

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій  
(повна назва)  
Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки  
(повна назва)

## АТЕСТАЦІЙНА РОБОТА

### Пояснювальна записка

другий (магістерський)

(рівень вищої освіти)

ОПТИМІЗАЦІЯ ВПЛИВУ ЕЛЕКТРОННИХ КОМПОНЕНТІВ ТА  
ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НА ЯКІСНІ ПОКАЗНИКИ ДРУКУ

Виконав: студент 2 курсу, гр. ІТМРТм-19-1  
Стрілець Роман Євгенійович  
(прізвище, ініціали)

Спеціальність  
172 Телекомунікації та радіотехніка  
освітньої програми Інтелектуальні технології  
мікросистемної радіоелектронної техніки  
(код і повна назва напрямку)

Тип програми Освітньо-професійна  
(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. Разумов-Фризюк Є.А.  
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту  
зав. кафедри

(підпис)

Невлюдов І.Ш.

(прізвище, ініціали)

2020 р.

## Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет	Автоматики і комп'ютеризованих технологій
Кафедра	Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки
Рівень вищої освіти	другий (магістерський)
Спеціальність	172 Телекомунікації та радіотехніка
Тип програми	освітньо-професійна
Освітня програма	Інтелектуальні технології мікросистемної радіоелектронної техніки (код і повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_

(підпис)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 р.

## ЗАВДАННЯ НА АТЕСТАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові \_\_\_\_\_ Стрільцю Роману Євгенійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Оптимізації впливу електронних компонентів та програмного забезпечення на якісні показники друку

затверджена наказом по університету від \_\_\_\_\_ 02.11. 2020 р. № \_\_\_\_\_ Ст \_\_\_\_\_

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії \_\_\_\_\_ 22.11. 2020 р.

3. Вихідні дані до роботи Напруга живлення 220 В, 50 Гц, потужність, що споживається 360 Вт

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі:

4.1 Аналіз предметної області

4.2 Аналіз електронних та програмних компонентів для модернізації макету 3D-принтера

4.3 Розробка 3D-моделі принтера та розробка макету згідно моделі

4.4 Аналіз факторів що впливають на показники якості друку

4.5 Експериментальні дослідження

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) Демонстраційний матеріал представлений у форматі презентації PowerPoint (\*.ppt) – 23с. формату А4

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1 )

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

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз предметної області	07.09 – 14.09	виконано
2	Аналіз електронних та програмних компонентів для модернізації макету	15.09 – 05.10	виконано
3	3D-принтера	06.10 – 18.10	виконано
4	Аналіз факторів що впливають на показники якості друку	19.10 – 31.10	виконано
5	Проведення експериментальних досліджень	01.11 – 17.11	виконано
6	Оформлення пояснювальної записки	18.11 – 20.11	виконано
7	Подання у ЕК	20.11	виконано

Дата видачі завдання 03.11.2020 р

Студент

Керівник роботи

03.11.2020 р

(підпис)

(підпис)

Стрілець Р.Є.

( прізвище, ініціали)  
доц. Разумов-Фризюк С.А

(посада, прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка передатестаційної роботи містить в своєму складі: 123 с., 6 табл., 140 рис., 2 дод., 14 джерел.

RASPBERRY, DLP, МАКЕТ 3D-ПРИНТЕРА, ФОТОПОЛІМЕРИ, LCD, МОДЕЛЮВАННЯ, 3D-ДРУК, СТЕРЕОЛІТОГРАФІЯ, УЛЬТРАФІОЛЕТ.

Актуальність теми – фотополімерний друк дає поштовх для реалізації різноманітних малосерійних проектів для непромислових користувачів. Це має значний вплив на популяризацію науки, виготовлення макетів, деталей та пристроїв з достатньо низькою собівартістю.

Мета роботи – оптимізація якості LCD/DLP 3D друку шляхом вдосконалення систем керування та виконавчої системи 3D-принтера та аналізу параметрів друку.

Методи дослідження – в якості методів дослідження використовувалися змішані методи, що включають в себе емпіричний метод, зокрема використовувалися експериментальні дослідження, зрівняння та виміри також використовується регресійний аналіз.

Із теоретичного методу використовувалися аналіз, уявне модулювання, індукція та дедукція. Зокрема використовувалося моделювання теплового аналізу радіатора.

На основі результатів виконаних досліджень розроблено макет фотополімерного 3D-принтера.

## ABSTRACT

Explanatory note pre-certification work contains in it`s composition: 123 page, 6 table applications, 140 drawings, 2 additions, 14 sources.

RASPBERRY, DLP, MODEL OF 3D-PRINTER, FOTOPOLYMER, LCD, MODELING, 3D-PRITING, STEREO LITHOGRAPHY, ULTRAVIOLET.

Relevance of the topic – photopolymer printing gives impetus to the implementation of various single projects for non-industrial users. This has a significant impact on the promotion of science, the manufacture of models, parts and devices at low cost.

The purpose of the work is to optimize the quality of LCD / DLP 3D printing by improving the control systems and the executive system of the 3D-printer and the analysis of printing parameters.

Research methods-mixed research methods including empirical method were used as research methods, in particular experimental researches, comparisons and measurements were used. Regression analysis is also used.

Analysis, imaginary modulation, induction and deduction were used from the theoretical method. In particular, modeling of thermal analysis of the radiator was used.

Based on the results of the performed researches the model of the photopolymer 3D-printer is developed.

## ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень і термінів.....	8
Вступ.....	9
1 Аналіз предметної області .....	11
1.1 Огляд і аналіз технології 3D-друку фотополімерами .....	11
1.2 Порівняльний аналіз будови 3D-принтерів по технології LCD.....	16
1.3 Аналіз технічного завдання .....	26
1.4 Висновки до першого розділу .....	27
2 Аналіз електронних та програмних компонентів для модернізації макету 3D-принтера .....	28
2.1 Аналіз вимог згідно характеристикам аналогічних конструкцій ....	28
2.2 Аналіз та вибір електронних компонентів 3D-принтера .....	34
2.3 Висновки до другого розділу .....	55
3 Розробка 3D-моделі принтера та зборка макету згідно моделі.....	56
3.1 Обґрунтування вибору середовища моделювання .....	56
3.2 Використання в моделюванні принтеру готових моделей .....	57
3.3 Розробка власних моделей для 3D-принтера .....	60
3.4 Виготовлення діючого прототипу .....	63
3.5 Порівняльний аналіз результатів вдосконалення .....	74
3.6 Проведення теплового аналізу радіатора світлодіодної матриці.....	76
3.7 Висновки до третього розділу .....	80
4 Аналіз факторів що впливають на показники якості друку .....	81
4.1 Аналіз факторів, що впливають на якісні показники друку.....	81
4.2 Параметри друку для дослідження .....	82
4.3 Вплив часу експонування на модель .....	83
4.4 Вплив кількості базових шарів на кінцеву якість моделі .....	86
4.5 Вплив функції перемішування на якість друку .....	86
4.6 Функція віддзеркалення .....	87
4.7 Використання функції Anti-Aliasing .....	88
4.8 Аналіз впливу калібрування платформи на друк .....	89

4.9 Аналіз використання вбудованої функції підйому робочої платформи після закінчення друку.....	91
4.10 Аналіз необхідності використання паузи друку і вплив на модель .....	91
4.11 Аналіз необхідності використання перфорованої платформи для друку моделей.....	92
4.12 Аналіз впливу фотополімеру на кінцеву якість.....	93
4.13 Аналіз впливу FEP-плівки на друк моделі .....	95
4.14 Висновок до четвертого розділу.....	96
5 Експериментальні дослідження.....	97
5.1 Постановка задачі експериментальних досліджень .....	97
5.2 Багатофакторний регресійний аналіз.....	100
5.3 Висновки п'ятого розділу.....	111
6 Охорона праці.....	112
Висновки .....	114
Перелік джерел посилань .....	116
Додаток А Результати експериментальних досліджень та розробка математичної моделі проведеного дослідження.....	118
Додаток Б Демонстраційний матеріал у вигляді презентації.....	122

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ**

ПЗ – Програмний засіб;

AC – Alternating current;

DC – Direct current;

DLP – Цифрова світлодіодна проекція;

GPIO – General – purpose input/output;

HDMI – High – Definition Multimedia Interface;

SLA – Stereolithography;

LCD – Liquid crystal display;

PWM – Pulse-width modulation;

RAMPS – RepRap Arduino Mega Pololu Shield;

USB – Universal Serial Bus;

3D – 3 Dimensions.

## ВСТУП

Сьогодні людство стало на той рівень, що дає можливість використовувати високі технології не тільки в закритих лабораторіях, з багатомільйонними бюджетами але й дома. Кожна людина має доступ к технологіям та знанням, тому виникає розвиток малих проектів з малим обігом коштів. Тому є необхідність приладів, що будуть виготовляти макети в невеликій кількості, але з високою якістю та малою ціною.

Одним з таких найбільш популярних приладів для виготовлення компонентів, деталей та макетів з пластику є 3D-принтери. Існує велика кількість технологій 3D друку, але найбільш поширені з них будують моделі шляхом нагрівання та екструзії пластику на платформу, або шляхом впливу на фотополімер ультрафіолетом. Можливість друку 3D-принтерів не обмежується розмірами, самий більший принтер, що є на даний час, може друкувати моделі розміром до 4 метрів.

Різноманіття пластиків також є досить велика. Пластики можуть бути як технічними, так і декоративними.

Одним з відгалуджень технологій 3D-друку є фотополімерний друк. Особливість технології є використання фотополімеру, що полімеризується під дією ультрафіолету. Використання фотополімера з передовими системами переміщення дають в результаті моделі, що по осям ХУ, мають найменшу точку променю лазера в 30 мікрон, що відповідає одному пікселю на екрані, на яку виводиться зображення всього слою моделі. По осі Z, модель може ділитися на шар, товщиною від 10 мкм, що повністю залежить від механіки. На даний момент такі принтери використовуються для друку майстер-моделей.

Таким чином метою магістерської випускної атестаційної роботи є знаходження параметрів та чинників, що впливають на кінцеву якість надрукованої моделі за технологією 3D-друку фотополімерною смолою.

Об'єкт дослідження – технологія фотополімерного друку.

Предмет дослідження – якісні показники друку фотополімерного 3D-принтера.

Методи дослідження – експеримент, спостереження, аналіз, індукція, дедукція, математичний аналіз.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати необхідні умови для нашарування моделі;
- визначити частку впливу на вихідну якість кожного фактору;
- розробити 3D-модель конструкції фотополімерного 3D-принтера;
- виконати аналіз впливу температури на конструкцію принтера та фотополімерну смолу.

Атестаційна робота виконана згідно ДСТУ 3008 – 15 [1] та керуючись навчальним посібником з дипломного проекту [2], методичними вказівками [3] та публікаціями, що були надруковані в збірниках студентських наукових статей «Автоматизація та приладобудування» ADED – 2018 (випуск 2)[електронне видання] [4], ADED – 2019 (випуск 2)[електронне видання] [5], ADED – 2020 (випуск 1)[електронне видання] [6] та попередньою атестаційною роботою на рівень бакалавра.

# 1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

## 1.1 Огляд і аналіз технології 3D-друку фотополімерами

Використання адитивних технологій побудови 3D-моделей на сьогодні дає більш широкий спектр можливостей ніж інші технології формоутворення. Більш високу якість, швидкість та можливості побудови моделей. Це все можливо використовувати лише з принтерами, що побудовані по всім стандартам та з використанням новітніх технологій. Щоб проаналізувати стандарти побудови принтерів потрібно визначити критерії якості побудованих моделей та залежності від складових принтера та його налаштування.

На сьогодні розповсюджені 3 підтипи технології адитивного фотополімерного 3D-прототипування:

– SLA технологія – технологія лазерної стереолітографії, з використанням лазера, що послідовно проходить побудований шлях слою в рідкому фотополімері (рис. 1.1). Точність друку залежить від плями лазерного променя, в середньому пляма має розміри від 50 мкм до 200 мкм. Пляма може відрізнятись в залежності від типу лазера та системи фокусування. Ще одним необхідним моментом у використанні лазерної стереолітографії є наявність дзеркала, що відбиває промінь безпосередньо на робочу область, тому вони потребують точного налаштування та калібрування.

Перевага такої технології в тому, що є можливість побудови моделей великих розмірів, велика точність, можливість побудови моделей будь-якої форми та конструкції, низький процент втрат зайвого матеріалу, низький шум роботи.

Недоліками є використання фотополімеру, що є дорожче ніж інші матеріали, висока вартість самого принтера, необхідність забезпечення високого класу точності при побудові принтера, що забезпечить правильний кут виставлення дзеркала, необхідність точної механіки, що забезпечить знаходження ванни на рівні одного слою від поверхні до платформи, необхідність частого обслуговування принтера;

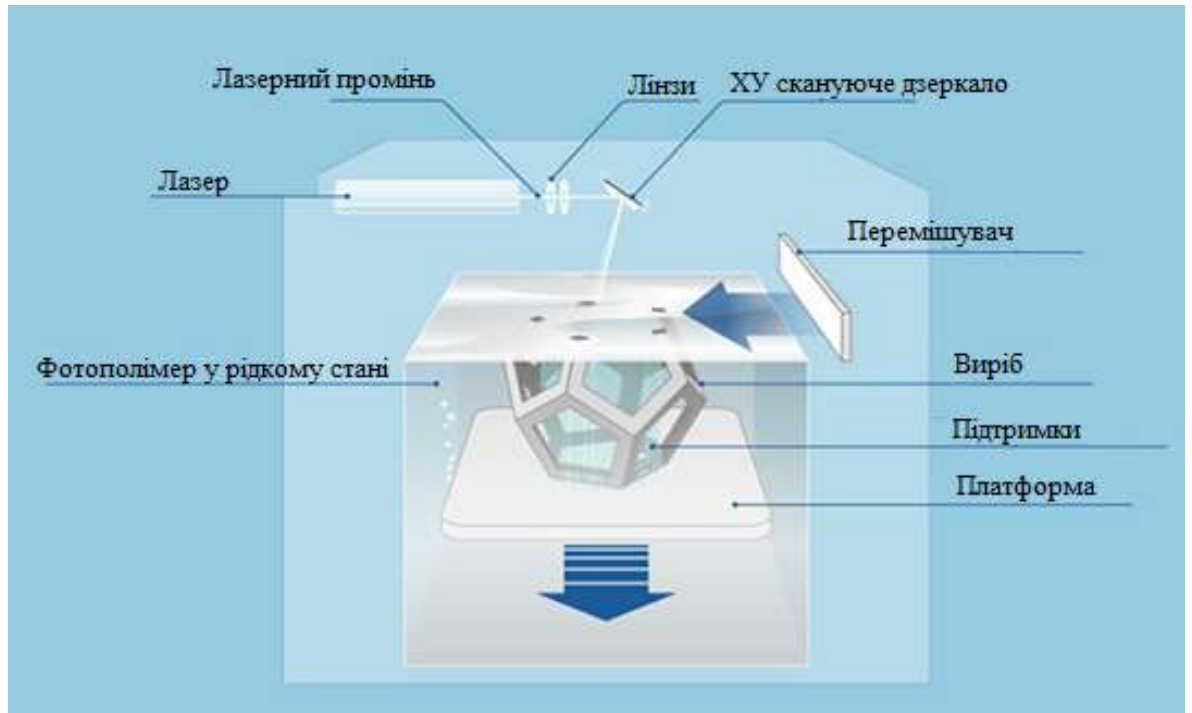


Рисунок 1.1 – Принцип роботи технології SLA

– DLP технологія – технологія що в своєму складі використовує проєктори для експонування фотополімеру. Дана технологія, крім використання проєктора відрізняється від SLA тим, що має інший спосіб побудови принтера (рис. 1.2), може будуватися по системі від низу-вгору та навпаки згори- вниз.

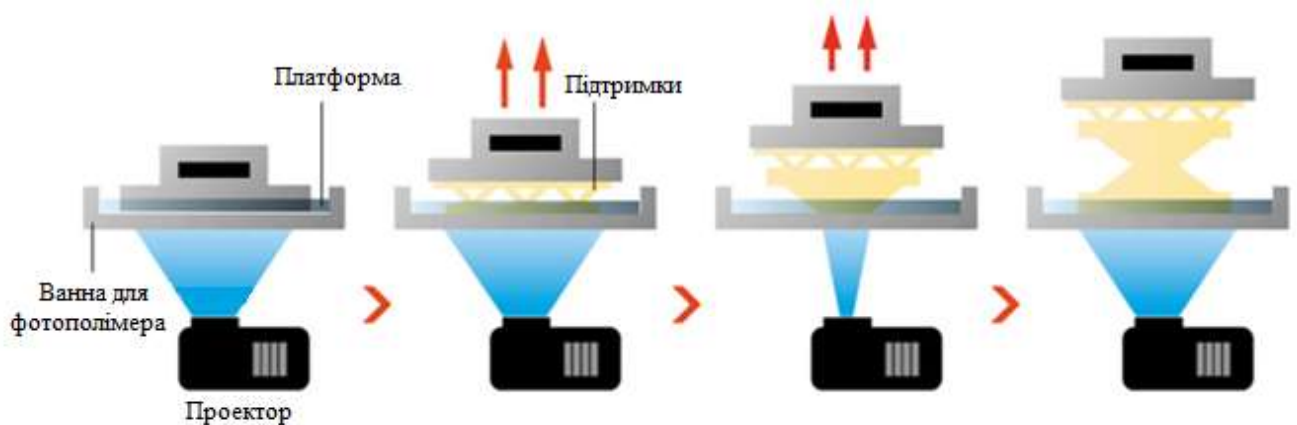


Рисунок 1.2 – Принцип роботи технології DLP

Система згори-вниз показана на рис. 1.1. Вона характерна для принтерів по технології SLA.

В своєму складі має плату управління механікою (рис. 1.3), що включає драйвер крокового двигуна, систему перемішування, проектор що відображує зображення та одночасно засвітлює фотополімер, персональний комп'ютер зі встановленим ПЗ, що виконує управління проектором та платою управління.

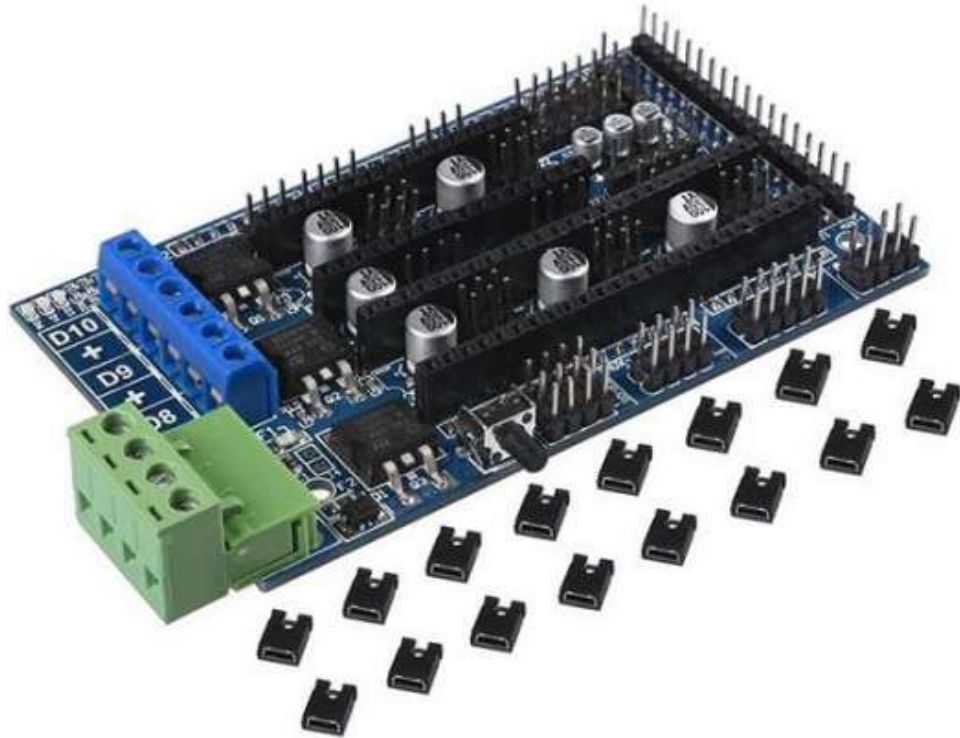


Рисунок 1.3 – Плата управління RAMPS 1.5

Розмір робочої зони залежить від проектора, від його мінімальної проекційної відстані на якій, зображення має найменший розмір пікселя. Точність принтера залежить від роздільної здатності та розміру робочої зони. Може будуватися з використанням дзеркала, що буде відбивати зображення на платформу з полімером.

Недоліком даної технології є залежність від проектора, що встановлює робочу зону, та точність по осі ХУ. 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 зона за рахунок 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 проєктора;

– LCD технологія – технологія подібна до технології DLP, але в своєму складі має LCD екран, що відображує шар моделі та світлодіод, що засвітлює фотополімер (рис. 1.4). Будує моделі лише знизу-вгору, екран знаходиться безпосередньо під ванною з фотополімером. Екран відображує весь шар моделі, відкриваючи світлі області – пікселі, через які проходить ультрафіолетове випромінювання, та засвітлює фотополімер.

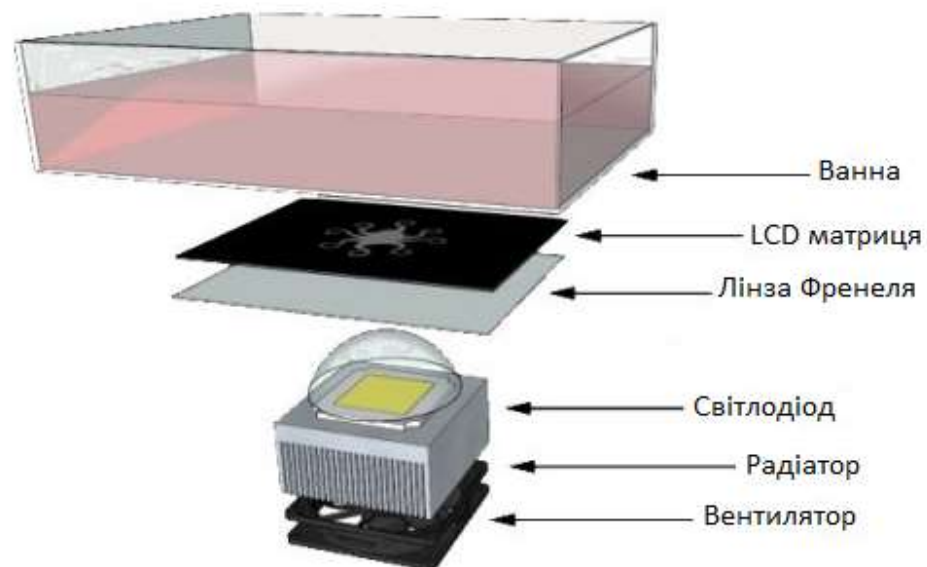


Рисунок 1.4 – Принцип роботи технології LCD

Особливістю використання екранів є те, що в екранах, що складаються з декількох шарів та підсвітці, видаляється підсвітка та майже всі шари, крім шару, на який виводиться зображення, це дає можливість найбільшого пропускання ультрафіолету (рис. 1.5). Екрани відрізняються розмірами та типом. Екрани можуть бути з роздільною здатністю 2К, 4К, 8К. Також вони діляться на стандартні розміри: 6, 8.9, 10.1 дюймів. Можуть також бути монохромними або цвітними. Монохромні порівняно з цвітними мають більшу пропускну здатність для ультрафіолету (в 4 рази), що значно прискорює швидкість нашарування моделі. В залежності від екрана змінюється робоче поле принтера.

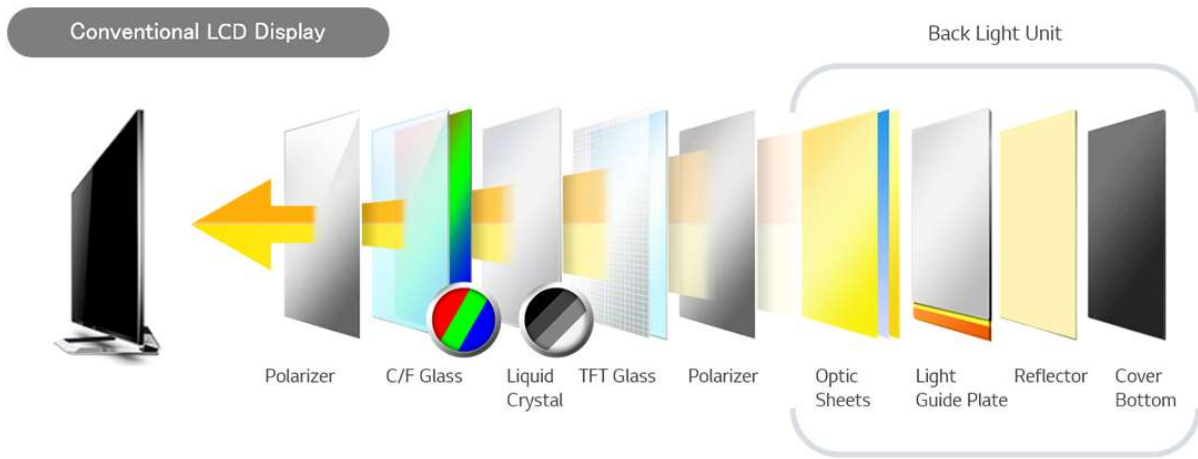


Рисунок 1.5 – Склад екранів LCD

Якщо в принтері використовується шести дюймовий монохромний екран з розширенням 4К, вихідна точність по осям ХУ буде дорівнювати 33 мікрона при швидкості друку від 50 мм за годину. 33 мікрона в даному випадку – це розмір одного пікселя на екрані.

Принтер складається з екрану, плати, що виводить зображення безпосередньо на екран, плату управління механікою, світлодіодну матрицю, кінцеві вимикачі, кроковий двигун, DC-DC перетворювач для живлення світлодіода та блок живлення AC-DC.

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

Перевагами даної технології є невелика вартість, простота обслуговування та широкі можливості до модернізації. Порівняно з технологією DLP, є відсутність спотворення зображення, що відображається на робочій області.

В результаті зрівняння можливо зробити висновок, що ці три різновиди технології (рис. 1.6) 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.

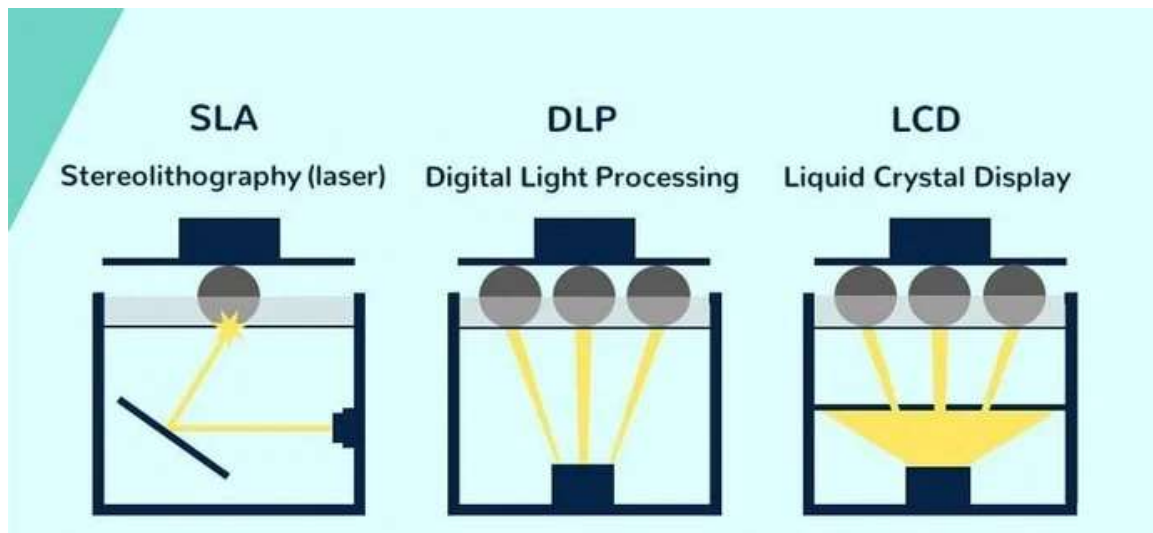


Рисунок 1.6 – Порівняння побудови технологій стереолітографії

## 1.2 Порівняльний аналіз будови 3D-принтерів по технології LCD

На сьогодні 3D-принтерів є дуже багато і вони в залежності від цінового сегменту можуть кардинально відрізнятися. Різниця може бути в побудові корпусу, у використанні механіки, у побудові електроніки, у способі управління тощо. Деякі моменти в більшості принтерів може повторюватися, за рахунок низької наявності нових технологій. Прикладом можуть слугувати екрани, яких є лише декілька видів, таких як Sharp LCD LS055R1SX04. Цей екран має роздільну здатність 1440×2560. Він встановлюється в таких принтерах як Wanhao Duplicator 8, Anycubic Photon, Creality 3D та ін.

Anycubic Photon Zero [7] (рис. 1.7), розроблений компанією Anycubic, відрізняється від інших принтерів за фотополімерною технологією тим, що при розширенні друку по осям ХУ роздільна здатність екрану 854×480р, відповідно

найменша можлива точка буде відповідати 115.5 мкм. Робоча зона відповідає 97×54×150 мм.

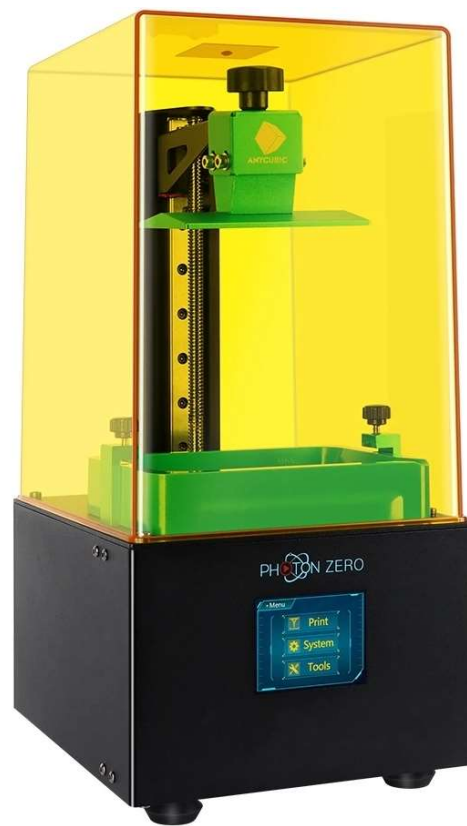


Рисунок 1.7 – Photon Zero

В принтері, для засвітлення використовується схема, що включає в себе світлодіодну матрицю 30 Вт (рис. 1.8) та відбивача світла, що слугує для концентрації випромінювання на екрані без втрат. Недоліком даної схеми є нерівномірність експонування, довгий час полімеризації чорних або високовмістких пігментами полімерів.

Кут розсіювання світла даної схеми складає близько  $60^\circ$ , що неможливо використовувати без спеціальних фокусаторів. Фокусатор будується з використанням дзеркальної поверхні під кутом в  $45^\circ$ , таким чином відбиття відбувається в центральній частині екрана. Для корегування даного недоліка, в ПЗ можливе встановлення, так званої маски, зображення, що має більш темні частки в місцях концентрації випромінювання та більш світлі частки в місцях найменшої кількості випромінювання.

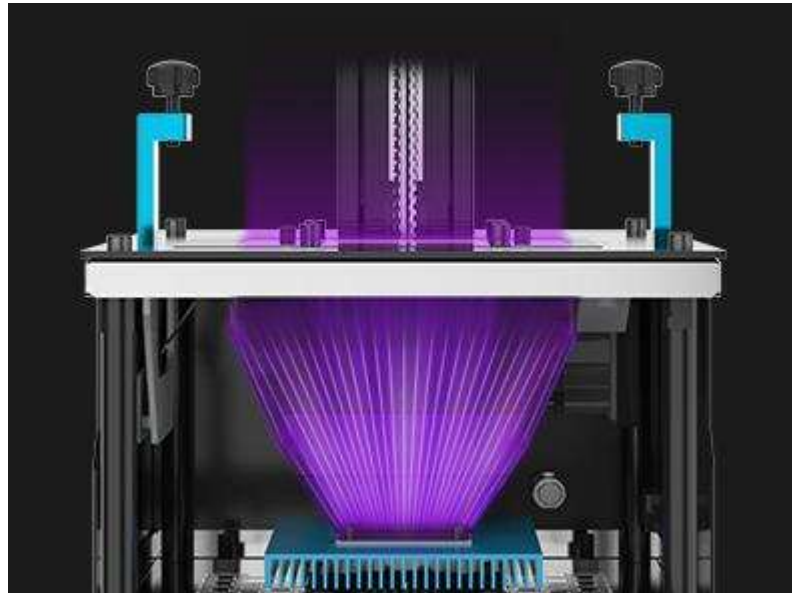


Рисунок 1.8 – Схема засвітлення фотополімеру

Для зменшення виділення тепла світлодіодної матриці використовується примусова вентиляція, дана схема зображена на рис. 1.9.

