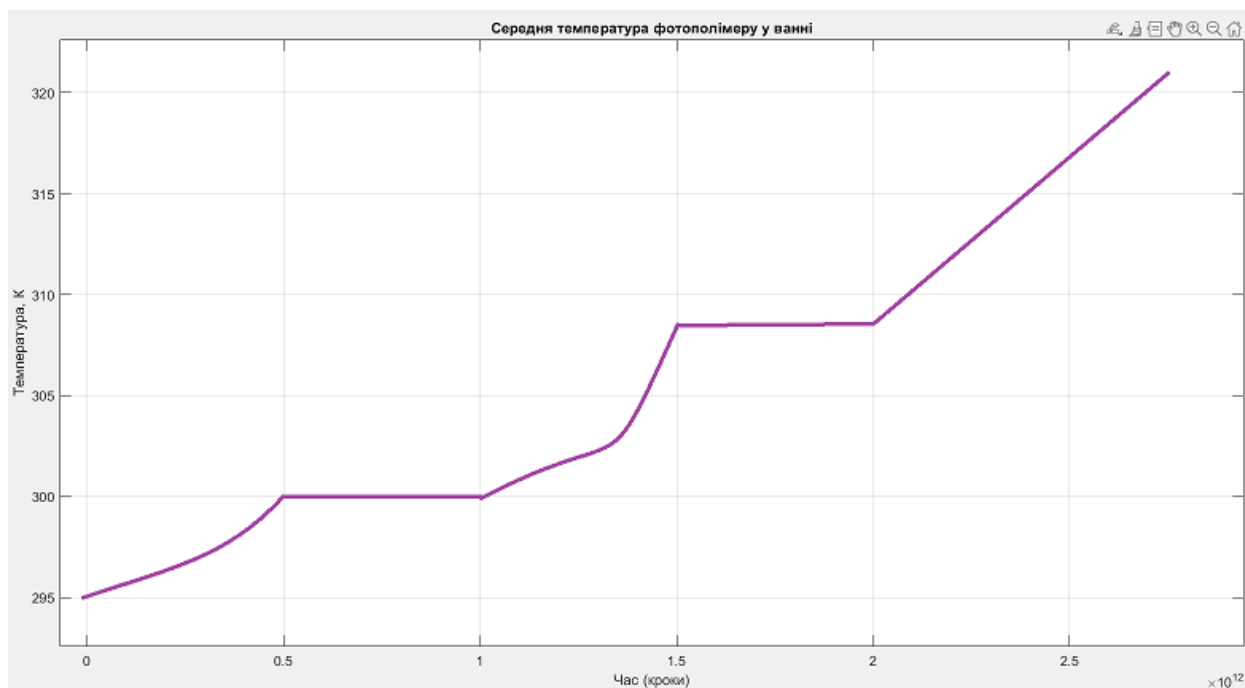


Рисунок 3.4 – Графік середньої температури у ванній

В результаті проведення моделювання у ПЗ MatLab можливо зробити висновок, що фотополімер у ванній набуває досить високих температур в процесі друку що може значно вплинути на якісні показники отриманих деталей, так як полімеризація при підвищенні температури прискорюється і призводить до виникнення мікротріщин та мікродефектів в шарі фотополімеру.

Також було визначено, що конструкція принтерів повинна мати в собі вентилятори для охолодження матриці, екрану та внутрішнього об'єму принтера для охолодження ванни та фотополімеру для збереження стабільної температури.

3.3 Розробка системи автоматичного керування кроковим двигуном за допомоги ПІД регулятора в ПЗ MatLab

Кроковий двигун є основним елементом фотополімерного друку. Він здійснює точне переміщення платформи по осі Z. Точність переміщення двигуна становить 10 мкм для збереження показників якості друкованих моделей.

ПІД регулятори застосовуються в системах управління для покращення характеристик перехідного процесу та підвищення точності, в тому числі і для крокових двигунів.

