

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 радіотехнік
Тип програми	освітньо-професійний
Освітня програма	Інтелектуальні технології мікросистемної радіоелектронної техніки

(код і повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

« _____ » _____ 2020 р.

ЗАВДАННЯ
НА АТЕСТАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові _____ Близнюку Данилу Сергійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Оптимізація впливу параметрів програмного забезпечення мікроконтролера та «слайсер» на якість 3D друку

затверджена наказом по університету від 02 11 2020 р. № 1508 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії .12.2020 р.

3. Вихідні дані до роботи 3D принтер з габаритами 850×550×900мм,
вага макету 50 кг, робоча зона 386×400×434 мм, 3D принтер працює за технологією FFF, FDM, максимальна точність друку 0,02 мм, максимальна швидкість друку 140мм/с програмне забезпечення на базі Repetier, кінематика Dual X Carriage, енергоспоживання 350Вт електроніка, 400Вт нагрівальний стіл.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі: _____

4.1 Вступ;

4.2 Огляд програмного забезпечення яке використовується для створення та проектування 3D-принтерів;

4.3 Налаштування програмного забезпечення;

4.4 Проведення експериментальних досліджень;

4.5 Аналіз результатів експериментальних досліджень;

4.6 Охорона праці;

4.7 Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) Демонстраційний матеріал.
представлений у форматі презентації PowerPoint (*.ppt) – 22 с. формату А4

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

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

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання завдання	20.05.2020	виконав
2	Аналіз завдання	15.06.2020	виконав
3	Огляд літератури за темою роботи	07.08.2020	виконав
4	Аналіз програмного забезпечення	15.08.2020	виконав
5	Налаштування програмного забезпечення	10.09.2020	виконав
6	Проведення експериментальних досліджень	06.10.2020	виконав
7	Аналіз результатів експериментальних досліджень	2.11.2020	виконав
8	Оформлення пояснювальної записки	15.11.2020	виконав
10	Подання роботи у ЕК	02.12.2020	виконав

Дата видачі завдання 20.05.2020

Студент _____ Близнюк Д.С.
(підпис)

Керівник роботи _____
(підпис)

доц. Хрустальов К.Л.
(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить: 98 сторінок, 57 рис., 2 табл., 19 джерел за переліком посилань.

3D-ПРИНТЕР, CARTESIAN, ЧИСЛОВЕ ПРОГРАМНЕ КЕРУВАННЯМ, ARDUINO DUE, 3D-МОДЕЛЬ, 3D-ДРУК, DUAL X CARRIAGE, REPETIER FIRMWARE.

Об'єкт дослідження – технологія 3D-друку принтера з кінематикою Dual X Carriage.

Предмет дослідження – вплив налаштувань прошивки на якість друку 3D принтеру.

Мета роботи – виявлення значень які впливають на якість та швидкість 3D-друку.

Методи дослідження – експеримент, математичне моделювання, аналіз та синтез, індукція, дедукція.

У магістерській атестаційній роботі досліджено залежність швидкості та прискорень на якість та час 3D-друку.

Під параметрами якості друку та часу друку розуміють: збереження зазначених геометричних розмірів 3D-моделі, час друку моделі розрізаної на частини моделі, дефекти на надрукованої моделі, зміщення шарів на моделі.

Для проведення даного дослідження були розглянуто програмне забезпечення для управління мікроконтролером та «слайсери» для нарізання 3D-моделі на шари, а також описані основні параметри «прошивок» та «слайсерів».

Після чого було проведено двохфакторні експерименти залежності швидкості та прискорень на час друку та дослідження залежності прискорення на час друку а також аналіз експериментів.

На базі проведених експериментальних досліджень, залежності точносних параметрів 3D друку від швидкості та прискорення переміщення екструдера, виконано регресійний аналіз та проведено оптимізацію цих параметрів.

ABSTRACT

Explanatory note contains pages 98, fig. 57, charts 2, 19 sources by the list of references.

3D-PRINTER, CARTESIAN, NUMERICAL SOFTWARE CONTROL, ARDUINO DUE, 3D-MODEL, 3D-PRINTING, DUAL X CARRIAGE, REPETIER FIRMWARE.

The object of research is the process of 3D-printing on a printer with Dual X Carriage kinematics.

The subject of the study is the influence of firmware settings on the print quality of a 3D-printer.

The purpose of the work – to identify values that affect the quality and speed of 3D printing.

Research methods – experiment, mathematical modeling, analysis and synthesis, induction, deduction.

In the master's attestation work dependence of speed and accelerations on the quality and time of 3D-printing is investigated.

The parameters of print quality and printing time are understood as: preservation of the specified geometric dimensions of the 3D-model, printing time of the model cut into parts of the model, defects on the printed model, displacement of layers on the model.

To conduct this study, the software for microcontroller and «slicers» for cutting 3D models into layers were considered, as well as the main parameters of «firmware» and «slicers» were described.

Then two-factor experiments of speed and acceleration dependence on printing time and research of dependence of acceleration on printing time as well as analysis of experiments were carried out.

Based on the conducted experimental research, dependence of exact parameters of 3D printing on speed and acceleration and movement of the extruder, the regression analysis is carried out and optimization of these parameters is carried out.

ЗМІСТ

Перелік скорочень та термінів	8
Вступ.....	9
1 Огляд програмного забезпечення яке використовується для створення та проектування 3D-принтерів	11
1.1 Аналіз комплексу програмного забезпечення для 3D-принтерів	11
1.2 Аналіз програмного забезпечення 3D-принтерів	12
1.3 Аналіз слайсерів	22
1.4 Висновки першого розділу.....	28
1.5 Аналіз технічного завдання.....	28
2 Налаштування програмного забезпечення	30
2.1 Розрахунок параметрів для крокових двигунів.....	30
2.2 Налаштування температури	31
2.3 Налаштування різких рухів	36
2.4 Планування шляхів	38
2.5 Налаштування швидкості	40
2.6 Налаштування екструдера.....	42
2.7 Застрягання та перевірка закінчення філаменту	45
2.8 Конфігурація інтерфейсу користувача.....	46
2.9 Підготовка плати до запису програмного забезпечення.....	47
2.10 Налаштування слайсеру.....	48
2.11 Висновки другого розділу	60
3 Експериментальні дослідження впливу програмних параметрів на якісні показники 3D-друку	61
3.1 Вибір параметрів для дослідження.....	61
3.2 Проведення експериментальних досліджень	62
3.3 Аналіз результатів експериментальних досліджень.....	64
3.4 Висновки третього розділу.....	72
4 Регресійний аналіз результатів експериментальних досліджень.....	73

4.1 Основи регресійного аналізу.....	73
4.2 Регресійний аналіз експериментів.....	78
4.3 Висновки четвертого розділу.....	85
5 Охорона праці.....	87
Висновки.....	95
Перелік джерел посилань.....	96
Додаток А. Результати експериментів.....	99
Додаток Б. Результати регресійного аналізу експерименту впливу швидкості та прискорення на якість по осі Х.....	100
Додаток В. Результати регресійного аналізу експерименту впливу швидкості та прискорення на якість по осі Y.....	101
Додаток Г. Результати регресійного аналізу експерименту впливу прискорення на якість.....	102
Додаток Д. Демонстраційний матеріал у вигляді презентації.....	103

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

- 3D – 3-dimensional. Трьох вимірний простір;
- ARM – архітектура мікропроцесорів;
- ASCII – американський стандартний код для інформаційного обміну;
- AVR – родина восьми бітових мікроконтролерів фірми Atmel;
- DIY – зроби це сам;
- EEPROM – постійний запам'ятовуючий пристрій програмується та стирається за допомогою електрики;
- FDM – Fused deposition modeling. Моделювання методом наплавлення;
- FFF – Fused filament fabrication. Виготовлення плавкими нитками;
- GNU GPL V3 – загальна публічна ліцензія;
- JSON – текстовий формат обміну даними між комп'ютерами;
- LUA – скриптова мова програмування;
- PRU – програмований пристрій реального часу;
- SD – Secure Digital. Портативна флеш карта пам'яті;
- STL – стерео літографія;
- USB – Universal Serial Bus. Універсальна послідовна шина;
- XOR – виключне “або”;
- Бод(baud) – міжнародна одиниця швидкості телеграфування;
- МГц – мегагерц;
- ПЗ – програмне забезпечення;
- ПІД – пропорціонально-інтегрально-диференціальний закон регулювання;
- ПК – персональний комп'ютер;
- РК – рідкокристалічний;
- ЧПК – числове програмне керування;
- ШІМ – широтно-імпульсна модуляція.

ВСТУП

На сьогоднішній день 3D-друк займає вагомe місце в більшості сфер життєдіяльності . Особливо його роль відстежується у виробничій сфері, а також в сфері дизайну.

Сфери застосування 3D-принтерів:

- а) архітектура та дизайн;
- б) освіта і дослідження;
- в) медицина;
- г) ювелірна справа;
- г) машинобудування;
- д) виробництво електроніки.

На якісні показники 3D-друку принтерів побудованих на технології FFF, FDM впливає досить велика кількість параметрів одне з найбільших впливів надає програмне забезпечення яке в свою чергу можна розділити на 2 складові.

Першою складовою є налаштування прошивки тобто програмного забезпечення яке описує перетворення G-code 3D-моделі в команди переміщення екструдера, стола, подачі пластика, зміна температур і т.д.

Найбільший вплив має налаштування механічних переміщень. параметр `stepper unit` який відповідає за крок, такт, двигуна, параметр `feedrate` – швидкість переміщення, `acceleration` – прискорення переміщення а також `jerks` – миттєве прискорення двигунів. А також на якість друку впливає настройки ПІД регуляції які впливають температуру, швидкість фіксації і досягнення їх в блоці екструдера тип і точність спрацьовування крокових датчиків.

У кінематиці Dual X Carriage має вплив правильність настройки відстані між крайніми положеннями екструдера.

Другою складовою є правильність налаштування програми слайсера під різні види пластика і з урахуванням специфіки друкованих деталей, температури екструзії, висота шару та ін.

Таким чином дослідження впливу параметрів програмного забезпечення як прошивки так і програми слайсера мають значний вплив на якість прототипування деталей і тим самим поставлена задача є актуальною.

Звичайно, складно точно спрогнозувати подальші відкриття і прориви в даній сфері. Але можна сказати точно, що 3D-друк буде і далі користуватися попитом і ще більше інтегрується в повсякденне життя.

Об'єкт дослідження – технологія 3D друку принтера з кінематикою Dual X Carriage.

Предмет дослідження – вплив налаштувань прошивки на якість друку 3D принтеру.

Методи дослідження – експеримент, математичне моделювання, аналіз та синтез, індукція, дедукція.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- а) провести аналіз показників якості 3D-друку;
- б) провести аналіз параметрів програмного забезпечення (слайсер, прошивка) які впливають на показники якості;
- в) побудувати модель та провести оптимізацію програмних параметрів з метою підвищення якості 3D-друку;
- г) оформити пояснювальну записку згідно з рекомендаціями [1], [3] та вимогами ДСТУ 3008:2015 [2].

1 ОГЛЯД ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКЕ ВИКОРИСТОВУЄТЬСЯ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ТА ПРОЕКТУВАННЯ 3D- ПРИНТЕРІВ

1.1 Аналіз комплексу програмного забезпечення для 3D-принтерів

Програмне забезпечення 3D-принтерів поділяється на дві категорії, першою з яких є програмне забезпечення 3D-принтерів.

Програмне забезпечення, як випливає з назви, є мостом між апаратним і програмним забезпеченням комп'ютерної системи. Коли програмне забезпечення надсилає команди до апаратних засобів комп'ютерної системи, програмне забезпечення інтерпретує та переводить команди програмного забезпечення у форму, яка розпізнається апаратним забезпеченням.

Коли програмне забезпечення 3D-принтера (наприклад, Repetier Host, Cura або OctoPrint) надсилає G-код на 3D-принтер, програмне забезпечення переводить команди G-коду в конкретні електричні сигнали, які надсилаються на мотори, нагрівачі, вентилятори і інші компоненти на 3D-принтері.

Наприклад, якщо хост-програмне забезпечення надсилає «G1 X50 Y50» на 3D-принтер, програмне забезпечення 3D-принтера визначає, наскільки далеко будуть рухати двигуни, щоб перемістити екструдер до $X = 50$ мм і $Y = 50$ мм, після чого посилає електричні сигнали двигунам перетворити їх на відповідну кількість обертів.

Другою категорією є слайсери. Слайсер це програмне забезпечення яке перетворює створену 3D-модель (3D-модель зазвичай має формат .stl) в спеціальний код, тобто G-code, який потім розуміє плата управління 3D принтеру.

3D-принтером можна керувати за допомогою невеликого вбудованого екрану або через (USB) інтерфейс з комп'ютером або обома інтерфейсами. Користувацький інтерфейс та програмне забезпечення для керування дозволяє користувачеві надсилати файл машинного коду з комп'ютера на 3D-принтер,

змінювати деякі параметри часу роботи (наприклад, швидкість, потік і температуру), а також переміщати друкуючу головку вручну по осях $x / y / z$ [4].

1.2 Аналіз програмного забезпечення 3D-принтерів

1.2.1 Marlin

Підтримує безліч кінематик, реалізований авторівень столу. Підтримує цілий ряд дисплеїв, і багато різної електроніки. В цілому, програмне забезпечення досить функціональна але деякі функції не працюють, або працюють але не повністю.

Marlin є найпопулярнішою у світі прошивкою з відкритим кодом для Replicating Rapid Prototyper (RepRap), які зазвичай називають «3D-принтерами». Marlin Firmware це високоефективна програмне забезпечення, працює навіть на 16MHz вбудованих AVR процесорах(рис.1.1).

```

1  /**
2  * Marlin 3D Printer Firmware
3  * Copyright (C) 2016 MarlinFirmware [https://github.com/MarlinFirmware/Marlin]
4  *
5  * Based on Sprinter and grbl.
6  * Copyright (C) 2011 Camiel Gubbels / Erik van der Zalm
7  *
8  * This program is free software: you can redistribute it and/or modify
9  * it under the terms of the GNU General Public License as published by
10 * the Free Software Foundation, either version 3 of the License, or
11 * (at your option) any later version.
12 *
13 * This program is distributed in the hope that it will be useful,
14 * but WITHOUT ANY WARRANTY; without even the implied warranty of
15 * MERCHANTABILITY or FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. See the
16 * GNU General Public License for more details.
17 *
18 * You should have received a copy of the GNU General Public License
19 * along with this program. If not, see <http://www.gnu.org/licenses/>.
20 *
21 */
22
23 /**
24 * Configuration.h
25 *
26 * Basic settings such as:
27 *
28 * - Type of electronics
29 * - Type of temperature sensor
30 * - Printer geometry
31 * - Endstop configuration
32 * - LCD controller
33 * - Extra features
34 *
35 * Advanced settings can be found in Configuration_adv.h
36 *
37 */
38 #ifndef CONFIGURATION_H
39 #define CONFIGURATION_H
40 #define CONFIGURATION_H_VERSION 010109
41
42 //=====
43 //===== Getting Started =====
44 //=====
45
46 /**
47 * Here are some standard links for getting your machine calibrated:
48 *

```

Рисунок 1.1 – Конфігуратор програмного забезпечення Marlin версія 1.