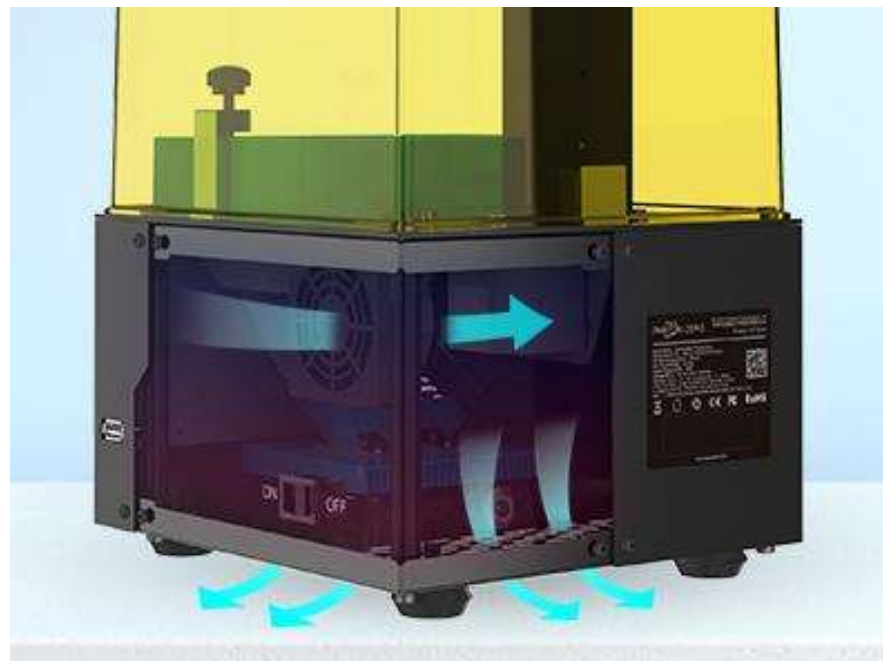


Рисунок 1.9 – Зображення схеми охолодження світлодіодної матриці принтера

Матриця використовується по стандарту даної технології. Так як найбільш розповсюдженими фотополімерами для друку є фотополімери, що полімеризуються під дією ультрафіолету з довжиною хвилі 405 нм.

Ціна – одна з найбільших переваг даного принтера, вона є самою нижчою на ринку порівняно з іншими принтерами по технології LCD. Позиціонується даний принтер як початковий, для можливості знайомства з технологіями адитивного прототипування. Має в конструкції сенсорний екран, зі встановленим інтерфейсом, що є простим для засвоєння, та має лише самі необхідні функції, інші налаштування задаються на персональному комп'ютері зі встановленими офіційними ПЗ.

Результат друку можливо побачити на рис. 1.10, друкована модель відрізняється чітким зображенням пікселей, що виглядають у виді дефектів (лінійної сегментації на пікселі) на моделі.



Рисунок 1.10 – Результат друку на принтері Photon Zero

Має програмне забезпечення, що підтримує встановлення Anti-Antialiasing, принцип роботи якого зображено на рис. 1.11. Він використовує будову екрану, що складається з декількох підпікселей, затемнює не весь піксель а його частку, що дає ефект розмиття чіткої лінії, що може зменшити ефект відображення пікселей на моделі.

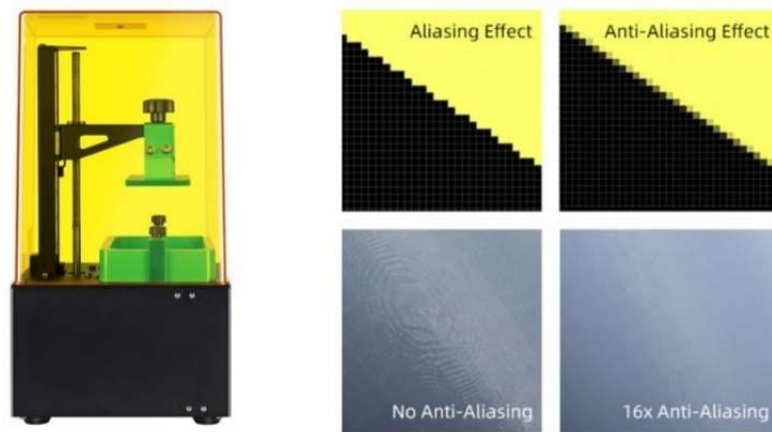


Рисунок 1.11 – Ефект Anti-Aliasing

ПЗ Anicubic Formware 3D [8] (рис. 1.12) – слугує для відображення, редагування, та нарізання моделей на шари для друку. Підтримує встановлення підтримок різних видів до моделі, має підтримку порожніх моделей, для заощадження фотополімеру та встановлення в ці порожнини мікро підтримки, що дадуть змогу їх друкувати.

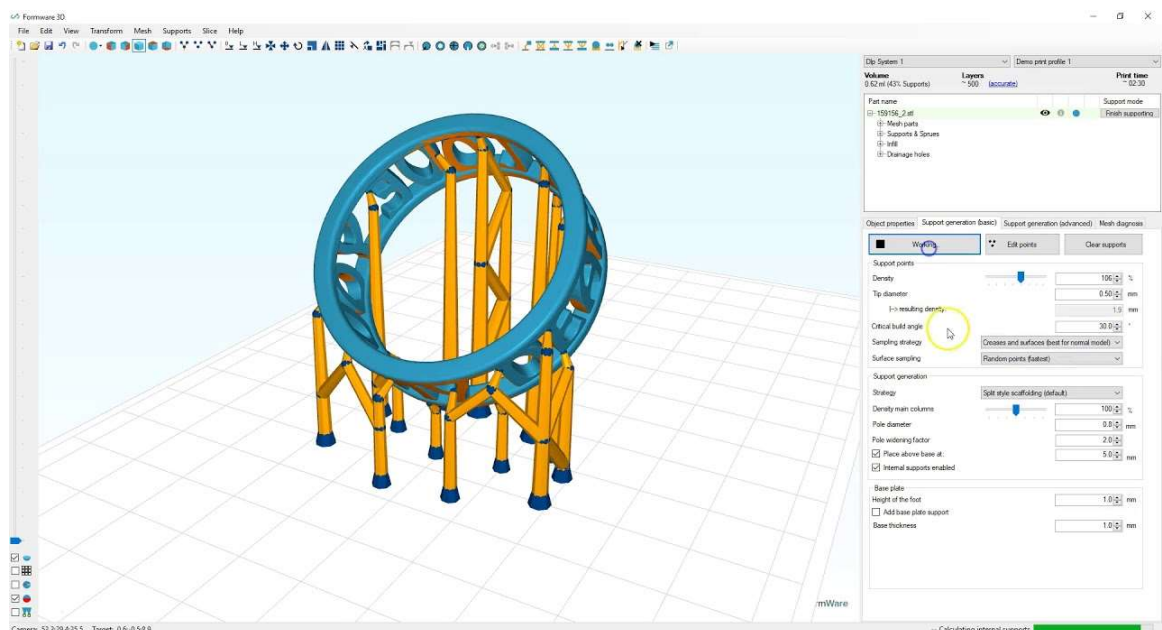


Рисунок 1.12 – Інтерфейс ПЗ Anicubic Formware 3D

Після налаштування та зберігання завдання друку з налаштуваннями, завантажуються на USB зберігач та встановлюється в принтер. Далі через меню екрану вибирається завдання та починається друк моделі.

Photon Mono [9] (рис.1.13) розроблений у 2020 році принтер, що використовує нові технології побудови екрана. Основною особливістю даного принтера є наявність дисплея, що має не кольорові пікселі а монохроматичні, що значно зменшують опір ультрафіолетовому випромінюванню, що дає змогу прискорити друк моделі у чотири рази порівняно з кольоровими екранами.



Рисунок 1.13 – Photon Mono

Розширення друку даного принтера по осям ХУ складає 51 мікрон (рис. 1.14), при області побудови в 130×80×165 мм.



Рисунок 1.14 – Порівняння екранів з різною роздільною здатністю

В якості схеми засвітлення використовується світлодіодна матриця з кварцовими лінзами, що дає майже паралельне випромінювання ультрафіолету з кутом розсіювання менше  $15^\circ$  (рис. 1.15).

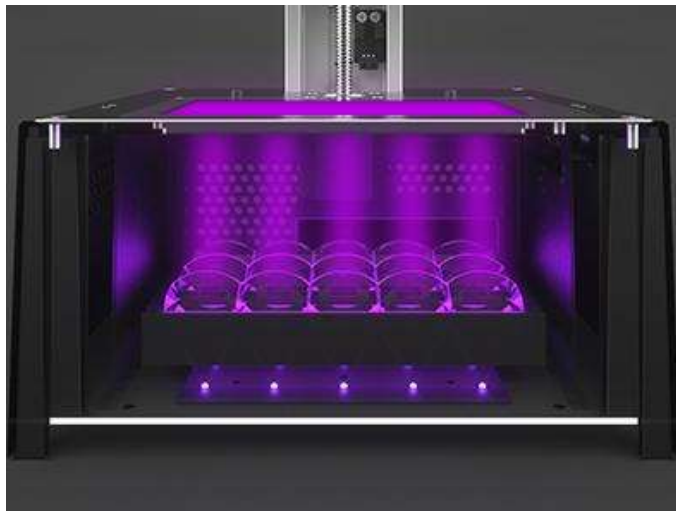


Рисунок 1.15 – Схема засвітлення принтера

Перевагою даного принтера є в швидкості експонування моделі, що досягає 50 мм за годину (рис. 1.16).

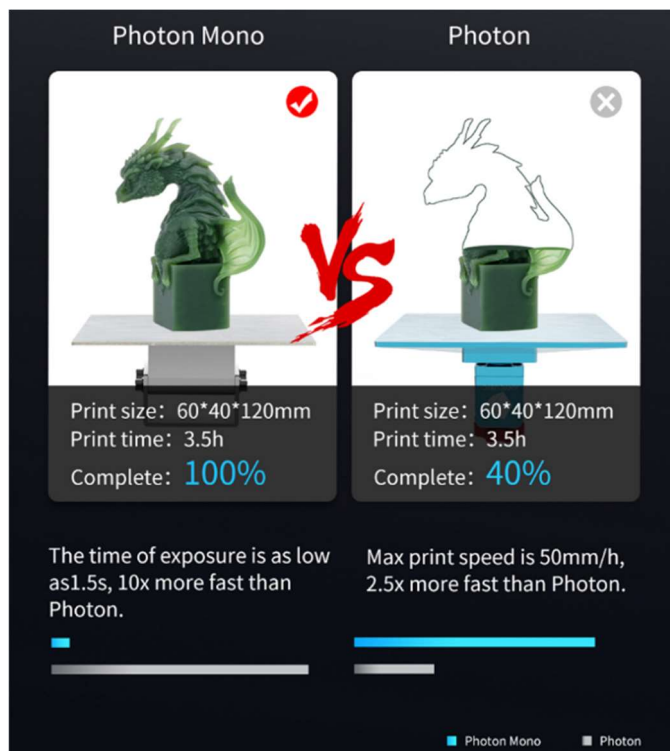


Рисунок 1.16 – Порівняння часу експонування звичайних екранів та монохромних

Phrozen Sonic Mini [10] (рис. 1.17) – принтер, що має малий розмір, високу швидкість друку, за рахунок використання монохромного екрану. Даний принтер має точність по осям ХУ 62 мікрона з роздільною здатністю 1920×1080 пікселів. Розміри робочої зони складають 120×68×130 мм при екрані 5.5"HD.

Схема засвітлення може бути порівняною з Photon Mono, та складається з світлодіодної матриці 405 нм та лінзи. Має вбудований сенсорний екран, через який можливо виконувати управління та друк.

Має версію зі встановленим кольоровим екраном з роздільною здатністю 4К, що дає змогу друкувати моделі з розширенням 35 мікронів по осям ХУ.



Рисунок 1.17 – Зовнішній вигляд принтера Phrozen Sonic Mini

Зображення меню управління можливо побачити на рис. 1.18. Має можливість калібрування осі Z, перевірку екрану, функцію переміщення та друку.



Рисунок 1.18 – Меню управління принтером

Можливо зробити порівняння між принтером Photon та Sonic Mini. Дане порівняння зображене на рис. 1.19.

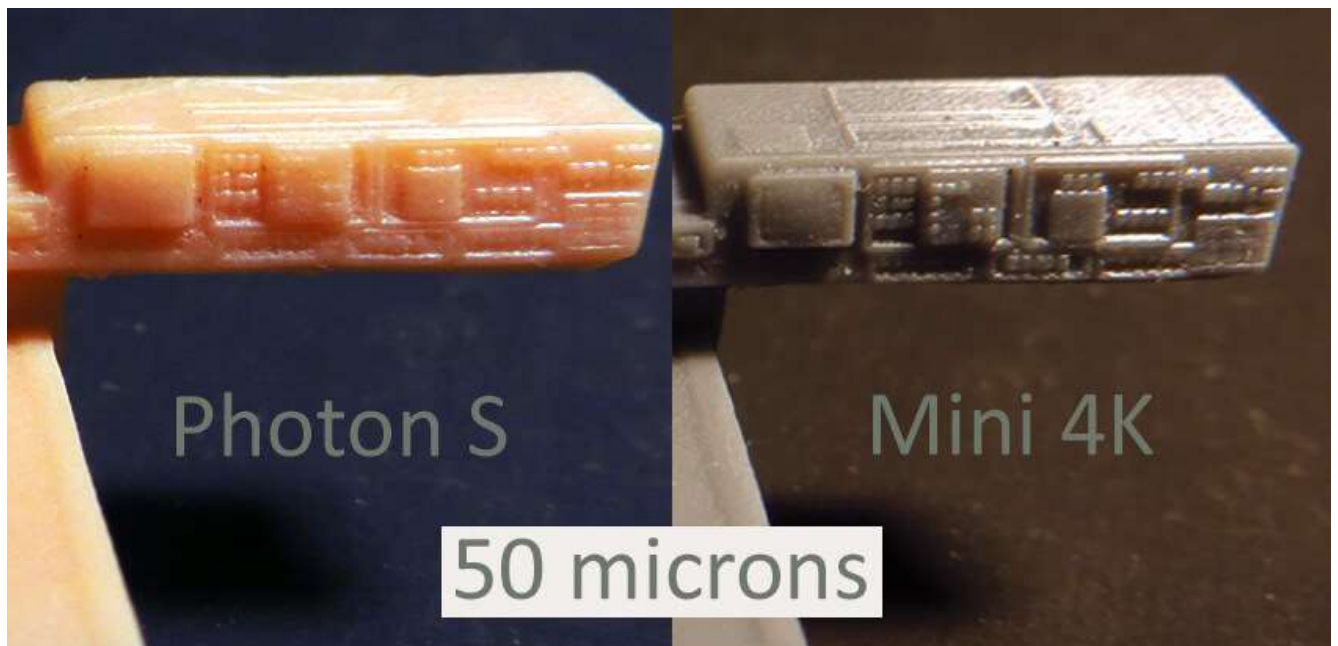


Рисунок 1.19 – Порівняльний друк моделі на 50 мікронах

Longer Orange 30 [11] принтер, що складається зі стандартними складовими конструкції, що включають в себе екран 47 пікселей, світлодіодну матрицю з кварцовими лінзами, звичайною системою механіки з направляючими Hiwin та каретками MGN 15 (рис. 1.20).



Рисунок 1.20 – Зовнішній вигляд Longer Orange 30

Перевагами даного принтера є його можливість друку без зайвих налаштувань. Має вдосконалену систему механіки, що дає стабільність руху та надійність, що допоможе подовжити термін роботи без налаштувань. Робоча платформа має фрезеровану поверхню з кутом нахилу в  $30^\circ$  в одну сторону, що зменшує час та трудові затрати на обслуговуванні принтера та підготовки до друку моделі (рис. 1.21).



Рисунок 1.21 – Зображення платформи для друку встановленій на принтері

Таким чином можливо зробити висновок, що аналоги принтера мають складові, що не відрізняються значною мірою друг від друга та мають взаємозамінні частини. Це також свідчить про те, що на даний момент принтери мають розвиток лише у вдосконаленні екрану, що вже дає змогу зменшити час друку моделі та може мати більшу роздільну здатність друку по осям ХУ в 30 мікрон. Але є потреби у подальшому вдосконаленні конструкції та в зменшенні ціни на комплектуючі принтерів, що зробить принтери доступнішими та більш універсальними до використання.

### 1.3 Аналіз технічного завдання

Технічне завдання на розробку фотополімерного 3D-принтера передбачає вдосконалення раніше розробленого макету принтера з виконанням таких вимог:

- використання для керування встановленого сенсорного екрану;
- мати можливість подальшого вдосконалення;
- принтер повинен мати взаємозамінні частини, та можливість доступу до електроніки макету для здійснення ремонту та вдосконалення;
- система засвітлення повинна бути конкурентною, та швидкість друку з використанням такої системи повинна бути не менше ніж 40 мм/год для шару 100 мкм;
- визначити необхідність встановлення примусової вентиляції для охолодження повітря в корпусі принтера;
- зменшити або уникнути «воблінгу» по осі Z;
- створити методику визначення необхідних параметрів для друку моделей.

В результаті виконання атестаційної роботи отримати вдосконалений макет фотополімерного принтера з дослідженням параметрів друку для дотримання відповідності розмірів друкованої моделі до вихідної 3D-моделі.

## 1.4 Висновки до першого розділу

В результаті аналізу предметної області було :

- проаналізовано технології фотополімерного 3D-друку;
- визначені особливості, переваги та недоліки технологій DLP, SLA та LCD;
- визначені особливості побудови згори-вниз та знизу-вгору;
- було проведено аналіз будови аналогічних конструкції, визначені елементи, що є інноваційними для принтерів;
- визначені переваги та недоліки програмних засобів, що використовуються в аналогічних конструкціях;
- було проаналізоване технічне завдання, визначені необхідні задачі, які необхідно в подальшому вирішити.

## 2 АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОННИХ ТА ПРОГРАМНИХ КОМПОНЕНТІВ ДЛЯ МОДЕРНІЗАЦІЇ МАКЕТУ 3D-ПРИНТЕРА

### 2.1 Аналіз вимог згідно характеристикам аналогічних конструкцій

На сьогодні принтерів, що працюють за технологією стереолітографії дуже багато. Але всі вони можуть характеризуватися декількома параметрами згідно яких можливо побудувати конкурентний прототип 3D-принтера.

Основними параметрами на які варто орієнтуватися є мінімальна товщина шару, швидкість друку, розмір робочої зони, висота можливого друку, вбудоване ПЗ, роздільна здатність встановленого екрану.

Перший варіант прототипу, що був розроблений в результаті підготовки атестаційної роботи на рівень бакалавра мав такі характеристики:

- мінімальна товщина шару відповідала 50 мкм;
- швидкість друку складала 5 мм/год;
- розмір робочої зони становив 120×68 мм;
- висота складала 182 мм;
- вбудоване ПЗ відсутнє, керування виконувалось з ПК;
- роздільна здатність становила 1440×2560, тобто 47 мкм один піксель.

Для порівняння можливо взяти декілька принтерів, що були розглянуті в першому розділі.

Anycubic Photon Zero має такі характеристики:

- мінімальна товщина шару відповідає 10 мкм;
- швидкість друку складає 30 мм/год;
- розмір робочої зони становить 97×54 мм;
- висота складає 150 мм;
- керування відбувається через встановлений екран (рис 2.1);
- роздільна здатність становить 854×480, тобто 115,5 мкм в одному пікселі.

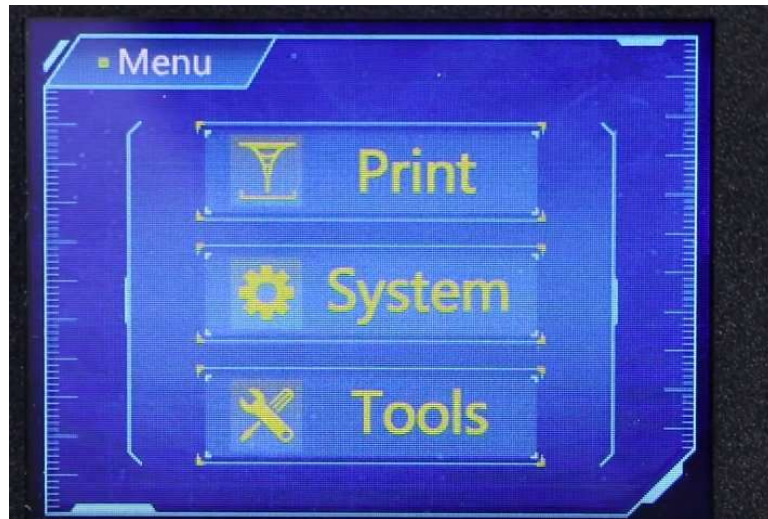


Рисунок 2.1 – Інтерфейс управління принтером Anycubic Photon Zero

Система засвітлення принтера зображена на рис. 2.2 та складається з світлодіодної матриці та фокусатора світла.

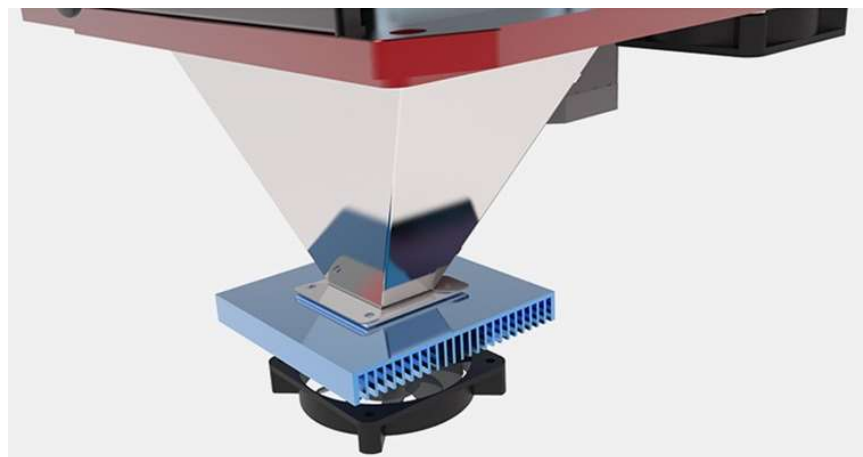


Рисунок 2.2 – Система засвітлення Photon Zero

Longer 3D Orange 30 має такі характеристики:

- мінімальна товщина шару становить від 10 мкм;
- швидкість друку складає до 30 мм/год;
- розмір робочої зони становить 120×68 мм;
- висота складає 170 мм;
- керування відбувається через встановлений екран (рис 2.3);
- роздільна здатність становить 1440×2560, тобто 47 мкм в одному пікселі.



Рисунок 2.3 – Зображення інтерфейсу екрану Longer 3D Orange 30

В якості системи засвітлення використовує систему ParaLED, що має кварцові лінзи, встановлені над світлодіодами, що мають кут розсіювання не більше  $15^\circ$  (рис 2.4).

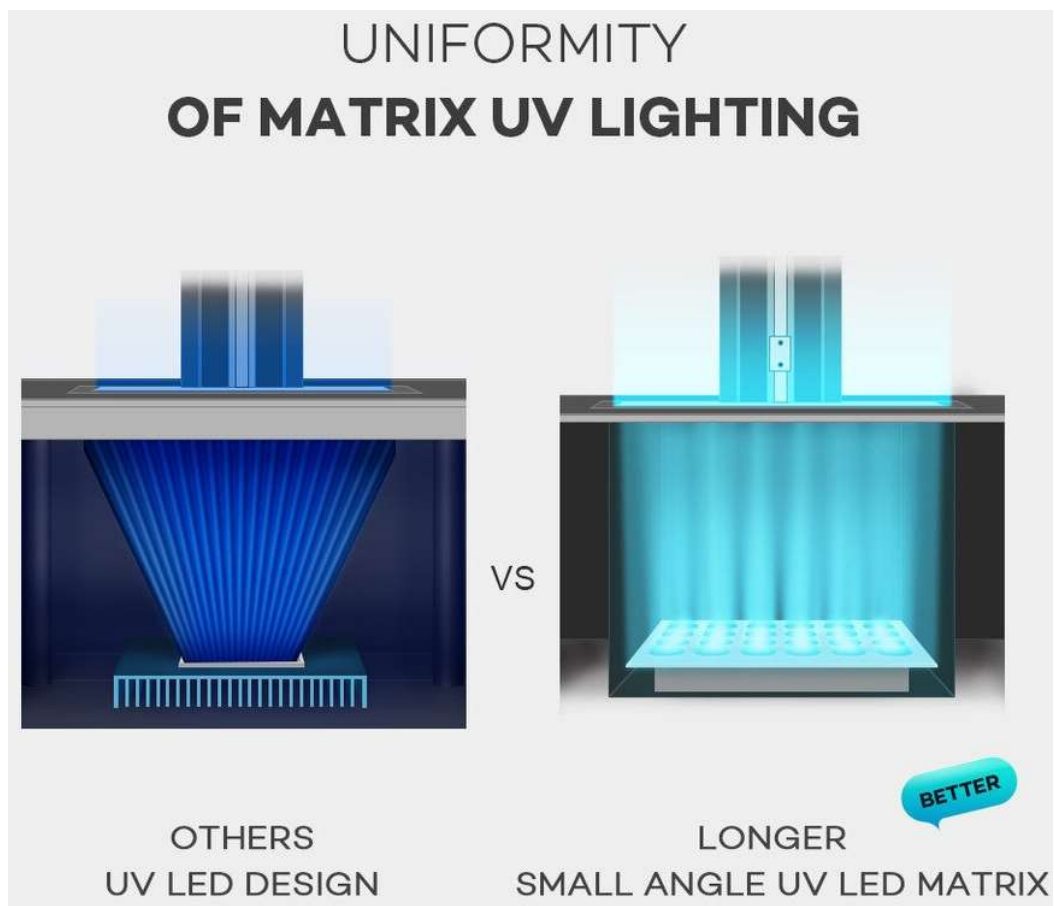


Рисунок 2.4 – Система засвітлення Longer 3D Orange 30

Корпус зі встановленими електронними компонентами зображено на рис. 2.5.

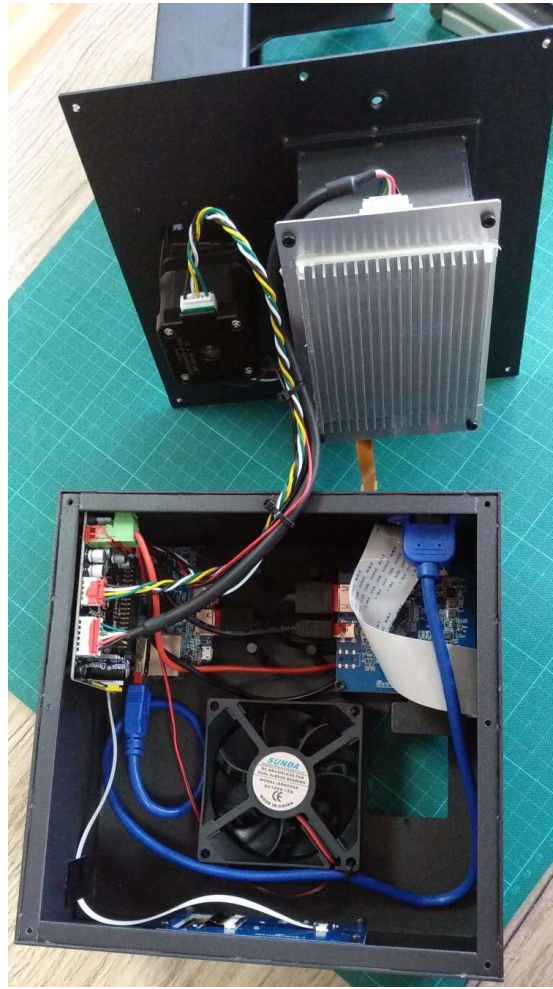


Рисунок 2.5 – Конструкція Longer 3D Orange 30

Після тривалого використання попереднього макета були визначені недоліки та проведено їх аналіз. Таким чином порівняно з іншими принтерами недоліками макета можливо вважати низьку швидкість друку, за рахунок недосконалої системи засвітлення, що давала низьку потужність, та високе паразитне засвітлення в центрі робочої зони.

Другим недоліком є необхідність використання ПК для роботи принтера, так як плата управління, що встановлена в принтері відповідала лише за управління світлодіодною матрицею та керування осі Z. Після використання програмних засобів з керування принтером було визначено їх недоліки. Всі програми, що здійснювали пряме керування мали нестабільну роботу, мали дуже малу можливість настроювання параметрів друку, не підтримували моделі що мали велику деталізацію, що значно обмежувало використання ПЗ у фотополімерному друці.

Блок-схема попереднього макету можливо побачити на рис. 2.6.



Рисунок 2.6 – Блок-схема макету фотополімерного 3D-принтера

Блок-схема LCD 3D-принтеру складається з таких модулів:

- материнська плата. Включає в себе або має можливість під'єднання модулів підвищення напруги для живлення світлодіодною матрицею, що забезпечує стабільну роботу світлодіодної матриці, драйвера крокового двигуна, який забезпечує управління кроковим двигуном, контролера кінцевого вимикача, на який подається сигнал з кінцевого вимикача при його спрацюванні, процесора або мікросхеми, що забезпечує виконання всіх вказаних інструкцій при програмуванні;
- контролер крокового двигуна, забезпечує управління кроковим двигуном;
- контролер світлодіодної матриці, що забезпечує підвищення напруги живлення до 32 В та управління світлодіодом;
- світлодіодна матриця, яка забезпечує випромінювання ультрафіолетовим світлом на поверхню матриці;

- кроковий двигун, що забезпечує переміщення платформи принтера по осі Z;
- кінцевий вимикач, забезпечує відправлення сигналу при спрацюванні на материнську плату, що зупиняє кроковий двигун в кінцевому положенні;
- контролер матриці, забезпечує відображення слою, який подається з комп'ютера через інтерфейс HDMI на матрицю;
- перехідник, слугує для зміни інтерфейсу та з'єднує матрицю та плату контролера матриці;
- блок живлення – виконує процес живлення материнської плати та вентиляторів;
- дисплей – забезпечує формування шару, шляхом відображення світлих пікселей одного шару, через які проходить ультрафіолетове світло;
- вентилятори – забезпечують охолодження плат управління, світлодіода.

В результаті вибору компонентів було встановлено RAMPS 1.4 з Arduino Mega 2560 в якості плати управління, TMC 2208 – драйвер крокового двигуна, світлодіодна матриця 30 Вт з використанням фокусатора з дзеркальною поверхнею, екрану LS055R1SX04 з роздільною здатністю 1440×2560, механічні кінцеві вимикачі, та блоком живлення 120 Вт. Встановлені компоненти зображені на рис. 2.7.



Рисунок 2.7 – Компоненти встановлені в корпусі першого варіанта принтера

Після використання макету (рис 2.8) було прийняте рішення провести його вдосконалення зі зміною складових частин принтеру відповідно до характеристик аналогічних виробів та з використанням нових технологій.

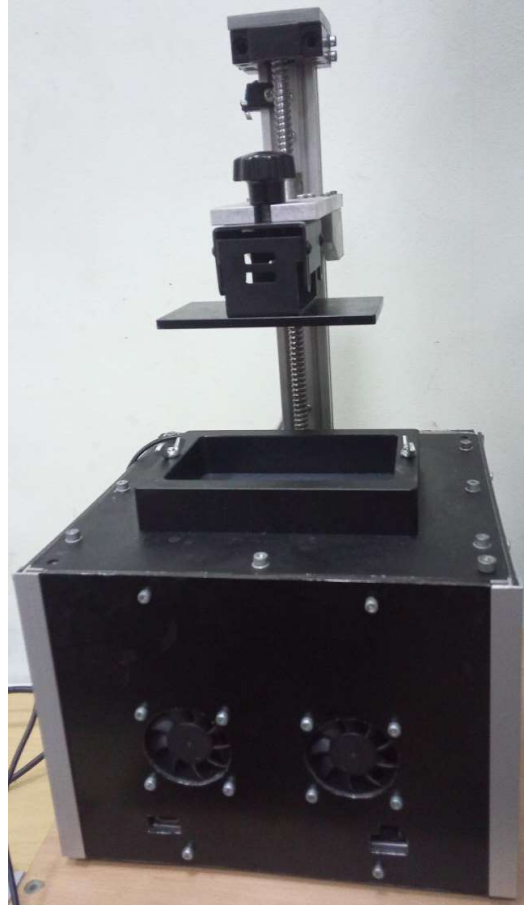


Рисунок 2.8 – Макет атестаційної роботи бакалавра

## 2.2 Аналіз та вибір електронних компонентів 3D-принтера

Так як головними недоліками макету є низька швидкість експонування фотополімеру та відсутність незалежних органів керування, було прийняте рішення замінити макет на новий з використанням нової конструкції.