Передатна функція ідеального ПІД-регулятора $W_{PID}(s)$ має вигляд:

$$W_{PID}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_D s, \quad (3.14)$$

де K_p , – параметр пропорційного елемента регулятора;

K_i – інтегрального елемента регулятора;

K_D – диференціюючого елемента регулятора;

s – оператор.

Для автоматизованого керування кроковим двигуном за допомоги ПІД виконано моделювання процесу керування двигуном в ПЗ MatLab. Для цього

було створено скрипт, який моделює систему управління кроковим двигуном за допомогою ПД регулятора у фотополімерному друці.

Для моделювання використовується стандартний кроковий двигун Nema 17, який зображений на рисунку 3.5.



Рисунок 3.5 – Кроковий двигун Nema 17

Такий двигун має наступні характеристики: 1.8° градуси на крок, максимальний крутний момент – 0.5 Нм.

В якості елемента що здійснює переміщення є гвинт-гайка, яка переміщує платформу. Для переміщення за допомогою гвинт-гайки необхідно визначити `step_per_revolution`, що означає відстань переміщення платформи за допомогою гвинт гайки за один оберт. Формула розрахунку `step_per_revolution` наведена нижче:

$$\text{Step_per_revolution} = \frac{360}{\text{кутоберта} * \text{діленнядрайвера}}, \quad (3.15)$$

Передавальна функція крокового двигуна має наступний вигляд:

$$W(s) = \frac{K}{Js+b}, \quad (3.16)$$

де: K – коефіцієнт підсилення;

J – момент інерції;

b – коефіцієнт тертя.

В результаті виконання коду було отримано розрахунок системи керування за допомогою ПД регулятора та отримано декілька графіків, що дає змогу оцінити стан моделі керування.

Першим графіком є порівняння фактичного положення платформи з заданим положенням. Він зображений на рисунку 3.5 вгорі.

Другим графіком є динаміка похибки ПД регулятора. Він зображений на рисунку 3.5 посередині.

Третім графіком є графік сигнал керування, який надсилається на двигун. Він зображений на рисунку 3.5 внизу.