У той час як Marlin 1.1 підтримує тільки ATmega AVR (Arduino і т.д.) і AT90USB (Teensy ++ 2.0), Marlin 2.0 також підтримує кілька ARM-процесорів, включаючи SAM3X8E (Arduino Due), NXP LPC1768 / LPC1769 ARM Cortex-M3 (Re-Arm) , MKS SBASE, Smoothieboard) і ARM Cortex-M4 (Teensy 3.5 / 3.6, STM32F1 / 4/7) [5].

1.2.2 MarlinKimbra

Італійський варіант програмного забезпечення Marlin. Основними фішками є підтримка всіх можливих кінематик в одній прошивці з зручними настройками. Підтримка різнокольорових екструдерів, мульти-екструдерів, змішувачів та ін. Має онлайн конфігуратор.

1.2.3 Repetier-Firmware

В цій прошивці реалізована більш швидке завантаження файлів з комп'ютера на внутрішню флешку.

Repetier-Firmware – це програмне забезпечення для RepRap 3D-принтеру що працює на сумісному з arduino контролері. Ця програмне забезпечення є майже повним переписом програмного забезпечення Sprinter від kliment, яка заснована на базі програмного забезпечення Tonokip RepRap яка в свою чергу була перероблена з програмного забезпечення Hydra-mmm. Деякі ідеї були взяті з Teacup, Grbl і Marlin.

Як пише розробник він змінив майже весь код але залишив логіку таку ж як у Sprinter. В результаті, всі плати, що мають принаймні 64Кб оперативної пам'яті, що працюють з Sprinter, повинні працювати з цією прошивкою. Це включає в себе Sanguino / GEN 6 / Gen 7 / Mega / RAMPS / Teensylu / Printrboard.

Основні функції програмного забезпечення:

а) швидкий та надійним обміном даних, якщо мають місце перебої в зв'язку між частинами принтеру або команди неправильно інтерпретовані, оскільки символ був втрачений або змінений під час передачі. З цієї причини мікропрограма використовує контрольні суми для перевірки цілісності даних.

Для цього потрібне програмне забезпечення, яке надсилає команди, включаючи контрольну суму і номер рядка. Контрольна сума побудована як просте 8-бітове значення хог над командою. Це дає деяку можливість для помилок, які не можуть бути виявлені прошивкою, наприклад, додавання додаткового символу двічі, що не впливає на контрольну суму.

Щоб подолати цей недолік, в прошивку було додано новий протокол бінарних даних. Цей новий Repetier протокол використовує двійкову передачу даних і 16-бітну контрольну суму. Двійкові дані прискорюють аналіз команд і зменшують необхідні дані до 50% від стандартної передачі ascii. 16-бітна контрольна сума Fletcher робить зв'язок дуже надійним. В даний час тільки Repetier-Host підтримує відправлення даних у цьому форматі. Програмне забезпечення автоматично виявляє, якщо команда знаходиться в ascii або двійковому форматі.

Для великої швидкості зв'язку можна використовувати широкий діапазон швидкості передачі даних. Для найбільш поширених плат 16 МГц рекомендується швидкість 250000 бод, якщо використовуване програмне забезпечення підтримує цю настройку;

б) швидкий і плавний друк, залежно від вашого обладнання, програмне забезпечення дає можливість швидкого пересування за допомогою крокових двигунів. Зазвичай він може пересунути осі принтер швидше, ніж екструдер. Він використовує лінійні швидкості для прискорення і уповільнення екструдера. Програмне забезпечення зберігає декілька рухів у буфері, тому не потрібно зупинятися на коротких паузах принтеру. Буфер також використовується для оптимізації шляху руху. Таким чином, потрібно менше прискорення, уповільнення, та друк стає більш гладким, а час друку зменшується;

в) зберігання конфігураційного параметра в флеш пам'яті EEPROM, мікроконтролер AVR, що використовується на платі, має невеликий EEPROM, який може постійно зберігати дані. Ці дані не втрачаються після перезапуску або після завантаження нової версії програмного забезпечення. Таким чином, можливе, змінення цих параметри під час роботи принтера. За допомогою

EEPROM можливо підготувати принтер до встановлення нової програмного забезпечення.

г) графічний інтерфейс користувача, можливе додання РК-дисплею або додаткових клавіш або датчиків, щоб керувати функціями принтера незалежно від будь-якого вузла. З підключеним пристроєм для читання карток sd можна навіть друкувати 3D-модель повністю без комп'ютера рис.1.2.

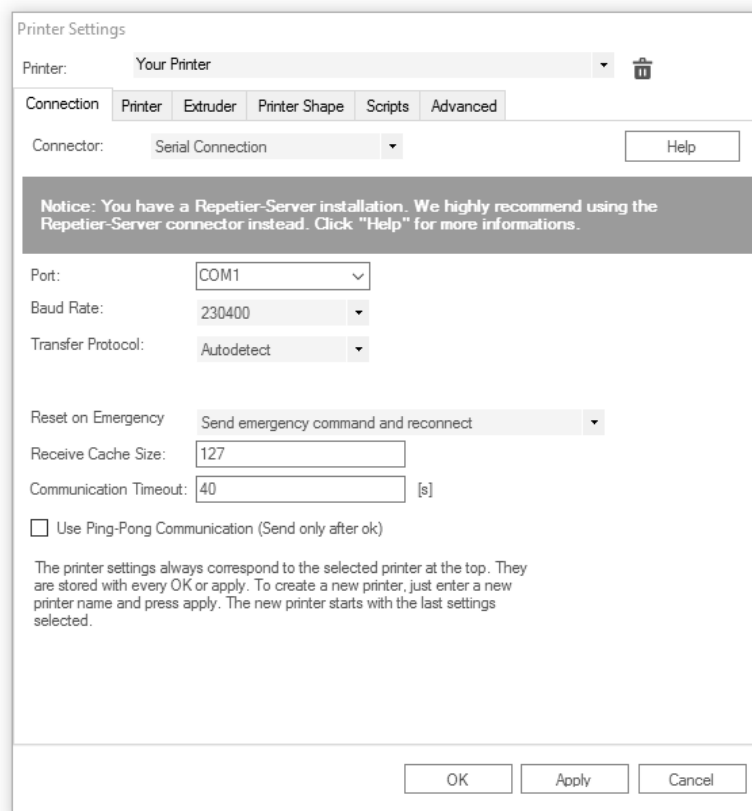


Рисунок 1.2 – Конфігуратор програмного забезпечення Repetier Firmware

На РК-дисплеї відобразиться найважливіший параметр (який можна налаштувати) на одному або декількох інформаційних екранах [6].

1.2.4 Klipper

“Програмне забезпечення, яка виконує всі обчислення на основній платі та зобов’язує мікроконтролер працювати тільки тоді коли потрібно”. Написана на мові Python. Розвантажує 8 бітний контролер 3D-принтера. Основні

розрахунки проводяться на комп'ютері або Raspberry під Linux. Розробником вказана підтримка Avr, Arm, Arduino, та Smoothieboard.

Основні функції програмного забезпечення Klipper:

а) висока точність руху крокового двигуна. Klipper використовує (наприклад, недорогий Raspberry Pi) при обчисленні рухів принтера. Процесор додатків визначає, коли переходити до кожного крокового двигуна, він стискає ці події, передає їх на мікроконтролер, а потім мікроконтролер виконує кожну подію в потрібний час. Кожна подія кроку планується з точністю 25 мікросекунд або вище. Програмне забезпечення не використовує кінематичні оцінки (наприклад, алгоритм Bresenham) – замість цього обчислює точні положення на основі фізики прискорення і фізики кінематики машини. Більш точне крокове переміщення двигуна призводить до більш тихої та стабільної роботи принтера;

б) klipper здатний досягати високих швидкостей двигунів на нових і старих мікроконтролерах. Навіть старий 8-бітний мікроконтролер AVR може отримати швидкості понад 175К кроків за секунду. На більш пізніх мікроконтролерах можливі ставки понад 500К кроків в секунду. Більш високі коефіцієнти кроку дозволяють підвищити швидкість друку. Час проведення крокових подій залишається точним навіть при високих швидкостях, що покращує загальну стабільність;

в) підтримує принтери з декількома мікроконтролерами. Наприклад, один мікроконтролер може використовуватися для управління екструдером, а інший керує нагрівачами принтера, а третій контролює іншу частину принтера. Програмне забезпечення хосту Klipper реалізує синхронізацію тактового сигналу для розрахунку різних часових значень між мікроконтролерами. Немає спеціального коду, необхідного для включення декількох мікроконтролерів – для цього потрібно лише кілька додаткових рядків у файлі налаштувань;

г) конфігурується за допомогою простого конфігураційного файлу. Для зміни налаштувань немає потреби перевстановлювати мікроконтролер. Вся конфігурація Klipper зберігається у стандартному файлі конфігурації, який

можна легко редагувати. Це спрощує налаштування та підтримку апаратного забезпечення;

г) портативний код. Klipper працює на мікроконтролерах ARM, AVR і PRU. Існуючі принтери схожі на «reprap» можуть запускати Klipper без апаратної модифікації – необхідно додати лише Raspberry Pi. Внутрішній макет коду Klipper полегшує підтримку інших мікроархітектур мікроконтролера;

д) простіший код. Klipper використовує мову Python для більшості коду. Алгоритми кінематики, розбір G-коду, алгоритми нагрівання та термістора тощо написані на Python. Це полегшує розробку нових функціональних можливостей [7].

1.2.5 MK4duo

Є прошивкою для однопроцесорної електроніки RepRap, вона підтримує друк через USB або з карток SD з папками, і використовує траєкторію планування. MK4duo ліцензується під GNU GPL v3 або пізнішої версії. Він заснований на програмному забезпеченні Sprinter, ліцензованому під GPL v2 або пізнішої версії.

Це програмне забезпечення RepRap є сумішшю між Sprinter, Marlin і Grbl з багатьма оригінальними частинами.

Похідна від Sprinter і Grbl Еріка ван дер Зальма. Провідні розробники Sprinter – Клімент і Кару. Провідним розробником Grbl є Simen Svale Skogsrud. Sonney Jeon (Chamnit) покращив деякі частини Grbl. Переробив bkubicek для Ultimaker, сприяв подальшому розвитку.

Основними особливостями якого є:

а) підтримка дуги. Slic3r може знайти криві, які, хоча і розбиті на сегменти, мають опис для дуги. Mk4Duo здатний друкувати ці дуги. Перевагою програмного забезпечення є можливість вибирати роздільну здатність, а також може виконувати дугу з майже постійною швидкістю. Також потрібно менше зв'язку між принтером і ПК;

б) авторегуляція температури. Якщо G-code містить широкий діапазон швидкостей екструдера, або зміна швидкості друку в реальному часі, температуру слід відповідно змінити. Зазвичай, більш висока швидкість вимагає більш високої температури. Тепер це можна виконати за допомогою функції AutoTemp;

в) автоматичний старт. Якщо помістити в файл значення auto [0-9].g в корінь sd-карти, він буде автоматично виконаний, якщо завантажити принтер. Той же файл буде виконано, вибравши в меню «Автостарт». Спочатку буде виконано * 0, а потім * 1 і так далі. Таким чином додається можливість нагрівати або навіть друкувати автоматично без взаємодії з користувачем [8].

1.2.6 RepRapFirmware

Хоча дане програмне забезпечення і підтримує Arduino mega 2560, але все ж в основному розроблений для DUE. Головна особливість – конфігурація програмного забезпечення ведеться шляхом запису файлу на флешку, і велика частина інтерфейсу і команд реалізована за допомогою окремих шматків G-коду. Є система управління через веб інтерфейс а також онлайн конфігуратор 3D-принтера <https://configurator.reprapfirmware.org/> його вигляд зображено на рис.

1.3

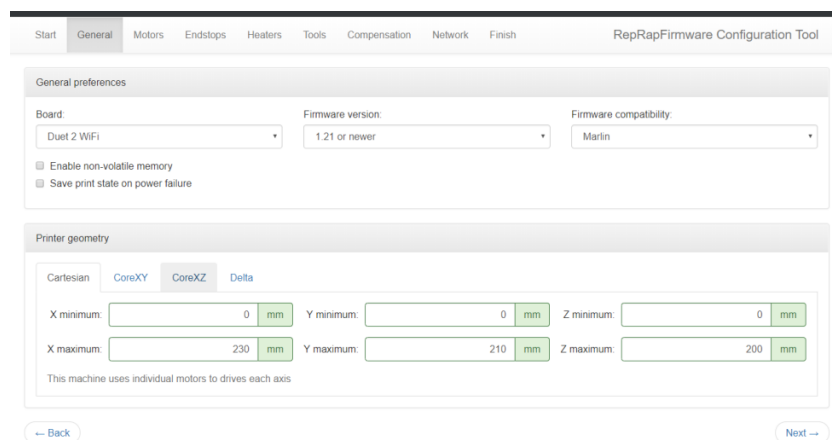


Рисунок 1.3 – Конфігуратор програмного забезпечення RepRap

Основними особливостями програмного забезпечення є:

- а) точне генерування часу кроку не тільки під час руху з постійною швидкістю, але і під час прискорення;
- б) точний рух каретки на дельта-принтерах, без використання сегментації для спрощення лінійного руху на дельта-принтері;
- в) автоматична настройка нагрівача, яка вимірює окремо коефіцієнт и посилення, постійну часу і мертвого часу нагрівача, дозволяючи використовувати різні параметри ПДД під час нагрівання (для мінімізації перенагріву) і під час друку (швидше реагувати на зміни в нагріванні);
- г) комплексна звітність про стан і конфігурацію принтера за допомогою розширеної відповіді на основі JSON [9].