Екран та плата, що виконує управління екраном, залишаться незмінними, бо вони на сьогодні відповідають характеристикам, що є конкурентними з іншими принтерами за даною технологією.

Для заміни системи засвітлення потрібно провести аналіз існуючих систем та порівняти їх переваги та недоліки.

Першою системою можливо вказати систему, що була вже встановлена в попередньому макеті. Вона складається зі світлодіодної матриці та фокусатора (рис. 2.9).

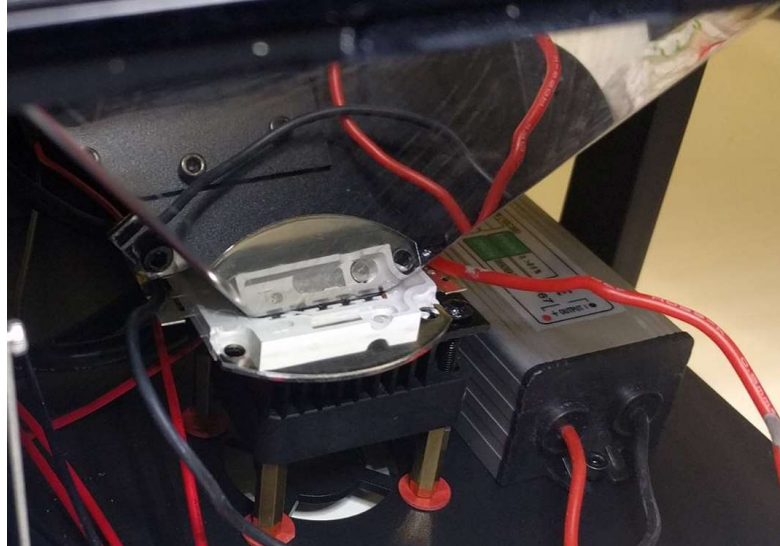


Рисунок 2.9 – Система засвітлення зі світлодіодної матрицею та фокусатором

Дана світлодіодна матриця має довжину хвилі ультрафіолету 405 нм. Потужність складає 30 Вт, найбільше значення потужності сконцентроване в центрі (рис 2.10).

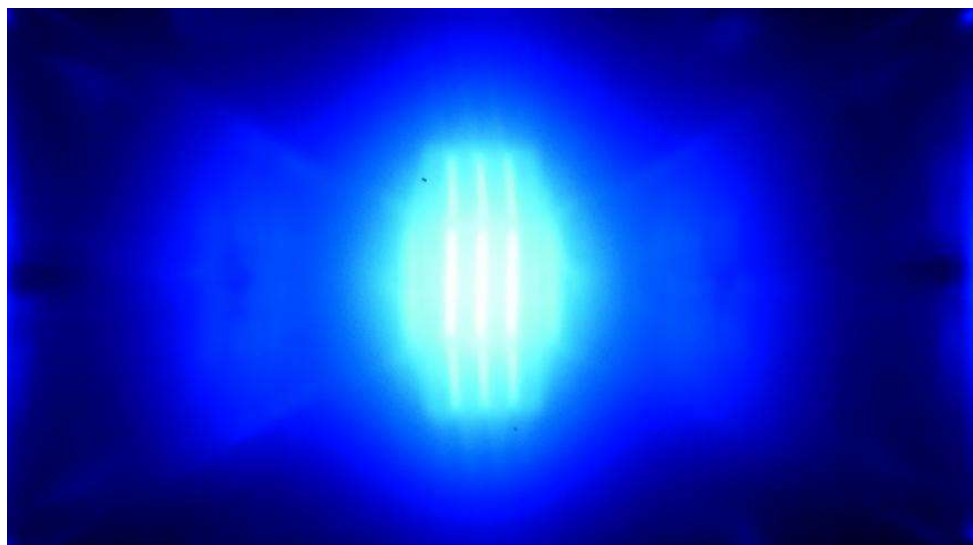


Рисунок 2.10 – Зображення розсіювання світлодіодної матриці з використанням відбивача – фокусатора

Потребує встановлення маски на екран – зображення, що буде корегувати кількість ультрафіолету, що проходить через екран шляхом неповного затемнення деяких ділянок екрану (рис. 2.11).

Рисунок 2.11 – Маска неоднорідності матриці

Для використання потребує перетворювача напруги, що буде перетворювати з 12 В на 36 В.

Швидкість експонування чорного фотополімеру MonoFilament складає 60 секунд для звичайних шарів, при розмірі шару в 50 мкм.

Система засвітлення, що має матрицю з окремих світлодіодів, де над кожним із них встановлена лінза, що дає кут розсіювання  $30^\circ$  (рис. 2.12).

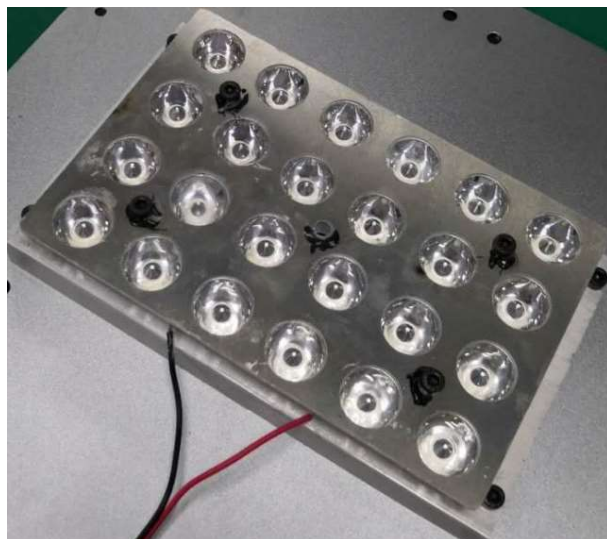


Рисунок 2.12 – Система засвітлення, що встановлюється в EZY LCD

Має версію, що використовується з екраном розмірами до 10.1 дюйма (рис. 2.13).

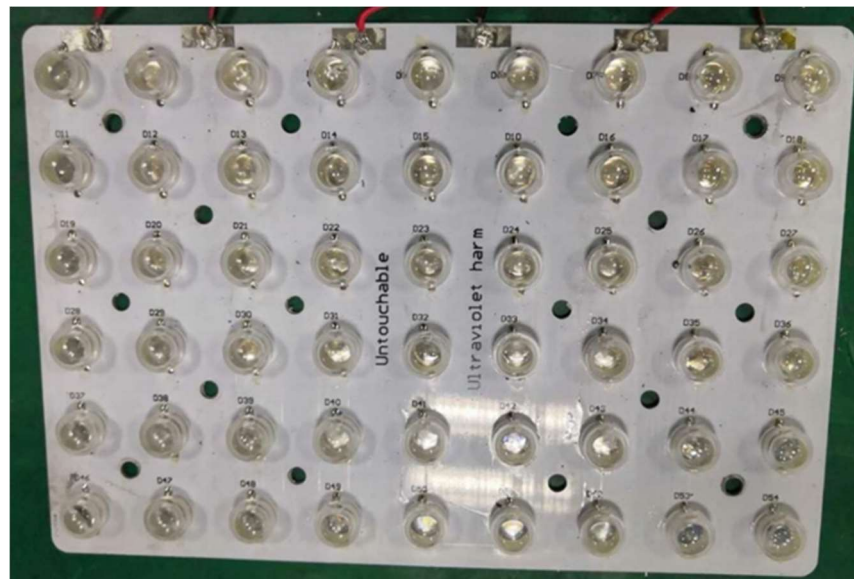


Рисунок 2.13 – Світлодіодна матриця, що використовується для 10 дюймових екранів

Для встановлення потребує 36 В напруги та 2.4 А струму. Швидкість експонування з використанням даної матриці для швидкого фотополімера становить 12 секунд для звичайних шарів при розмірі шару в 50 мкм.

Світлодіодна матриця з використанням кварцових лінз – ParaLED (рис. 2.14) має кут розсіювання в  $15^\circ$ .



Рисунок 2.14 – ParaLED

Для використання даної матриці потрібно 50 В напруги та 1.5 А струму.

Вихідна потужність матриці складає 70 Вт, для швидких фотополімерів час полімеризації складає 5 секунд на звичайний шар для шару товщиною 50 мкм.

При невідповідній відстані від екрану за рахунок чітких меж розсіювання світла (рис. 2.15) може або створювати зони, де буде менше ультрафіолетового випромінювання, або якщо відстань буде більше, тоді вихідна потужність, що впливає на фотоплімер зменшиться як і швидкість полімеризації фотополімеру. Документована відстань, від якої слід відбиватися, вказана в специфікації до світлодіодної матриці та складає 340 мм.

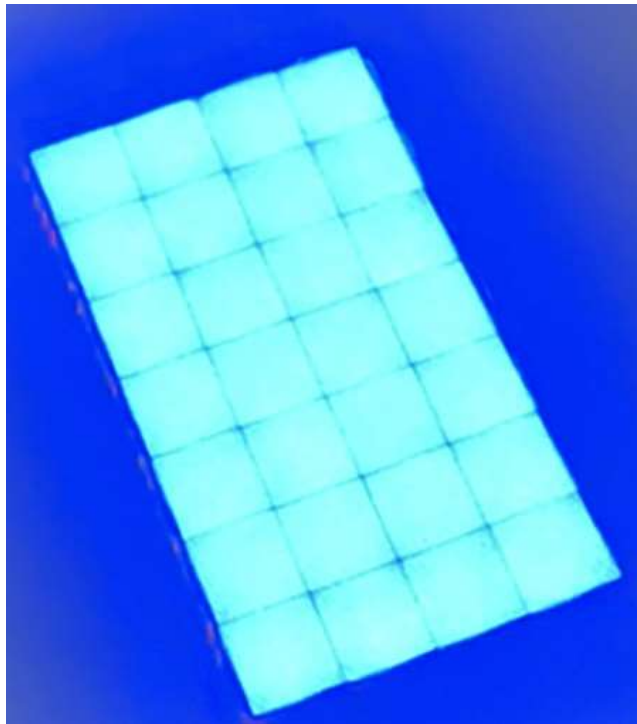


Рисунок 2.15 – Приклад чіткого розділення ділянок, що досягається встановленими кварцовими лінзами

В результаті аналізу було здійснено вибір системи ParaLED, так як дана система в результаті широкого використання показала вищу надійність, в результаті друку багатьох моделей було визначено, що дана система дає менше паразитного засвітлення. Встановлений радіатор, що має поперечні пластини, що краще відводять тепло.

Порівняння систем з використанням лінз та з використанням фокусатора зображені на рис. 2.16.

Для вибору плати управління було проаналізоване використання попереднього макету. Таким чином система, що має повну залежність від персонального комп'ютера є недосконалою, та потребує використання потужності персонального комп'ютера, що буде спрямоване лише на управлінні екраном принтера, та платою управління, що буде здійснювати переміщення осі Z. Таким чином під час друку моделі комп'ютер повинен знаходитися в робочому стані та його неможливо використовувати для інших завдань. Також для коректної роботи принтера ПК потребує наявності HDMI входу, що має версію 1.4b або краще. Лише дані інтерфейси мають можливість відображувати зображення на 2К екранах, за рахунок власної пропускну здатності.

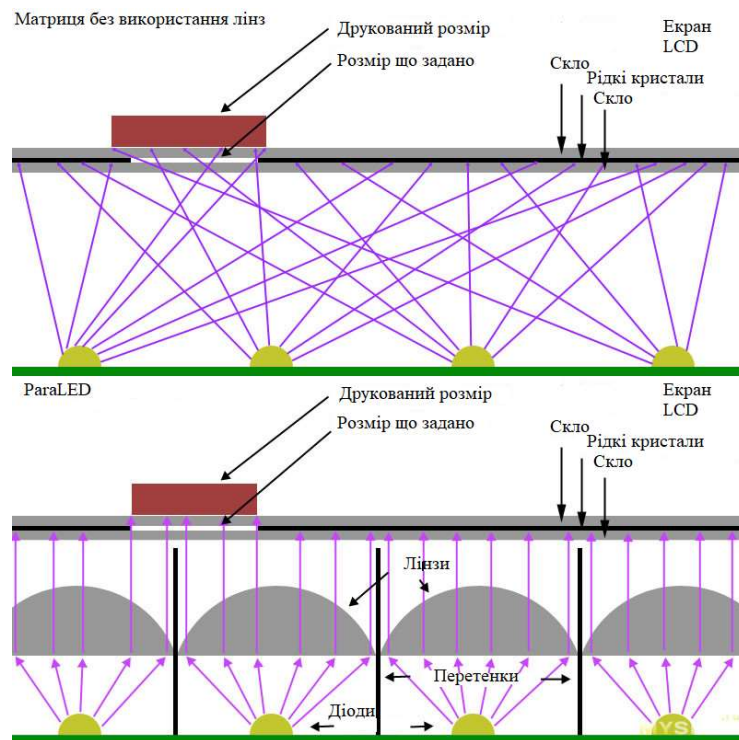


Рисунок 2.16 – Порівняння системи ParaLED та звичайні світлодіоди з фокусатором

На сьогодні існує декілька способів вирішення даної проблеми. Першим способом можливо вказати встановлення одноплатних мікрокомп'ютерів

(рис. 2.17), що мають вбудовану операційну систему та ПЗ, що стоїть поверх системи.

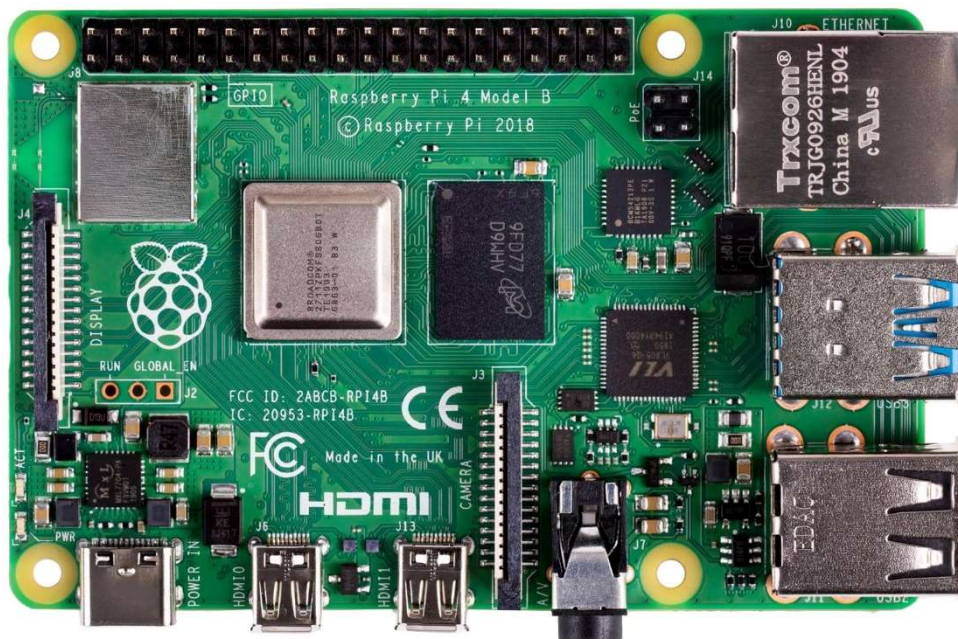


Рисунок 2.17 – Мікрокомп'ютер Raspberry Pi 4

Управління екраном відбувається на системному рівні. Вбудовані програмні засоби використовують існуючі піни GPIO з встановленими платами розширення, що мають відповідні роз'єми для керування кроковим двигуном, світлодіодною матрицею та вентиляторами (рис. 2.18), або можуть виконувати управління платами через USB, що відповідають за управлінням виконавчих пристроїв, такими платами є плати основані на Arduino Mega.

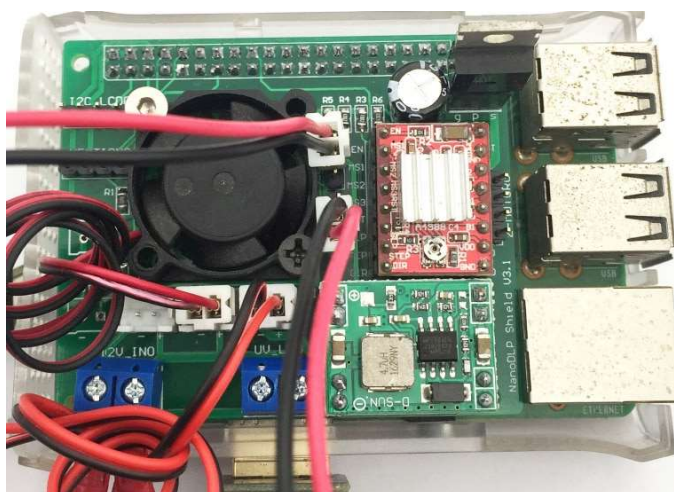


Рисунок 2.18 – Плата розширення NanoPi

Управління через Arduino потребує використання G-code. Для цього у вбудованих ПЗ є термінал, через який можуть відправлятися G-code на плату. Управління через плату розширення виконується безпосередньо на виконавчі органи, такі як світлодіодна матриця або кроковий двигун. Для управління використовуються GPIO (рис 2.19), на які подаються або високий сигнал або низький. Управління кроковим двигуном виконується у вигляді імпульсів. Таким чином можливо програмне вимірювання відстані, на яку платформа здійснила переміщення.

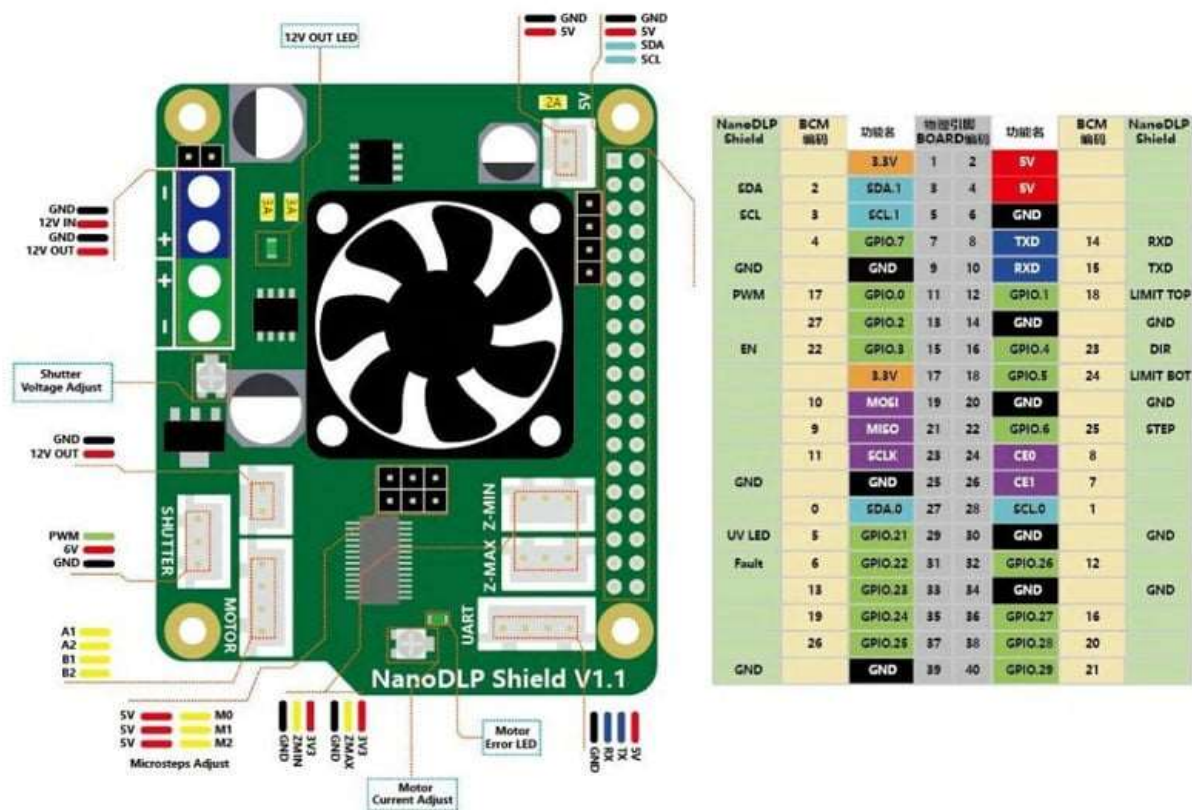


Рисунок 2.19 – Піни GPIO Raspberry Pi

Для використання мікрокомп'ютера потрібне спеціалізоване програмне забезпечення, яке зможе виконувати управління GPIO, та зможе відображувати на екрані зображення шару.

На сьогодні таких ПЗ є декілька. Першим є NanoDLP, що побудоване на відкритій основі та повністю направлене на застосуванні у фотополімерних

принтерах. Іншим є Octoprint (рис.2.20). Даний ПЗ може керувати принтерами за технологіями DLP та FFF.

NanoDLP використовує 16, 15, 18 пini керують кроковим двигуном, 33, 22 керують кінцевими вимикачами. Інші пini слугують допоміжним функціям.

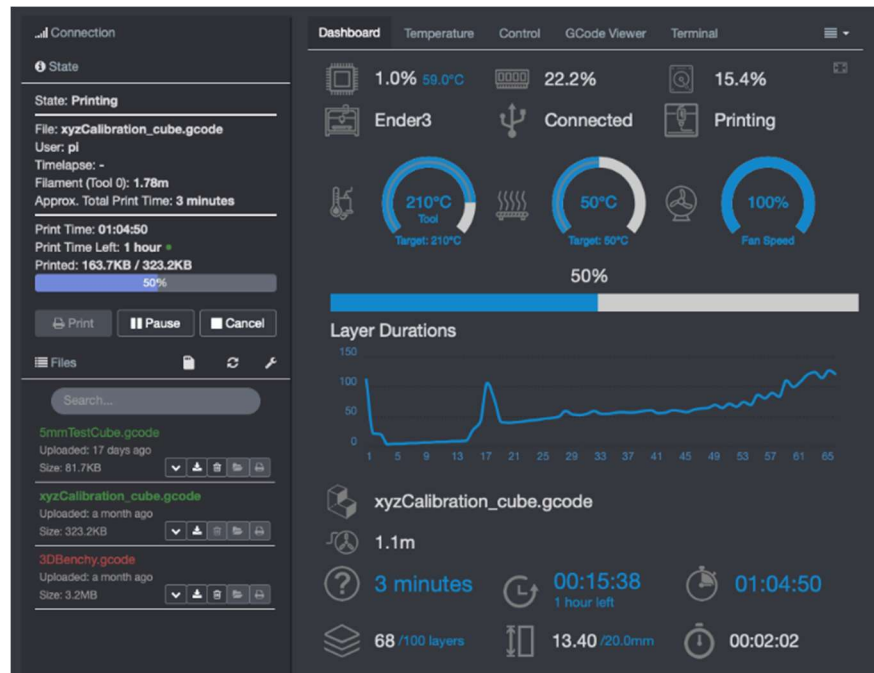


Рисунок 2.20 – Інтерфейс управління Octoprint

Іншим способом управління принтером без використання комп'ютера є використання спеціалізованих плат, що включають в себе управління екраном та управління двигуном та світлодіодом (рис. 2.21).

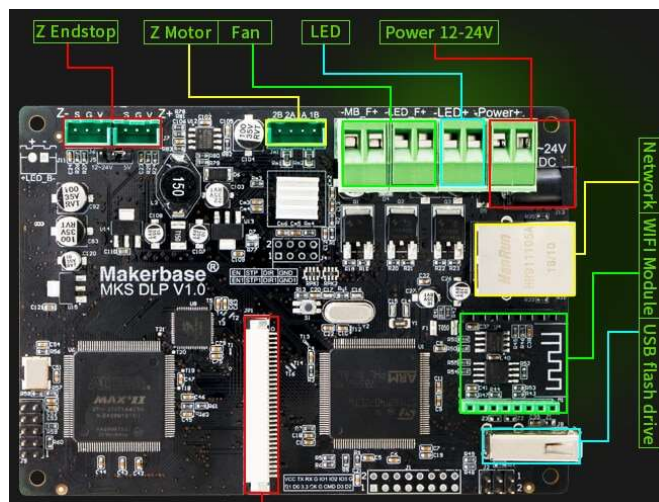


Рисунок 2.21 – Плата управління MKS DLP

Першим рішенням може слугувати MKS DLP[13] (рис. 2.21), плата включає в себе вбудований драйвер крокового двигуна, роз'єми, що управляють кінцевими вимикачами, кроковим двигуном, вентиляторами, світлодіодною матрицею, має можливість підключення по Wi-Fi або Ethernet, має роз'єм USB. Підтримує можливість встановлення камери для зйомки процесу друку моделі. Має роз'єм для управління екраном, через який здійснюється відображення шару моделі (рис 2.22) та підтримує встановлення резистивного дисплея для управління принтером.

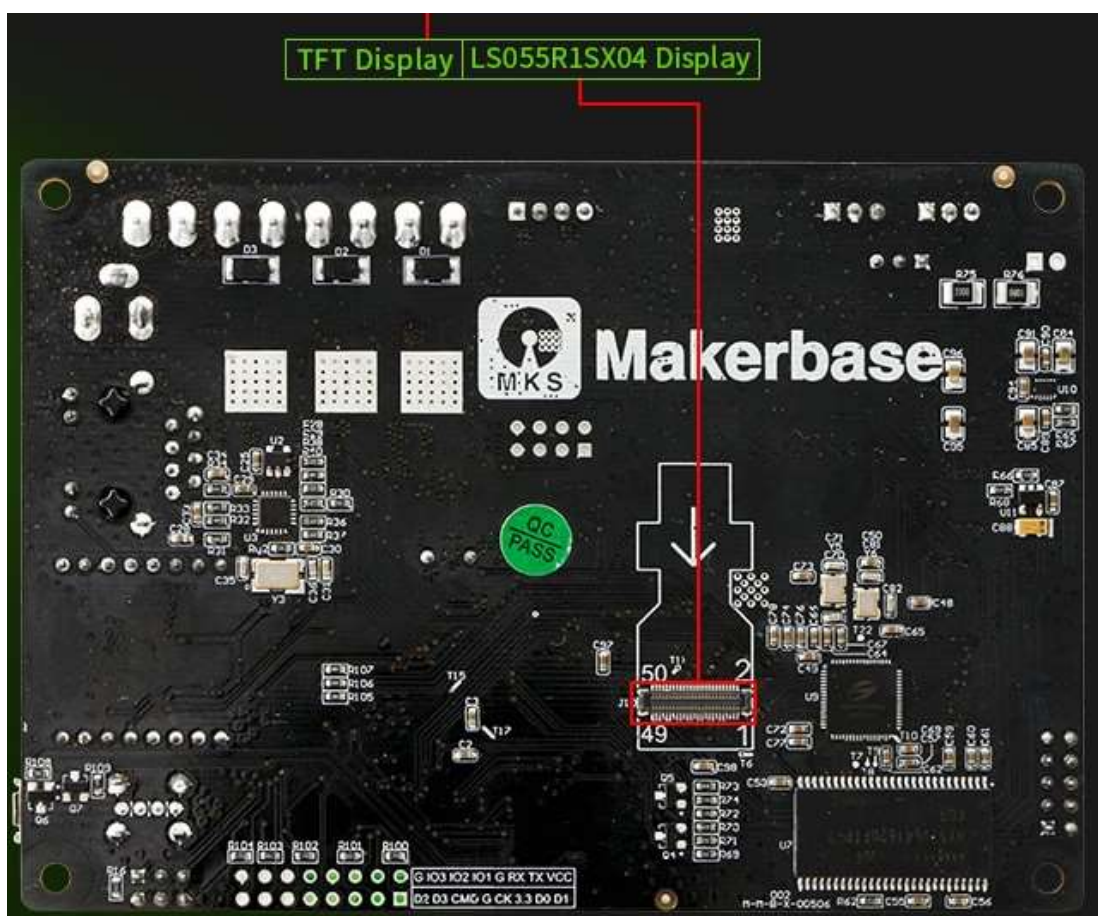


Рисунок 2.22 – Зображення плати з роз'ємом підключення екрану

Плата ChiTu V3 SLA [14] (рис. 2.23), плата що має вбудований мікропроцесор STM32F407, має вбудований драйвер крокового двигуна A4988, підтримує встановлення екрану для управління. Підтримує бездротове з'єднання по Wi-Fi або дротове по мережі Internet. Має підтримку більшості існуючих екранів для відображення шарів моделі в залежності від версії плати.

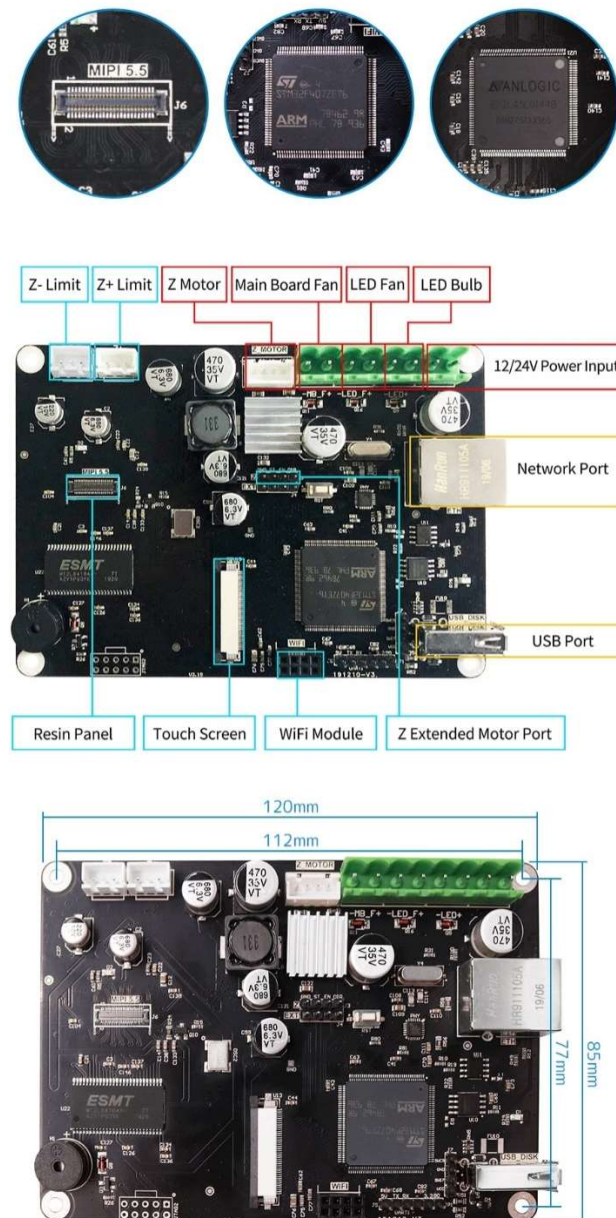


Рисунок 2.23 – Зображення плати ChiTU V3 SLA

Плата має відкрите програмне забезпечення, керування відбувається через екран, на який також встановлюється спеціалізоване програмне забезпечення або через мережу Internet за допомоги web-інтерфейсу.

Недоліком даної плати є програмне забезпечення, що не підтримує більшість найрозповсюджених форматів файлів, низька підтримка користувача, що не може гарантувати вирішення проблем та недоліків програмного забезпечення. Кожний варіант плати підтримує лише деяку кількість екранів (рис. 2.24).

	L M1	L V3	L K1	L H1
LS055R1SX04 - 5.5inch (1440*2560)		✓		
LS060R1SX02 - 6.0inch (1440*2560)			✓	✓
TFTMD089030 - 8.9inch (2560*1600)			✓	✓
P101SFA-AF0 - 10.1inch (2560*1600)			✓	
RV059FBB-N80-28P0-5.96inch - Mono (1620*2560)		✓		
ZX608XI5249727 - 6.08inch - Mono (1620*2560)		✓		
TM089CFSP01 - 8.9inch-Mono (3840*2400)	✓			
PJ089Y2V3 - 8.9inch (3840 *2400)	✓			
LS055D1SX02 - 5.5inch (2160*3840)				✓
LQ125D1JW31 - 12.5inch (3840*2160)				✓
LP133UD1-SPA1 - 13.3inch (3840*2160)				✓
LQ156D1JX01 - 15.6inch (3840*2160)				✓
eMMC	Onboard	Optional	Optional	None
Motor driver chip	TMC2209	A4988/ TMC2209	TMC2209	A4988

Рисунок 2.24 – Підтримувані екрани в залежності від варіанту плати

Також недоліком є наявність вбудованого драйвера крокового двигуна, що значно обмежує використання плати в різних умовах.