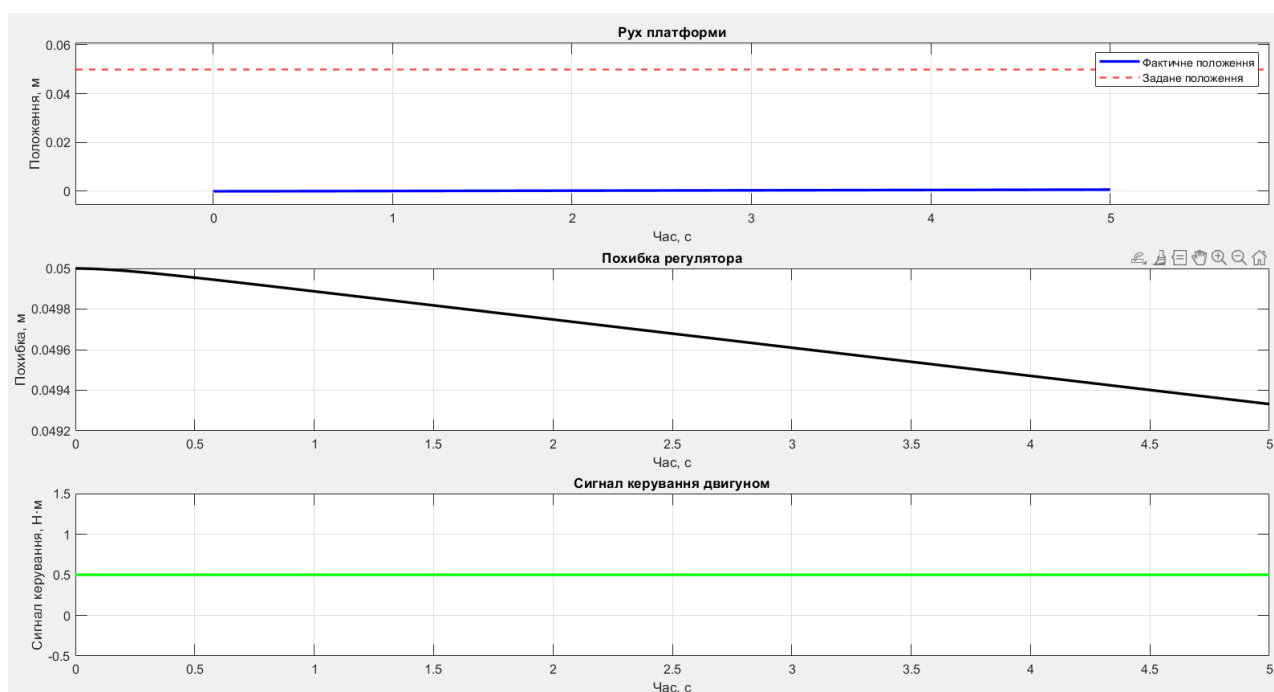


Рисунок 3.5 – Графіки руху платформи, похибки регулятора та сигналу системи керування

Ці графіки свідчать про наявність похибки при переміщенні двигуна на 2 МКМ.

Також в результаті моделювання було отримано годограф Найквіста, який демонструє стабільність системи в частотній області. Годограф Найквіста зображений на рисунку 3.6.

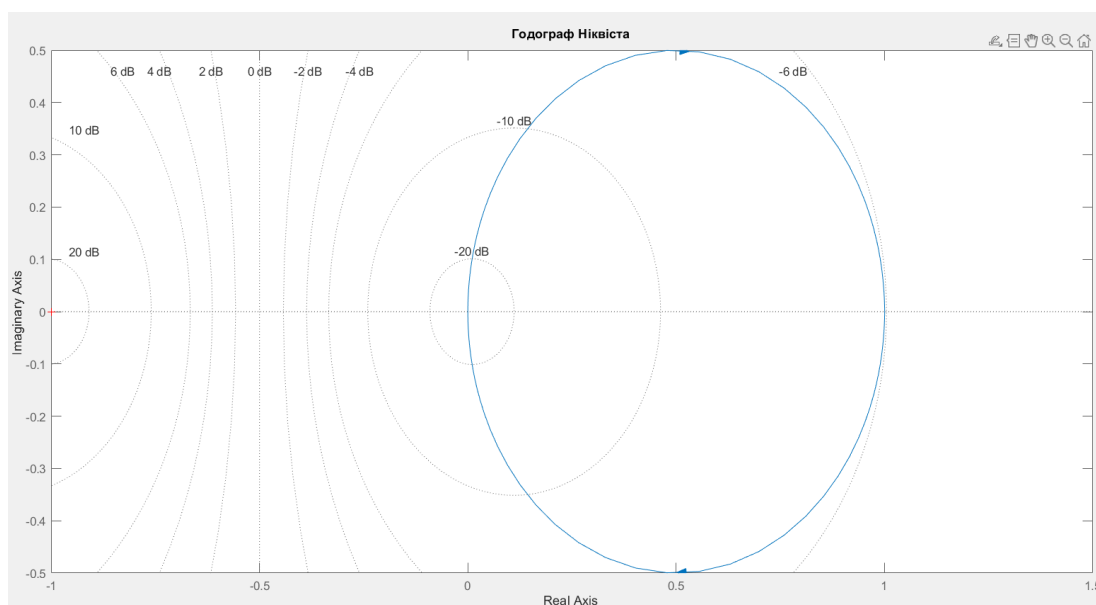


Рисунок 3.6 – Годограф Найквіста

Перехідна характеристика, яка зображує реагування системи на зміну заданого положення зображена на рисунку 3.7.