1.2.7 Smoothie Project

Проект, який набирає велику популярність. Плата для цього проекту включає в себе багато можливостей в тому числі підтримку інтернету, можливість швидко конфігурувати як саму прошивку, так і зовнішні виходи плати (в оригінальній Smoothieboard). Тим самим легко отримати як 3D принтер, так і ЧПК верстат, так і гравер, просто закидаючи різні конфігураційні файли (рис. 1.4) на флешку.

```
# Smoothieboard configuration file, see http://smoothieware.org/configuring-smoothie
# NOTE Lines must not exceed 132 characters, and '#' characters mean what follows is ignored
## Robot module configurations : general handling of movement G-codes and slicing into moves

# Basic motion configuration
default_feed_rate          4800          # Default speed (mm/minute) for G1/G2/G3 moves
default_seek_rate          4800          # Default speed (mm/minute) for G0 moves
mm_per_arc_segment         0.0           # Fixed length for line segments that divide arcs, 0 to disable
mm_per_line_segment        5            # Cut lines into segments this size
mm_max_arc_error           0.01          # The maximum error for line segments that divide arcs 0 to disable
                                # note it is invalid for both the above be 0
                                # if both are used, will use largest segment length based on radius

# Arm solution configuration : Cartesian robot. Translates mm positions into stepper positions
# See http://smoothieware.org/stepper-motors
alpha_steps_per_mm         80            # Steps per mm for alpha ( X ) stepper
beta_steps_per_mm          80            # Steps per mm for beta ( Y ) stepper
gamma_steps_per_mm         1600         # Steps per mm for gamma ( Z ) stepper

# Planner module configuration : Look-ahead and acceleration configuration
# See http://smoothieware.org/motion-control
acceleration                3000         # Acceleration in mm/second/second.
#z_acceleration              500          # Acceleration for Z only moves in mm/s^2, 0 uses acceleration which is the default. DO NOT SET ON A DELTA
junction_deviation          0.05         # See http://smoothieware.org/motion-control#junction-deviation
#z_junction_deviation        0.0         # For Z only moves, -1 uses junction_deviation, zero disables junction_deviation on z moves DO NOT SET ON A DELTA

# Cartesian axis speed limits
x_axis_max_speed            30000        # Maximum speed in mm/min
y_axis_max_speed            30000        # Maximum speed in mm/min
z_axis_max_speed            300          # Maximum speed in mm/min

# Stepper module configuration
# Pins are defined as ports, and pin numbers, appending "!" to the number will invert a pin
# See http://smoothieware.org/pin-configuration and http://smoothieware.org/pinout
alpha_step_pin              2.0          # Pin for alpha stepper step signal
alpha_dir_pin               0.5          # Pin for alpha stepper direction, add '!' to reverse direction
alpha_en_pin                 0.4          # Pin for alpha enable pin
alpha_current                1.5         # X stepper motor current
alpha_max_rate               30000.0     # Maximum rate in mm/min

beta_step_pin                2.1         # Pin for beta stepper step signal
beta_dir_pin                 0.11        # Pin for beta stepper direction, add '!' to reverse direction
beta_en_pin                  0.10        # Pin for beta enable
beta_current                 1.5         # Y stepper motor current
beta_max_rate                30000.0     # Maximum rate in mm/min

gamma_step_pin               2.2         # Pin for gamma stepper step signal
gamma_dir_pin                0.20        # Pin for gamma stepper direction, add '!' to reverse direction
gamma_en_pin                 0.19        # Pin for gamma enable
gamma_current                1.5         # Z stepper motor current
gamma_max_rate               30000.0     # Maximum rate in mm/min
```

Рисунок 1.4 – Конфігураторний файл для SmoothieProject

Плата дуже дорога але є аналоги «MKS S-base» і «MKS SMini» які працюють на цій прошивці без проблем.

Як написано в документації розробникам Smoothieboard.

Модульна, керована подіями конструкція, що дозволяє легко додати функціональність без зміни ядра. Призначений для підтримки не картезіанських машин. LPC1769 залишає багато місця для додаткової функціональності.

Суворий процес прийняття нового коду, щоб зберегти проект з кодом високої якості.

1.2.8 Redeem

Програмне забезпечення написана спеціально для платформи BigleBon. Це не єдина програмне забезпечення для бігла, можна хоч безпосередньо влити дистрибутив GNU Linux, але виникають серйозні проблеми з самим ПЗ, так як воно заточене під ЧПК верстати.

1.2.9 Aprinter

Aprinter – це портативна програмне забезпечення для принтерів RepRap 3D та інших настільних ЧПК. Він підтримує багато плати контролерів на основі різних сімей мікроконтролерів: AVR, AT91SAM (наприклад, Arduino Due), STM32F4 і Freescale MK20 (Teensy 3). Для налаштування функцій для певної машини використовується веб-конфігураційна система.

Основні функціональні особливості:

а) підтримує безліч геометрій (на додаток до декартових). Лінійна-дельта, ротаційна-дельта, SCARA (як Morgan) і CoreXY. Нові геометрії можуть бути додані шляхом реалізації перетворень рухів в декартовій системі координат. Необхідний процесор з достатньою швидкістю і оперативною пам'яттю (не AVR);

б) вимірювання висоти столу виконується за допомогою цифрового входу(наприклад мікроперемикач). Данні вимірів записуються в файл або виводяться в консоль;

- в) корекція висоти столу виконується або лінійним або квадратичним поліномом а також обчислюється за допомогою методу найменших квадратів;
- г) підтримка нагрівачів та куллерів кількість їх не обмежена прошивкою це визначається тільки материнською платою принтера;
- г) експериментальна підтримка для лазерів (ШІМ-вихід з робочим циклом, пропорційний поточній швидкості);
- д) підтримує кілька екструдерів але інтерфейс не сумісний з типовими програмне забезпеченнями. команд для налаштування немає, замість цього екструдери з'являються як окремі осі [10].

1.2.10 Sailfish

Програмне забезпечення Sailfish – це вдосконалена програмне забезпечення для принтерів Makerbot, що містять функції, призначені для досвідчених користувачів. Ці функції поділяються на декілька широких категорій:

- а) розширені функції друку, такі як зміна швидкості друку та температури під час друку;
- б) підтримка різних механік Makerbot і систем приводів (наприклад, Core-XU, осі різного розміру, різні обмеження руху, різне обладнання ПК, альтернативні послідовні комунікації і так далі).

Sailfish існує з кінця 2011 року і базується на поєднанні прошивок RepRap Marlin і MBI Gen 4. Sailfish побудований на Marlin з покращеним «Advance» алгоритмом так же, як і в п'ять-шість разів швидшим планувальником. Більш швидкий планувальник досягається за допомогою обчислень числами з фіксованою точкою, а не за допомогою арифметики чисел з плаваючою точкою як це реалізовано в Marlin, яку мікропроцесор в Makerbots і багатьох інших принтерах DIY не можуть виконати апаратно тому емулюють в програмному забезпеченні. Додаткове підвищення продуктивності було досягнуто завдяки ретельній оптимізації обчислень (наприклад, усунення частих обчислень

квадратного і квадратного коренів, працюючи в просторі квадрата швидкості, а не просторі швидкості).

Sailfish спочатку був відомий як «Jetty Firmware». На початку осені 2012 року розробники Makerbot перейняли програмне забезпечення Sailfish у свої власні програмного забезпечення, відмовившись від власного порту Marlin. Проте, мікропрограмне забезпечення Makerbot не включає в себе багато більш продвинутих функцій Sailfish – частково через обмеженість програмного простору в Makerbots і необхідності використовувати більшу частину цього простору для функцій «першого запуску» [11].

1.3 Аналіз слайсерів

Слайсери для 3D принтерів бувають з відкритим кодом такі як Cura, Slic3r або з закритим кодом(патні програми) Simplify3D.

Майже всі слайсери мають додаткові функції такі як:

а) заповнення (Infill), тверді об'єкти потребують великої кількості цінного матеріалу і часу друку. Слайсер може автоматично перетворювати тверді обсяги в порожнисті, заощаджуючи витрати та час. Порожній предмет може бути частково заповнений внутрішніми конструкціями, такі як внутрішні стіни, для забезпечення додаткової міцності. Всі ці структури називаються щільністю заповнення, що є одним параметром для коригувань, які необхідно надати для слайсера;

б) підтримка(Supports), більшість процесів 3D-друку створюють шар об'єкта за шаром, знизу вгору, при цьому шаблон, що будується, зберігається поверх попереднього. Як наслідок, всі частини об'єкта повинні опиратися, принаймні в якійсь частині, на інші частини. У випадку плаваючого шару об'єкта (наприклад, плоский дах будинку або горизонтально розширеної руки на фігурі), слайсер може додати опори для нього. Підтримка торкається об'єкта таким чином, що легко знімається з нього на кінцевій стадії створення об'єкта;

в) опори(Rafts), спідниці (Skirts) та кромки (Brim), друк першого шару, який знаходиться в контакті з столом для принтера, має деякі особливості, такі як проблеми зчеплення предметів до столу, грубість, гладким нанесення перших слоїв нитки.

Слайсер може автоматично додавати деякі знімні структури для мінімізації цих проблем [12].

1.3.1 Cura

Слайсер, візуальна оболонка, основою є Repetier Host, розроблялася для 3D-принтерів Ultimaker але можливе використання з іншими 3D-принтерами. Має відкритий код, її можливості можливо розширити за допомогою плагінів(рис.1.5).

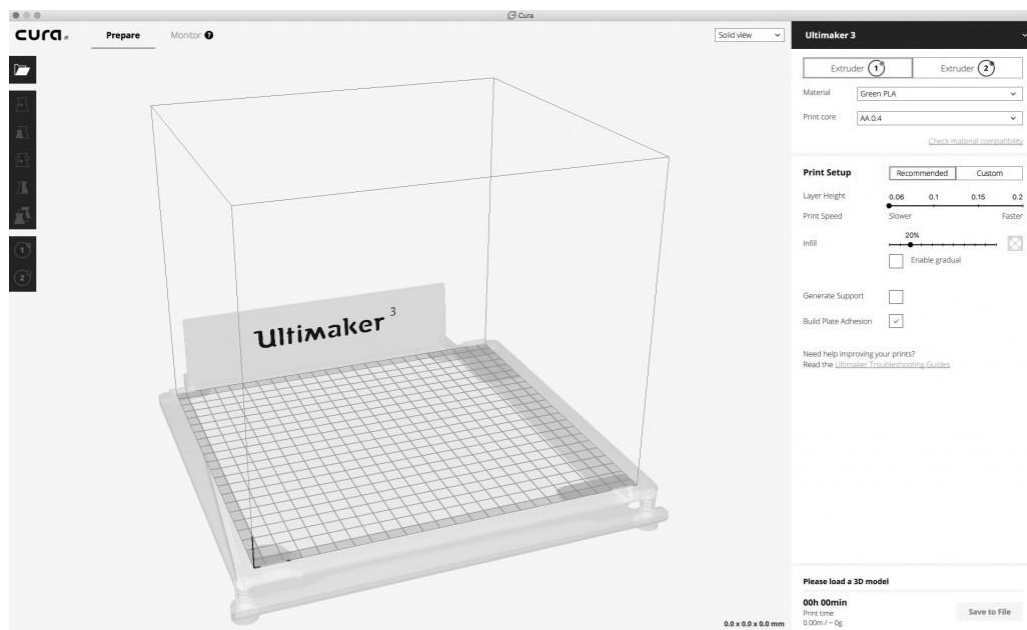


Рисунок 1.5 – Меню слайсеру Cura

1.3.2 Slic3r

Поставляється в комплекті з програмою Repetier Host має прогресивне тривимірне сотове заповнення – перший такого типу маска, який може поширюватися на кілька шарів, а не повторюватися, як штамп. Це істотно підвищує міцність внутрішнього заповнення моделі та фінальної роздруківки.

Користується популярністю в професійних користувачів, часті оновлення та можливості конфігурацій, в тому числі і настройки для відомих 3D принтерів.

1.3.3 Simplify3D

Програма-слайсер яка має гнучкий алгоритм який перевіряє модель на наявність проблем та виправляє їх, показує прев'ю процесу друку (ідеально для виявлення потенційних проблем) і потім нарізає її.

Simplify3D пропонує кращі серед конкурентів варіанти шаблонів заповнення. Для моделей, в яких потрібні підтримки, Simplify3D створить відповідні структури самостійно і надає вам повний контроль за їх розміщенням. Для принтерів з подвійним екструдером, при друку різними матеріалами допоможе майстер Dual Extrusion, в результаті чого, наприклад, видалити розчинний філамент буде легше.

Програма Simplify3D підтримує 90% наявних у продажу сучасних настільних 3D-принтерів і сумісна з програмне забезпеченнями Marlin, Sprinter, Repetier, XYZprinting, FlashForge, Sailfish і MakerBot. Simplify3D можна використовувати і для прямого управління принтером, але тоді принтер та комп'ютер повинні бути з'єднані один з одним. Програма є платною. Ціна програми 149\$(рис. 1.6).

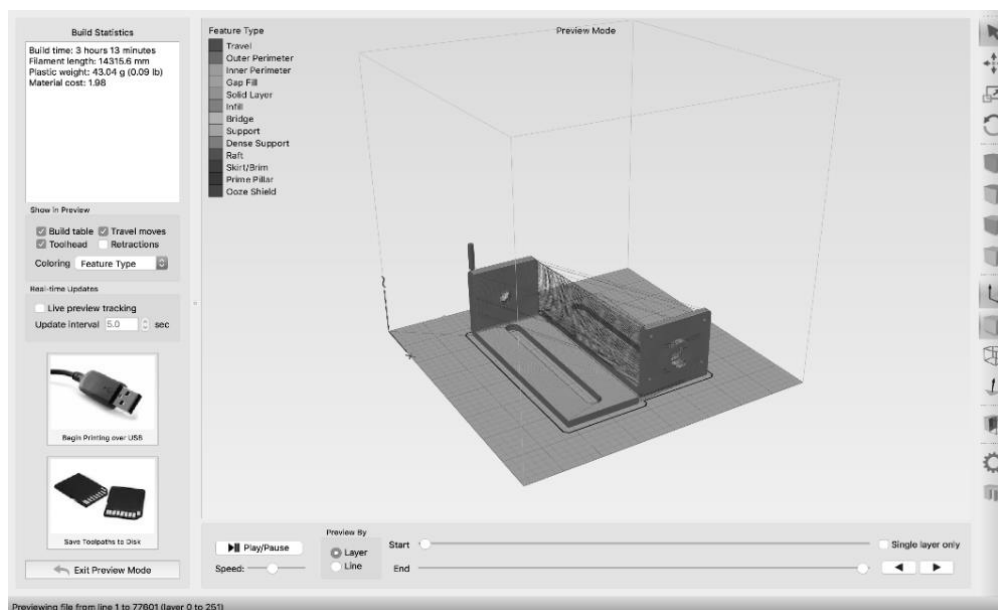


Рисунок 1.6 – Меню слайсеру Simplify 3D

1.3.4 CraftWare

Розроблена виробником 3D-принтерів, угорським стартапом CraftUnique, для підтримки свого громадського фінансування(Crowdfunding) принтеру CraftBot. Втім, програма працює і з іншими принтерами(рис. 1.7).