В результаті аналізу було вибрано використання мікрокомп'ютера Raspberry Pi 4 зі встановленою платою розширення NanoDLP.

Так як дана плата розширення передбачає використання лише ПЗ NanoDLP, потрібно провести аналіз недоліків та переваг даного програмного забезпечення.

NanoDLP може встановлюватися на різні платформи, це може бути Windows, Linux, Mac OS. Але основною платформою, де функції NanoDLP є найбільшими, є Raspberry Pi з операційною системою Raspbian, яка заснована на Linux. NanoDLP підтримує використання генератора імпульсів, GPIO, PWM та встановлення та використання камери для зйомки процесу друку.

Встановлення виконується після завантаження та первинного налаштування на Raspberry операційної системи Raspbian, далі для встановлення безпосередньо ПЗ потрібно ввести код в терміналі:

```
(wget https://www.nanodlp.com/nanodlp.tar.gz --no-check-certificate -O
- | tar -C /home/pi -xzf --warning=no -timestamp);cd /home/pi/printer;sudo
./setup.sh
```

Цей код автоматизовано завантажить файли програмного засобу на мікрокомп'ютер, перезавантажиться та буде готовий для подальшої роботи.

Використання даного засобу можливо або через web-інтерфейс, або через екран.

Web-інтерфейс зображений на рис. 2.25.

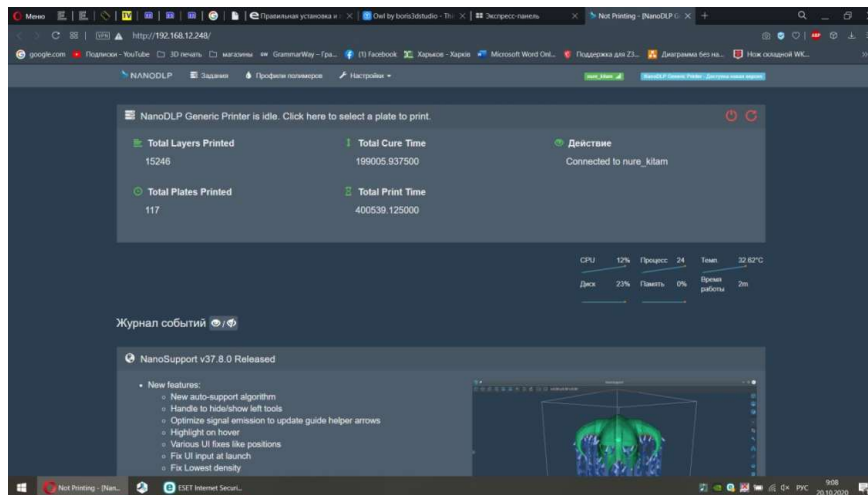


Рисунок 2.25 – Зображення web-інтерфейсу NanoDLP

Зображення інтерфейсу екрана можливо побачити на рис. 2.26.



Рисунок 2.26 – Інтерфейс екрану NanoDLP

Екран може налаштувати з'єднання Wi-Fi (рис. 2.27).



Рисунок 2.27 – Налаштування Wi-Fi

У вікні налаштування Wi-Fi можливо побачити IP-адрес по якому можливо з'єднатися з NanoDLP по web-інтерфейсу.

Управління по екрану дає можливість вибирати та налаштовувати профілі (рис.2.28) окремих фотополімерів, вказуючи час експонування базових шарів, звичайних шарів, висоту перемішування та ін.



Рисунок 2.28 – Вікно управління профілей

Вікно управління переміщенням (рис. 2.29) дає можливість переміщувати на різні проміжки платформу, встановлювати її в нижній точці, або навпаки в верхній.

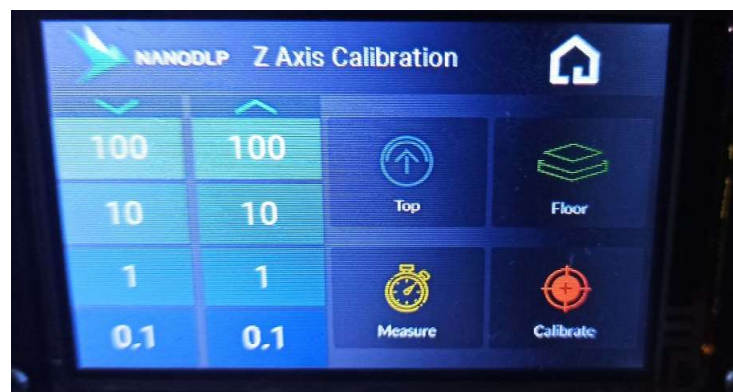


Рисунок 2.29 – Вікно управління переміщенням

Для встановлення на друк завдань на екрані було виділено окрему вкладку (рис. 2.30), вона керує підготовкою до друку моделей, вибір завдань, що були встановлені у web-версії.



Рисунок 2.30 – Вікно керування завданнями

Вікно керування екраном (рис. 2.31) може висвітлювати на екрані калібрувальні сітки, для перевірки екрану на порушення.



Рисунок 2.31 – Вікно керування екраном

Вікно керування друком (рис. 2.32) висвітлює час закінчення друку, шари, що були надруковані та загальну їх кількість, висоту поточного шару та загальну висоту моделі, може зупинити друк або встановити паузу.



Рисунок 2.32 – Вікно керування друком

Web-інтерфейс має більш широкі можливості для корегування параметрів принтеру, та налаштування параметрів друку.

На головній сторінці NanoDLP (рис. 2.33) відображається інформація про кількість шарів, що були надруковані, загальний час експонування, графіки використання Raspberry Pi, інформація про останні оновлення програмного забезпечення. Журнал подій дає можливість переглядати не тільки останні оновлення а й деяку кількість останніх відправлених команд NanoDLP. Це дає можливість краще зрозуміти яким чином йде друк та ін.

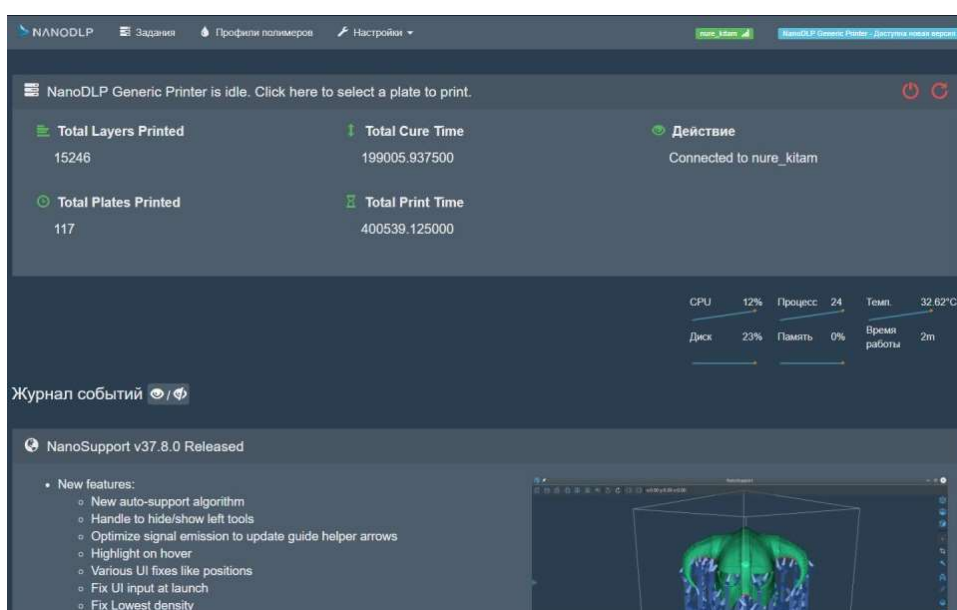


Рисунок 2.33 – Головне вікно NanoDLP

Вікно завдання (рис. 2.34) дає можливість додавати завдання для подальшого друку, це можливо зробити трьома способами, перший спосіб дає можливість завантажувати в NanoDLP вже повністю готовий до друку файл, що буде мати налаштування для друку, відслайсені зображення шарів. Даний спосіб не потребує встановлення до заданої позиції моделі, налаштування підтримок та ін. Налаштування в даному способі виконується на ПК в спеціалізованих програмах.

Другий спосіб дає можливість вибрати налаштовану модель з накопичувача USB, даний спосіб також передбачає використання вже налаштованих моделей для друку.

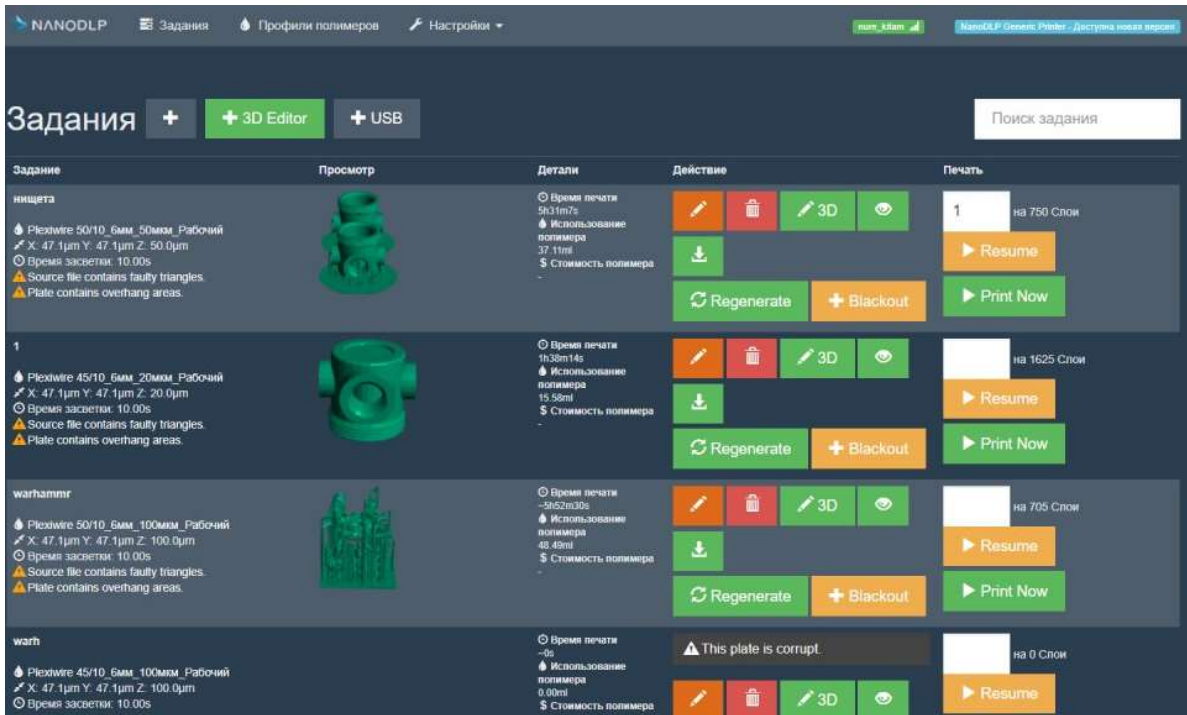


Рисунок 2.34 – Вікно управління завданнями

Третій спосіб при натисканні 3D Editor (рис. 2.35), дає можливість налаштування положення, висоти, підтримок, встановлення декількох моделей.

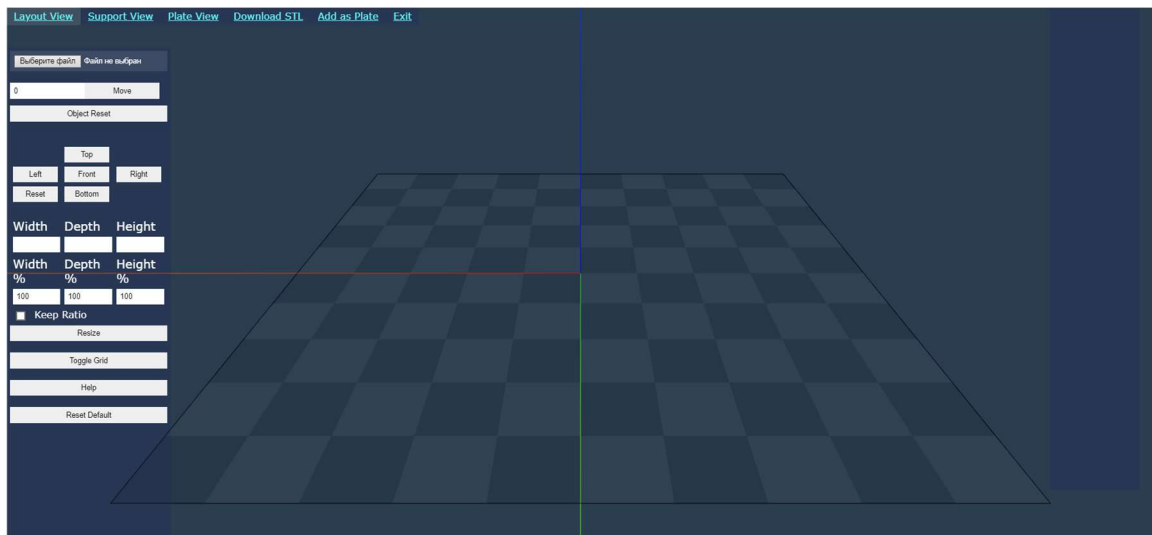


Рисунок 2.35 – Вікно редагування моделей 3D Editor

Вікно для вибору профілей (рис. 2.36) дає можливість створювати, зберігати та редагувати профілі полімерів, також підтримується вибір стандартного профілю.

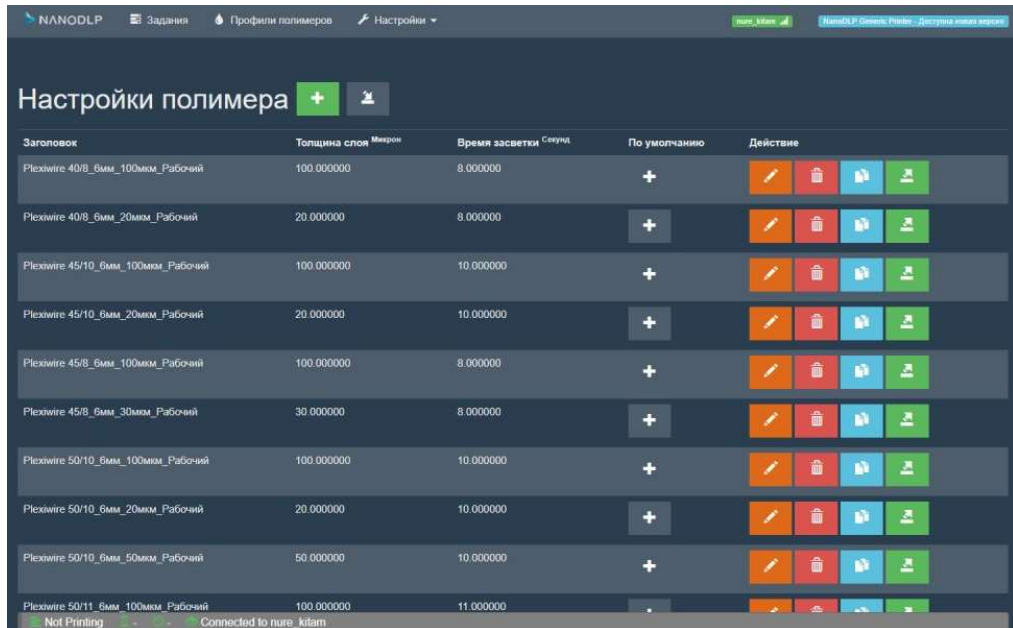


Рисунок 2.36 – Вікно редагування профілей

Редагування профілів (рис. 2.37) підтримує встановлення часу експонування звичайних та базових шарів, які дають можливість приліпитися до платформи полімеру та утримувати всю модель впродовж всього друку, незважаючи на масу моделі.

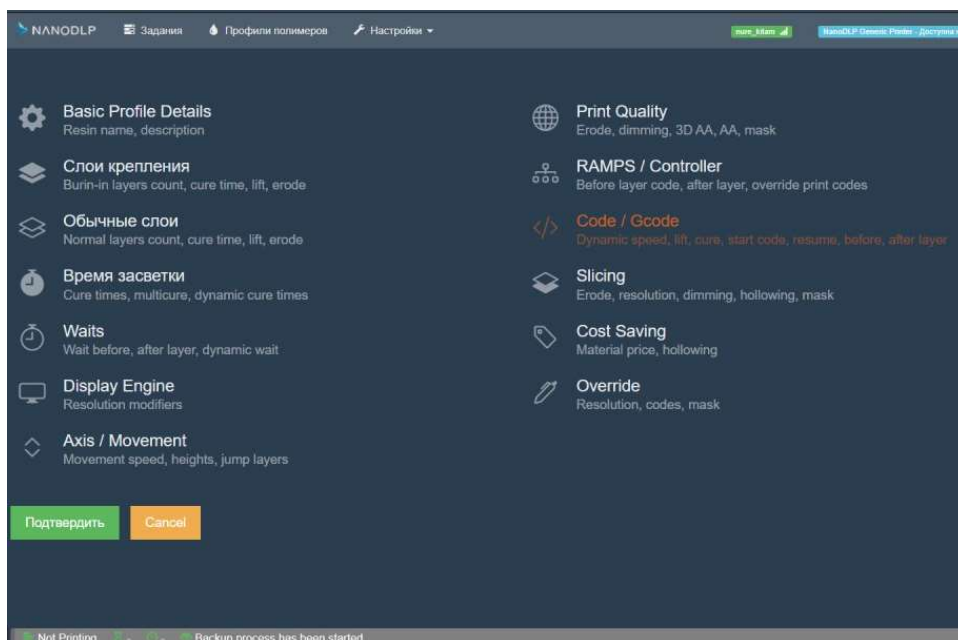


Рисунок 2.37 – Вікно редагування профілей

Також підтримується налаштування G-code, пауз, висоти підйому, швидкості руху, встановлення Anti-Aliasing, підтримується встановлення ціни

фотополімеру для подальшого підрахунку вартості друку. Підтримуються налаштування відображення на екрані зображення.

Вікно управління переміщеннями (рис. 2.38) керує переміщенням платформи на задану висоту. Показує на якій висоті знаходиться платформа зараз, підтримує калібрування переміщенням для уточнення положення платформи. Може вимикати використання двигунів.

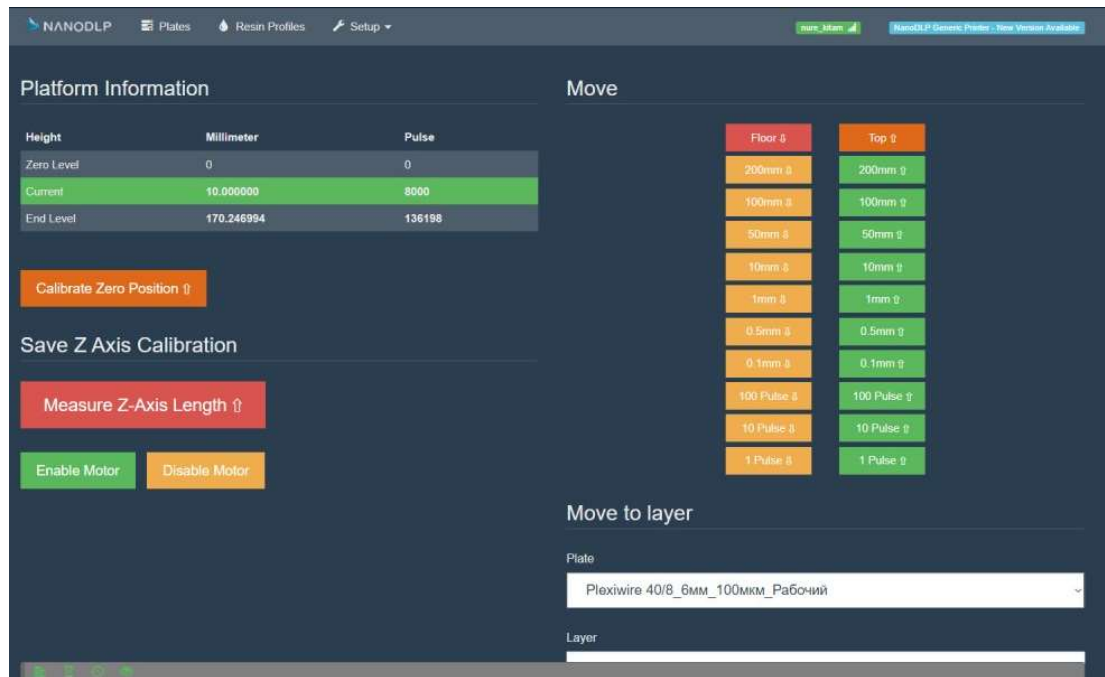


Рисунок 2.38 – Вікно керування переміщеннями

Калібрування проектором (рис. 2.39) може відображати на екрані калібрувальну сітку, має спеціальні налаштування для проекторів, що має назву бочка, дана функція створює на екрані вигини зображення, які будуть нівелювати недоліки налаштування проектора. Дане вікно підтримує встановлення маски для нівелювання нерівномірності експонування світлодіодних матриць зі встановленими фокусаторами. Може програмно керувати шторкою, пластиною пластику, що встановлена над проектором та виконує переміщення за допомоги сервоприводу, вона відкриває або закриває проектор від робочої зони. Це обумовлено тим, що проектори дають максимальну потужність лише коли лампа проектора набуває потрібної температури.

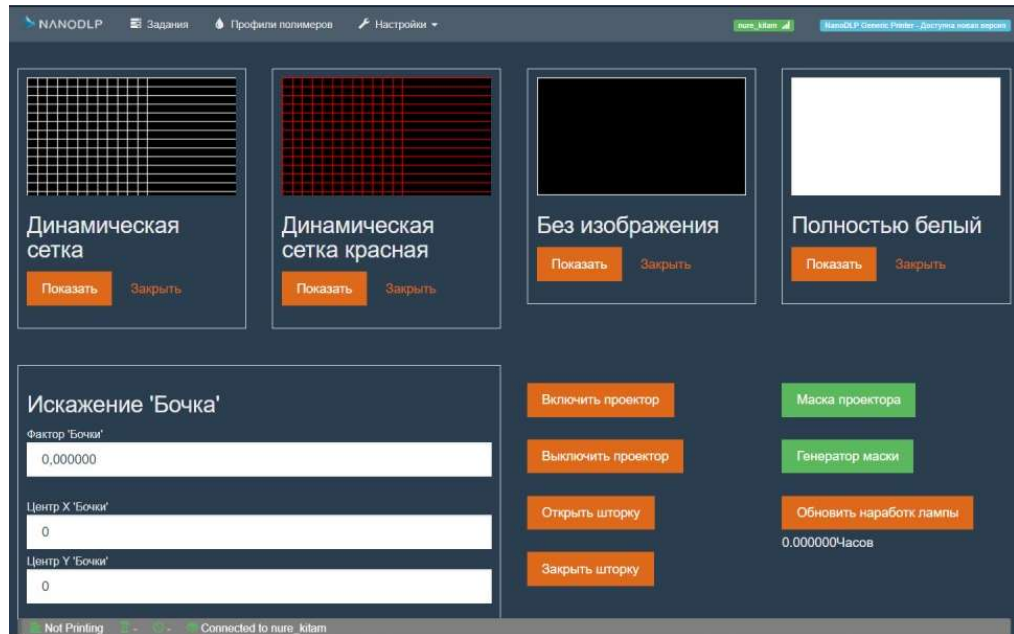


Рисунок 2.39 – Вікно керування проектором або екраном

Вікно налаштування принтера (рис. 2.40) дає можливість налаштувати роздільну здатність екрану, розмір пікселя, встановлення віддзеркалення, спосіб управління дисплеєм, яскравість лампи проектора, адрес підключення до проектора та інші параметри.

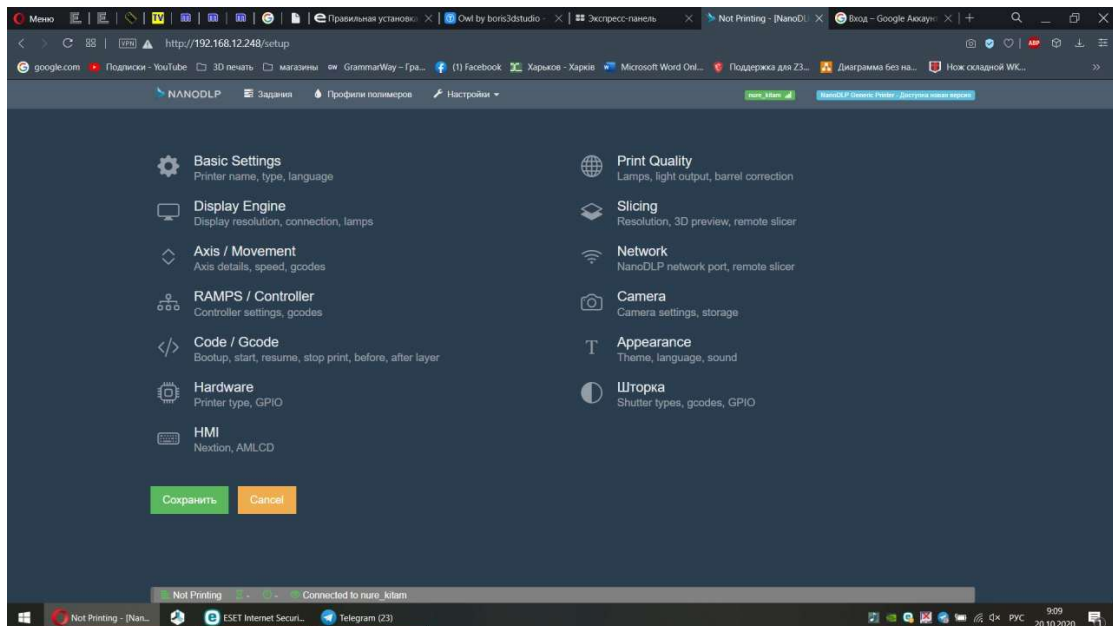


Рисунок 2.40 – Вікно налаштування принтера

Налаштування переміщення корегує спосіб переміщення який може бути або абсолютним або відносним, вибір початкової точки, тобто нуль може бути

або вгорі або знизу. Позиція очікування, в якій платформа знаходиться після завантаження принтера.

Кількість полімера – функція, що дає можливість вираховувати висоту з якої швидкість зменшиться для кращого входження платформи в фотополімер, таким чином повітря що буде на дні зможе вийти на зовні. Підтримує встановлення початкової швидкості, максимальної та мінімальної швидкості, кут обертання крокового двигуна, кількість мікрокроків, що може робити кроковий двигун і залежить від встановленого драйвера крокового двигуна. Може підтримувати загальну висоту переміщення, якщо відсутні кінцеві вимикачі.

NanoDLP може використовуватися з Arduino або з прямим керуванням і для цього є також опції (рис. 2.41).

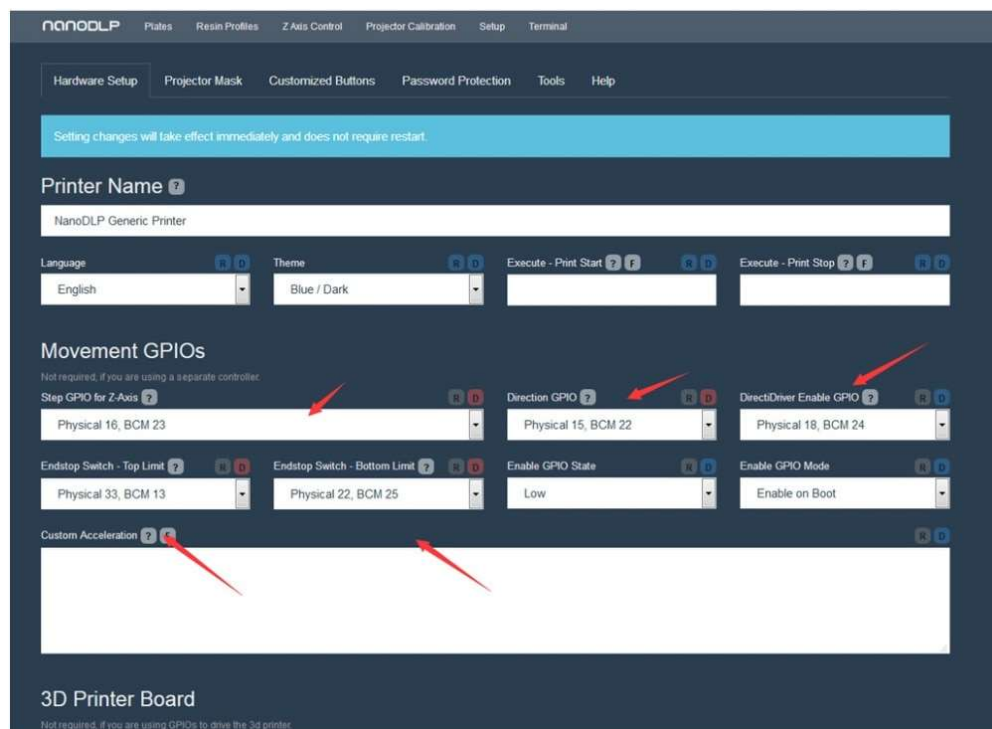


Рисунок 2.41 – Налаштування прямого керування

Налаштування прямого керування передбачає встановлення фізичних пінів для використання крокового двигуна, для кінцевих вимикачів.

Інші параметри дають можливість встановлення власних G-Code та використання мови програмування JavaScript.

У даному вікні також може налаштовуватися встановлення екрану, налаштування зовнішнього вигляду NanoDLP, використання зовнішнього слайсеру та ін.

### 2.3 Висновки до другого розділу

В результаті аналізу електронних та програмних компонентів було проведено аналіз вимог, які відповідають характеристикам кращих аналогічних конструкцій, для порівняння було використано блок-схему попереднього макету, визначили елементи, які потребують модернізації або заміни на більш вдосконалі.

Були проаналізовані компоненти, які можуть використовуватися для вдосконалення макету принтера. Було визначено, що з використанням мікрокомп'ютерів Raspberry можливо використовувати лише декілька ПЗ, які можуть задовольнити всі потреби у керуванні та налагодженні параметрів принтера – NanoDLP.

Таким чином NanoDLP, що використовується з Raspberry Pi 4 та з платою розширення NanoDLP мають багато переваг, серед яких виділяється можливість точного налаштування, можливість використання як прямого управління так і управління через Arduino, підтримка різних екранів в тому числі і монохромних, підтримка проекторів. Також перевагами є відкритість та підтримка проекту, що дає часті оновлення та вирішення проблем на рівні розробників.

## 3 РОЗРОБКА 3D-МОДЕЛІ ПРИНТЕРА ТА ЗБОРКА МАКЕТУ ЗГІДНО МОДЕЛІ

### 3.1 Обґрунтування вибору середовища моделювання

Так як в результаті вдосконалення виконується заміна електронних компонентів, потрібно вирішити проблему мініатюризації корпусу принтера з використанням великої кількості компонентів необхідно вирішити дві задачі:

- розміщення компонентів в корпусі принтер;
- розробка та аналіз необхідності встановлення примусового охолодження.

Система охолодження є вкрай важливою для довготривалого використання 3D-принтера.

В результаті неправильного аналізу конвекції повітря в корпусі можливо швидка деградація електронних компонентів.

Для ефективного розміщення електронних компонентів в корпусі 3D принтеру було прийняте рішення побудувати 3D. Для розробки моделі використовувалось програмне забезпечення Autodesk Fusion 360.

При розробці моделі принтера були використані готові моделі окремих компонентів для скорочення витраченого часу на розробку кожного окремого елемента моделі та розробка нових унікальних компонентів для окремих модулів.

Прикладом може слугувати блок живлення, даний блок живлення зображений на рис. 3.1.

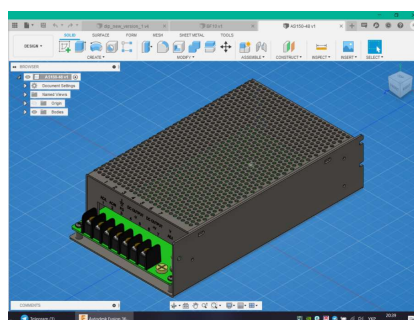


Рисунок 3.1 – Окремий блок живлення Fusion 360

Розробка власних компонентів виконувалась з використанням базових функції Fusion 360. Таким чином було розроблене кріплення реле постійного струму на верстатний профіль. Дане кріплення зображене на рис. 3.2.