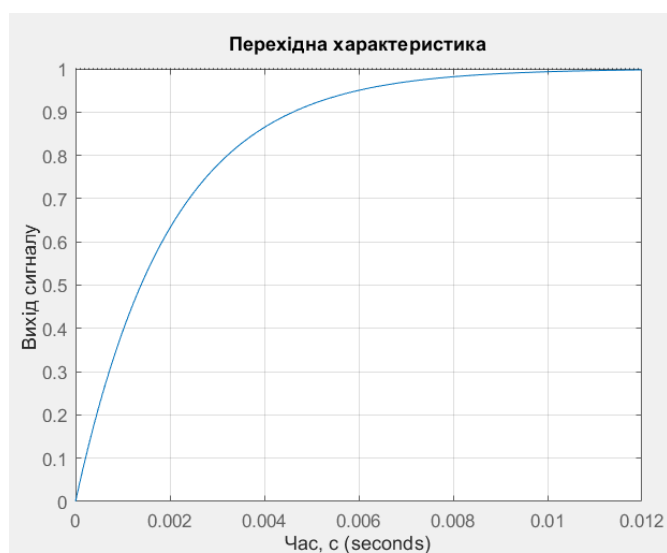


Рисунок 3.7 – Перехідна характеристика системи

Імпульсна характеристика, яка показує реакцію системи на імпульсний вхід зображена на рисунку 3.8

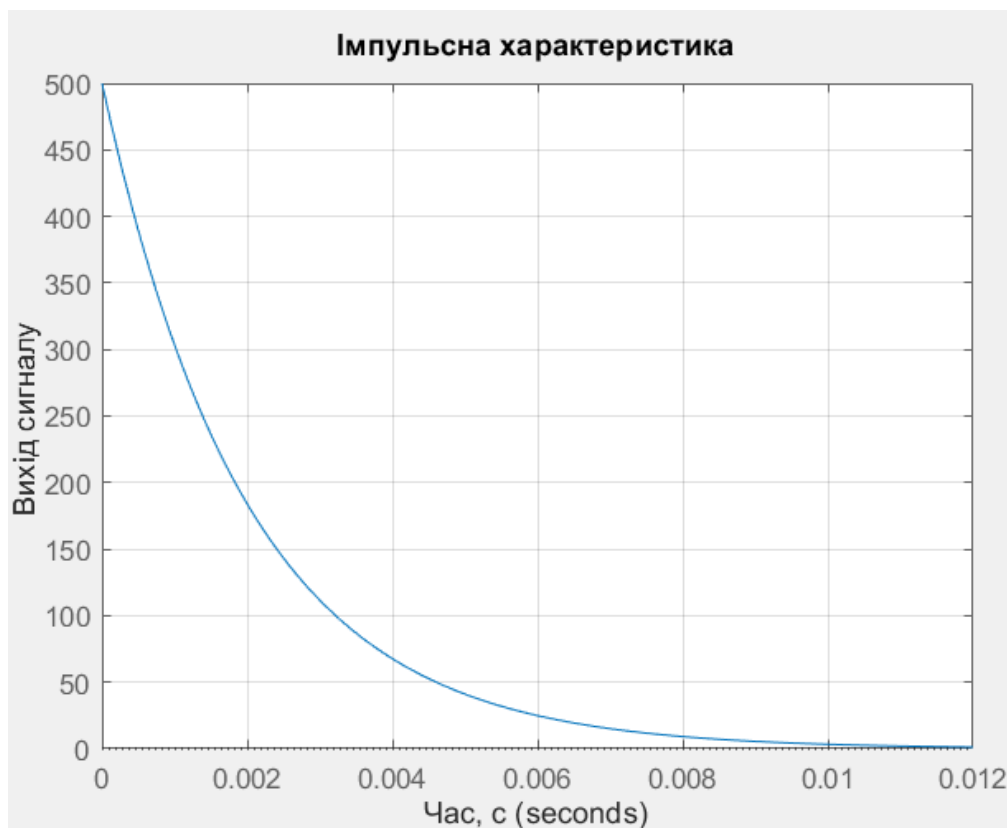


Рисунок 3.8 – Імпульсна характеристика системи

3.4 Висновки до третього розділу

В результаті виконання розділу було виконано наступні задачі:

- визначено основні фактори, що впливають на температуру під час друку;
- визначено основні елементи моделі для подальшої її моделювання у ПЗ MatLab;
- виконано моделювання зміни температури в процесі друку у ПЗ MatLab;
- розроблено модель управління кроковим двигуном фотополімерного 3D принтера за допомогою ПД регулятора.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Аналіз умов праці на робочому місці

На робочому місці оператора ПК виникають небезпечні та шкідливі чинники: підвищений рівень шуму, несприятливі мікрокліматичні умови, недостатній рівень освітленості, шкідливі речовини, підвищений рівень електромагнітних випромінювань радіочастот, висока напруга електричної мережі, статична електрика тощо. Робота з ПК супроводжується також підвищеним ступенем напруженості трудового процесу. У разі систематичного впливу виробничих чинників, які не відповідають нормативним показникам, зростає рівень професійно зумовленої захворюваності працівників та можуть виникнути професійні захворювання органів зору, руху, нервової системи. Отже, вивчення умов праці на робочому місці програміста є необхідною умовою запобігання негативних наслідків впливу небезпечних та шкідливих чинників.

Організація робочого місця. Приміщення, в якому знаходиться робоче місце програміста, загальною площею 48 м², і висотою стелі 3.5 м. У приміщенні розташовано 6 робочих місць з ПК. Кожне робоче місце обладнане робочим столом, стільцем та персональним комп'ютером, що складається з монітора, системного блоку, клавіатури та миші.

4.2 Промислова безпека на робочому місці

Живлення ПК здійснюється від трифазної електричної мережі змінного струму з глухозаземленою нейтраллю і напругою 220 В, частотою 50 Гц. Згідно з НПАОП 40.1-1.21-98 приміщення можна віднести до категорії без підвищеної небезпеки, оскільки в приміщенні відсутні чинники, що спричиняють підвищену або особливу небезпеку

Для створення безпечних умов праці необхідно провести низку організаційних і технічних заходів. Згідно з НПАОП 40.1-1.32-01 для запобігання ураження людини електричним струмом у приміщенні застосовується система занулення.

4.3 Виробнича санітарія у приміщенні

Робота оператора ПК за енерговитратами належить до категорії легких робіт. У таблиці 4.1 наведені оптимальні параметри мікроклімату в приміщеннях, де виконуються роботи операторського типу [20].

Таблиця 4.1 – Параметри мікроклімату для приміщень з ПК

Період року	Параметр мікроклімату	Величина
Холодний	Температура повітря в приміщенні; відносна вологість; швидкість руху повітря	від 22 °С до 24 °С; від 40% до 60 %; до 0,1 м/с
Теплий	Температура повітря в приміщенні; відносна вологість; швидкість руху повітря	від 23 °С до 25 °С; від 40 % до 60 %; від 0,1 м/с до 0,2 м/с

Виміряні за допомогою приладів температура та вологість у лабораторії відповідають вказаним у таблиці для теплого періоду року. Слід зазначити, що для нормалізації параметрів мікроклімату слід використовувати у приміщеннях кондиціонування повітря, або забезпечити подачу свіжого повітря системами вентиляції.

Лабораторія, де виконується робота, має наступні характеристики:

- площа приміщення – 48 м² (8 м × 6 м);
- висота – 3,5 м;
- кількість робочих місць – 6 шт.;
- обладнання – стіл з ПК і периферією – 6 шт.

Приміщення, відповідно до ДНАОП 0.00-1.31-99, має забезпечувати 6 м² площі та 20 м³ об'єму на одне окреме робоче місце з ПК [20]. Площа приміщення 48 м² та об'єм 168 м³, на кожне робоче місце приходиться 8 м² площі і об'єм 28 м³, тобто вимога виконана.