Як і в Cura, в CraftWare можна переключитися з «легкого» на «експертний» режим.

Цей яскравий додаток, що відрізняється наочною візуалізацією G-коду, на якій кожна функція представлена своїм кольором. Але найбільша особливість – індивідуальна служба підтримки. Програма знаходиться на стадії розробки.

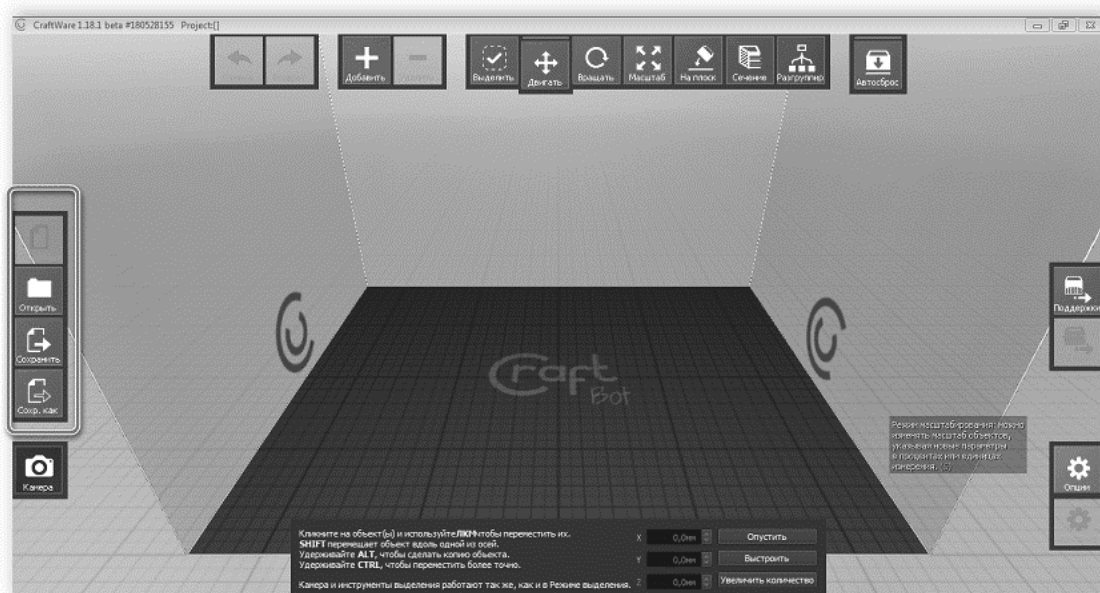


Рисунок 1.7 – Меню слайсеру Craftware

1.3.5 IceSL

Редактор та слайсер, програма має повноцінний функціонал для 3D-моделювання.

Особливості: можливе редагування полігональної сітки в Lua-кодi і перегляд зміни моделі в режимі реального часу. Також в IceSL реалізовані функції захисту від змінення пластику під час друку та пошарове відображення G-коду. MAC OS не підтримується(рис. 1.8).

1.3.6 SelfCAD

Програма для 3D-моделювання та 3D-друку. Може працювати і в автономному режимі.

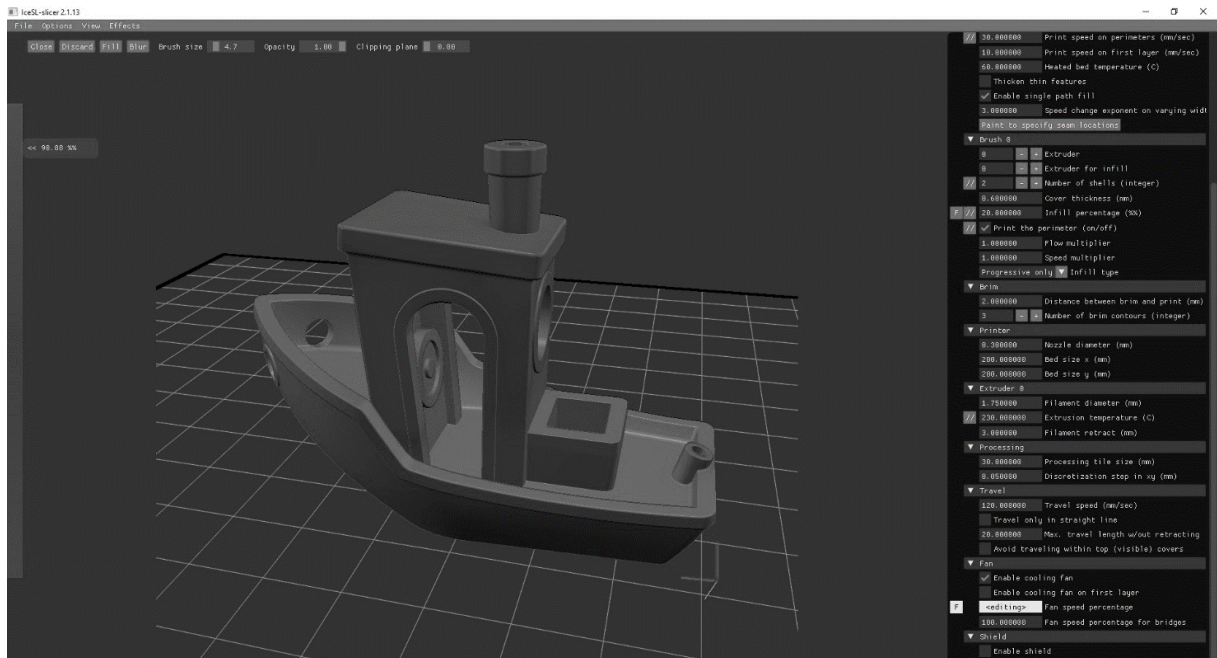


Рисунок 1.8 – Меню слайсеру IceSL

Інтерфейс простий, навіть початківець користувач може з нею розібратися. Реалізована функція зміни висоти шару, щільності заповнення, швидкості друку. Є можливість попереднього перегляду шарів, розрахунку приблизного часу друку та кінцевого ваги моделі. Можна імпортувати 3D-моделі зі сторонніх джерел.

Підтримується на Windows 7, 8 і 10, Mac і Linux з підтримкою браузера для Chrome, Firefox і Safari.

SelfCAD це проста у користуванні програма вона є зручною для користувача. Програмне забезпечення має численні засоби створення та модифікації, а також вбудовані автоматичні форми, гвинти, гайки, спіралі та генератори зображень. Іншою особливістю є вбудований інструмент для нарізки. SelfCAD має велику бібліотеку 3D об'єктів та частин. Програмне забезпечення також може похвалитися здатністю імпортувати моделі в формат STL і OBJ з інших програм 3D-дизайну.

Враховуючи, що SelfCAD розроблена для студентів і використовується у школах, компанія надає більше уваги розгортанню в секторі освіти. Наприклад, відповідно до їхньої веб-сторінки, так звана програма «SelfCAD для освіти» пропонує додаткові можливості та підтримку шкіл і педагогів. Деякі з цих функцій включають: доступ до спеціальної бази даних онлайн-зберігання, додаткові заходи безпеки, а також додаткову підтримку для вчителів(рис. 1.9) [13].

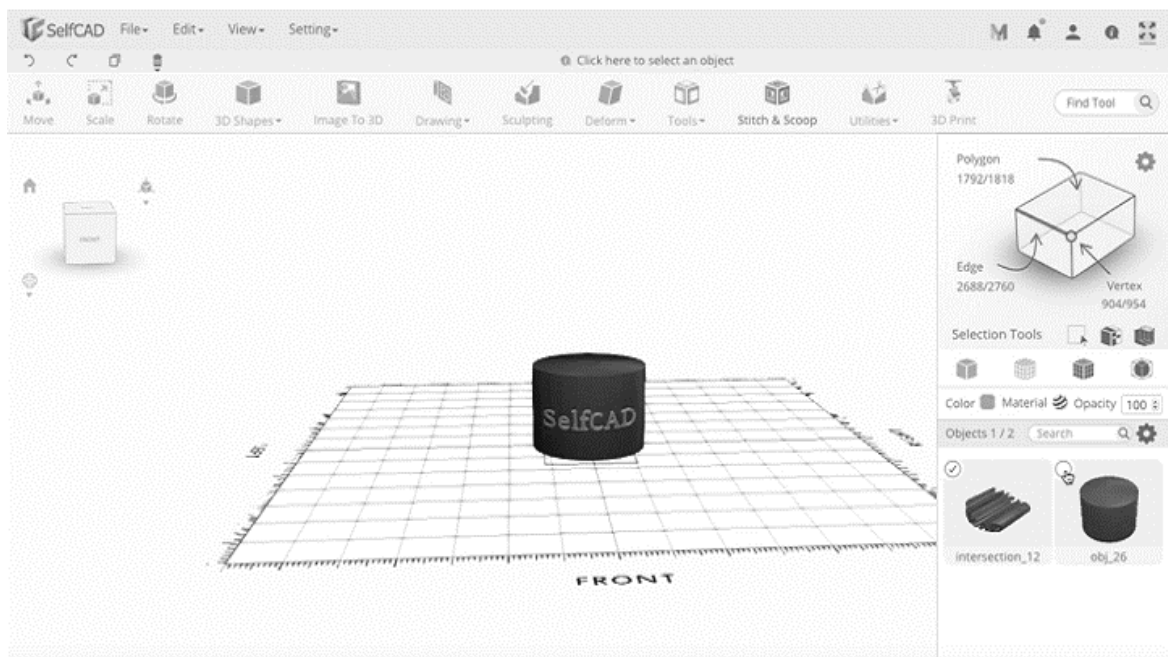


Рисунок 1.9 – Меню SelfCAD

1.3.7 Pathio

Програма використовує власний метод слайсингу, має назву 3D-offsetting. Функція дозволяє користувачам визначати товщину стінки, а потім обчислює зміщення стінки моделі для найбільш оптимального формування кромки і заповнення. В існуючих повзунках це досягається шляхом настройки багатьох параметрів (наприклад, верхніх суцільних шарів, нижніх суцільних шарів і т.д.), 3D-зміщення створює постійну товщину стінки у всій моделі без будь-яких розривів або отворів.

Виробник заохочує тестування і поширення результатів робіт, щоб перевірити подальші функціональні можливості і виявити і виправити будь-які помилки. Він також розраховує на те, що база даних профілів для

найпопулярніших 3D-принтерів буде побудована досить швидко – в даний час Pathio може використовувати, серед іншого користувачі популярного Creality Ender 3(рис. 1.10) [14].

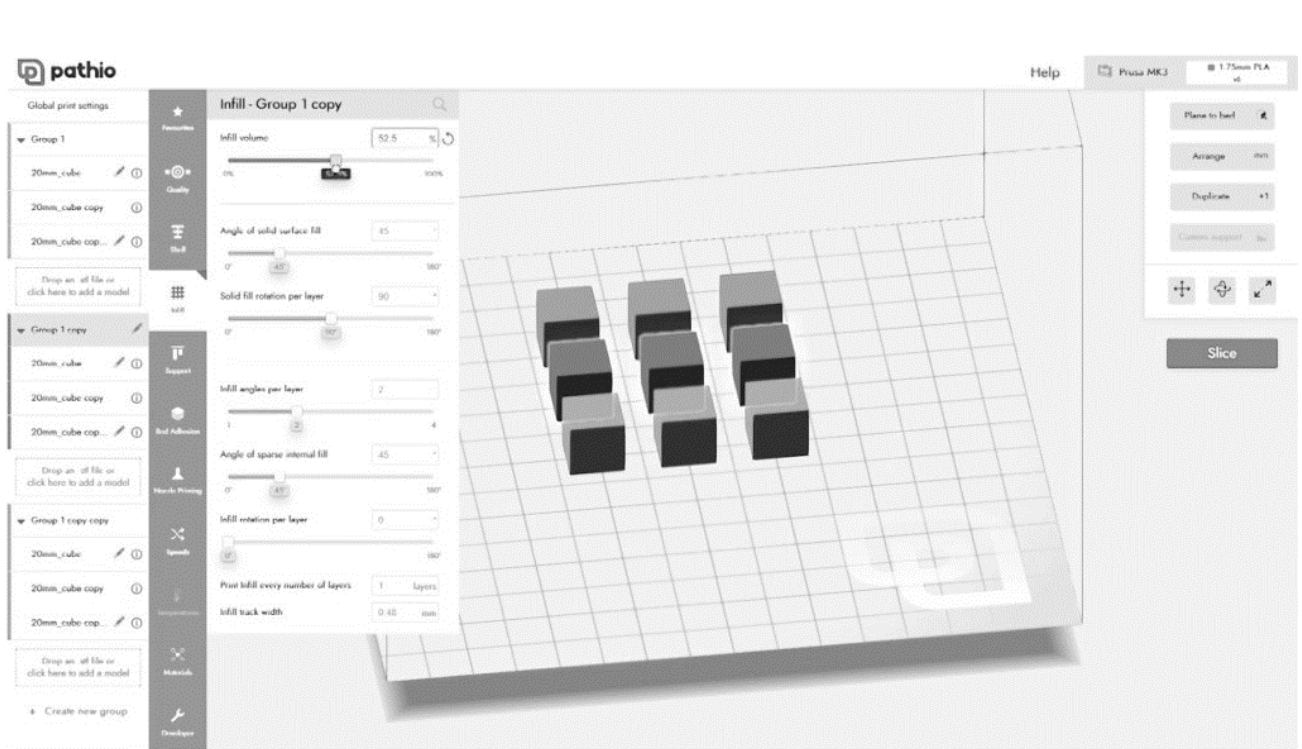


Рисунок 1.10 – Меню слайсеру Pathio

1.4 Висновки першого розділу

В першому розділі було проаналізовано програмне забезпечення яке використовується для контролювання 3D-принтером, прошивка та слайсери. А також були описані основні властивості, особливості та характеристики для кожного типу програмного забезпечення.