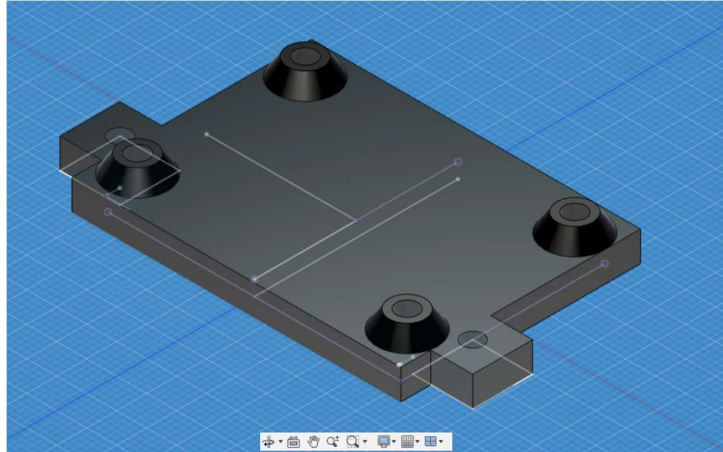


Рисунок 3.2 – Кріплення для встановлення реле

Таким чином для побудови моделі спочатку було знайдено розміри основних компонентів, проаналізовано технічне завдання, зняті розміри попереднього макету.

### 3.2 Використання в моделюванні принтеру готових моделей

Для побудови корпусу були використані готові моделі профілю, кутів. Для їх використання використовується вбудована функція Fusion 360 McMASTER-CARR (рис. 3.3), дана функція дає можливість отримати кресленик та 3D-модель технічного кріплення та ін.

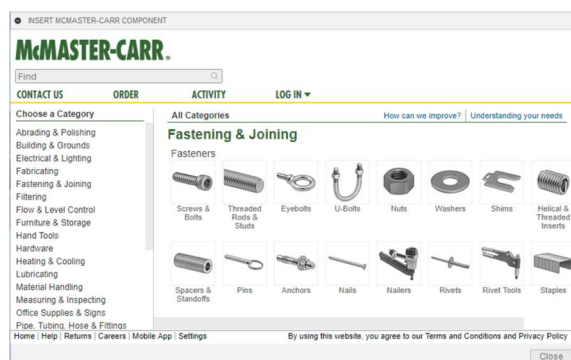


Рисунок 3.3 – Вбудована функція McMASTER-CARR

Спочатку було побудовано каркас майбутнього принтера з використанням верстатного профілю (рис. 3.4).

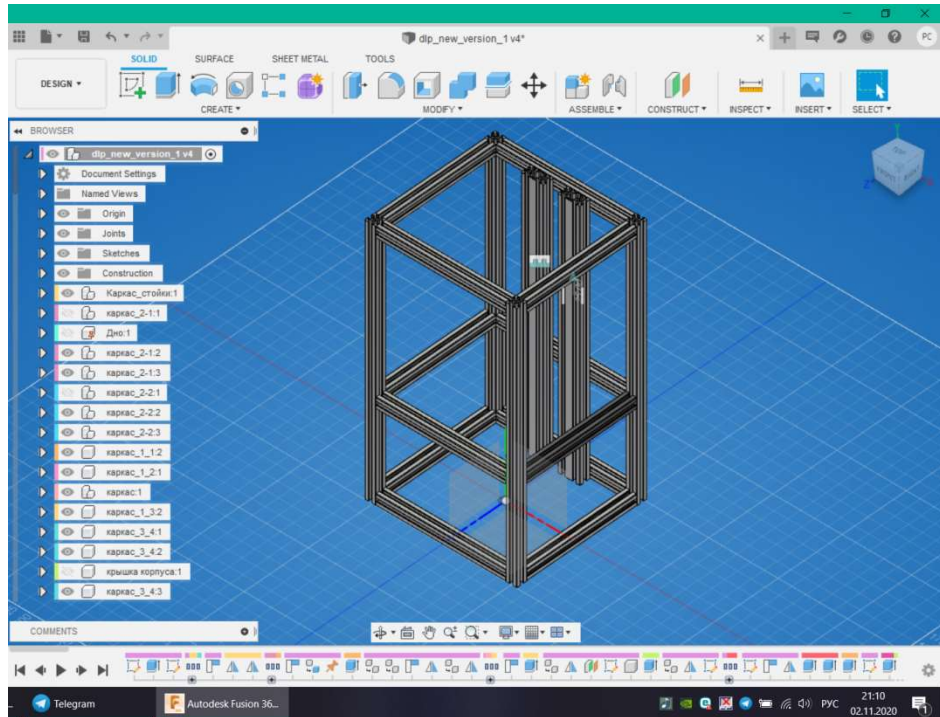


Рисунок 3.4 – Зображення каркасу принтера з верстатного профілю

Далі каркас був посилений встановленими куточками 20×20 (рис. 3.5).

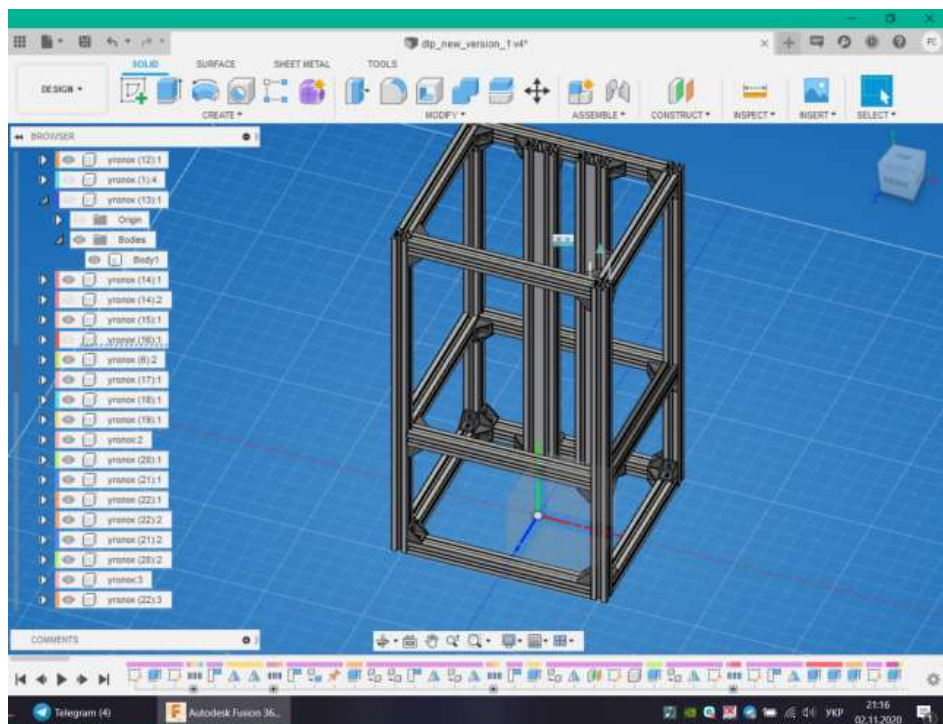


Рисунок 3.5 – Конструкція зі встановленими кутами в профілі

Встановлено металеву пластину на дно принтера та розрахована відстань від світлодіодної матриці до екрану. Закладене кріплення для світлодіодної матриці верстатного профілю (рис. 3.6).

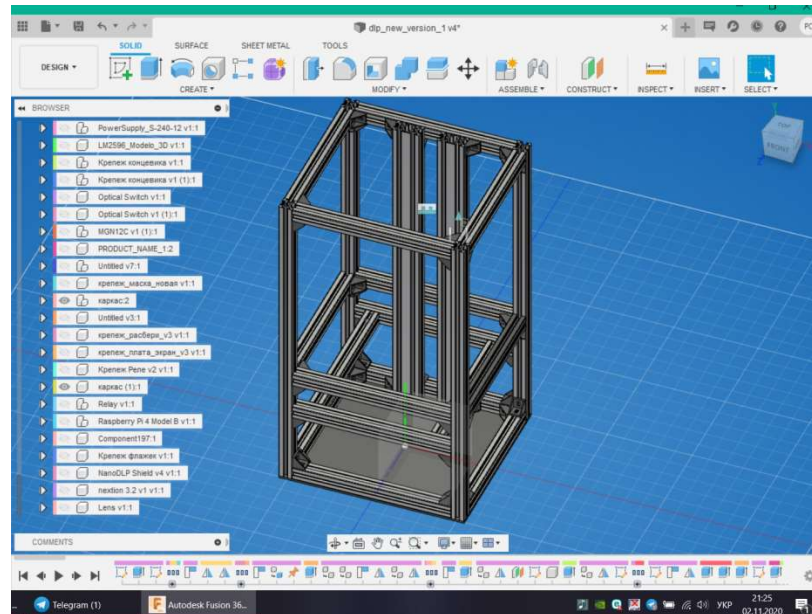


Рисунок 3.6 – Модель з встановленим кріпленням для світлодіодною матрицею

Розроблена система переміщення осі Z, з використанням лінійних направляючих та ШВП згідно кресленикам (рис. 3.7).

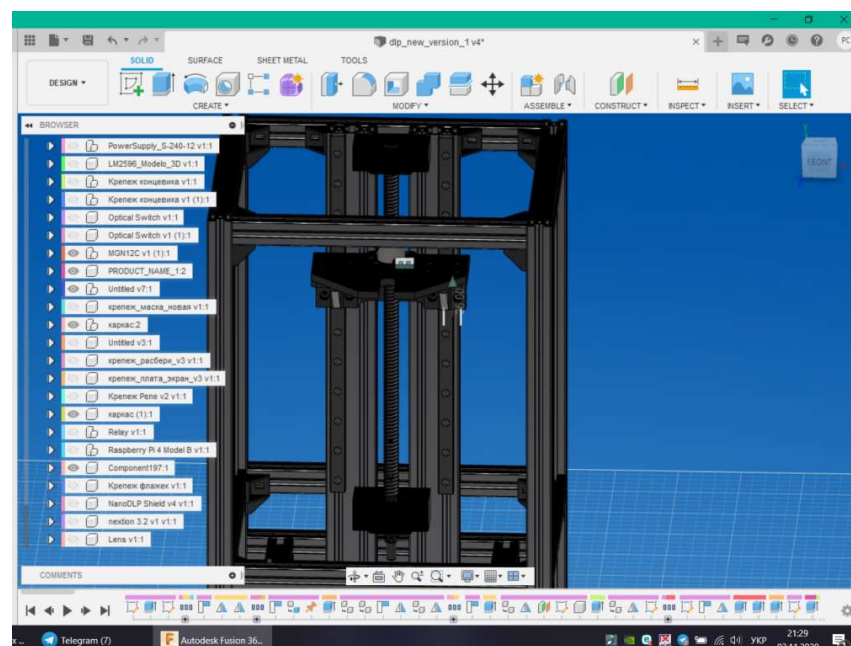


Рисунок 3.7 – Система переміщення осі Z

Встановлення електроніки в електронній моделі дає можливість оптимізувати кількість зайнятого місця електронікою та покращити термічні характеристики.

Розташування компонентів в корпусі зображено на рис. 3.8.

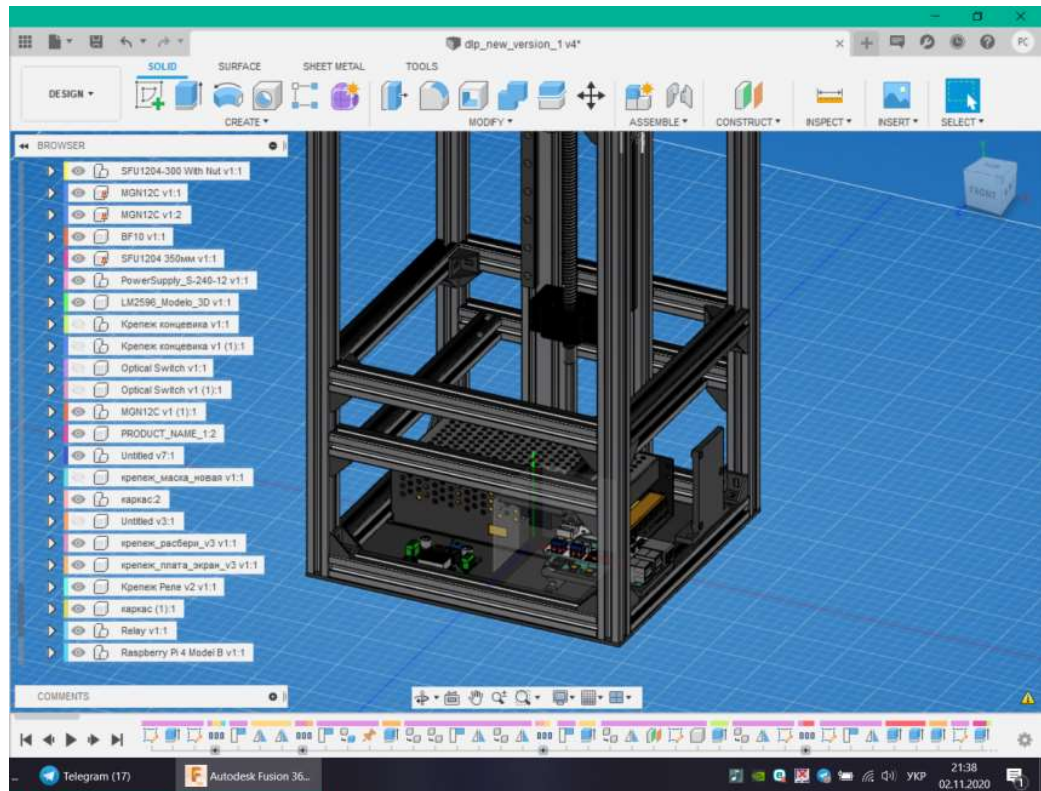


Рисунок 3.8 – Встановлена електроніка в корпусі принтера

Зменшення розмірів принтера можливе лише при використанні меншого блока живлення.

### 3.3 Розробка власних моделей для 3D-принтера

Для встановлення електроніки були розроблені моделі кріплень, на які встановлюються електронні компоненти без корпусу, які мають кріплення, що розраховані під верстатний профіль та розташування в принтері, це дало можливість збільшити варіативність встановлення компонентів в корпусі. Прикладом може слугувати розроблене кріплення під Raspberry Pi 4 (рис. 3.9).

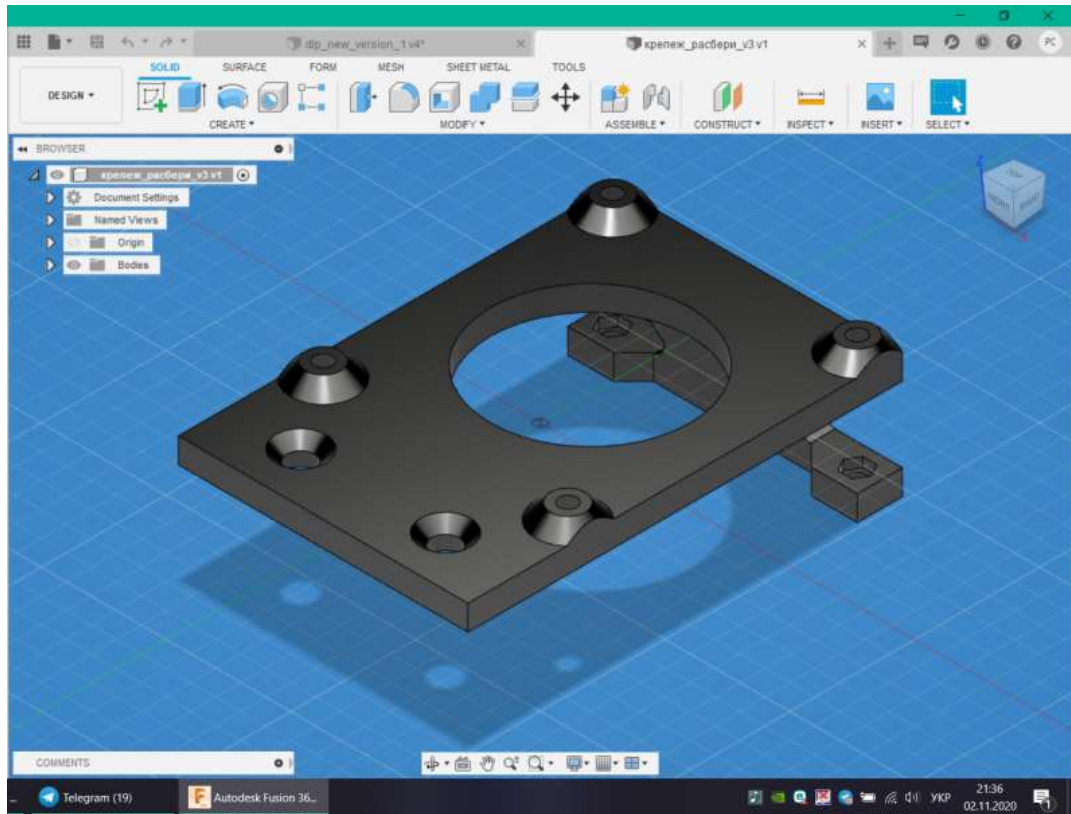


Рисунок 3.9 – Кріплення Raspberry Pi 4

Система експонування складається з світлодіодної матриці та екрана. Для екрана було розроблено кріплення, яке має форму, що повторює екран, має місце для встановлення ванни та має можливість кріплення до верхньої пластини, (рис. 3.10).

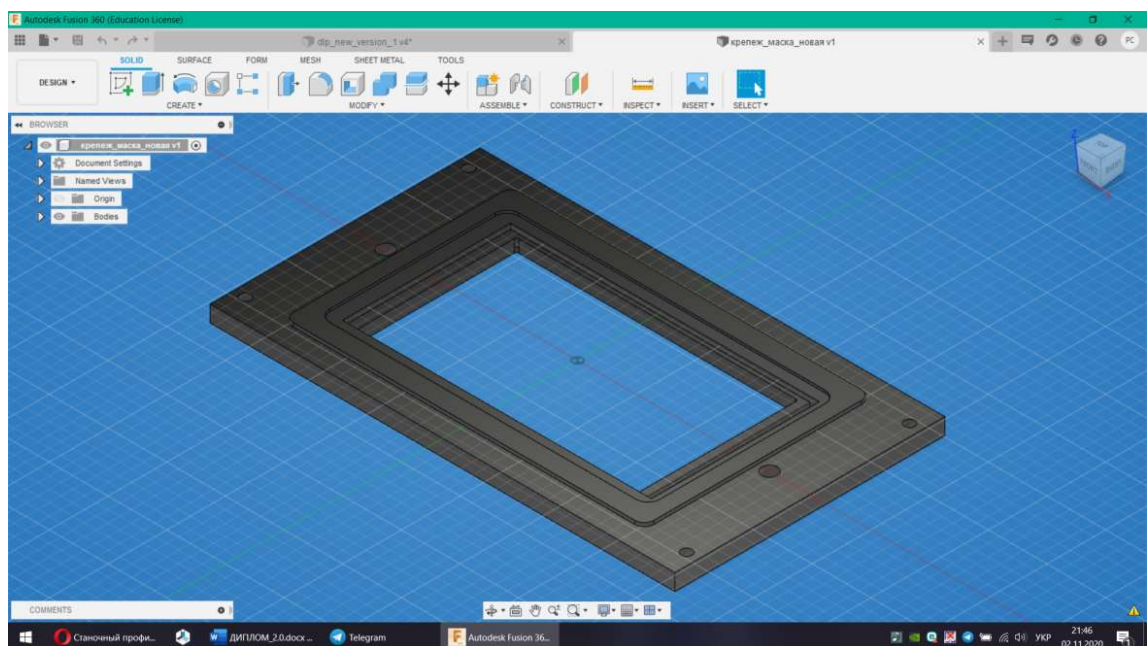


Рисунок 3.10 – Кріплення для екрана

Встановлені матриця, пластина та кріплення під екран зображені на рис. 3.11.



Рисунок 3.11 – Модель принтера зі встановленою матрицею та кріпленням для екрану

Також були розроблені унікальні моделі для кріплення двигуна (рис. 3.12).

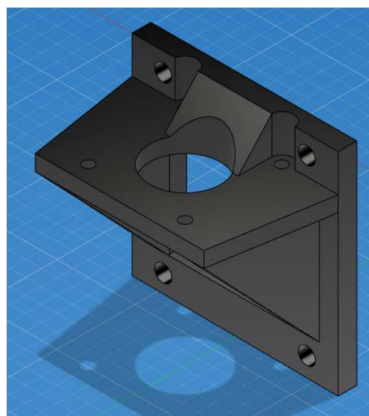


Рисунок 3.12 – Кріплення для крокового двигуна на два верстатних профіля 20×40 мм

Для осі Z було розроблено каретку, яка переміщує ось Z (рис. 3.13).

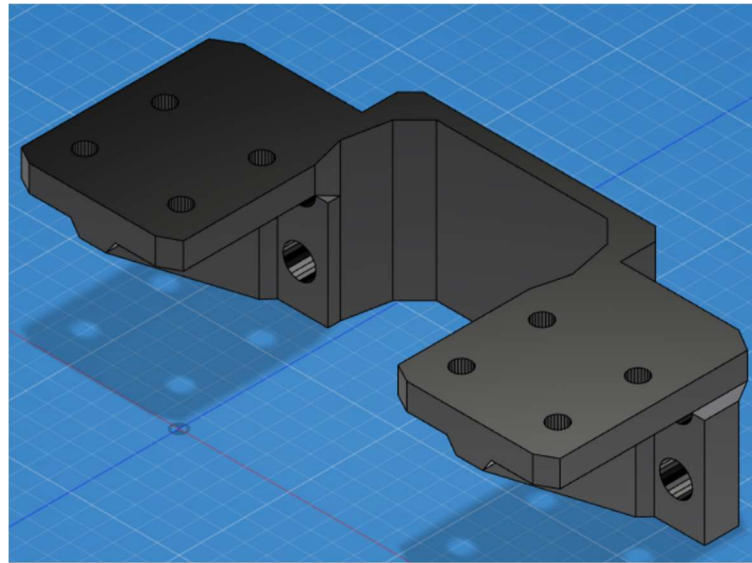


Рисунок 3.13 – Каретка осі Z

В результаті використання моделей стандартних та розроблених унікальних, які підходять лише під даний принтера було побудовано модель, згідно якої можливо побудувати фізичний макет принтеру

Він дає можливість зрозуміти основні розміри, напрямок виготовлення, кількість складових частин та їх розташування, що значно прискорює швидкість виготовлення макету, сприяє кращій повторюваності побудови аналогів. Дає можливість побудувати багатосерійне виробництво.

### 3.4 Виготовлення діючого прототипу

Для побудови нового макету потрібно проаналізувати попередній макет та його будову. Так як макет був у використанні деякий час, було отримані статистичні дані його використання, проаналізувавши які, можливо покращити характеристики принтера, шляхом його реконструювання.

Блок-схема попереднього макета зображена на рис. 2.7.

Схема складається з плати управління Arduino Mega 2560 зі встановленою платою розширення RAMPS 1.4. Плата розширення дає можливість

встановлювати та використовувати крокові двигуни, систему охолодження, кінцеві вимикачі та під'єднати до керованого живлення світлодіодну матрицю.

Плата розширення з вказанням його фізичних пінів та їх призначенням зображена на рис. 3.14.

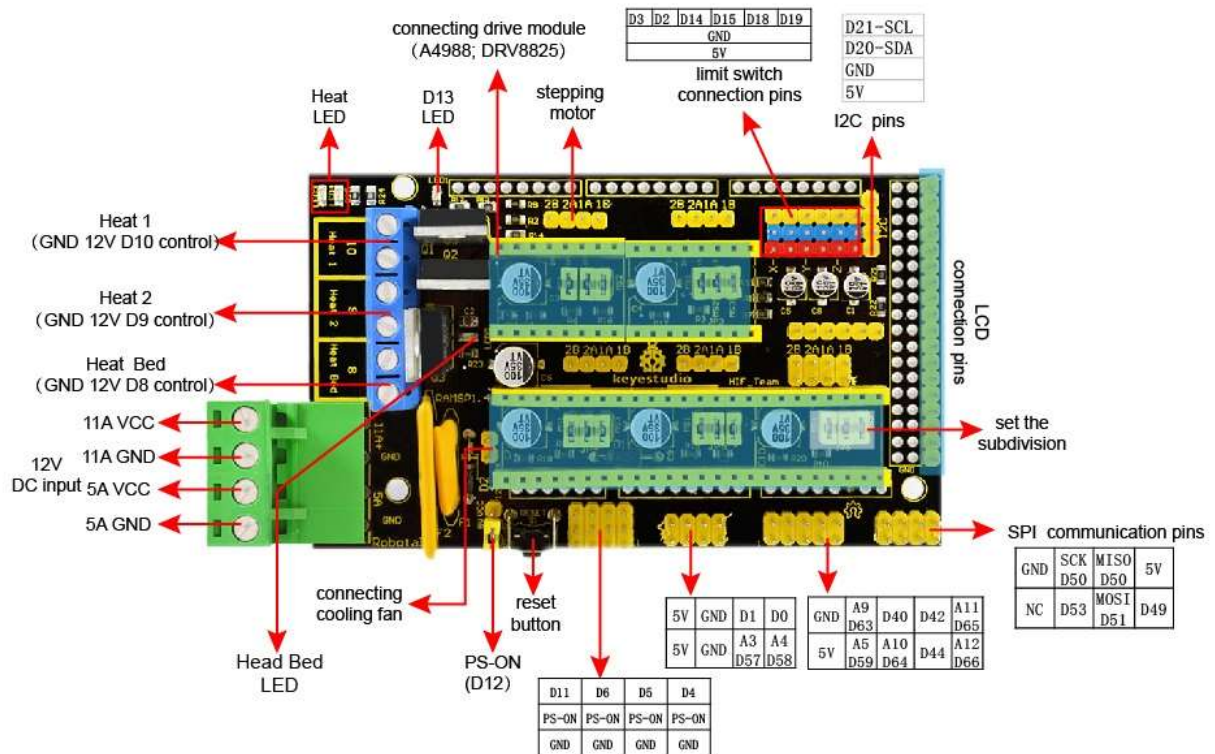


Рисунок 3.14 – Плата розширення RAMPS 1.4

До плати розширення можливо під'єднати світлодіодну матрицю в роз'єми HeatBed, що дає можливість керувати напругою на даному виході та надавати повну потужність для світлодіодної матриці (рис. 2.8).

Кроковий двигун керується за допомогою драйверу крокового двигуна, що може ділити повний крок двигуна на частини, мінімальна частина для встановленого драйверу TMC 2108 є 1/256 мікрокрока.

Таким чином зі встановленим драйвером та використанням ШВП мінімальна товщина шару, що можливо отримати при друці може становити від 10 мкм.

Драйвер TMC 2108 зображений на рис. 3.15.

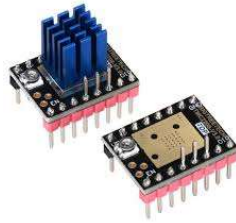


Рисунок 3.15 – Драйвер крокового двигуна TMC2208

Схема підключення драйверу зображена на рис. 3.16.

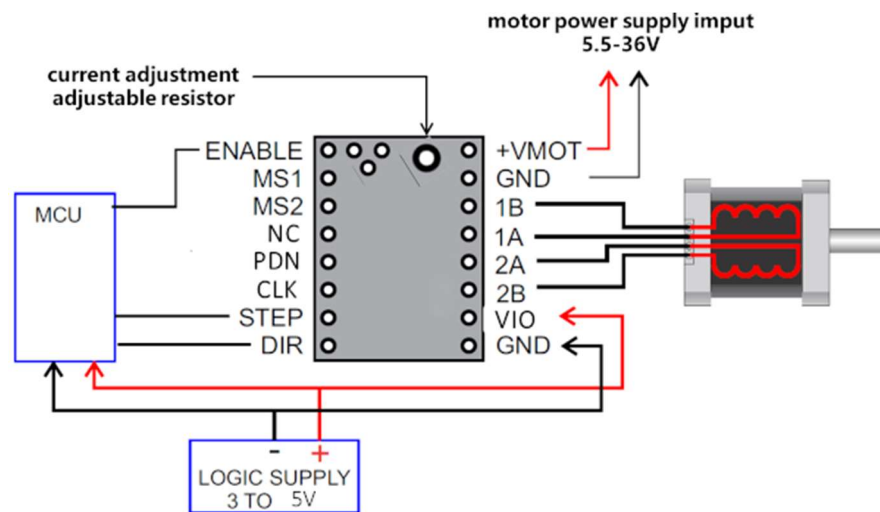


Рисунок 3.16 – Схема підключення драйверу TMC2208

Кінцеві вимикачі використовувалися механічні. Даний тип вимикачів можливо використовувати лише при відносній системі координат, коли переміщення відбувається на якість, конкретно визначене значення. Даний параметр може налаштовуватися в прошивці плати. (рис. 3.17).



Рисунок 3.17 – Механічний кінцевий вимикач

Система відображення шару моделі складається з плати управління екраном, що має роз'єм живлення та HDMI, який підключається до пристрою,

може відправляти зображення, керування екраном відбувається через шлейф та плату перехідник на роз'єм екрана. Дана система зображена на рис. 3.18.



Рисунок 3.18 – Система відображення шарів

Для можливості підключення комп'ютера до виконавчих модулів принтера були використані кабелі – подовжувачі HDMI та USB, що були виведені на передню панель принтера, кінцевий вимикач було прийняте рішення використовувати лише один в максимальній координаті осі Z, що знаходилась зверху, це дало можливість мати високу точність переміщення до встановленої нульової точки. Це дало можливість зменшити кількість калібрувань платформи.

Таким чином було поєднано всі компоненти та встановлені в корпус (рис. 3.19).



Рисунок 3.19 – Зображення фотополімерного принтера зі встановленою електронікою

Після вдосконалення принтера було змінено плату керування, світлодіодну матрицю, кінцеві вимикачі, перетворювач напруги та блок живлення. Додали реле керування світлодіодною матрицею. Оптимізовано та зменшено місце зайняте електронікою, змінено конструкцію та зменшено розмір корпусу.

Так як попередня модель принтера мала конструкційні недоліки: можливість керування лише за допомоги зовнішнього пристрою, за рахунок використання однієї лінійної направляючої та ШВП мала недоліки системи переміщення, що впливало на якість надрукованих моделей, було прийняте рішення вдосконалити принтер, змінивши спосіб управління на пристрій, що не потребував зовнішнього підключення комп'ютера, мав можливість встановлення екрану для керування переміщенням та екраном, мав можливість підключення зовнішніх USB-накопичувачів. Також, щоб мав можливість відображати на екран відображення шару чітких зображень у високій роздільній здатності. Під дані вимоги підходять лише декілька варіантів. Першим варіантом є використання спеціалізованих плат, таких як ChiTu (рис. 2.24), що були розглянуті у другому розділі, та інших плат побудованих по такому принципу, або використовуючи мікрокомп'ютери.

Мікрокомп'ютери порівняно з спеціалізованими платами мають більше переваг, як у варіативності використання, бо плати що зроблені для даних принтерів мають лише одну прошивку, що є недоліком, бо робота плати буде залежати від підтримки розробників, може мати мало налаштувань, що не зможуть дати можливості досягти високої ефективності у використанні, можуть мати елементи, що будуть не підходити до поточного обладнання, або будуть потребувати додаткових налаштувань. Прикладом можуть слугувати екрани для управління. Для кожної плати існує лише один екран, який також має власну прошивку.

Використання мікрокомп'ютерів задовольняє всім потребам, таким як можливість власного налаштування, варіативність використання програмного забезпечення, наявність роз'ємів для використання USB-накопичувачів.

Наявність операційної системи Linux дає можливість використовувати відкрите програмне забезпечення, що також є перевагою. Для керування

виконавчими пристроями, такими як світлодіодна матриця, кроковий двигун та кінцеві вимикачі існує спеціальна плата, що використовує піни GPIO мікрокомп'ютера. Вона має роз'єми для підключення драйвера крокового двигуна, самого крокового двигуна, світлодіодну матрицю та кінцеві вимикачі та має роз'єми для встановлення вентиляторів охолодження.

Таким чином було прийняте рішення використовувати мікрокомп'ютера Raspberry Pi 4 з платою розширення NanoDLP.

Використання плати розширення NanoDLP можливе лише при використанні сервера NanoDLP, що керує переміщенням двигуна та іншими виконавчими засобами через піни GPIO Raspberry що були зображені на рис. 2.20 у другому розділі.

Для вибору даного засобу було проаналізовано його можливості та особливості і було визначено що його використання є доцільним та рекомендованим.

Так як для керування Raspberry потрібне використання екрану було проаналізовано наявність існуючих екранів та можливість їх підключення до плати розширення NanoDLP. Зображення плати розширення NanoDLP можливо побачити на рис. 3.20.