Приміщення з ПК повинні мати природне та штучне освітлення відповідно до ДБН В.25-28-2006 «Природне і штучне освітлення». Природне світло повинно проникати через бічні світлові прорізи, зорієнтовані, як правило, на північ або північний схід, і забезпечувати коефіцієнт природної освітленості (КПО) не нижче 1.5 %.

Рівень загального штучного освітлення приміщення можна перевірити за допомогою методу питомої потужності, викладеної в [20].

Обчислювальна формула методу:

$$W = \frac{W_{\Sigma}}{S}, \quad (4.1)$$

де W – питома потужність, Вт/м²;

S – площа приміщення, м²;

W_{Σ} – загальна потужність освітлювальної установки Вт, яка розраховується за формулою:

$$W_{\Sigma} = W_{cs} \cdot n_{cs}, \quad (4.2)$$

де W_{cs} – потужність одного світильника, Вт;

n_{cs} – кількість світильників у приміщенні.

$$W_{\Sigma} = 100 \cdot 4 = 400 \text{ Вт}, \quad (4.3)$$

$$W = \frac{400}{48} = 8,33 \text{ Вт/м}^2. \quad (4.4)$$

Питомої потужності 8.33 Вт/м^2 за таблицею Б.3 із [20] відповідає освітленість в 250 лк при мінімальній допустимій освітленості 300 лк.

Отже, для створення сприятливих зорових умов у лабораторії необхідно збільшити кількість світильників або замінити лампи в світильниках на більш потужні.

4.4 Пожежна безпека приміщення

Пожежна безпека – стан об'єкта, при якому виключається можливість пожежі, а у випадку її виникнення запобігає впливу на людей небезпечних чинників пожежі й забезпечується захист матеріальних цінностей.

Пожежна безпека забезпечується системою запобігання пожежі й системою пожежного захисту. У всіх службових приміщеннях обов'язково повинен бути «План евакуації людей при пожежі», що регламентує дії персоналу у випадку виникнення вогнища загоряння, що й указує місця розташування пожежної техніки.

Горючими компонентами у виробничому приміщенні є: перегородки, двері, підлоги, ізоляція кабелів і ін.

Протипожежний захист – це комплекс організаційних і технічних заходів, спрямованих на забезпечення безпеки людей, на запобігання пожежі, обмеження його поширення, а також на створення умов для успішного гасіння пожежі.

Джерелами запалювання у виробничому приміщенні можуть бути електронні схеми від ПК, прилади, застосовувані для технічного обслуговування, пристрою електроживлення, кондиціонування повітря, де в результаті різних порушень утворюються перегріті елементи, електричні іскри й дуги, здатні викликати загоряння горючих матеріалів.

У сучасних ПК дуже висока щільність розміщення елементів електронних схем. У безпосередній близькості один від одного розташовуються сполучні проведення, кабелі. При протіканні по них електричного струму виділяється значна кількість теплоти. При цьому можливо оплавлення ізоляції. Для відводу

надлишкової теплоти від ПК служать системи вентиляції й кондиціювання повітря. При постійній дії ці системи являють собою додаткову пожежну небезпеку.

Енергопостачання виробничого приміщення здійснюється за допомогою трансформаторної станції та за допомогою двигун-генераторних агрегатів. На трансформаторних підстанціях особливу небезпеку представляють трансформатори з масляним охолодженням. Зважаючи на це перевагу слід віддавати сухим трансформаторам.

ВИСНОВКИ

В даному розділі були проаналізовані сфери застосування фотополімерного 3D-друку, розглянуті технології SLA, DLP та LCD, їх переваги та недоліки. Зокрема були розглянуті види фотополімерних смол та їх особовості.