1.5 Аналіз завдання

Магістерська робота є дослідницькою роботою, має назву оптимізація впливу параметрів програмного забезпечення мікроконтролера та «слайсера» на якість 3D-друку. Для виконання магістерської роботи необхідно описати

можливі налаштування програмного забезпечення та описати вплив налаштувань на роботу 3D принтеру, якість його друку та час друку.

Далі необхідно розробити план за яким буде виконуватися експериментальне дослідження, описати обрані параметри та 3D-моделі необхідні експерименту.

Наступним виконати експериментальне дослідження, отримати дані з цього дослідження, проаналізувати дані отримані після закінчення дослідження, використати отримані данні для створення парної регресійної моделі та описати формули та параметри використані при моделі.

2 НАЛАШТУВАННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

2.1 Розрахунок параметрів для крокових двигунів

Для точної роботи крокових двигунів необхідно розрахувати stepper unit тобто кількість кроків щоб пересунути ось на 1мм.

2.1.1 Розрахунок кроку кулько-гвинтової передачі

Для осі Z яка основана на двох двигунах NEMA 17 та двох кулько-гвинтових передачах необхідно розрахувати значення stepper unit для точного позиціонування столу для друку відносно осі X та Y.

Для розрахунку значень stepper unit необхідно знати значення таких елементів:

- а) Кількість кроків двигуна на повний оберт навколо своєї осі;
- б) Кількість мікро кроків драйвера для двигуна;
- в) Крок кулько-гвинтової передачі для повного оберту.

Для крокового двигуна NEMA 17 з кроком в 1.8° необхідно 200 кроків для повного оберту навколо своєї осі.

Драйвер DRV8825 має виставлене значення мікрокроку 1/32.

Крок КГП для повного оберту має значення 4мм виходячи з документації КГП.

$$SPU_{кгп} = a * \frac{b}{z}, \quad (2.1)$$

де a – кількість кроків для повного оберту двигуна на 360° , кр;

b – кількість мікрокроків драйверу;

z – крок різьби КГП, мм.

Виходячи з формули 2.1 значення кроку для системи з КГП осі Z має значення 1600 обертів двигуна щоб підняти ось Z на один мм.

2.1.2 Розрахунок кроку для ремінної системи

Розрахунок для ремінної системи для X та Y осі, необхідно знати скільки зубців має шків, тобто 20, скільки оборотів повинен зробити двигун при повороті на 360 градусів, тобто 200, та які мікрокроки використовує драйвер, так як ремінь який використовується GT2 має відстань між зубцями ременя 2мм.

$$SPUP = a * b/v * c, \quad (2.2)$$

де a – кількість кроків для повного оберту двигуна на 360, кр;

b–кількість мікрокроків драйверу;

c–кількість зубців на шківі, шт;

v–відстань між зубцями ременю, мм.

Виходячи з формули 2.2 значення кроку для ремінної системи принтеру дорівнює 160 stepper unit.

2.2 Налаштування температури

Новітні Arduino використовують контролер AVR з роздільною здатністю 10 біт. Напруга перетворюється в число між 0 для землі і 1023 для VRef, що, як правило, 5V. Новітні Arduino використовують контролер AVR з роздільною здатністю 10 біт. На рис. 2.1 зображено схему підключення термістору.

Напруга перетворюється в число між 0 для землі і 1023 для VRef, що, як правило, 5В. Новий контролер XМega AVR має дозвіл 12 біт, що призводить до значень від 0 до 4095. Програмне забезпечення автоматично додає 4 показання для розрахунку температури, в результаті чого температура знаходиться в діапазоні від 0 до 4092.

З цього значення, програмне забезпечення обчислює температуру в термісторі. Крива напруги-температури нелінійна і відрізняється для кожного типу термісторів. Навіть різні 100К термістори мають різні криві.

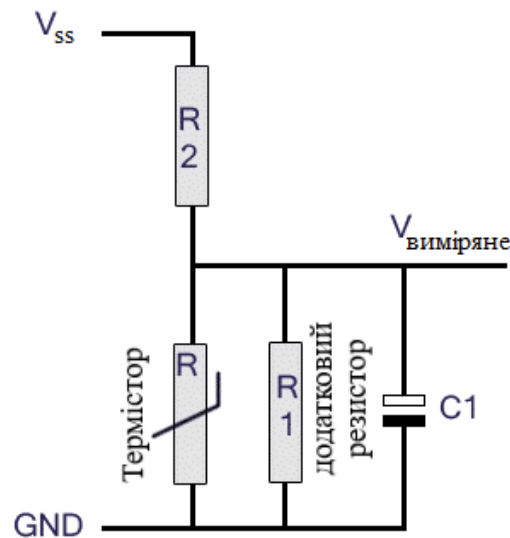


Рисунок 2.1 – Схема підключення термістору

Програмне забезпечення використовує таблицю пошуку, з якої вона інтерполює температури між заданими значеннями.

Одна з таблиць налаштувань термістору:

```
#define USER_THERMISTORTABLE0 {\
    {1*4,864*8},{21*4,300*8},{25*4,290*8},{29*4,280*8},{33*4,270*8},{39*
4,260*8},{46*4,250*8},{54*4,240*8},{64*4,230*8},{75*4,220*8},\{90*4,210*8},
    {107*4,200*8},{128*4,190*8},{154*4,180*8},{184*4,170*8},{221*4,160*8},{265
*4,150*8},{316*4,140*8},{375*4,130*8},\{441*4,120*8},{513*4,110*8},
    {588*4,100*8},{734*4,80*8},{856*4,60*8},{938*4,40*8},{986*4,20*8},{1008*4,
0*8},{1018*4,-20*8} }
```

Таблиця містить 28 еталонних значень.

```
#define NUM_TEMPS_USER_THERMISTOR0 28
```

Таблиця містить 28 пар {adc, температура * 8} з відображенням adc в діапазоні від 0 до 4093 і значенням температури, помножених на 8 як ціле число. Пари повинні бути впорядковані з підвищенням значень.

Таблиця складається з двох стовпців. Перший – це значення напруги, а другий – температура. У таблиці видно, що показання множиться на 4, а значення температури – на 8. Оскільки більшість прошивок використовують діапазон читання від 0 до 1023 і повні цілі значення для температур. Repetier-Firmware

використовує більш високу роздільну здатність для введення температури, і цей фактор перетворює значення таблиці, які приймаються в необхідному діапазоні значень для Repetier-Firmware. Табличні данні дають характеристичну криву для термістора 8404. Данні в таблиці показують температури і коефіцієнт $RT / R25$. Знаючи $R25$ 100K, обчислюємо опір для кожної температури. Для 100°C . Отримуємо фактор 0.063688, тому $R100 = 100000 * 0.063688 = 6368.8$. У цьому прикладі приймаємо $R1$ не присутній і $R2 = 4,7\text{K}$. $U100 = 4093 * 6368.8 / (6368.8 + 4700) = 2355 = 4 * 588.76$.

2.2.1 Контроль температури

Знаючи температуру, можна почати керувати нагрівачем. Програмне забезпечення підтримує два методи [15].

а) Контролювання температури за допомогою двопозиційного регулятора.

Це метод, який використовується для нагрітого столу і екструдера, якщо встановити рівень нагріву на 0. Принцип дуже простий. Якщо виміряна температура нижче заданої температури, нагрівач встановлюється на повну потужність. Якщо температура підвищується вище заданої температури, нагрівач вимикається. Плюси: просте налаштування. Мінуси: Температура коливається навколо цільової температури. Для обігрівання столу, це не проблема.

б) ПІД-керування.

Для керування температурою використовується вбудований ПІД-контролер. Для цього потрібний вихід ПІД з невикористаним таймером.

/ ** Максимальне значення I-gain може сприяти виведенню.

Значення для екструзії:

130 => PLA для температур від $170-180^{\circ}\text{C}$

180 => ABS для температур близько 240°C

Точні значення можуть відрізнятися для різних комбінацій сопла / резистора.

```
Перевизначається, якщо активовано EEPROM.* /
#define EXT0_PID_INTEGRAL_DRIVE_MAX 150
/ ** – нижнє значення для складової частини
```

Стан I-gain повинен підходити до точної температури нагрівача, необхідного для цільової температури.

Щоб запобігти тривалому відхиленню від цільової зони температур, обмежується найнижче значення.

Стабільний старт значення нижче на 30 ніж оптимальна температура. Необхідно залишати місце для охолодження.

```
Перевизначається, якщо активовано EEPROM.* /
#define EXT0_PID_INTEGRAL_DRIVE_MIN 60
/ ** P-коефіцієнт посилення.
```

```
Перевизначається, якщо активовано EEPROM.* /
#define EXT0_PID_P 24 / ** I-gain.
```

```
Перевизначається, якщо активовано EEPROM.* /
#define EXT0_PID_I 0.88/ *
* Dgain.
```

```
Перевизначається, якщо активовано EEPROM./ *
#define EXT0_PID_D 80
// максимальний час увімкнення нагрівача. Max = 255.
```

```
Перевизначається, якщо активовано EEPROM.
#define EXT0_PID_MAX 255
```

PID_MAX – це максимальне значення ПІД для виходу. Обирається нагрівальний резистор, якому дозволено максимальне значення 255, тобто повна напруга (зазвичай 12В) надсилається на резистор. Втрачена енергія на резисторі U^2 / R . Якщо напруга збільшується вище ніж розрахована напруга, необхідно знизити значення PID_MAX.

На початку, контролер поводить себе як двопозиційний регулятор, за винятком того, що він використовує PID_MAX замість повної потужності. Як тільки поточна температура знаходиться в діапазоні ± 10 ° С від цільової

температури, починається регулювання температури за допомогою ПД. Для виводу обчислюються і додаються три умови P, I і D для отримання вихідного значення. Результат обрізається до діапазону 0..PID_MAX.

Для обчислення P-значення використовується формула:

$$P = (T_{Target} - T_{Current}) * P_{GAIN}, \quad (2.3)$$

де TTarget – необхідна температура;

TCurrent – виміряна температура;

P_GAIN – пропорційний коефіцієнт підсилення.

Чим ближче температура до цільової температури, тим менше P значення.

Також важливим є I-GAIN або інтегральний коефіцієнт, намагається знайти ідеальний вихід для температури. Він робить це, збільшуючи / зменшуючи вихідну температуру повільно. Швидкість визначається параметром I_GAIN. Якщо обмежити діапазон можливих значень до відомого діапазону INTEGRAL_DRIVE_MIN .. INTEGRAL_DRIVE_MAX. Мінімальне значення має бути не менше 0, а максимум не перевищувати 255. Команда перевіряє значення температури M203 S0. Коли стабілізується температура, до середнього значення додається або віднімається 20

Якщо I_GAIN встановлено на необхідне значення, коливання ставатимуть меншими з часом. Перешкоди, подібні до різної швидкості друку або охолодження на екструдері, можуть знову збільшити помилку.

D-GAIN є коефіцієнтом гасіння. З хорошим фактором демпфування, коливання будуть сповільнюватися набагато швидше, тим самим отримуємо більш стабільну систему.

Щоб подолати проблеми з налаштуванням ПД, програмне забезпечення має функцію автоналаштування, щоб знайти потрібні значення. Для цього необхідно вимкнути екструдер і зачекати, доки він не стане більш-менш

холодним. Потім необхідно розпочати автоналаштування за допомогою команди M303 P0 S180

Це передбачає знаходження значення ПІД для першого екструдера, і типова температура екструдера буде 180°C. Для другого екструдера використовується P1, а для нагрітого столу використовується кількість екструдерів як P-GAIN.

SCALE_PID_TO_MAX

Цей параметр лише вказує, коли і як масштабувати до DRIVE_MAX. Якщо встановлено значення 0, додавання ПІД-значень закріплюється до 0..DRIVE_MAX. Якщо встановити цей параметр на 1, значення ПІД залишається до 0..255 і потім масштабується до 0..DRIVE_MAX.

Якщо були розраховані ідеальні значення для 12V та DRIVE_MAX = 255, а тепер необхідно використовувати 18V, потрібно зменшити DRIVE_MAX до $DRIVE_MAX_OLD * (12 \wedge 2 / 18 \wedge 2) = 113$, щоб захистити резистор від перегорання. Якщо необхідно зберегти знайдені коефіцієнти, потрібно встановити DRIVE_MAX на 133 і SCALE_PID_TO_MAX 1. Якщо залишити його зі значенням 0, знайдені значення будуть занадто високими і більше не будуть працювати.

2.3 Налаштування різких рухів

Ривок – це те, що додає принтеру деяких різких рухів. Це різниця швидкості між двома рухами, яка може бути досягнута без прискорення. Ривок впливає на початкову швидкість.

Так, якщо є значення ривку 20, перший крок почнеться з 10мм / с. З іншого боку ривок контролює швидкість приєднання для послідовних сегментів. На рис. 2.2 два приклади.

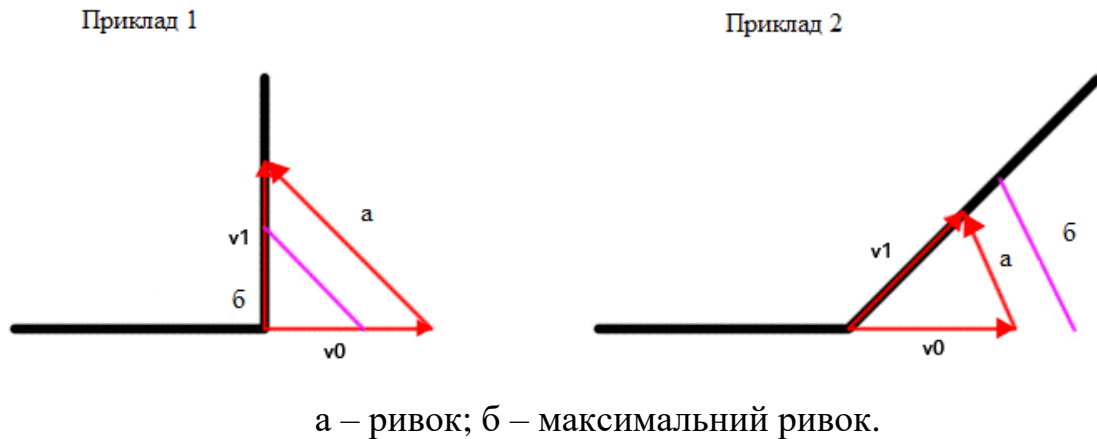


Рисунок 2.2 – Приклади ривку

Ривок – це різниця двох швидкостей. Приклад 1 показує ривок значення якого вище ніж дозволено. У цьому випадку планувальник рухів зменшить швидкість відповідно до максимально дозволеної швидкості. Приклад 2 має більш низьку зміну напрямку, тому ривок знаходиться в межах допустимого і планувальник дозволяє рухатися з повною швидкістю переміщення.