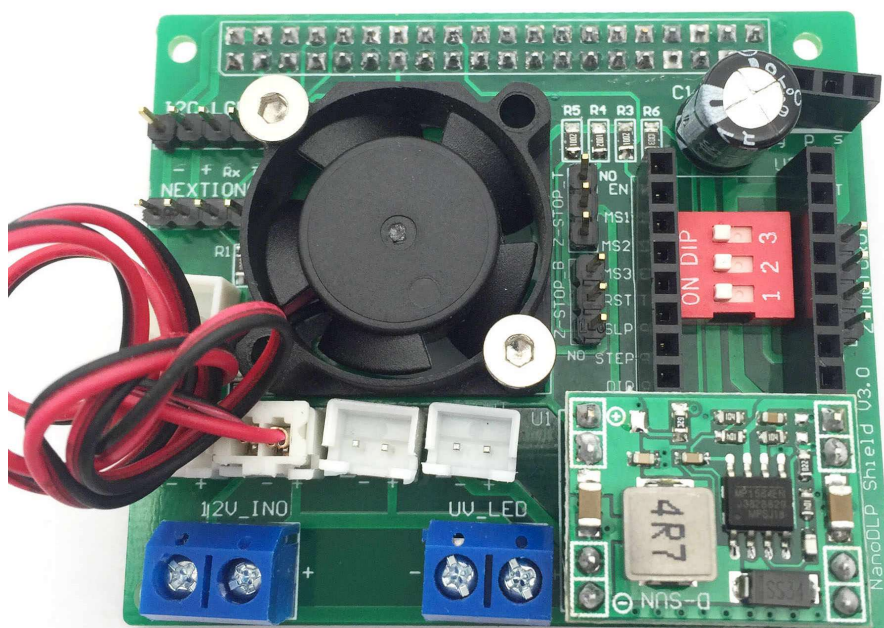


Рисунок 3.20 – Плата розширення NanoDLP

Плата дає можливість підключення двох типів екранів. Першим є екрани I2C. Це екрани, що мають монохромне зображення та відсутній сенсорний екран, що дає можливість лише відображати кількість шарів друку та час закінчення без можливості керування, керування відбувається через web-інтерфейс принтера. Даний екран зображений на рис. 3.21.



Рисунок 3.21 – Екран I2C-1602

Іншим можливим екраном для принтера може бути екрани Nextion, що мають можливість керування за допомогою сенсорного екрану, мають вбудований процесор з можливістю встановлення прошивки з інтерфейсом керування. Даний екран зображений на рис. 3.22.



Рисунок 3.22 – Екран Nextion NX4832T035

Таким чином було зроблено вибір на якість екрану Nextion. Підключений екран до Raspberry зображено на рис. 3.23.

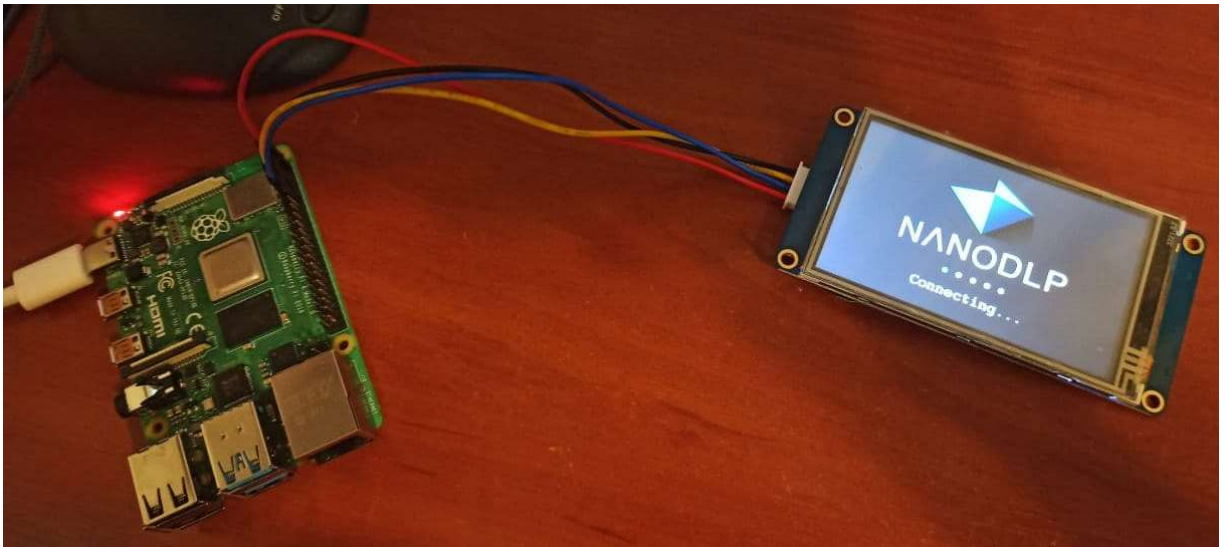


Рисунок 3.23 – Зображення підключеного екрану до Raspberry Pi 4

Схема підключення зображена на рис. 3.24.

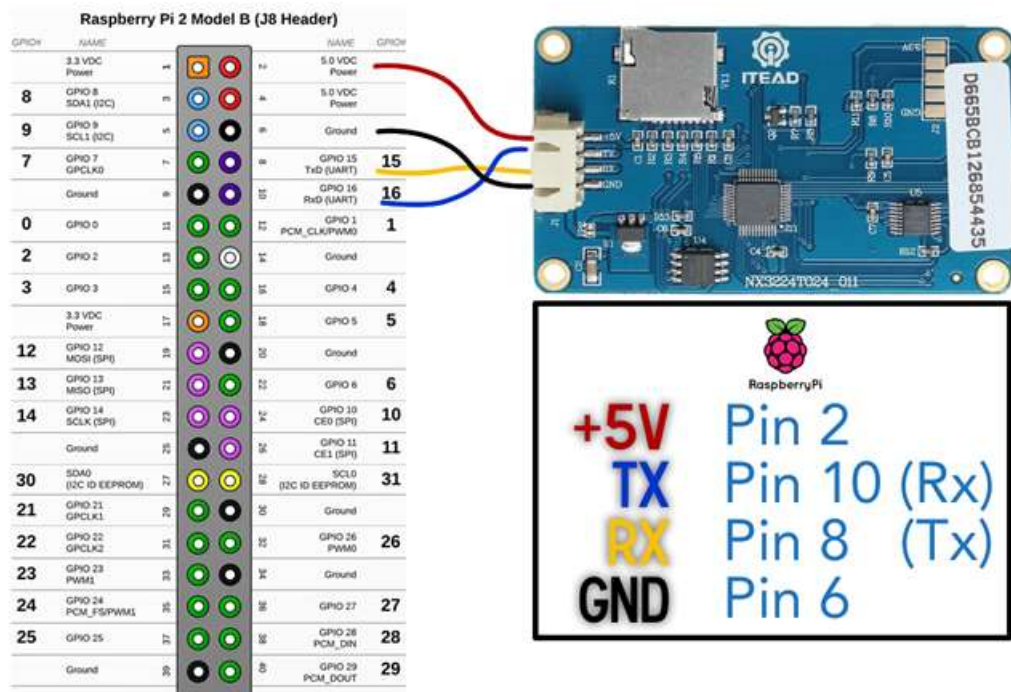


Рисунок 3.24 – Схема підключення екрану до Raspberry Pi 4 через GPIO

В процесі вдосконалення принтера було прийняте рішення замінити механічні кінцеві вимикачі на оптичні (рис. 3.25), які мають більшу точність, та

за рахунок особливостей управління через плату розширення дало можливість прямого керування без значних відхилень значень висоти від встановленої. Також встановлення нижнього кінцевого вимикача дало можливість зменшити потенціальну небезпеку програмного збою, що може призвести до поломки екрану.



Рисунок 3.25 – Оптичний кінцевий вимикач

Далі було замінено систему експонування фотополімеру на світлодіодну матрицю з кварцовими лінзами (рис. 2.15).

Дана система має потужність 72 Вт, напруга даної матриці становить 50 В та струм 1.5 А. Таким чином загальне живлення складає 12В, тому є потреба у використанні перетворювача напруги. В результаті було вибрано перетворювач на 150 Вт, що може регулювати вихідну напругу та струм з максимальним струмом 1.5 А та напругою до 50 В. Даний перетворювач розроблений на алюмінієвій основі, що слугує для відводу температури (рис. 3.26).

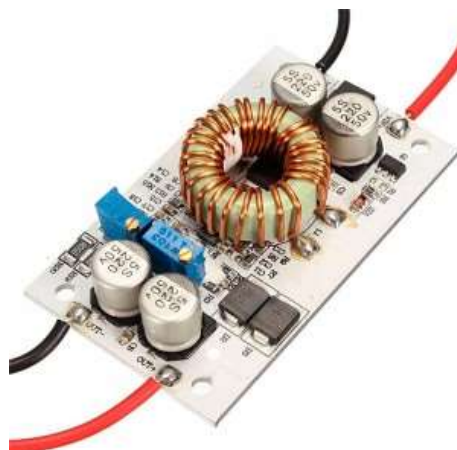


Рисунок 3.26 – Перетворювач напруги

Драйвер крокового двигуна залишився незмінним, бо TMC2208 повністю задовольняє потребу у точності переміщення.

Система відображення шару моделі залишилась незмінною, вона також задовольняє мінімальним технічним вимогам точності відображення моделі по осям ХУ.

Блок живлення відповідно до зміни вживаної потужності було прийнято рішення замінити на більш потужний. Так як 120 Вт для роботи принтеру не вистачало, в наявності був блок живлення, що мав 360 Вт. Таким чином він був встановлений.

Таким чином всі електронні компоненти підключені до Raspberry Pi 4 можливо побачити на рис. 3.27.

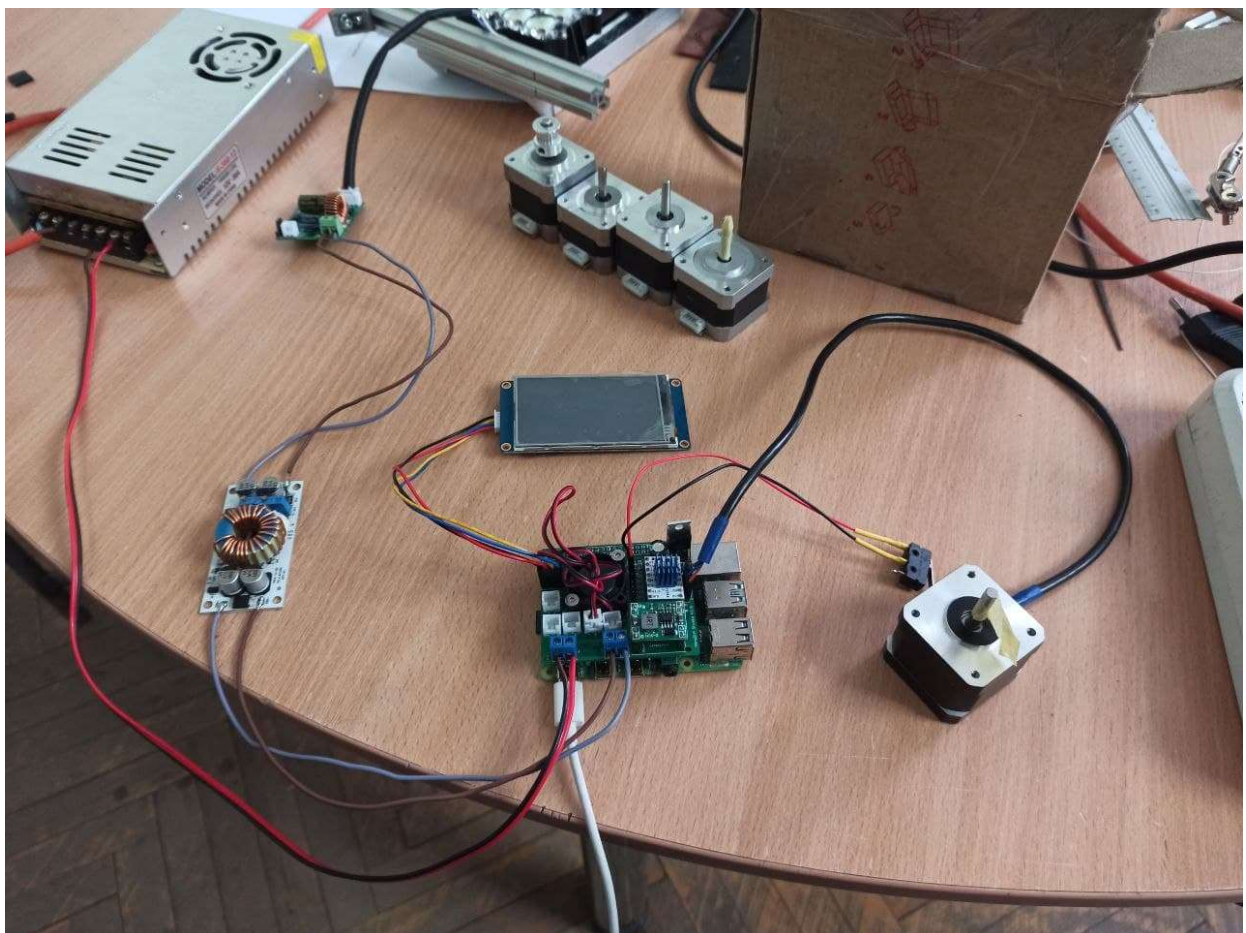


Рисунок 3.27 – Підключені електронні компоненти до Raspberry Pi 4

Схема підключення компонентів до плати розширення NanoDLP зображено на рис. 3.28.

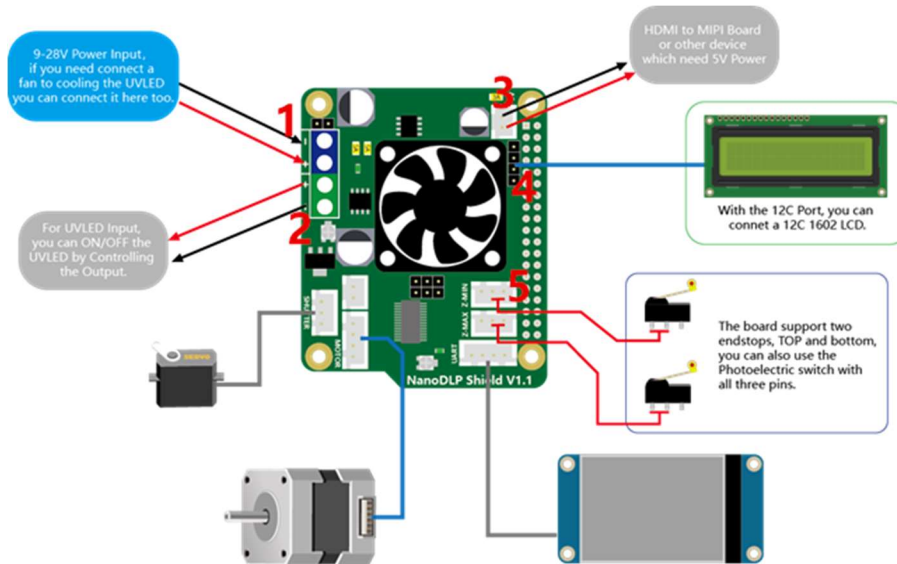


Рисунок 3.28 – Схема підключення електроніки до NanoDLP

В результаті всіх операцій, що були проведені з принтером з'явився новий принтер з унікальною конструкцією, який на проміжній стадії вдосконалення зображений на рис. 3.29.



Рисунок 3.29 – Оновлений принтер, що використовує Raspberry Pi 4 та RAMPS 1.4 з Arduino Mega 2560

Після заміни RAMPS 1.4 з Arduino Mega 2560 на NanoDLP було прийняте рішення закорпусувати принтер, використовуючи прозорий полікарбонат, що не пропускає ультрафіолетове випромінювання як із зовні, так і із корпусу в зовнішнє середовище.

Таким чином кінцевий зовнішній вигляд принтера зображений на рис. 3.30.



Рисунок 3.30 – Зовнішній вигляд принтера

### 3.5 Порівняльний аналіз результатів вдосконалення

В результаті вдосконалення було змінено оснівні електронні модулі, що відповідали за час експонування моделі, було змінено конструкцію системи переміщення осі Z, додали систему автономного та автоматичного керування.

Було встановлено нове програмне забезпечення, що забезпечило можливість поглибленого налаштування, за допомогою якого можливо налаштовувати слайсинг моделі, керування принтера та друк моделей з індивідуальними налаштуваннями, що вплинуть на результат друку.

Таким чином, модель надрукована на попередньому макеті зображено на рис. 3.31.



Рисунок 3.31 – Модель надрукована на принтера

Модель зображена на рис. 3.31 мала розміри 60 мм у висоту, друкувалась 12 годин з 50 секундами на кожний звичайний шар та з 120 секунд базових шарів при товщині шару 50 мкм.

В якості матеріалу використовувався чорний фотополімер MonoFilamen Basic. На моделі чітко видно зміщення шарів, що дає шершаву фактуру поверхні моделі.

Для нового варіанту принтера надрукована модель зображена на рис. 3.32.



Рисунок 3.32 – Модель надрукована на вдосконаленому принтера

Модель розміром 160 мм друкувалась 10 годин, розмір шару 100 мкм при часу експонування одного шару в 10 секунд звичайних шарів та 50 секунд базових шарів. Модель надрукована фотополімером PlexiWire синього кольору.

Модель має гладку поверхню, приємну на дотик. Твердість моделі оцінюється в 80 одиниць по Шору.

### 3.6 Проведення теплового аналізу радіатора світлодіодної матриці

Радіатор світлодіодної матриці є єдиним компонентом принтера, що має високу розсіювання тепла в корпусі 3D-принтера. Тепло радіатора впливає на компоненти, що знаходяться під радіатором, такими як блок живлення, мікрокомп'ютер Raspberry, перетворювач напруги, тощо.

Однак випромінювання основного потоку тепла, що генерується світлодіодами, відбувається і в гору. Таким чином тепловому впливу піддається LCD екран, який дуже чутливий до впливу на нього температури. Максимальна температура, до якої можлива стабільна праця екрану є 60° по Цельсію, після якої екран може вийти з ладу.

Одним з наслідків впливу температури може бути спотворення зображення, що відображається на екрані (рис. 3.33).

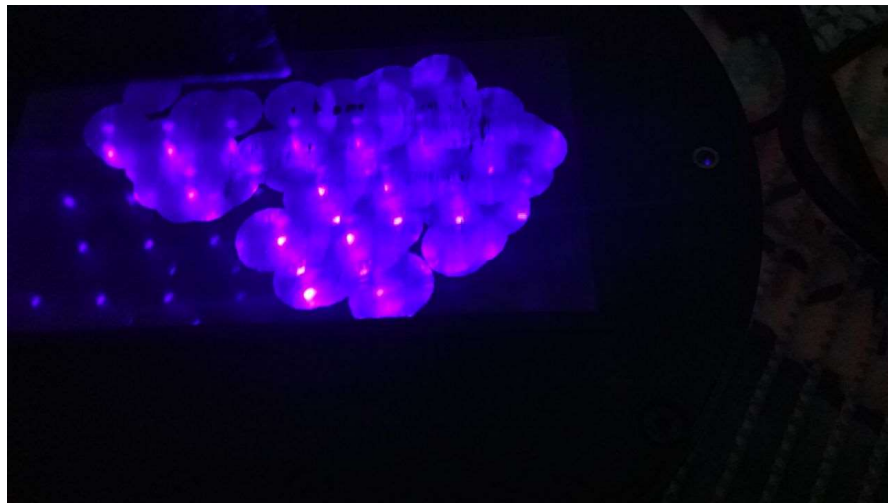


Рисунок 3.33 – Спотворення зображення на екрані

Для нівелювання даних недоліків використання світлодіодної матриці потрібно використовувати примусове охолодження. Для цього потрібно дізнатися розсіювану потужність світлодіодної матриці, що буде мати вираження у значенні температури. Для цього можливо промоделювати дану світлодіодну матрицю з використанням програмного забезпечення Autodesk Fusion 360.

Для моделювання використовується компонент Fusion 360 Simulation.

В результаті моделювання світлодіодної матриці з використанням радіатора, було отримано модель, що зображена на рис. 3.34.

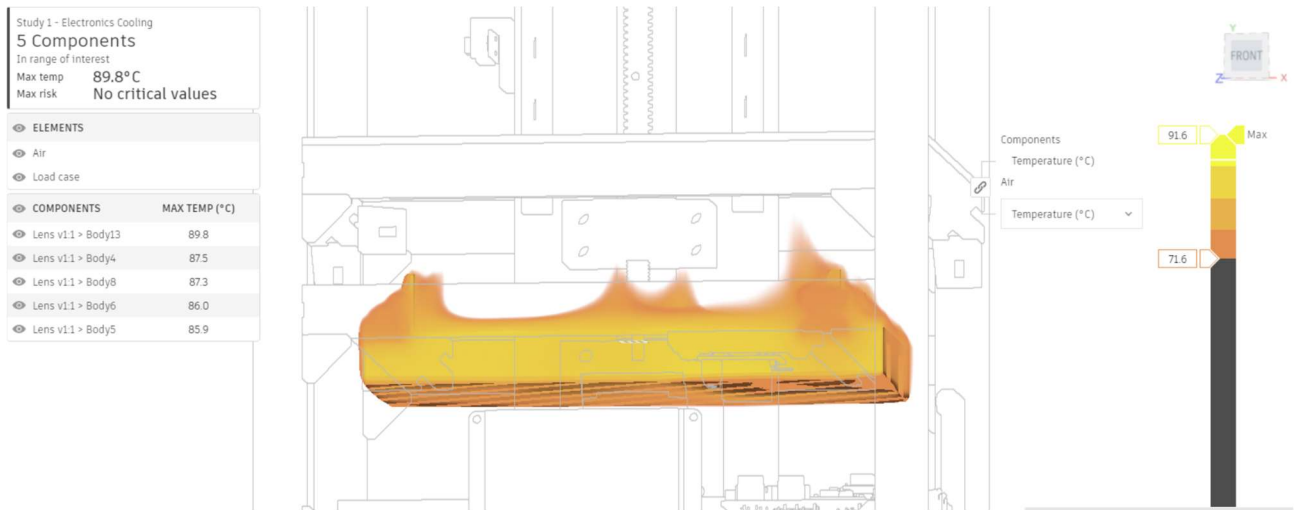


Рисунок 3.34 – Результат моделювання роботи світлодіодної матриці без примусового охолодження

Основне направлення випромінювання тепла направлене вгору (рис.3.35), таким чином основному впливу піддається екран.

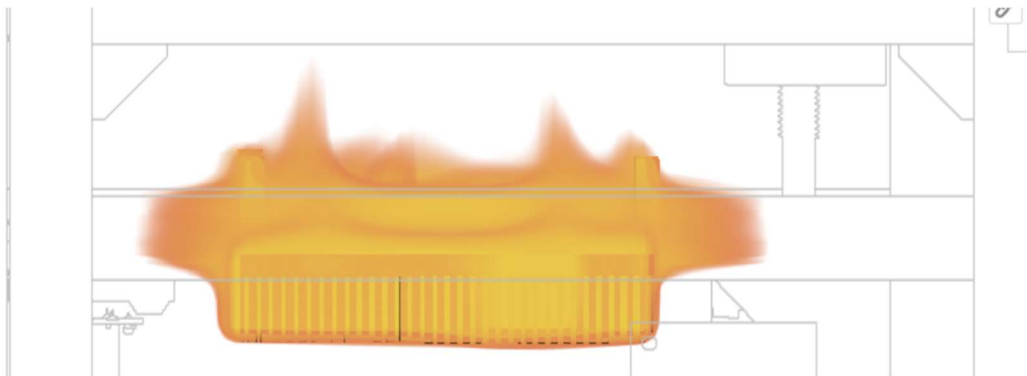


Рисунок 3.35 – Модель радіатора, вид сбоку

Середня температура, що виділяється без використання примусової вентиляції, при тривалому використанні світлодіодної матриці та при процесі друку без пауз становить 89° по Цельсію. Мінімальна температура при такому режимі роботи буде становить 71.6°. Максимальна температура, при якій світлодіодна матриця буде знаходитись в робочому стані становить 105° але час роботи даної матриці скоротиться на двісті тисяч годин.

Максимальна температура фіксується поряд з світлодіодами та становить  $91^{\circ}$  (рис. 3.36), для зменшення даного ефекту було прийняте рішення, додати в простір між світлодіодами та радіатором термопасту КПТ-8, яка збільшить провідність тепла від світлодіоду до радіатора.

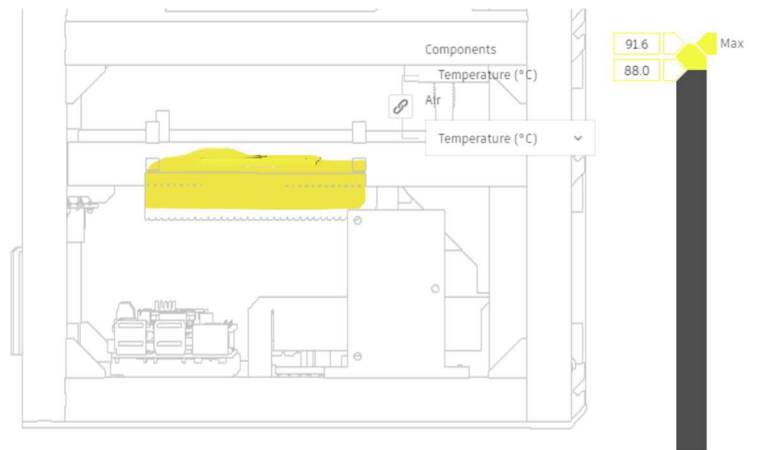


Рисунок 3.36 – Зображення температури в середині радіатора

При збільшенні температури, світлодіоди мають властивість зменшувати світловий потік випромінювання, що призведе до збільшення часу експонування фотополімерної смоли.

Для даного типу світлодіодів час життя світлодіодів в залежності від температури зображений на рис. 3.37.

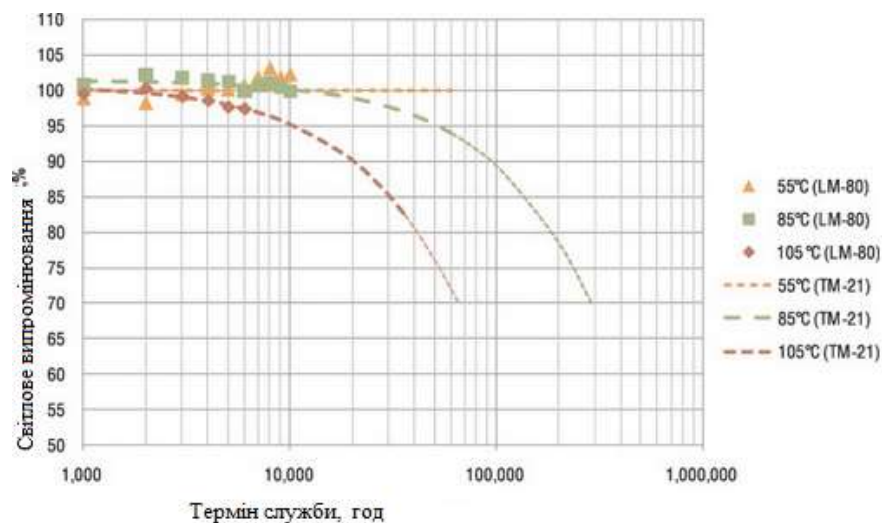


Рисунок 3.37 – Графік залежності терміну служби від температури

У зв'язку з тим, що в результаті комп'ютерного аналізу термічного впливу ультрафіолетової світлодіодної матриці на електронні компоненти принтера, було виявлено, що температура, що розсіюється з світлодіодної матриці може впливати на екран, що відповідає за відображення моделі, та може мати деградацію у зв'язку з впливом на нього температури, необхідно забезпечити систему примусової вентиляції екрана та конвекції повітря в області між світлодіодною матрицею та екраном.

Для цього було розроблено конструкцію кріплення вентиляторів та встановлена у корпус фотополімерного 3D-принтера. Кріплення зображене на рис. 3.38.

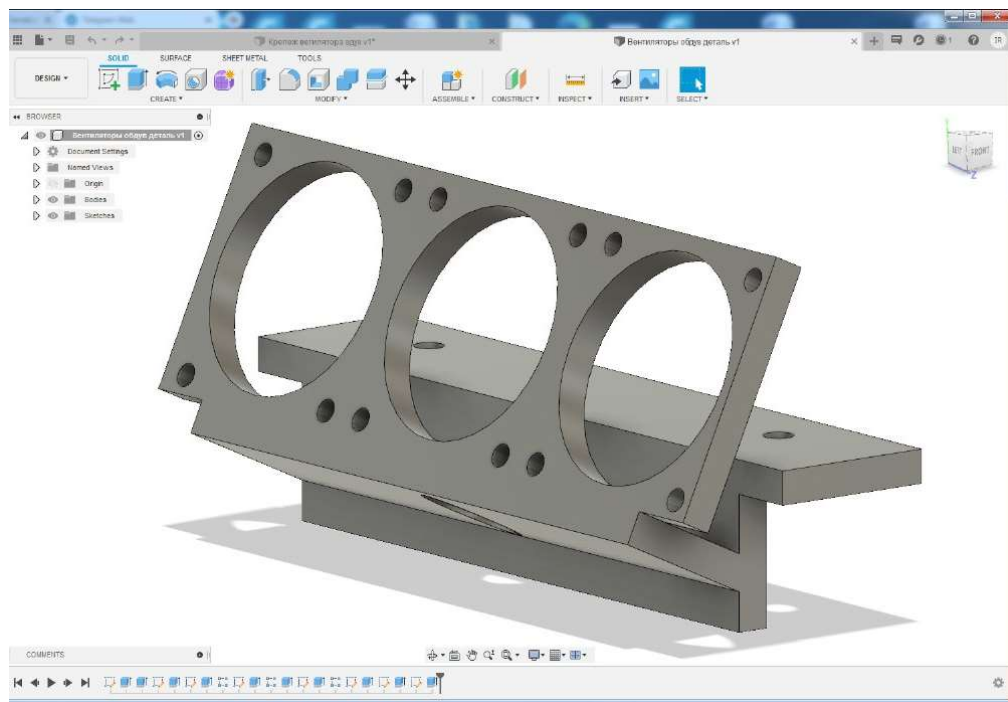


Рисунок 3.38 – Кріплення вентиляторів для охолодження екрану

Таким чином в результаті температурного аналізу радіатора з світлодіодною матрицею, було прийняте рішення встановити 3 вентиляторів 40×40, які мають потік повітря 11,9 м<sup>3</sup>/год з направленням повітряного потоку в корпус принтера під кутом у 45°, що дасть охолодження екрану до необхідної температури.

Також було прийняте рішення встановити один вентилятор 80×80 з потоком повітря 62.8 м<sup>3</sup>/год поряд з радіатором, з потоком, що буде виходити

назовні та забирати надлишок тепла із корпусу принтера. Для цього було розроблене кріплення, зображене на рис. 3.39.

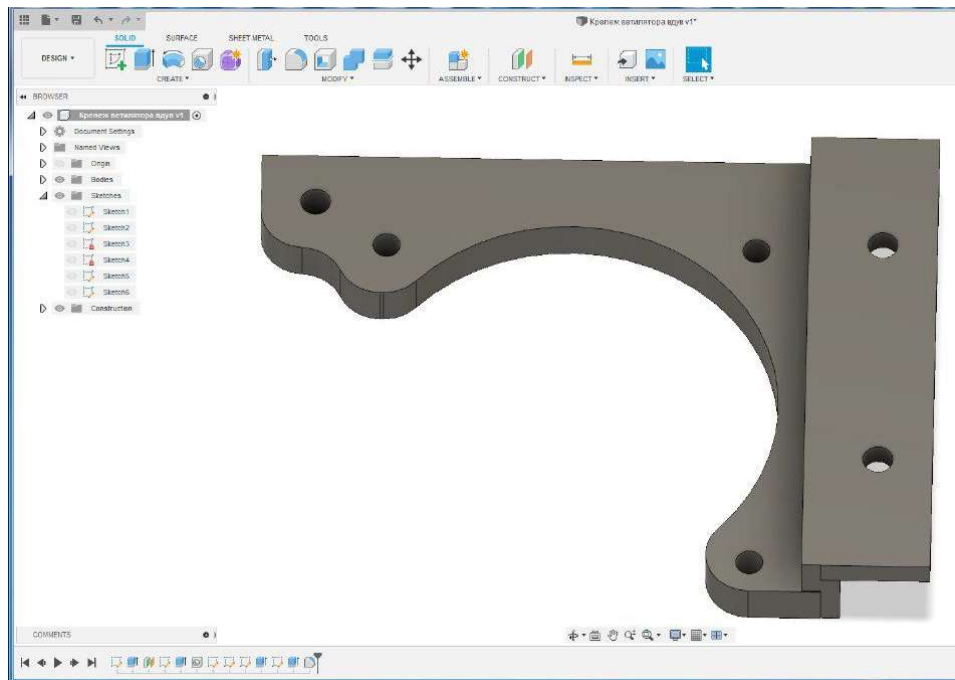


Рисунок 3.39 – Кріплення вентилятора для виводу теплого повітря із корпусу принтера

### 3.7 Висновки до третього розділу

В результаті виконання третього розділу було створено 3D-модель принтера з використанням готових 3D-моделей та моделей що були розроблені самостійно.