За результатами аналізу можливо виділити наступне, що збереження геометричних розмірів моделі при друці на сам перед залежить не тільки від обраної технології друку, а значною мірою від матеріалу для друку (фотополімер).

Основними характеристиками фотополімеру, які впливають на точність виготовлення деталі при 3D-друці є:

- час експонування шару (час дії УФ-випромінювання на фотополімер), с;
- товщина шару, мкм;
- довжина хвилі полімеризації, нм;
- інтенсивність випромінювання, Лм;
- коефіцієнт усадки фотополімеру, %.

Для кожного фотополімеру ці значення різні, тому дослідження впливу цих параметрів на модель, є актуальною задачею.

В дугому розділі був розглянуто макет для проведення досліджень Anycubic Photon Mono 4K. Розглянуті його характеристика та особливості. Була описана кінематика та принцип дії даного верстата з ЧПУ (числове програмне управління).

Особлива увага була приділена до його електронній складовій, бо в залежності від роздільної здатності LCD матриці, кількості пікселів та типу джерела УФ-випромінювання, можуть безпосередньо вплив на відхилення геометричних розмірів моделі при друці.

За результатами аналізу можливо виділити наступне, що даний фотополімерний 3D-принтер Anycubic Photon Mono 4K, підходить для

проведення досліджень за рахунок:

- високої роздільної здатності;
- можливості регулювати інтенсивність випромінювання;
- довжині хвилі встановленому на ньому УФ-матриці, 405 нм.

В результаті виконання третього розділу було виконано наступні задачі:

- визначено основні фактори, що впливають на температуру під час друку;
- визначено основні елементи моделі для подальшої її моделювання у ПЗ

MatLab;

- виконано моделювання зміни температури в процесі друку у ПЗ MatLab;
- розроблено модель управління кроковим двигуном фотополімерного 3D

принтера за допомогою ПД регулятора.

Також були розглянуті питання щодо охорони праці.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ 3008-15. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. структура та правила оформлення. Введ. 2015-06-22. К. Держстандарт України, 2017. 29 с.
2. Методичні вказівки з підготовки та захисту кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка, освітньо-професійних програм: «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» /Упоряд. І. Ш. Невлюдов, Р. В. Артюх, В. В. Безкоровайний, Н. П. Демська, В.В.Євсєєв, О. І. Филипенко, О. М. Цимбал. Харків: ХНУРЕ, 2023. 49 с.
3. I.Sh. Nevliudov, V.M. Borshchov, I.T. Tymchuk, M.A. Protsenko, N.P. Demska / Novitni konstruktyvno-tekhnologichni rishennia nadlehykhdetektornykh moduliv dlia fizychnykh eksperymentiv // Innovative technologies and scientific solutions for industries. 2018. No. 5 (3). – S. 67-78
4. Alfred Jacobsen, Trond Jorgensen, Øyvind Tafjord, and Endre Kirkhorn "Concepts for 3D print productivity systems with advanced DLP photoheads", Proc. SPIE 9376, Emerging Digital Micromirror Device Based Systems and Applications VII, 937605
5. 3D printing. A Practical Guide / Redwood Ben, Garrat Brian, Chauffeur Philemon. – М.: DMK-Press, 2020. – 220 p.
6. Ian Gibson, David Rosen, Brent Stucke (2015) Additive Manufacturing Technologies 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. Springer New York Heidelberg Dordrecht London. ISBN 978-1-4939-2112-6 ISBN 978-1-4939-2113-3 (eBook). DOI 10.1007/978-1-4939-2113-3.
7. Manapat J, Chen Q, Ye P, Advincula R (2017) 3D printing of polymer nanocomposites via stereolithography. Macromol Mater Eng 302: 1600553
8. DLP (Digital Light Processing) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.jetcom-3d.ua/technology/digital-light-processing/>

9. Alfred Jacobsen, Trond Jorgensen, Qyvind Tafjord, and Endre Kirkhorn "Concepts for 3D print productivity systems with advanced DLP photoheads", Proc. SPIE 9376, Emerging Digital Micromirror Device Based Systems and Applications VII, 937605.