Ривок задається за допомогою двох значення:

```
#define MAX_JERK 20.0
```

```
#define MAX_ZJERK 0.3
```

MAX_JERK призначено для переміщення по осі x / y, а MAX_ZJERK для переміщення в осі Z.

Плюси високих значень ривка:

- а) скорочується час друку;
- б) друк показує менше крапель.

Плюси низьких значень ривка в тому що:

- а) менше механічного навантаження на принтер;
- б) рухи більш плавні;
- в) філамент має кращу адгезію при зміні напрямку друку;
- г) зменшує шум принтера;
- г) втрачаються кроки з більш високими значеннями.

2.4 Планування шляхів

Планування шляхів робить принтер більш плавним. Рис. 2.3 представляє друк трьох рядків. Без планування шляхів принтер повинен слідувати за повноцінною лінією контуром. Для кожного сегмента він прискориться до заданої швидкості подачі і повернеться до максимально допустимої кінцевої швидкості.

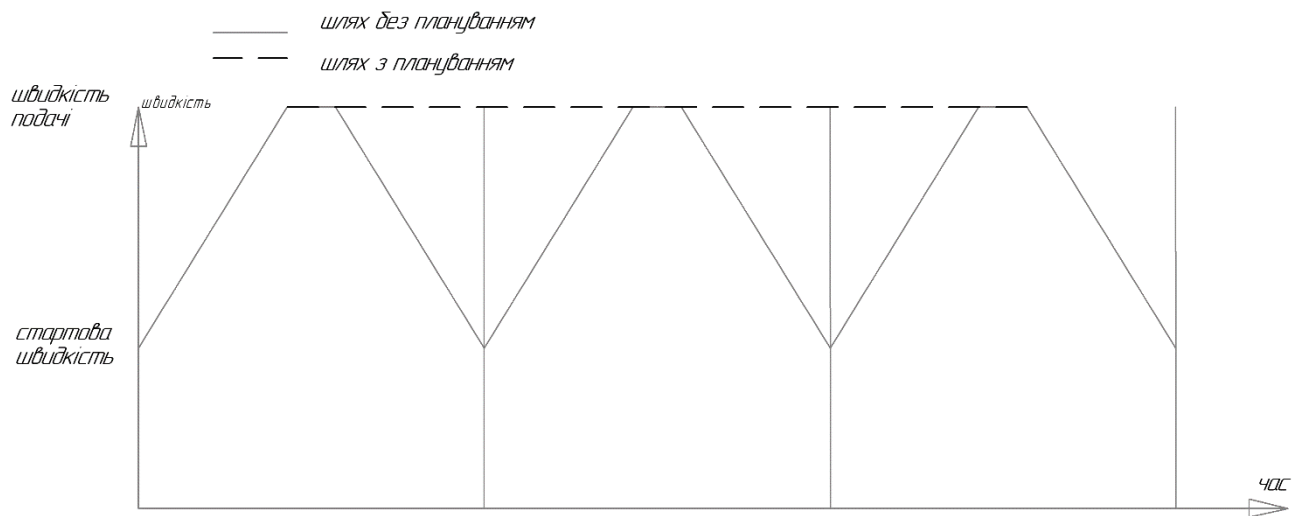


Рисунок 2.3 – Планування шляхів

Планувальник шляхів шукає попередні ходи, які не виконуються зараз, і намагається видалити сповільнення або прискорення між з'єднаннями лінії, що призводить до більш гладкої пунктирної лінії. Для кожного з'єднання лінії розраховується максимально допустимий ривок і скорочується швидкість, якщо це необхідно для зменшення ривку. У більшості випадків це все ще набагато швидше, ніж швидкість запуску або зупинки. У колах, швидше за все, не буде зниження швидкості. Єдина погана річ в плануванні шляхів – це необхідність розрахунку часу.

Для кожного нового сегмента лінії алгоритм повинен оновити старі записи. Для нормальних рухів, це не важливо та відбувається занадто швидко. Тільки якщо існує багато дуже коротких рухів, час оновлення стає домінуючим,

а програмне забезпечення має уповільнити друк. На поведінку впливає наступний параметр конфігурації:

`MOVE_CACHE_SIZE` (за умовчанням 16)

Тобто розмір буфера для поточно обробленого сегмента і наступних ходів. Якщо є 8кб вільної оперативної пам'яті, можливо збільшити її до 24, якщо необхідно. Це може зробити друк більш гладким, якщо вони мають багато маленьких рядків.

`MOVE_CACHE_LOW` (за умовчанням 10)

Планувальник шляхів має деякі фокуси для запобігання порожнім буферам. Перший – зробити мінімальний час руху за сегмент. Якщо буфер має тільки `MOVE_CACHE_LOW` або менше сегментів, кожен сегмент уповільнюється, якщо в іншому випадку він буде меншим. Для типових друкованих файлів буфер завжди має `MOVE_CACHE_SIZE` або `MOVE_CACHE_SIZE-1` переміщується, а звичайні проходи достатньо довгі, щоб зниження швидкості не потребувалося. Це налаштування ефективно лише для дуже коротких рухів. Більш високі значення можуть збільшити вартість обчислення в екстремальних ситуаціях.

`LOW_TICKS_PER_MOVE` (за умовчанням 250000)

Мінімальний час у тактах процесорів, кожен сегмент повинен мати, якщо кеш низький. Значення за замовчуванням означає, що в секунду буде надруковано 40 сегментів.

2.4.1 Згладжування траєкторії руху

Програмне забезпечення використовує алгоритм Брезенхема(рис. 2.4) для обчислення осей x , y , z і e . Він приймає ось з найбільшою кількістю необхідних кроків і рухається по кроках цієї осі.

На цих кроках програмне забезпечення перевіряє, якщо інші осі також потребують кроку. Що відбувається, час первинної осі є ідеальним, в той час як залежні осі тільки оновлюються у дискретних точках, але не в найкращий час [16].

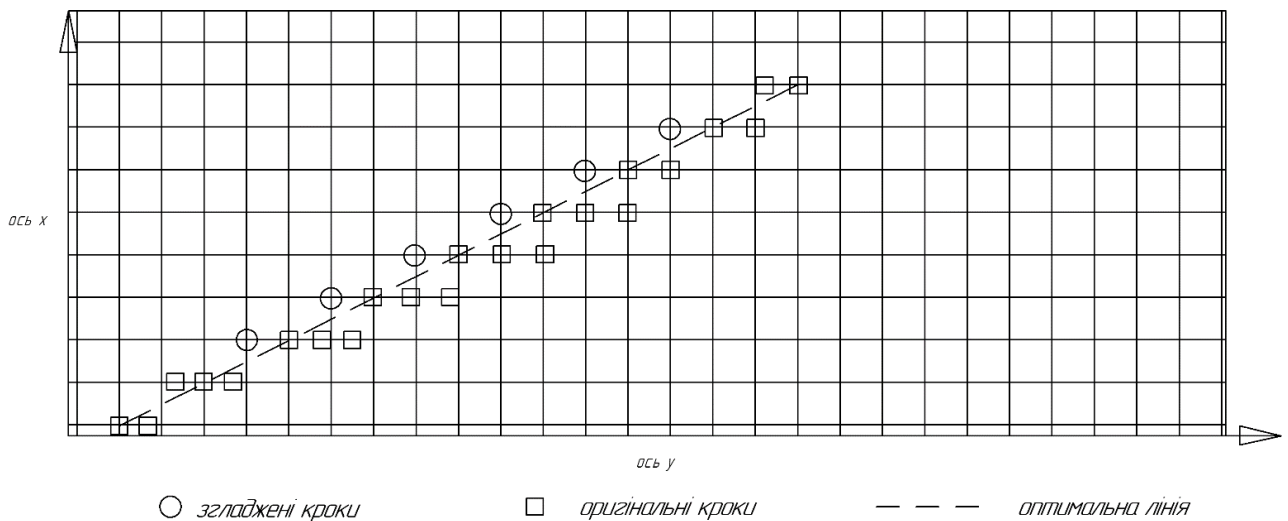


Рисунок 2.4 – Алгоритм Брезенхема

Це надає невеликого тремтіння до залежної осі. Щоб зменшити цей ефект, програмне забезпечення може виконувати напів кроки на основній осі. Ціна цього подвійне обчислення для крокового оновлення.

З метою безпеки ця поведінка ввімкнена, лише якщо найкоротший час між двома повними кроками перевищує `MAX_HALFSTEP_INTERVAL` (за замовчуванням 1999). Це дозволяє згладжувати з частотою 8000 герц. Якщо 80 кроків / мм, можливо друкувати до 100 мм / с та користуватися ефектом згладжування.

2.5 Налаштування швидкості

Швидкість подачі завжди в мм / с.

Спочатку слід зрозуміти з якою максимальною швидкістю може працювати принтер. Більшість принтерів зможуть обробляти 100мм / с (окрім осі z, що набагато повільніше для більшості типів принтерів). 200мм / с є середньою швидкістю, з якою може працювати більшість принтерів. Швидкі принтери досягають 500 мм / с. Необхідно перевірити ці значення, коли встановлене програмне забезпечення. Необхідно зменшувати швидкість друку на 20-30% від максимально вирахованої. Можлива втрата кроків двигунів через занадто швидкий друк. Струм двигуна також впливає на швидкість. Необхідно мати на

увазі, що високий струм нагріває двигуни та драйвери, що також може призвести до втрати кроків.

```
#define MAX_FEEDRATE_X 200
#define MAX_FEEDRATE_Y 200
#define MAX_FEEDRATE_Z 1600
```

Далі йде швидкість наведення. Це значення має бути набагато нижчим, ніж максимальне. Принтер повинен негайно зупинитися, коли спрацює кінцевий датчик зупинки. Тому беруться значення, які дозволяють зупинитися без уповільнення.

```
#define HOMING_FEEDRATE_X 40
#define HOMING_FEEDRATE_Y 40
#define HOMING_FEEDRATE_Z 2
```

Програмне забезпечення розрізняє звичайні переміщення та рух при друці. Звичайні переміщення не впливають на якість друку, тому тут можна використовувати більш високі значення. Для осі x і y 500 мм / с² повільно, 1000мм / с² помірне значення для плавного друку і 3000 мм / с² добре для швидкого руху.

```
#define MAX_ACCELERATION_UNITS_PER_SQ_SECOND_X 1500
#define MAX_ACCELERATION_UNITS_PER_SQ_SECOND_Y 1500
#define MAX_ACCELERATION_UNITS_PER_SQ_SECOND_Z 100
#define
MAX_TRAVEL_ACCELERATION_UNITS_PER_SQ_SECOND_X 3000
#define
MAX_TRAVEL_ACCELERATION_UNITS_PER_SQ_SECOND_Y 3000
#define MAX_TRAVEL_ACCELERATION_UNITS_PER_SQ_SECOND_Z
100
```

Стандартні значення для крокових таймінгів працюють відмінно з мікросхемами драйверів Allegro stepper, які використовуються на більшості RepRap. Необхідно змінювати його якщо використовується інший драйвер, який потребує більш повільних таймінгів.

Сигнал кроку, як правило, зберігається високим близько 2 мкс, залежно від ситуації. Можливо збільшити цей час за допомогою

```
#define STEPPER_HIGH_DELAY 0
```

Одиниці вимірювання в мкс.

Реальна межа для точного позиціонування крокових імпульсів становить близько 16000 Гц. При такій швидкості більше 80% часу обчислення витрачається в кроковій площині і не залишає багато місця для інших завдань. Хитрість полягає в тому, щоб збільшити в два або чотири рази число крокових сигналів в одному обчисленні. Частота, де це починається, є

```
#define STEP_DOUBLER_FREQUENCY 10000
```

Якщо частота вище, то це значення програмного забезпечення подвоїть кроки для частот від 10000 до 20000 Гц та дозволить використовувати чотириразові кроки вище 20000 Гц.

Якщо активовано подвійний / чотириразовий степінг, послідовні кроки відкладаються

```
#define DOUBLE_STEP_DELAY 1 // час у мкс
```

2.6 Налаштування екструдера

```
#define NUM_EXTRUDER 1
```

Програмне забезпечення розраховане на підтримку 2 або 3 екструдерів. Ця функція не протестована добре, тому ніхто не зможе сказати, чи буде він працювати.