Була виконана фізична зборка макету принтера, встановлена електроніка та програмне забезпечення, проведено налаштування.

Так як в корпусі принтера є елементи, що при роботі виділяють дуже багато тепла, було виконано комп'ютерне моделювання теплових процесів в корпусі принтера, в результаті якого було виконане встановлення примусової вентиляції в корпус з додатковим охолодженням екрану.

## 4 АНАЛІЗ ФАКТОРІВ ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ДРУКУ

### 4.1 Аналіз факторів, що впливають на якісні показники друку

Моделі, надруковані на фотополімерному принтері можуть мати різні розміри, різну поверхню та можуть мати інші дефекти, що змінять зовнішній вигляд моделі.

Прикладом може слугувати модель зображена на рис. 4.1.



Рисунок 4.1 – Дефект друку, при якому модель має деламіновану поверхню

Ці та інші дефекти залежать від налаштувань принтера, від калібрування платформи, від плівки з ванни, від електроніки тощо.

Якісні показники друку моделі включають в себе такі параметри:

- відповідність кінцевого розміру до вихідного;
- встановлена шорсткість.

Встановлена шорсткість залежить від розміру кожного шару моделі, чим менше шар моделі, тим гладка буде поверхня. Даний параметр може залежати від використаного матеріалу. Фотополімер має різні властивості і різні особливості експонування.

## 4.2 Параметри друку для дослідження

Параметри друку моделей встановлюються в ПЗ NanoDLP та задаються в налаштуванні профілей (рис. 4.2).

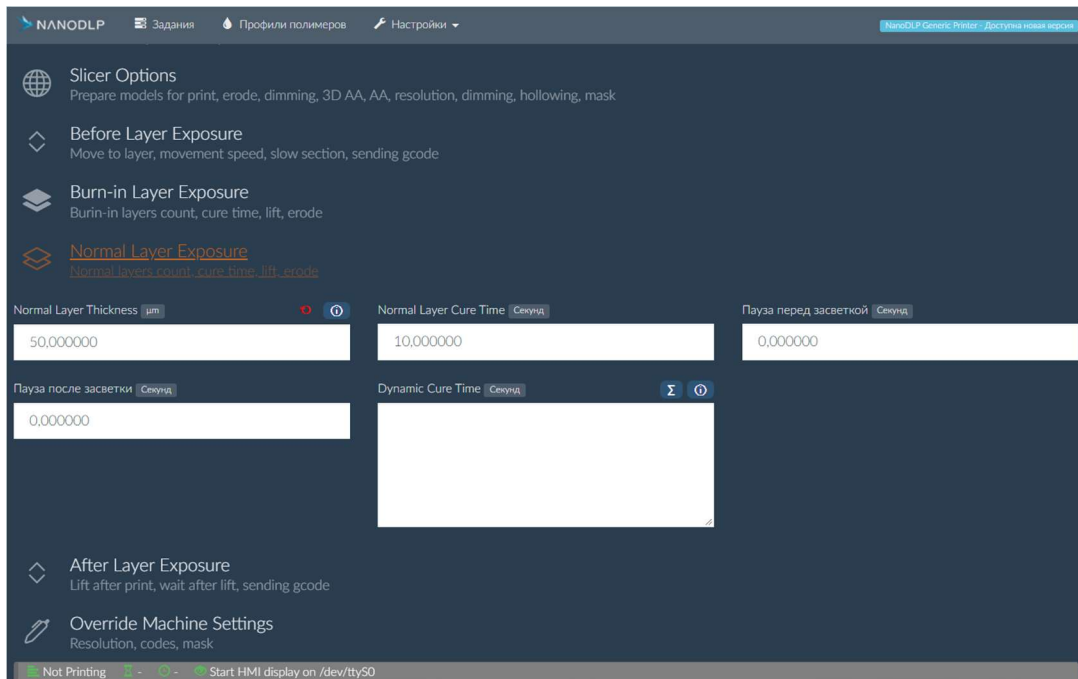


Рисунок 4.2 – Налаштування профілю фотополімера в NanoDLP

В профілі задаються такі параметри:

- налаштування часу експонування базових шарів;
- кількість базових шарів;
- товщина шару друку базових шарів;
- товщина друку звичайних шарів;
- налаштування часу експонування звичайних шарів;
- висота підйому перемішування;
- швидкість підйому перемішування;
- налаштування Anti-Aliasing;
- встановлення підйому після деякої кількості шарів;
- встановлення згладжування.

### 4.3 Вплив часу експонування на модель

Час засвітлення базових та звичайних шарів мають дуже значний вплив на кінцеву якість моделі. Дані параметри визначають наскільки якісна буде адгезія до платформи в базових шарах та міжшарова для звичайних шарів. При меншому часі експонування базових шарів модель може деламінуватися від поверхні платформи та залишитись на дні ванни, або можливо часткове деламінування, що змінить геометрію друкованої моделі. При високому часі експонування базових шарів може бути сильна адгезія до робочої платформи, що ускладнить зняття моделі та виникне низька адгезія до наступних шарів. Прикладом може слугувати рис. 4.3.

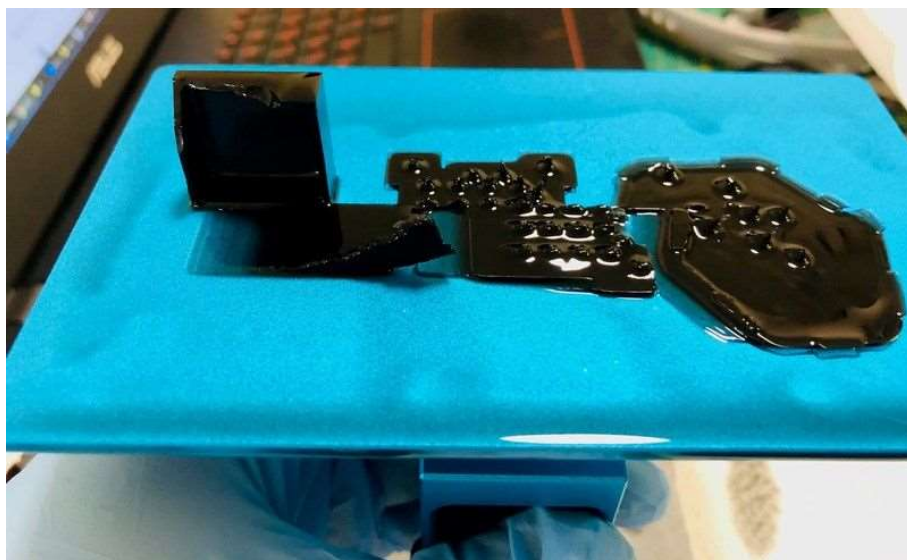


Рисунок 4.3 – Деламінація звичайних шарів моделі

Для різних фотополімерів час експонування як базових шарів так і звичайних є різним. Також час експонування залежить від кольору фотополімера, за рахунок різної кількості пігментів, що містяться в фотополімері.

Якщо час експонування дуже великий, тоді адгезія до шарів та моделі становиться краще але відбувається запливання дрібних деталей, так зване паразитне засвітлення (рис. 4.4). Паразитне засвітлення може бути як по осям ХУ та і по осі Z. Даний недолік також залежить від системи експонування принтера,

тобто під яким кутом буде виконане експонування фотополімеру. Також при великому часі експонування розміри моделі збільшуються.

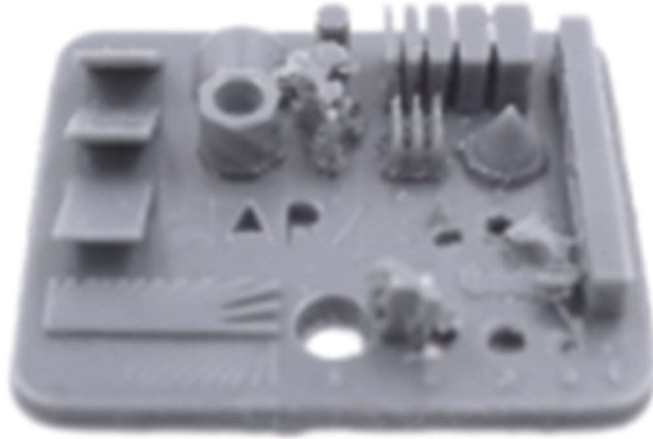


Рисунок 4.4 – Модель надрукована з надмірним часом експонування

Недостатній час експонування може дати модель без деламінування з більш чіткими дрібними деталями але можуть зменшитися розміри самої моделі та деякі елементи можуть не надрукуватися (рис. 4.5).



Рисунок 4.5 – Модель надрукована з малим часом експонування

Таким чином потрібно знайти час друку звичайних шарів, які дали модель, що мала дрібні деталі та не змінила свій розмір (рис. 4.6).



Рисунок 4.6 – Модель надрукована з нормальним часом експонування

Для аналізу часу експонування існують тестові моделі, що мають різні геометричні фігури, текст та цифри. Вони дають можливість швидко визначити необхідний час експонування за короткий час. Також для аналізу часу експонування в ПЗ NanoDLP є функція, що дає можливість друкувати тестові моделі на одній робочій платформі з різним часом експонування звичайних шарів. Працює така функція таким чином, що спочатку всі моделі відображуються на екрані під час експонування, потім після проходження мінімального часу експонування, одна з зображуваних моделей зникає і таким чином проходять всі моделі, далі платформа змінює своє положення і все починається спочатку (рис. 4.7).

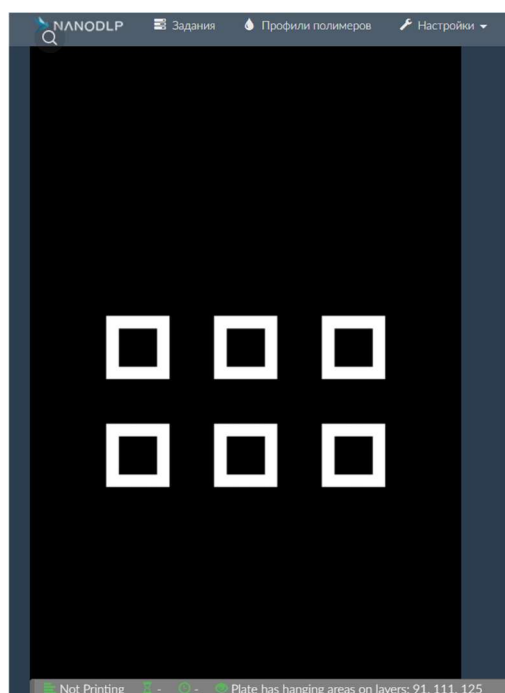


Рисунок 4.7 – Друку тестової моделі

#### 4.4 Вплив кількості базових шарів на кінцеву якість моделі

Базові шари зазвичай друкуються з більшим часом експонування, таким чином, якщо звичайні шари моделі друкуються з часом 8 секунд, базові шари будуть друкуватися з часом експонування в 40 секунд. Базові шари слугують для кращої адгезії до платформи, але є ще одна функція даних шарів. Вони нівелюють недоліки калібрування площини робочої поверхні відносно плівки ванни та екрану. Прикладом використання малої кількості базових шарів з малим часом експонування слугує рисунок 4.8.



Рисунок 4.8 – Зміна геометрії моделі при використанні недостатньої кількості базових шарів з малим часом експонування

Також цей параметр дуже важливий при великих розмірах друкованої області, тоді дані шари при великій кількості, зможуть витримувати більшу вагу.

#### 4.5 Вплив функції перемішування на якість друку

Перемішування є одним з найважливіших етапів друку моделі. Робота перемішування полягає в підйомі після друку і різкому опусканні в фотополімер.

Дана функція залежить від властивостей фотополімеру та наявності плівки на ванні. Фотополімер є рідкою речовиною, що має власну густину, яка після експонування шару повинна відновити покриття всієї площини ванни. Якщо

убрати переміщення можливі випадки коли при друці будуть пропускатися шари або модель залишиться на ванні.

Вплив плівки полягає в можливості її розтягнення. При друці адгезія фотополімера до плівки дуже велика і при підйомі платформи, плівка має властивість розтягуватися на деяку величину. При недостатній висоті перемішування плівка розтягується але модель від неї не відривається. Таким чином модель буде мати вигляд, зображений на рис. 4.9.



Рисунок 4.9 – Модель надрукована з меншою висотою переміщення

Встановлення переміщення залежить від товщини використаної плівки для ванни, чим тонша плівка, тим більше вона буде розтягуватися, тим більше потрібно ставити висоту перемішування.

#### 4.6 Функція віддзеркалення

Віддзеркалення – параметр, що може встановлюватися в NanoDLP. Встановлюється в налаштуваннях дисплея. Може бути горизонтальними, вертикальними або і горизонтальними, і вертикальними (рис. 4.10).



Рисунок 4.10 – Горизонтальне віддзеркалення моделі

#### 4.7 Використання функції Anti-Aliasing

Функція, що допомагає зробити поверхню краще за рахунок зменшення ступенчості моделі. Прикладом може слугувати рис. 4.11.

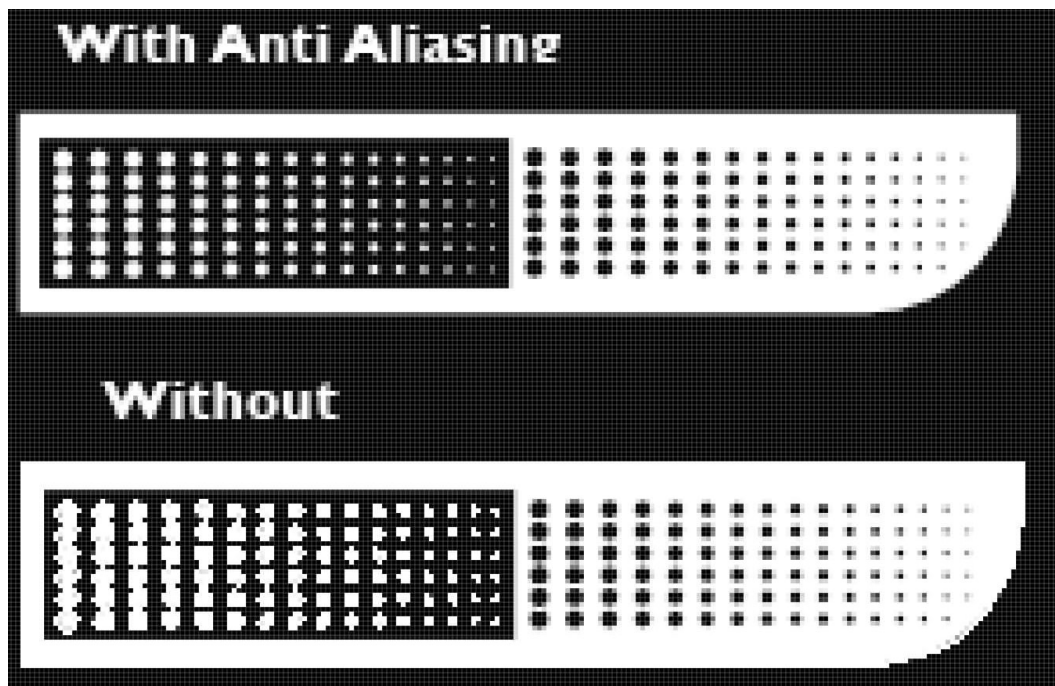


Рисунок 4.11 – Приклад роботи Anti-Aliasing

Тобто модель за рахунок використання полутонів пікселей екрану може зробити поверхню моделі гладкішою (рис. 4.12).

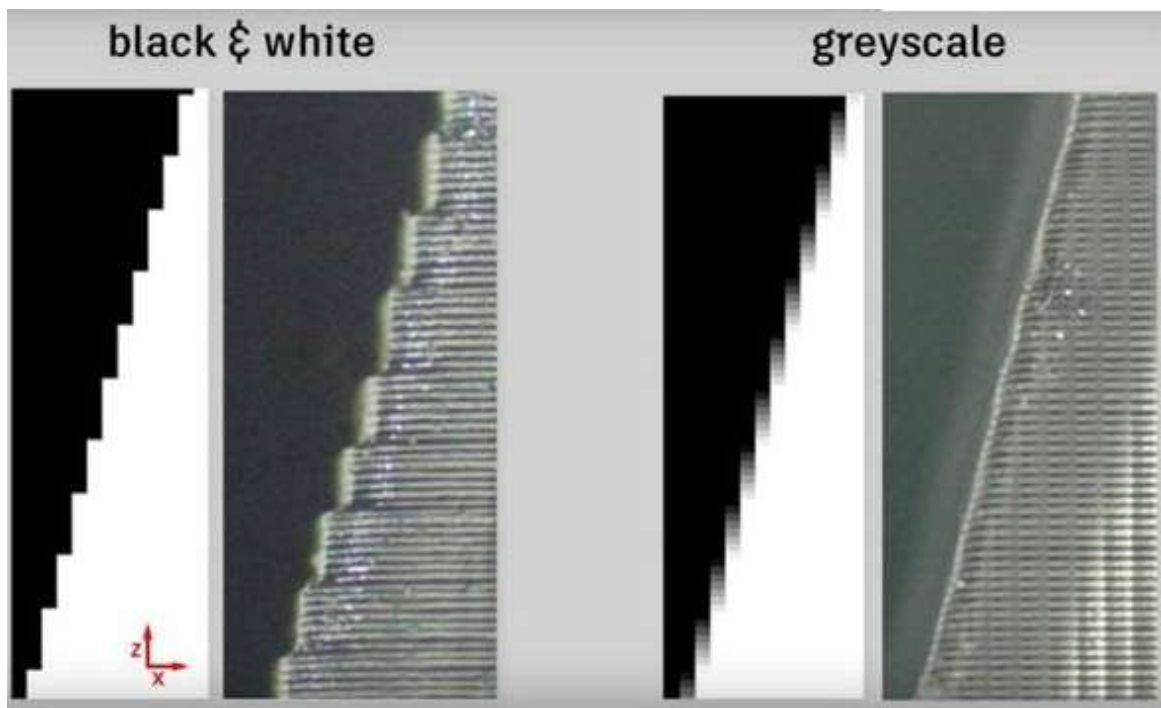


Рисунок 4.12 – Результат використання субпіксельного згладжування

#### 4.8 Аналіз впливу калібрування платформи на друк

Неправильне калібрування платформи може привести до неможливості якісного друку відповідальних моделей, особливо, якщо модель займає всю площину робочої зони (рис. 4.13).



Рисунок 4.13 – Неправильне калібрування платформи

Калібрування платформи в макеті принтера виконується наступним чином:

- відпускаються болти кріплення платформи (рис. 4.14);



Рисунок 4.14 – Платформа макету принтера

- платформа встановлюється в нульове положення;
- після встановлення платформи, закручуються болти платформи.

Таким чином платформа отримує нове положення, однак в процесі калібрування можливо допущення помилок:

- нерівномірне затягнення болтів, що призводить до перекосу платформи;
- сильне притиснення платформи до екрану;
- велика щілина між екраном та платформою.

При даних похибках можливо такі дефекти:

- з однієї сторони виникає деламінація фотополімеру;
- модель залишається на плівці.

#### 4.9 Аналіз використання вбудованої функції підйому робочої платформи після закінчення друку

В NanoDLP після закінчення друку є функція повернення платформи в вихідне положення принтера (рис. 4.15). Перевагами використання даної функції є зменшення фотополімеру на моделі, так як модель буде повністю піднята на вихідну висоту. Недоліком даної функції є те, що користувач, при неправильному налаштуванні даної функції може пошкодити складові принтера.

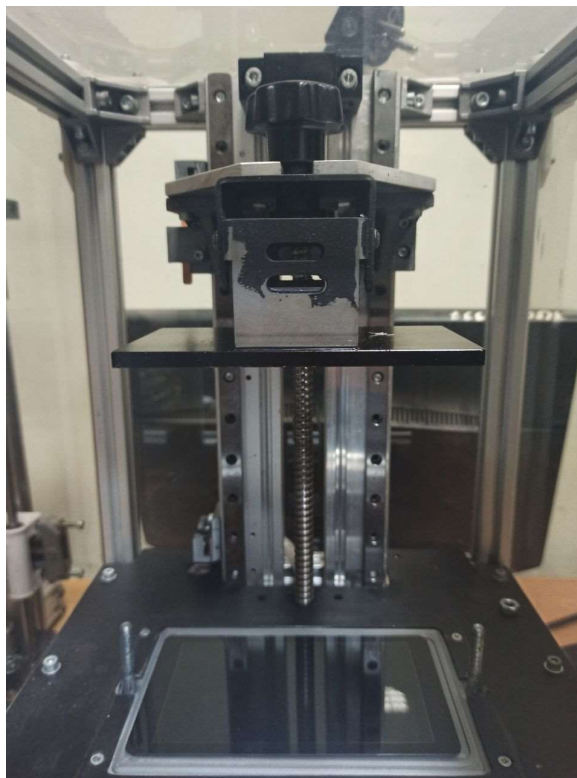


Рисунок 4.15 – Позиція очікування принтера

Якщо висота точки очікування буде меншою за висоту моделі, принтер опустить модель на дану висоту, що приведе до пошкодження екрану та плівки.

#### 4.10 Аналіз необхідності використання паузи друку і вплив на модель

Пауза – функція NanoDLP, що дозволяє зупинити процес друку зі збереженням положення та шару моделі. Вона слугує для можливості

доповнення ванни фотополімером або для контролю кількості надрукованої моделі. Після включення паузи виключається світлодіодна матриця та платформа переміщується в задану позицію. Після запуску друку платформа переміщується на шар моделі, запускається світлодіодна матриця.

Недоліком даної функції є те, що при переміщеннях на велику відстань, після встановлення вихідного положення відбувається зміщення шарів моделі, таким чином у підсумку модель буде мати видимі зміщення шарів (рис. 4.16).



Рисунок 4.16 – Модель з дефектом поверхні

#### 4.11 Аналіз необхідності використання перфорованої платформи для друку моделей

Перфорована платформа – це платформа, що має поверхню з отворами (рис. 4.17).



Рисунок 4.17 – Перфорована платформа принтера

Перфорована платформа дає можливість збільшити адгезію базових шарів до платформи, зменшує навантаження при відриванні моделі від плівки.

Використовується для друку великих моделей, та для моделей, які мають сферичну форму. Недоліком є те, що необхідно більш ретельне очищення платформи після друку та при друці для заповнення першого шару буде необхідно використовувати більше фотополімеру для заповнення отворів.

#### 4.12 Аналіз впливу фотополімеру на кінцеву якість

Фотополімер – матеріал, мономер, що знаходиться в рідкому стані. Під дією ультрафіолетового випромінювання з довжиною хвилі у 395-405 нм.

За властивостями можливо відрізнити фотополімери, що після полімеризації набувають різноманітних фізико-механічних властивостей, мають високу деталізацію та можливості до випалювання.

Також фотополімер має технологічні властивості, що дають можливість друкувати з різним часом експонування або з різною кінцевою поверхнею.

Фотополімери можуть бути керамовмісними – дані фотополімери після повного циклу обробки піддається термічній обробки і в результаті отримується керамічний виріб зі всіма властивостями кераміки.

В основному полімери мають декілька властивостей, можуть бути або високодеталізованими та крихкими, можуть бути еластичними, можуть бути стійкими до різних хімічних чинників. Тобто різноманіття полімерів є дуже великим.

Гнучкі фотополімери мають такі властивості:

- твердість може становити від 25A до 85A одиниць по Шору;
- міцність на розрив становить від 1.5МПа;
- відносне подовження на розрив становить до 300%.

Жорстко-еластичні фотополімери мають такі характеристики:

- твердість даних фотополімерів становить від 60D по Шору;
- міцність на розрив становить від 10МПа;
- відносне подовження на розрив становить до 120%.

Тверді та крихкі фотополімери мають такі характеристики:

- твердість даних фотополімерів становить від 70D до 94D по Шору;
- відносне подовження на розрив становить до 6%.

Спеціалізовані фотополімери не маючи високої твердості та інших фізико-механічних властивостей можуть мати високі термічний опір та можуть тримати температуру до 240 градусів.

Таким чином фотополімер є значимим чинником на кінцеву якість моделі, та визначається завданнями, для яких буде використовуватися побудована модель у майбутньому.

Для дослідження факторів було використано декілька фотополімерів. PlexiWire – фотополімер, твердий, жорсткий, некрихкий фотополімер, має час експонування 8 секунд на принтері розробленому на кафедрі. Має твердість 80D по Шору. Має щільність 1,2 г/см<sup>3</sup>, в'язкість 700 мПа\*с.

Усадка становить менше 1%. Мінімальний шар друку для даного фотополімера становить 30 мкм. Модель надрукована даним фотополімером з товщиною друку у 20 мкм зображена на рис. 4.18.



Рисунок 4.18 – Модель надрукована фотополімером PlexiWire з розміром шару в 20 мкм

Monofilament Basic – фотополімер має твердість 75D по Шору, твердий, ламкий. Друкується з часом експонування у 70 секунд базових шарів та 35 секунд

звичайні шари. Після друку має гнучку структуру, після доекспонування становиться твердим та негнучким.

Результат друку зображений на рис. 4.19.



Рисунок 4.19 – Модель надрукована смолою MonoFilament

#### 4.13 Аналіз впливу FEP-плівки на друк моделі

Тefлонова FEP-плівка використовується для забезпечення герметичності ванни, вона є прозорою для фотополімера, що дає можливість швидко друкувати модель. Вона може бути різною товщини, це дає різні характеристики плівки, чим товще плівка, тим менше вона буде розтягуватися. Цей параметр впливає на налаштування принтеру, зокрема на висоту підйому перемішування. Плівка після тривалого використання зображена на рис. 4.20.



Рисунок 4.20 – FEP-плівка з видимими дефектами поверхні

Якщо плівка має механічні пошкодження або буде мати менший коефіцієнт світлопроникності, це значно знизить кінцеву якість моделі або зробить друк її зовсім неможливим.

Таким чином основними факторами є час експонування базових шарів, час експонування звичайних шарів, висота перемішування, використаний фотополімер, висота шару.

#### 4.14 Висновок до четвертого розділу

В результаті виконання четвертого розділу було виконано аналіз факторів що впливають на показники якості друку.

Було визначені параметри друку моделей та їх налаштування в NanoDLP, було визначені фактори:

- час експонування шарів;
- кількість базових шарів;
- функція перемішування;
- функція Anti-Aliasing;
- функція віддзеркалення;
- калібрування платформи;
- пауза;
- перфорована платформа;
- фотополімер;
- FER-плівка.

## 5 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

### 5.1 Постановка задачі експериментальних досліджень

В третьому розділі були проаналізовані фактори що впливають на кінцеву якість моделі надрукованої на фотополімерному принтері. Дані фактори були отримані в результаті проведення серії експериментальних досліджень з використанням емпіричного методу дослідження. В процесі дослідження були використані різні значення факторів та проаналізовані вихідні результати, що знайшли відображення у третьому розділі. Таким чином був використаний промисловий експеримент.

Таким чином, наступним кроком для дослідження результатів, отриманих емпіричним шляхом, результатів буде проведення регресійного аналізу впливу факторів на кінцеві якісні показники моделі.

В результаті проведення аналізу буде вирішено такі завдання:

- визначення виду та форми залежності;
- оцінка параметрів рівняння регресії ;
- перевірка значущості рівняння регресії ;
- перевірка значущості окремих коефіцієнтів рівняння;
- побудова інтервальних оцінок коефіцієнтів ;
- дослідження характеристик точності моделі.

В результаті емпіричних досліджень було визначено такі фактори:

- висота перемішування;
- час експонування базових шарів;
- час експонування звичайних шарів;
- товщина шару базових шарів;
- товщина шару звичайних шарів;
- кількість базових шарів;
- швидкість переміщення осі Z;
- потужність світлового потоку.

Дослідження було проведення з виконанням друку моделі, що зображена на рис. 5.1.



Рисунок 5.1 – Досліджувана надрукована модель

Дана модель дає можливість прослідити зміни розміру в залежності від інтенсивності випромінювання ультрафіолету світлодіодної матриці, товщини шару моделі та часу експонування.

Залежність відповідності розмірів можливо відобразити виразом:

$$\Delta l = l_{\text{друк}} - l_{\text{вих}} \quad (5.1)$$

Так як висота переміщення може бути або занадто маленькою або достатньою для відриву плівки та повністю залежить від фізичних властивостей плівки та після заміни плівки може змінюватися, даний фактор використовувати у дослідженні регресії є недоцільним. Таким чином отримане значення, що було досліджене емпіричним шляхом становить 5 мм та при збільшенні його, ніяк не впливає на подальші якісні показники моделі.

Кількість базових шарів це функція, що створена для нівелювання нерівності платформи, дефекту калібрування вона також не підходить для використання у регресійному аналізі.

Швидкість переміщення – параметр що використовується під час усього друку. Вплив даного параметру на кінцеву якість друку повністю залежить від

конфігурації друкованої моделі, фізичних характеристик плівки та хімічних властивостей фотополімеру.

Потужність світлового потоку, який може регулюватися ШІМ контролером, використовується для оптимізації процесу друку. При друці шару, який має велику площину, необхідно зменшити інтенсивність потоку, та навпаки інтенсивність потоку необхідно збільшити для тонких деталей.

Таким чином в якості досліджуваних факторів було вибрано два фактори:

- час експонування;
- найменший шар моделі.

Для дослідження залежності відповідності розмірів друкованих, до розмірів вихідних з впливом зовнішніх факторів, було зроблено три дослідження з різною товщиною шару моделі, які найбільш частіше використовуються для друку різноманітних моделей. В кожному дослідженні було проведено 7 експериментів з різним часом експонування та різним світловим потоком від світлодіодної матриці, що керувалася ШІМ контролером.

Світловий випромінювання було виміряне спеціальним програмним засобом, що встановлюється на смартфон, та за допомоги датчика освітлення, дає точні значення випромінювання за конкретну годину (рис.5.2).

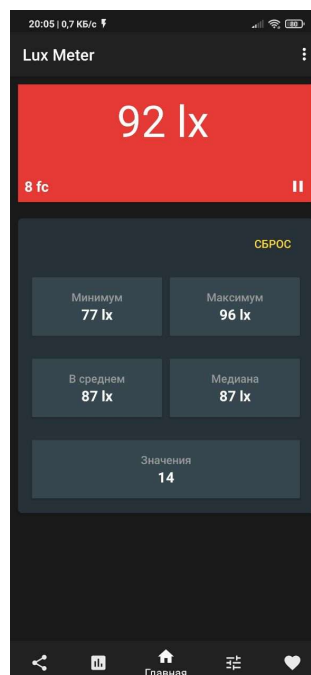


Рисунок 5.2 – Зображення програмного засобу для вимірювання освітленості

Значення з програмного забезпечення були отримані в люксах. Так як в смартфоні датчик освітлення має невеликі розміри, отримані значення для використання їх в дослідженні були переведені в люмени при відношенні 1 люкс до 1 люмену на квадратний метр.

Для дослідження висоти шару та часу експонування, було налаштовано ПЗ NanoDLP (рис. 5.3).

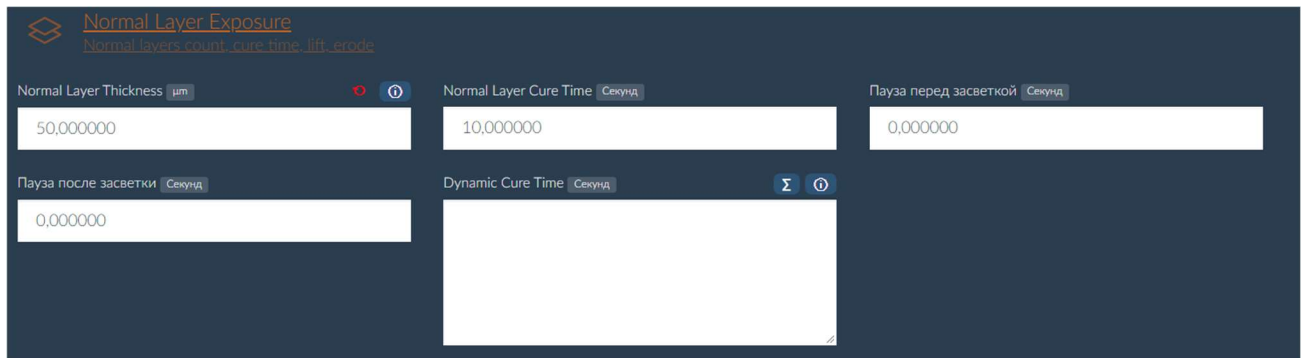


Рисунок 5.3 – Налаштування NanoDLP для дослідження

Для дослідження багатofакторного регресійного аналізу було використано ПЗ Microsoft Excel.