10. Modern photopolymer printers 3D printers: laser, DLP, LCD [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://3dtoday.ua/blogs/pl32/modern-photopolymer-3d-printersprinters-laser-dlp-lcd>

11. Anycubic 405nm UV [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://3dreams.com.ua/product/фотополимерная-смола-anycubic-405nm-uv-resin/>

12. Plexiwire Resin Basic Orange Transparen LCD [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://shop.plexiwire.com.ua/ru/basic-resin/resin-orange-transparent-500/>

13. Mono Filament tBasic [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://monofilament.com.ua/ua/products/fotopolimernie-smoli-dlya-3d-printera/resin-basic/>

14. FunToDo [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.funtodo.net>

15. Wanhao Castable [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://wanhao.store/products/wanhao-castable-resin-for-jewelry-green-color-1000ml-bottle>

16. BlueCast CR3A [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.uvelirmag.com/3d-printery-i-polimery/bluecast-cr3a-for-lcddlp-3dp/>

17. Elegoo 3D [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.elegoo.com/collections/resin>

18. Weitek [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.amazon.com/Standard-UV-Curing-Precision-Photopolymer-Printing/dp/B08L6P5PNK>

19. Tevo [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://3ddevice.com.ua/product/smola-dlia-3d-printera-nextdent-base/>

20. FunToDo CB [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

<https://3dprinter.ua/shop/funtodo-cb-resin-dlp/>

21. MakerJuiceWaxCast [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://3ddevice.com.ua/product/fotopolimer-makerjuice-waxcast/>

22. Anycubic Dental (Skin) Non – Castable [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://prom.ua/p1439969120-stomatologicheskaya-zuboproteznaaya-modelnaya>

23. Anycubic 405nm UV resin, ECO [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://3dreams.com.ua/product/-anycubic-uv-resin/>

24. Anycubic Photon Mono 4K [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.anycubic.com/products/photon-mono-4k>

25. Різбовий вал T8*2мм [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://uareprap.store/T8-2mm?_route_=T8-2mm

26. Лінійна рельсова на прямна MGN12 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://3ddevice.com.ua/product/lineinaya-napravliayushaia-mgn12/>

27. Кроковий двигун 17HS3430 1.2 A 0.28 N. М [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://cnc.prom.ua/ua/p442128379-shagovuj-dvigatel-17hs3430.html>

28. Материнська плата Anycubic Photon Mono V0.05 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://3dreams.com.ua/product/-anycubic-photon-mono/>

29. LCD матриця Anycubic Photon Mono 4K [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://violadent.com/cifrovaya-stomatologiya/zapchasti-i-aksessuary-dlya-3d-printerov/623-dyujma-4k-lcd-dlya-photon-mono-4k/>

30. Світлодіодна матриця ParaLED [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://pro3d.com.ua/p1005708062-svitlodiodna-matritsya-dlya.html>

31. Сенсорний дисплей MKS TFT24 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://3dprinter.ua/shop/sensornyj-displej-mks-tft24/>

32. SPSS Statis for Dumlmies, 4th Edition /by Jesus Salcedo and Keith McCormick.[Book]. Published by: John&Sons.Inc. 2020. P. 444.

33. Statistical Methods in Psychiatry Research and SPSS. 2ndEdition./ByM. Venkataswamy Reddy. [Book]. Apple Academic Press. 2019. P.442.

<https://doi.org/10.1201/9780429023309>

34. Комплекс навчально-методичного забезпечення навчальної дисципліни «Організація керування умовами праці» підготовки освітнього рівня бакалавр усіх спеціальностей та усіх напрямів університету [Електронний ресурс] / ХНУРЕ; розроб.: Т.Є. Стиценко, Г. В. Пронюк, Н. М. Сердюк. – Харків, 2017. – 108 с.