Якщо в принтері є другий екструдер, потрібно скопіювати визначення EXT0_ і перейменувати їх в EXT1_ для конфігурації другого екструдера.

```
#define EXT0_X_OFFSET 0
```

```
#define EXT0_Y_OFFSET 0
```

Команди друку засновані на одній позиції для всіх інструментів. Перемикання екструдера необхідно для переміщення головки, тому другий

екструдер знаходиться точно в положенні першого екструдера. Ці координати відрізняються від положення першого екструдера.

```
#define EXT0_STEPS_PER_MM 373
```

Скільки кроків робить необхідно зробити двигуну для переміщення нитки 1 мм. Це число для нитки, що входить, а не виходить.

```
#define EXT0_TEMPSENSOR_TYPE 5
```

Який тип датчику використовується в екструдері. Файл конфігурації містить список можливих значень.

```
#define EXT0_TEMPSENSOR_PIN 0
```

Цей параметр є складним і часто викликає неправильні конфігурації. З історичних причин його називають PIN-кодом, але це не PIN код. Це положення в масиві джерел аналогових входів. У цьому масиві зберігається справжній код. У 99,9% 0 тут правильна відповідь.

```
#define EXT0_HEATER_PIN HEATER_0_PIN
```

Який пін вмикає блок нагрівача. Він працює з будь-яким піном. Можливість управління через PWM не потрібна для використання PID на виході.

```
#define EXT0_STEP_PIN E_STEP_PIN
```

Який пін переміщує кроковий двигун на один крок далі.

```
#define EXT0_DIR_PIN E_DIR_PIN
```

Який пін визначає напрямок повороту екструдера.

```
#define EXT0_INVERSE
```

Якщо ваш екструдер повертається в неправильному напрямку, змініть значення на true.

```
#define EXT0_ENABLE_PIN E_ENABLE_PIN
```

Прикріпіть, щоб активувати / деактивувати кроковий двигун екструдера. Для інвертування пінів з активацією степер двигунів (Active Low) використовуйте 0, Non Inverting (Active High) використовуйте 1

```
#define EXT0_ENABLE_ON
```

Для інвертування шпильок включити степер (активний низький) використовувати помилкові, без інвертування (Active High) використання

істинного.

```
#define EXT0_MAX_FEEDRATE 1500
```

Максимальна швидкість подачі екструдера в мм / хв.

```
#define EXT0_MAX_START_FEEDRATE 18
```

Початкова швидкість подачі в мм / с екструдера. Нормальна швидкість подачі становить 12-20мм / с залежно від сили двигуна, типу тертя і екструдера. Якщо екструдер зупиняється на втягуванні філаменту з самого початку, необхідно зменшити це значення.

```
#define EXT0_MAX_ACCELERATION 6000
```

Прискорення екструдера в мм / с².

```
#define EXT0_HEAT_MANAGER 1
```

Тип теплового менеджера для цього екструдера.

0 = Просто увімкніть / вимкніть при досягненні температури. Працює завжди.

1 = Контроль температури через ПІД регулятор.

Цей метод дає більш стабільні результати з хорошим встановленням параметрів PID.

```
#define EXT0_WATCHPERIOD 20
```

Зачекати x секунд після досягнення цільової температури.

Використовується тільки для M109.

```
#define EXT0_PID_INTEGRAL_DRIVE_MAX 130
```

Максимальне значення I-gain може сприяти виведенню.

Залежно від нагрівача ці значення можуть змінюватися. Якщо принтер не може утримувати цільову температуру або не досягає її, необхідно збільшити це значення

```
#define EXT0_PID_INTEGRAL_DRIVE_MIN 50
```

Менше значення для інтегрованої частини. Щоб запобігти тривалому відхиленню від цільової зони, це значення обмежує нижнє значення.

```
#define EXT0_PID_PGAIN 500
```

P-коефіцієнт посилення в 0,01 одиниць.

```
#define EXT0_PID_IGAIN 1
```

I-посилення в 0,001 одиниці.

```
#define EXT0_PID_DGAIN 3000
```

D-коефіцієнт посилення в 0,01 одиниць.

```
#define EXT0_PID_MAX 255
```

Максимальний час увімкнення нагрівача. Max = 255. Це працює тільки з PID. Потужність, розсіяна нагрівальним резистором, становить U^2 / R . Якщо збільшити напругу, резистор може пошкодитись, якщо використовується все ще повна потужність.

```
#define EXT0_ADVANCE_K 0.0f
```

```
#define EXT0_ADVANCE_L 0.0f
```

2.7 Застрягання та перевірка закінчення філаменту

Програмне забезпечення підтримує застрягання та датчики філаменту. Ці датчики працюють досить просто. Нитка проходить через датчик і повертає колесо. Колесо повороту вмикає або вимикає перемикач. Це може бути механічний перемикач, але краще коли він подібний до датчику світлового бар'єру або датчику Хола. Один цикл увімкнення або вимкнення завжди повинен мати таку ж кількість кроків екструдера (JAM_STEPS).

Екструзія стає важчою через часткове закупорювання або зменшене зчеплення. У цьому випадку необхідно зменшити швидкість, встановивши множник швидкості на JAM_SLOWDOWN_TO.

Значення 0 просто надрукує попередження на РК-дисплеї вимагає від принтера звуковий сигнал. Дія 1 виводить сповіщення на екран та зупиняє будь-який зв'язок, що перешкоджає подальшому друку, переміщує екструдер на положення зміни філаменту і відключає нагрів і всі двигуни, які б перемістилися на домашню позицію після зміни нитки. Потім він чекає реакції користувача.

Перший клік на РК-дисплеї буде повторно нагрівати екструдери. Потім доведеться почекати, доки всі екструдери будуть знову нагрілися. Після цього

необхідно перемістити екструдер, щоб видалити філамент, та перевірити чи працює екструзія, тощо. Наступна дія вимагатиме призупинення від хоста або призупинить друк з флешки.

Для обробки нової функції є нові команди:

M513 Скидає сигнал застрягання, тому принтер перестає скаржитися на заклинювання, а також вимикає звуковий сигнал.

M601 S1 призупиняє нагрівання екструдера, тоді як M601 S0 відновлює нагрівання перед паузою.

M602 S <1/0> P <1/0> Призначений для налагодження застрягання (значення S) або вимкнення регулювання затримки (значення P).

Це необхідно щоб з'ясувати, при якій швидкості екструзії сили стають занадто високими, так що екструдер починає ковзати.

2.8 Конфігурація інтерфейсу користувача

Можливо контролювати всі операції принтера через послідовну лінію зв'язку. Але якщо є декілька принтерів то найпростіший додатковий спосіб введення це користувацький інтерфейс.

Найпростішим доповненням є РК-дисплей, який показує деякі поточні дані, такі як температура екструдера, ліжка або рівень z. Необхідний мінімум три сигнали. Можливе використання поворотного датчику з кнопковою функцією або трьома простими кнопками. Також можливе додавання повноцінної матриці кнопок до 4 × 4 кнопок. Для акустичного зворотного зв'язку можливе додання п'єзоелементу.

Поточна реалізація підтримує пряме підключення до контактів IO Arduino або непрямого підключення через I2C до чіпа PCF8574, де підключені дисплей і клавіші або зумер. Необхідний один чіп для дисплея і один для клавіш та зумеру. Якщо є вільні контакти, простіше використовувати пряме з'єднання.

2.9 Підготовка плати до запису програмного забезпечення

Для запису будь-якого програмного забезпечення на плату Ramps або будь-яку іншу плату на базі ATmega 2560 необхідно підготувати пам'ять пристрою до запису та протестувати її роботу. Це робиться за допомогою програмного комплексу Arduino IDE який включає в себе не тільки редактор коду але і програматори різних типів які мають як програмні так і апаратні аналоги.

Для початку необхідно встановити Arduino IDE та драйвери які йдуть в комплекті з ним потім необхідно налаштувати швидкість передачі даних між платою та комп'ютером, швидкість передачі даних визначається за допомогою програмного забезпечення та комп'ютера.

Найбільш стабільна швидкість передачі даних для програмного забезпечення Repetier-Host це 115200 бод за секунду (92160 біт на секунду) при цій швидкості не буде помилок передачі та не буде затримок в діях принтеру.

Для очищення плати та перевірки її готовності використовують код в якому світлодіод стану налаштовується на мигання(рис. 2.5).

```

blink | Arduino 1.8.9
Файл  Правка  Скетч  Інструменти  Допомога
✓ ↶ ↷ ⌨ ⬆ ⬇
blink
// the setup function runs once when you press reset or power the board
void setup() {
  // initialize digital pin LED_BUILTIN as an output.
  pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);
}

// the loop function runs over and over again forever
void loop() {
  digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH); // turn the LED on (HIGH is the voltage level)
  delay(1000); // wait for a second
  digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW); // turn the LED off by making the voltage LOW
  delay(1000); // wait for a second
}

```

Рисунок 2.5 – Код налаштування світлодіоду

Якщо необхідно очистити пам'ять EEPROM використовується такий код:
`#include <EEPROM.h>`

```

void setup() {
// Визначення світлодіоду як виходу.
pinMode(13, OUTPUT);
for (int i = 0 ; i < EEPROM.length() ; i++) {
EEPROM.write(i, 0); }
// Включити світлодіод коли програма виконається
digitalWrite(13, HIGH);}
void loop() {}

```

Після перевірки плати та мікроконтролеру на працездатність на неї записують необхідний код програмного забезпечення.

2.10 Налаштування слайсеру

2.10.1 Додавання 3D принтеру в слайсер

Після встановлення програмного забезпечення Cura необхідно додати 3D принтер для подальшого налаштування слайсеру. Для цього в Головному меню програми обрати «Параметри» → «Принтер» → «Додати принтер».

Після відкриття екрану «Додавання принтера». В запропонованому списку можливо вибрати принтер, але тільки якщо виробник додав його в програмне забезпечення. Але якщо принтера немає в списку, то необхідно натиснути на кнопку «Other» і також із запропонованого списку вибрати свій принтер.

Якщо принтеру немає в списку можливо додати свій принтер, натиснувши на кнопку «Custom», змінити його ім'я та натиснути кнопку "Додати принтер».

Перед Вами відкриється вікно «Додавання принтера – Параметри принтеру»

В вкладці принтер необхідно встановити наступні дуже важливі параметри(рис. 2.6):

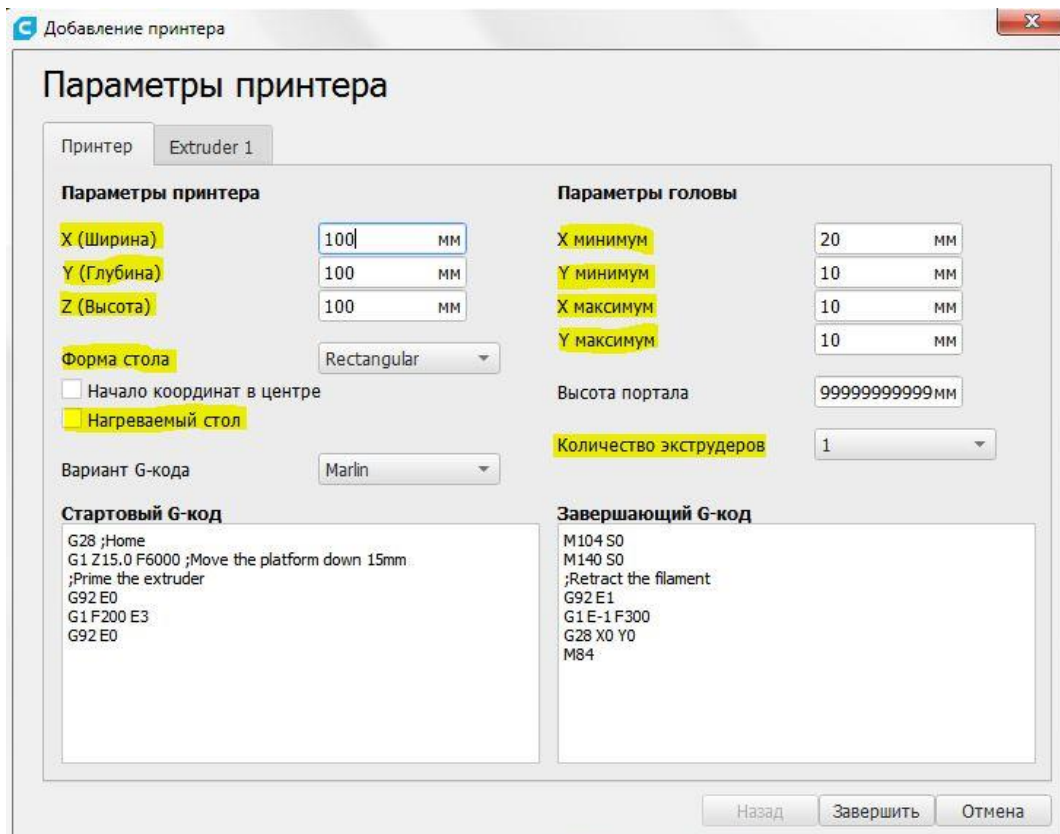


Рисунок 2.6 – Вкладка параметри принтеру в слайсері Cura

- а) ширина друкованої області X;
- б) глибина друкованої області Y;
- в) висота друкованої області Z;
- г) стіл з підігрівом (в разі якщо він має опцію підігріву);
- г) форма столу (прямокутна для Cartesian або кругла для Delta та SCARA);
- д) параметри голови (можна налаштувати «відступ» від краю столу, щоб екструдер не заходив далі цих значень);
- е) висота порталу. Ця настройка позначає висоту, нижче якої рухатися над надрукованої моделлю не можна, інакше буде зіткнення голови екструдера зі столом;
- є) кількість екструдерів(більше двох екструдерів Cura не підтримує);
- ж)варіант G-коду(різне програмне забезпечення має різні варіанти використання G-коду).

На вкладці екструдер потрібно встановити такі параметри:

- а) діаметр сопла(відповідає діаметру встановленого сопла);

- б) діаметр сумісного матеріалу (діаметр прутка пластика який використовує принтер, зазвичай використовується діаметр від 1.75мм до 3мм);
- в) зміщення сопла за осями X та Y(рекомендується встановлювати зміщення на рівні прошивки);
- г) номер охолоджуючого вентилятора (залежить від кількості вентиляторів обдуву деталі та екструдерів) [17].

2.10.2 Базові налаштування слайсеру під конкретну 3D-деталь

Cura, починаючи з другої версії отримала величезну кількість налаштувань, велика частина з яких потрібна вкрай рідко.

Якщо будь то налаштувань ви не виявили в своєму додатку, але відображаються якісь зайві, досить навпроти назви пункту налаштувань натиснути на кнопку налаштування відображення налаштувань. І в вікні встановити галочки на відображення потрібних опцій(рис.2.7).