## 5.2 Багатofакторний регресійний аналіз

Для багатofакторного регресійного аналізу всі отримані дані були зведені в таблицю 5.1, 5.2, 5.3.

Таблиця 5.1 – Зведені параметри друку, отриманих в результаті проведення першого дослідження.

Відхилення розмірів, мкм	Товщина мінімального шару, мкм	Час експонування стандартних шарів, с	Інтенсивність потоку світла, лм
0,00	20,00	7,00	2800
5,00	20,00	8,00	2600
10,00	20,00	9,00	2400
15,00	20,00	10,00	2200
20,00	20,00	11,00	2000
30,00	20,00	12,00	1800
40,00	20,00	13,00	1600

Максимальне випромінювання світла становить 2800 люменів на квадратний метр, а мінімальне становить 1600 люменів на квадратний метр, що відповідає системі засвітлення 30 Вт зі встановленим фокусатором.

Час експонування вибраний з мінімально можливого часу експонування, при якому модель не втрачається, та не деламінюється від поверхні платформи або самої моделі.

Таблиця 5.2 – Зведені параметри друку моделі для аналізу, що отримані під час другого дослідження.

Відхилення розмірів, мкм	Товщина мінімального шару, мкм	Час експонування стандартних шарів, с	Інтенсивність потоку світла, лм
-100	50	7	2800
0	50	8	2600
30	50	9	2400
50	50	10	2200
60	50	11	2000
80	50	12	1800
100	50	13	1600

При проведенні другого дослідження були отримані перші результати зі зменшенням вихідних розмірів моделі.

Таблиця 5.3 – Зведені параметри друку моделі для аналізу, що отримані під час третього дослідження.

Відхилення розмірів, мкм	Товщина мінімального шару, мкм	Час експонування стандартних шарів, с	Інтенсивність потоку світла, лм
-300	100	7	2800
0	100	8	2600
10	100	9	2400
50	100	10	2200
70	100	11	2000
90	100	12	1800
150	100	13	1600

Таким чином було отримано три результати дослідження, які в подальшому з використанням пакету аналізу ПЗ Microsoft Excel було отримано графіки та результати регресійного аналізу.

Для першого дослідження багатofакторної регресії залежності відхилення розмірів від товщини мінімального шару друку, часу експонування та інтенсивності потоку в результаті проведення аналізу було отримано 7 друкованих моделей, що зображені на рис. 5.4.



Рисунок 5.4 – Надруковані моделі для дослідження

Таким чином було проаналізовано перший регресійний аналіз, який був зведений у додатку А.

Основне рівняння багатofакторної регресії можливо записати таким виразом:

$$\tilde{y}_i = a_1 x_{1i} + a_2 x_{2i} + \dots + a_m x_{mi} + b, \quad (5.2)$$

Графік, що відображає залежності відхилення розмірів від товщини мінімального шару друку зображено на рис. 5.5.

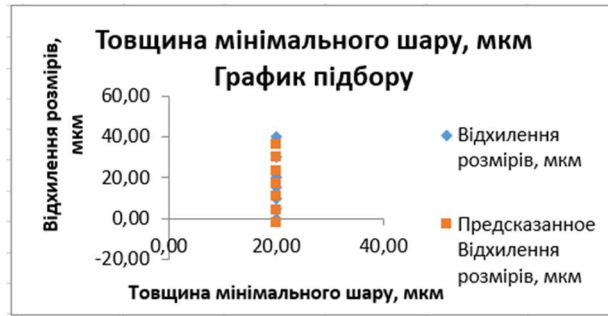


Рисунок 5.5 – Графік відхилення розмірів від товщини мінімального шару

Графік залежності відхилення розмірів від часу експонування зображені на рис. 5.6.

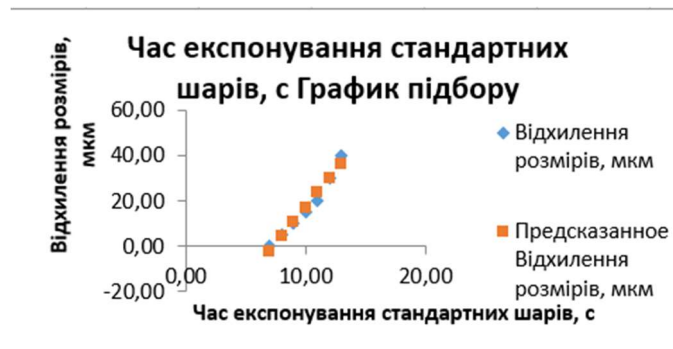


Рисунок 5.6 – Графік залежності відхилення розмірів від часу експонування

Графік залежності відхилення розмірів від потоку світла зображений на рис. 5.7.

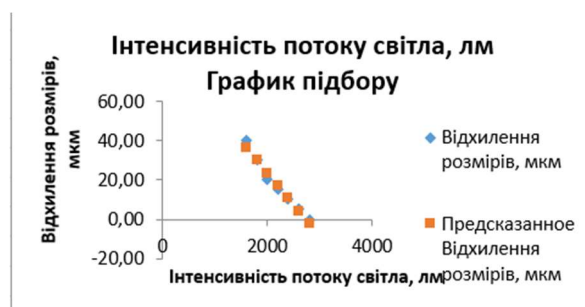


Рисунок 5.7 – Графік залежності відхилення розмірів від інтенсивності потоку світла

Графік залишків товщини мінімального шару зображені на рис. 5.8.

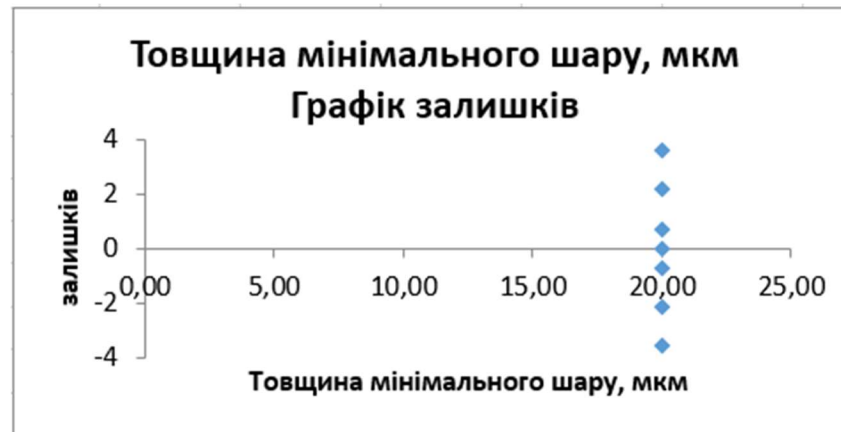


Рисунок 5.8 – Графік залишків товщини мінімального шару

Графік залишків часу експонування стандартних шарів зображений на рис. 5.9.

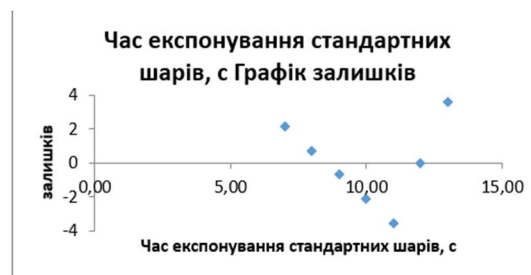


Рисунок 5.9 – Графік залишків часу експонування стандартних шарів

Графік залишків інтенсивності випромінювання потоку світла зображений на рис. 5.10.



Рисунок 5.10 – Графік залишків інтенсивності потоку світла на робочу поверхню

Графік вірогідності для першого дослідження зображений на рис. 5.11.

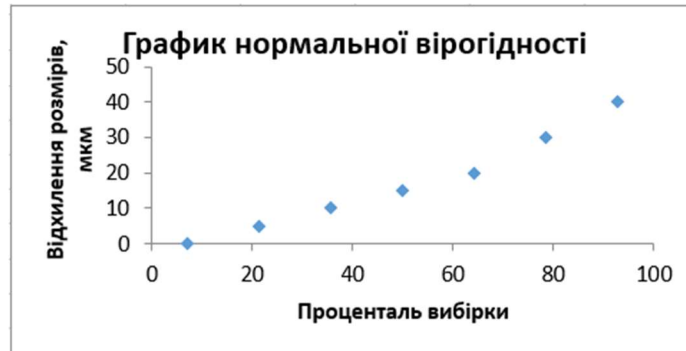


Рисунок 5.11 – Графік вірогідності

Для другого дослідження та регресійного аналізу графік залишків товщини мінімального шару моделі зображений на рис. 5.12.

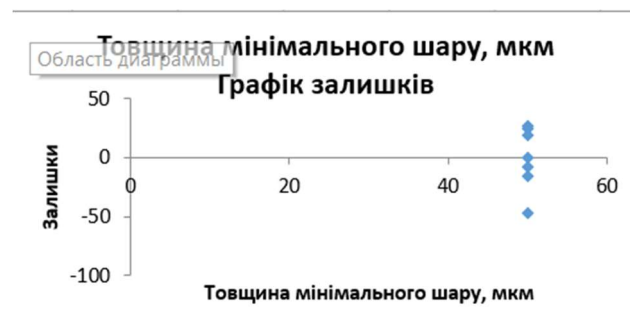


Рисунок 5.12 – Графік залишків товщини мінімального шару моделі

Графік залишків часу експонування стандартних шарів зображений на рис. 5.13.

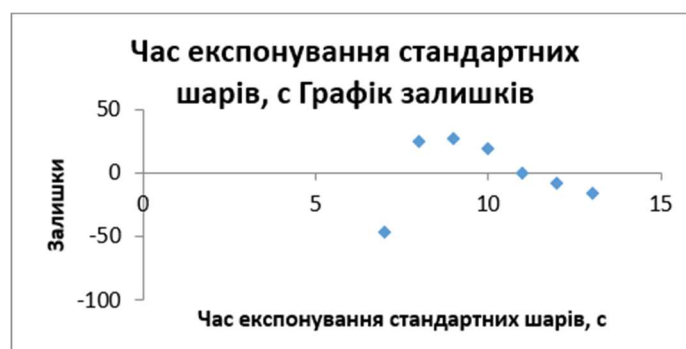


Рисунок 5.13 – Графік залишків часу експонування стандартних шарів

Графік залишків інтенсивності випромінювання потоку світла зображений на рис. 5.14.



Рисунок 5.14 – Графік залишків інтенсивності потоку світла на робочу поверхню

Графік відхилення розмірів від товщини мінімального шару зображений на рис. 5.15.



Рисунок 5.15 – Графік відхилення розмірів від товщини мінімального шару

Графік підбору часу експонування зображений на рис. 5.16.

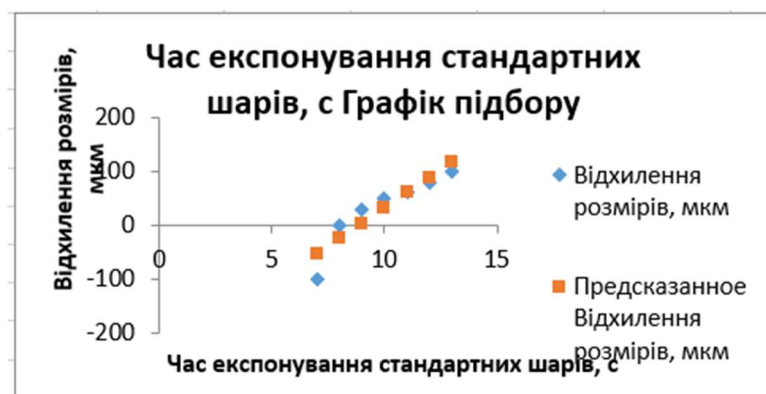


Рисунок 5.16 – Графік підбору часу експонування

Графік підбору інтенсивності потоку світла зображений на рис. 5.17.

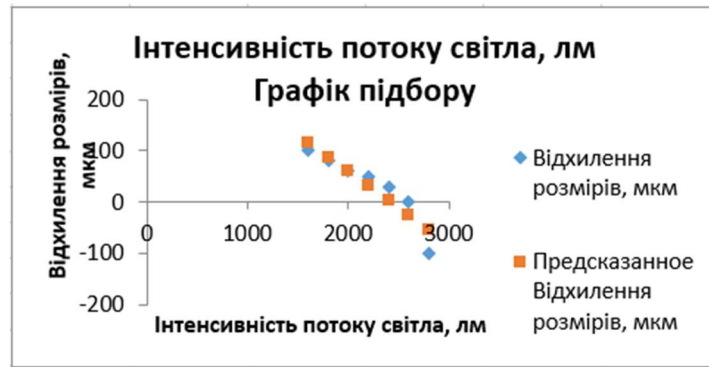


Рисунок 5.17 – Графік підбору інтенсивності потоку світла

Графік вірогідності для другого дослідження зображений на рис. 5.18.

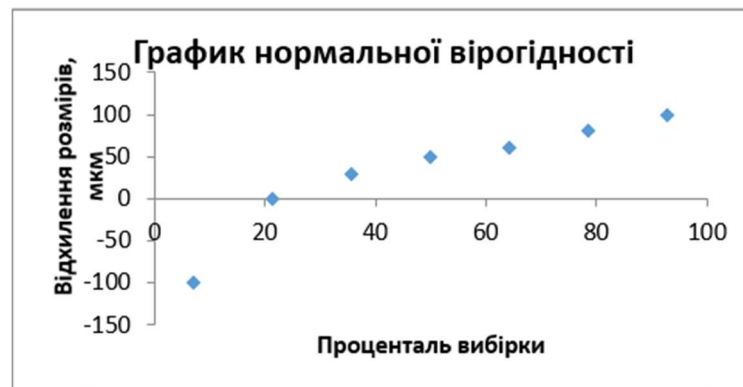


Рисунок 5.18 – Графік вірогідності

Графік залишків товщини мінімального шару моделі з третього дослідження зображений на рис. 5.19



Рисунок 5.19 – Графік залишків товщини мінімального шару моделі

Графік залишків часу експонування стандартних шарів зображений на рис. 5.20.

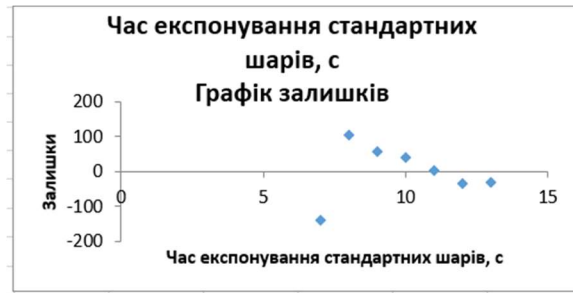


Рисунок 5.20 – Графік залишків часу експонування стандартних шарів

Графік залишків інтенсивності випромінювання потоку світла зображений на рис. 5.21.

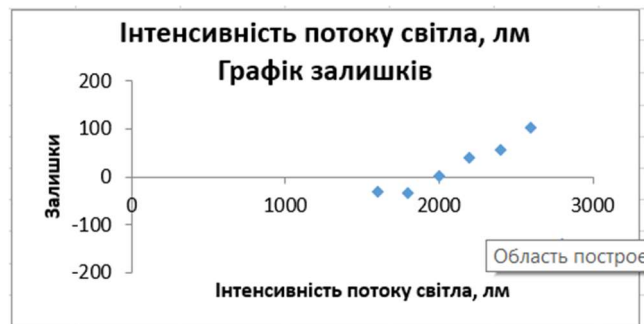
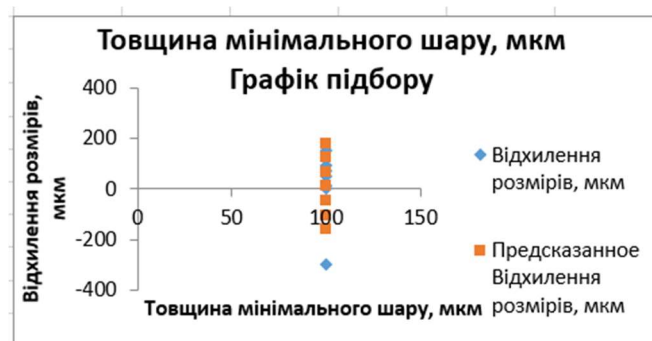


Рисунок 5.21 – Графік залишків інтенсивності потоку світла на робочу поверхню

Графік підбору відхилення розмірів від товщини мінімального шару зображений на рис. 5.22.



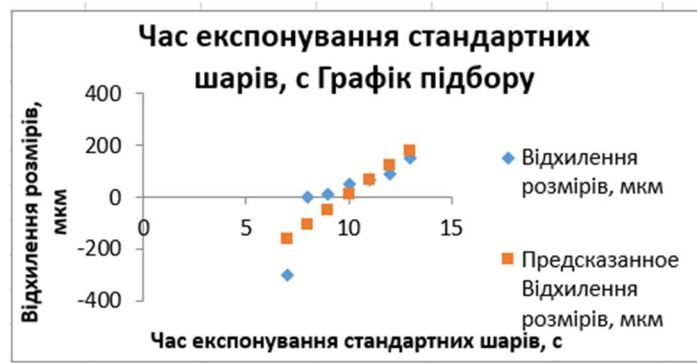


Рисунок 5.23 – Графік підбору часу експонування

Графік підбору інтенсивності потоку світла зображений на рис. 5.24.

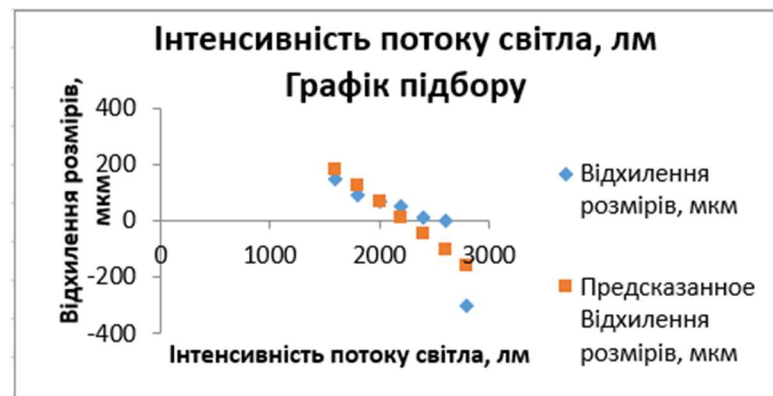


Рисунок 5.17 – Графік підбору інтенсивності потоку світла

Графік вірогідності для другого дослідження зображений на рис. 5.18.

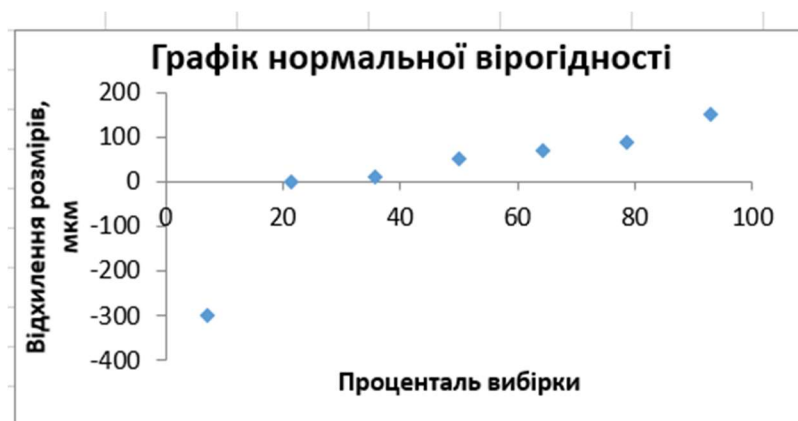


Рисунок 5.18 – Графік вірогідності

Графіки регресії показують різницю між значеннями, що отримані в результаті дослідження та значеннями, що були передбачені досліджуваною регресійною моделлю. Чим краще модель відповідає цим значенням, що вказані в досліджах, тим менше значення залишків.

Для першого дослідження були отримано рівняння регресії, що має вигляд:

$$y = 4,18x_3 - 0,011x_4 \quad (5.3)$$

Коефіцієнт детермінації, що був отриманий з регресійної статистики становить 0.99, що показує оцінку адекватності регресійної моделі. Також при  $R^2$ , що становить 0.98 та є більшим ніж 0.95, що може свідчити про високу точність апроксимації.

Для другого дослідження було отримане рівняння регресії, що має вид:

$$y = 6,83x_2 - 0,014x_4 \quad (5.4)$$

Коефіцієнт детермінації, що був отриманий з регресійної статистики становить 0.93, що показує оцінку адекватності регресійної моделі. Також при  $R^2$ , що становить 0.87 та є меншим ніж 0.95, що може свідчити про задовільну точність апроксимації.

Для третього дослідження було отримане рівняння регресії, що має вид:

$$y = 6,34x_2 - 0,028x_4 \quad (5.5)$$

Коефіцієнт детермінації, що був отриманий з регресійної статистики становить 0.84, що показує оцінку адекватності регресійної моделі. Також при  $R^2$ , що становить 0.71 та є меншим ніж 0.8, що може свідчити про незадовільну точність апроксимації.

### 5.3 Висновки п'ятого розділу

Таким чином в результаті проведення регресійного аналізу було отримано такі результати:

– при мінімальному часу друку моделі та при максимальній інтенсивності випромінювання світла на платформу вихідні розміри можуть змінюватися до 300 мкм. Мінімальний час друку, при якому модель буде друкуватися, для фотополімера PlexiWire становить 7 секунд для шару моделі, товщиною 20 мкм та інтенсивності світла, що становить 2800 люменів;

– для шару товщиною в 100 мкм час експонування фотополімеру становить 8 секунд при інтенсивності випромінювання в 2600 люменів. Менший час експонування зменшить геометричні розміри моделі від 300 мкм;

– результати, що перевищують номінальне значення часу експонування, будуть збільшувати розміри в середньому на 10 мкм, що при перевищенні часу експонування на 10 секунд дасть збільшення моделі на 100 мкм.

## 6 ОХОРОНА ПРАЦІ

Розміри приміщення, в якому буде розроблюватися система, складає. Робоче місце складається зі столу, стільця та персонального комп'ютера. В приміщенні працюють 6 чоловік. Площа приміщення складає 42,7 м<sup>2</sup>, об'єм – 128,1 м<sup>3</sup>. Відповідно до ДСанПіН 3.3.2.007-98, площа на одне робоче місце повинна складати не менше 6 м<sup>2</sup>, об'єм – 20 м<sup>3</sup>. Для даного приміщення робоча площа та об'єм на одну людину відповідає нормам, так як площа на одне робоче місце складає 7,11 м<sup>2</sup>, а об'єм – 21,35 м<sup>3</sup>.

Схема приміщення вказана на рис. 6.1.

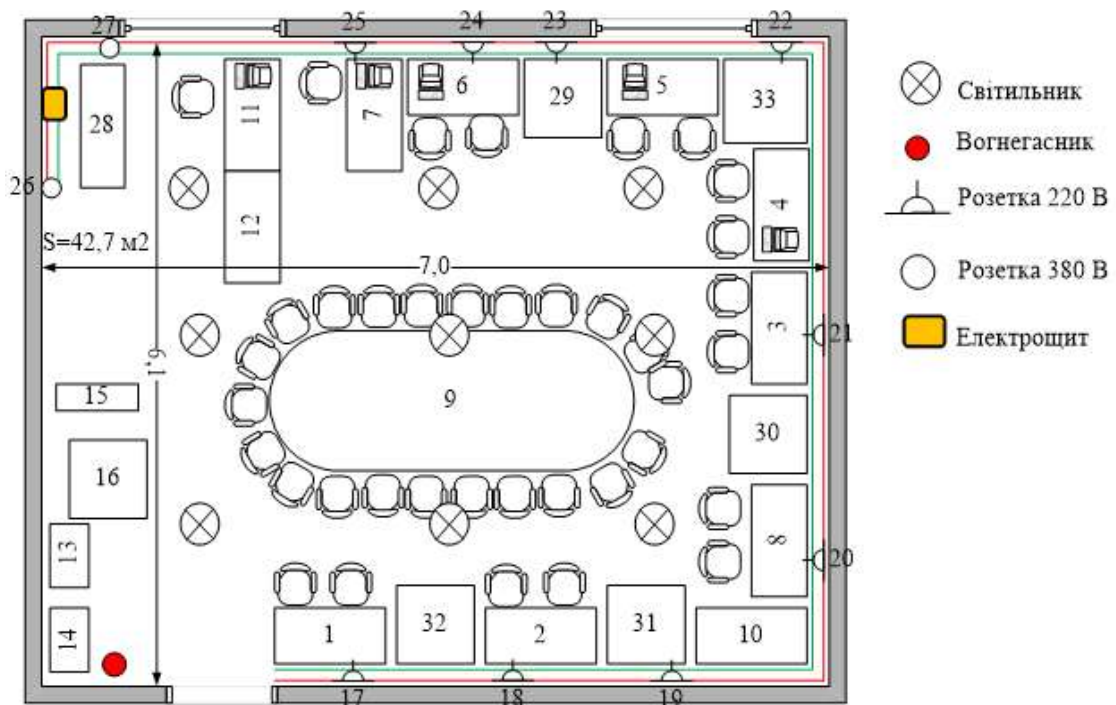


Рисунок 6.1 – Схема приміщення

Для розрахунку природного освітлення необхідно визначити площу вікон, що буде забезпечувати нормоване значення КЕО. Далі необхідно зрівняти розраховану площину з реальною. Приміщення має два вікна, які мають розміри 2 м × 1,5 м. Умови праці вважаються нормальними, якщо:

$$S_{\text{вік}} \leq S_{\text{реал}}, \quad (6.1)$$

де  $S_{\text{вік}}$  – площа вікон, що розраховується по формулі 6.2;

$S_{\text{реал}}$  – реальне значення площини вікон в приміщенні що становить  $6.4 \text{ м}^2$ ;

$$S_0 = \frac{e_n \eta_0 K_{зд} K_3 S_n}{100 \tau_0 r_1}, \quad (6.2)$$

де  $S_0$  – площа світлових отворів, що забезпечує нормовані значення КЕО в приміщенні;

$S_{\text{п}}$  – площа підлоги приміщення;

$e_{\text{норм}}$  – нормоване значення КЕО для 3-го поясу світового клімату,  $e = 0.9$ ;

$\eta_0$  – світлова характеристика вікна;

$K_{\text{буд}}$  – коефіцієнт, що враховує затінення вікон протилежними будівлями,  $K = 1$ ;

$K_3$  – коефіцієнт запасу( залежить від концентрації пилу в приміщенні та від періодичності очищення скла),  $K_3 = 1.4$ ;

$\tau_0$  – загальний коефіцієнт світлопропускання, що визначається в залежності від коефіцієнта пропускання скла, втрат світла в оправках вікна, шару забруднення, наявності сонцезахисних конструкцій,  $\tau_0 = 0.94$ ;

$r_1$  – коефіцієнт, що враховує підвищення КЕО за рахунок відображення.

$$S_0 = \frac{0.9 \times 15 \times 1 \times 1.4 \times 42.7}{100 \times 0.94 \times 1.1} = 7.8 \text{ м}^2. \quad (6.3)$$

Так як  $S_{\text{вік}} > S_{\text{реал}}$ , то для покращення цього фактора необхідно використовувати штучне освітлення в денний час.

## ВИСНОВКИ

В результаті виконання атестаційної роботи на рівень магістра було отримано такі результати:

- проаналізовані аналогічні конструкції фотополімерних принтерів, що існують на даний момент та використовують найкращі інноваційні технології;
- проаналізоване технічне завдання, визначені необхідні задачі для рішення;
- проаналізовані недоліки макету, що був побудований в рамках попередньої атестаційної роботи;
- проаналізовані електронні компоненти, які необхідно вдосконалити для виконання умов технічного завдання;
- проаналізоване програмне забезпечення для використання в принтері;
- побудовано макет 3D-принтера з використанням програмних засобів для моделювання;
- виконано вдосконалення принтера, збірка конструкції, встановлення електронних компонентів та налаштування програмного забезпечення;
- побудована модель конвекції повітря в корпусі принтера при використанні світлодіодної матриці;
- проаналізовані фактори, що впливають на якісні показники надрукованої моделі, визначені шляхи вдосконалення;
- було проведено експериментальні дослідження, з використання багатфакторної регресії, в результаті якої було визначено вплив кожного з значущих факторів, які безпосередньо впливають на відхилення розмірів від вихідної 3D-моделі.

Було виявлено недоліки макету принтера, що був розроблений для атестаційної роботи бакалавра.

Після чого можливо створити новий макет, з відповідністю характеристик до технічного завдання та конкурентних характеристик принтерів.

В результаті проведення експериментальних досліджень було підтверджено залежність відповідності розмірів від часу експонування, товщини шару та інтенсивності освітлення робочої зони світлодіодною матрицею.

Було визначено та перевірено залежність товщини шару від використаних драйверів крокового двигуна.

Визначено відповідність документованих характеристик фотополімеру до характеристик, що були визначені після практичного застосування на макеті принтера.

Для виконання атестаційної роботи було прийнято участь у виставках «Зброя та безпека 2019», та «Tech Fest 2019». Було опубліковано 4 статті в журналі «Автоматизація та приладобудування» ADED – 2018 (випуск 2)[електронне видання], ADED – 2019 (випуск 2)[електронне видання], ADED – 2020 (випуск 1)[електронне видання].

**ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ**

1. ДСТУ 3008 – 15. документація. звіти у сфері науки і техніки. структура і правила оформлення [Текст] – Введ. 2015 – 06 – 22. – К. Держстандарт України, 2017 – 29с.
2. Методичні вказівки з «Розробки й оформлення магістерської атестаційної роботи» для студентів другого (магістерського) рівня вищої освіти 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / Упоряд.: І.Ш. Невлюдов, В.В. Косенко, В.В. Євсєєв. – Харків: ХНУРЕ, 2019. – 55 с.
3. Невлюдов, І.Ш. дипломне проектування для студентів усіх форм навчання спеціальностей 151 «автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» [Текст] / І.Ш. Невлюдов, А.О. Андрусевич, О.В. Токарева, Г.В. Пономарьова – Київ – 58, пр. Космонавта Комарова, 1, 2016 – 320с.
4. АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА ПРИЛАДОБУДУВАННЯ («Automation and Development of Electronic Devices» ADED – 2018) [Електронний ресурс] : збірник студентських наукових статей / Харківський національний університет радіоелектроніки ; [редкол.: І.Ш. Невлюдов та ін.]. – Харків : ХНУРЕ, 2018. – Вип. 2. – 227 с.
5. АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА ПРИЛАДОБУДУВАННЯ («Automation and Development of Electronic Devices» ADED – 2019) [Електронний ресурс] : збірник студентських наукових статей / Харківський національний університет радіоелектроніки ; [редкол.: І.Ш. Невлюдов та ін.]. – Харків : ХНУРЕ, 2019. – Вип. 2. – 152 с.
6. АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА ПРИЛАДОБУДУВАННЯ («Automation and Development of Electronic Devices» ADED – 2020) [Електронний ресурс] : збірник студентських наукових статей / Харківський національний університет радіоелектроніки ; [редкол.: І.Ш. Невлюдов та ін.]. – Харків : ХНУРЕ, 2018. – Вип. 1. – 50 с.
7. Anycubic Photon Zero [електронний ресурс]; режим доступу (<https://www.anycubic.com/products/anycubic-photon-zero>) дата використання [18.10.20];

8. Anicubic Formware 3D [электронный ресурс]; режим доступа (<https://www.anycubic.com/blogs/videos>) дата використання [18.10.20];
9. 3D – принтер Anycubic Photon Mono: высококачественная печать за \$249 [электронный ресурс]; режим доступа (<https://3dtoday.ru/blogs/news3dtoday/3d – printer – anycubic – photon – mono – vysokokachestvennaya – pechat – za – 249>) дата використання [18.10.20];
10. 3D принтер Phrozen Sonic Mini [электронный ресурс]; режим доступа (<https://pro3d.com.ua/p1130622566 – printer – phrozen – sonic.html>) дата використання [18.10.20];
11. Longer Orange 30 – обзор и выводы по итогам 2 недель владения [электронный ресурс]; режим доступа (<https://3dtoday.ru/blogs/andybig/longer – orange – 30 – obzor – i – vyvody – po – itogam – 2 – nedel – vladeniya/>) дата використання [18.10.20];
12. MKS DLP [электронный ресурс]; режим доступа (<https://github.com/makerbase – mks/MKS – DLP?spm=a2g0v.12057483.0.0.26386f2eXaF7RE>) дата використання [18.11.20];
13. MKS DLP [электронный ресурс]; режим доступа (<https://github.com/makerbase – mks/MKS – DLP?spm=a2g0v.12057483.0.0.26386f2eXaF7RE>) дата використання [18.11.20];
14. Плата контроллера ChiTu L V3 SLA с системами ChiTu, 32 бит, для ЖК-экрана, 3D-принтера, материнская плата Creality LD – 002R/Photon [электронный ресурс]; режим доступа (<https://aliexpress.ru/item/4001162750130.html>) дата використання [18.11.20];