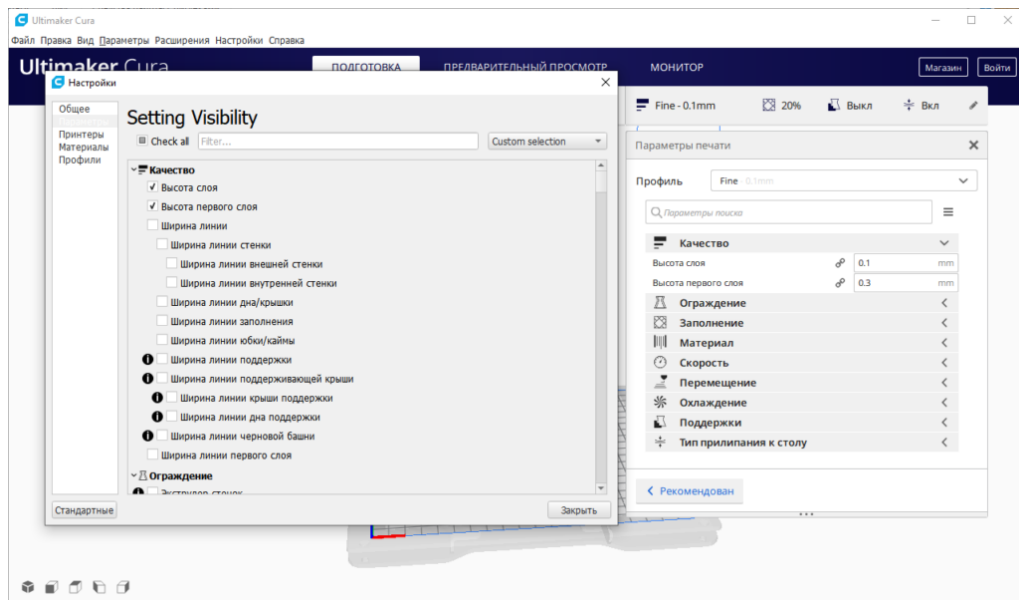


Рисунок 2.7 – Вибір необхідних налаштувань

Тепер пройдемося через основні налаштування:

- а) якість(рис. 2.8);

1) висота шару. Чим менше шар, тим менш помітні шари на моделі, і тим більшу деталізацію по осі Z ми отримуємо. Але при цьому при малому шарі збільшується загальний час друку. Максимально можливий шар обмежується діаметром сопла і швидкістю переміщення друкуючої головки. Для 0,4 сопла максимальний шар складає 0,3 мм. Мінімальний шар не обмежений. Оптимальна висота шару для більшості завдань 0,15–0,2 мм;

2) висота першого шару. Не рекомендовано встановлювати більшу величину першого шару, тому що на товстому шарі не так чітко видно якість укладання пластику. Якщо ми не переконаємося, що перший шар прилип добре і рівномірно, в подальшому модель може відлипнути від стека. Рекомендоване налаштування 0,1 мм.

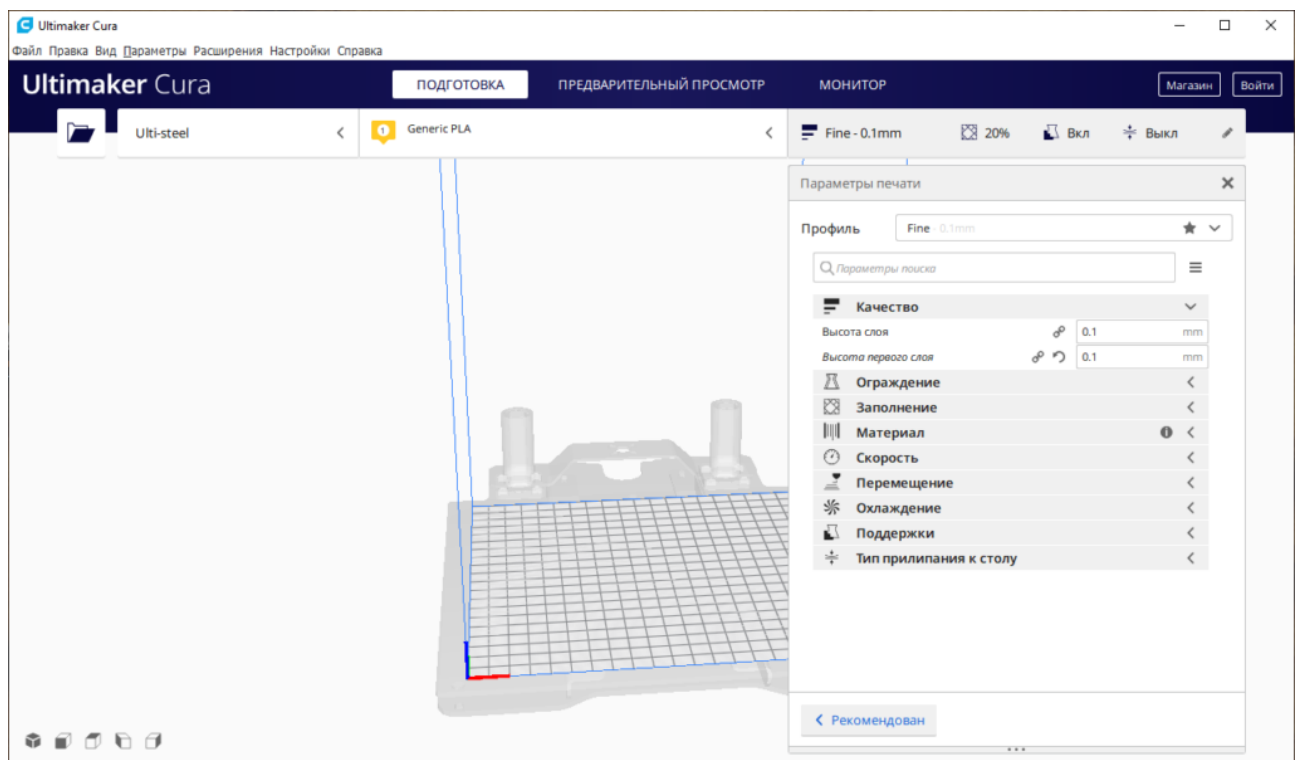


Рисунок 2.8 – Налаштування якості

б) огорожа(рис. 2.9);

1) кількість ліній стінки. Існують дві опції - товщина стінки і кількість ліній стінки. Вони взаємо розраховуються. Найкраще використовувати дану

опцію, так як не потрібно перераховувати товщину стінки при зміні діаметра сопла. Рекомендований параметр – 2;

2) товщина дна / кришки. Цей параметр відповідає за товщину нижньої і верхньої поверхні, іноді при малому% заповнення необхідно збільшити це значення, щоб верхня плоска грань краще перекривалася і не виступала. Але для більшості моделей збільшувати це значення не потрібно. Рекомендований параметр – 0,8 мм.

в) заповнення(рис. 2.10);

1) щільність заповнення. Виражається у відсотках. Чим менше% заповнення, тим легша вийде модель, але при цьому так само зменшується і міцність. Не рекомендується використовувати 100% заповнення, тому що багато пластики мають невелику нерівномірність по діаметру, а значить і за обсягом пластика, тому мікро надлишки пластику будуть псувати якість виробу, при цьому міцність з 80% заповненням і 100% не відрізнити.

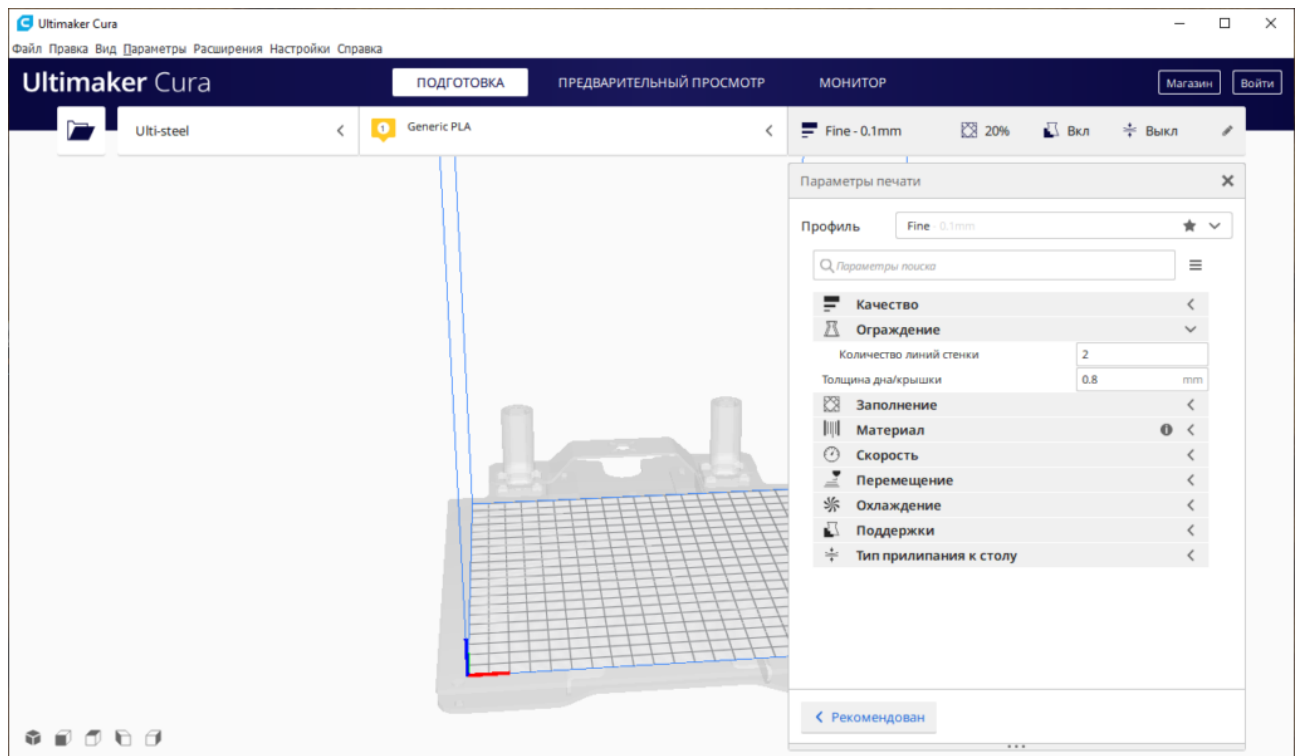


Рисунок 2.9 – Налаштування огорожі

Рекомендований параметр 35-50% для технічних виробів. 14-18% для

художніх моделей;

2) шаблон заповнення. Вид малюнка внутрішнього заповнення. Рекомендований параметр – Сітка;

3) рандомізація початку заповнення. У деяких випадках необхідно щоб точки початку шарів знаходились в різних місцях моделі, а не будувалися єдиною лінією. Іноді потрібно зворотний ефект;

4) заповнення перед друком стінок. При виключенні цієї опції спочатку буде друкуватися периметр деталі, а потім заповнення, в такий спосіб не буде проявлятися сітка заповнення на текстурі зовнішньої стінки. Рекомендований параметр – вимкнути цю опцію.

г) матеріал(рис.2.11);

1) температура сопла. В залежності від типу використовуваного матеріалу. Дані установки можуть автоматично підставлятися в залежності від обраного типу пластику. Рекомендовані параметри: PLA 190-210, ABS 230-245, Pet-G 210-230;

2) температура столу. Аналогічно написаного вище. Рекомендовані параметри: PLA 60, ABS 90-110, Pet-G 80;

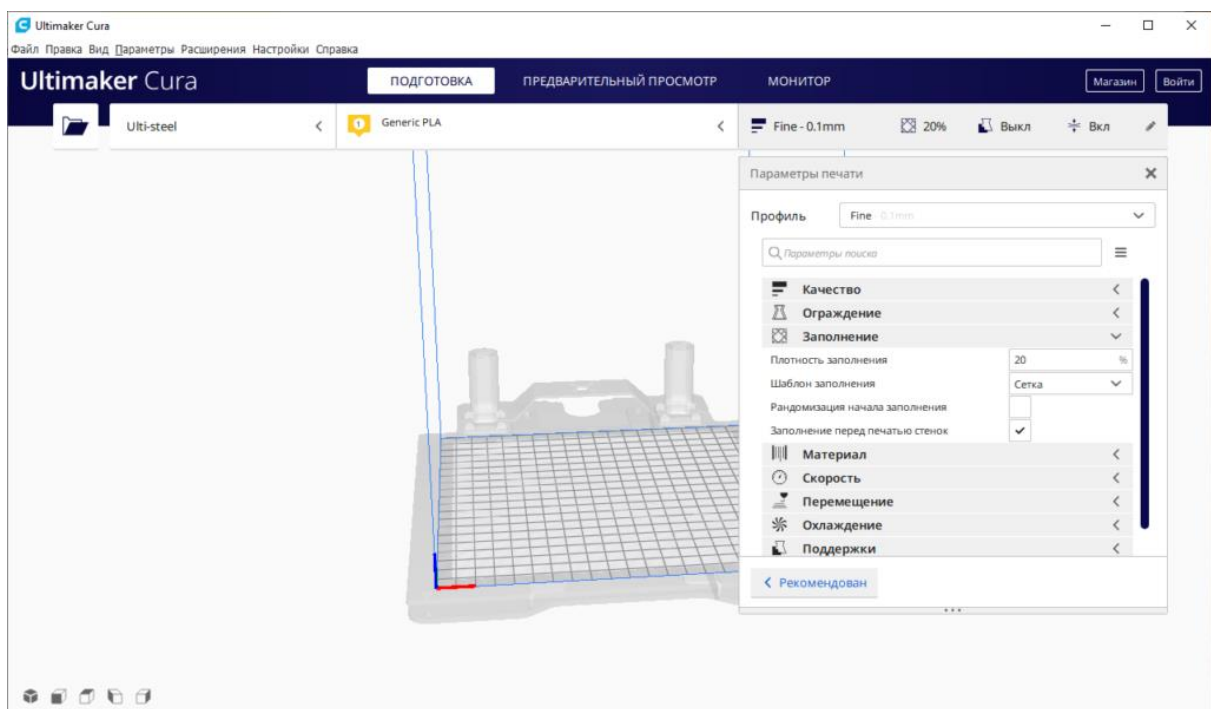


Рисунок 2.10 – Налаштування заповнення

3) дозволити відкат. При неодружених переміщеннях пластик може витікати з сопла, залишаючи залишки пластику на моделі. Щоб цьому запобігти використовується так званий відкат (retract). Пластик витягується з хотенда на невеликій відстань, імітуючи роботу поршня шприца. Ця опція обов'язково повинна бути включена;

4) відкат при зміні шару. Іноді потрібно відкотити пластик так само при зміні шару. Параметр підбирається експериментально в залежності від моделі;

5) величина відкату. Здається в залежності від типу використовуваного матеріалу. Дані установки можуть автоматично підставлятися в залежності від обраного типу пластику. Рекомендовані параметри: PLA, ABS – 4.5 мм, Pet-G – 5 мм;

б) Швидкість відкату. Аналогічно написаного вище. Рекомендовані параметри: PLA, ABS, Pet-G 50 мм / с.

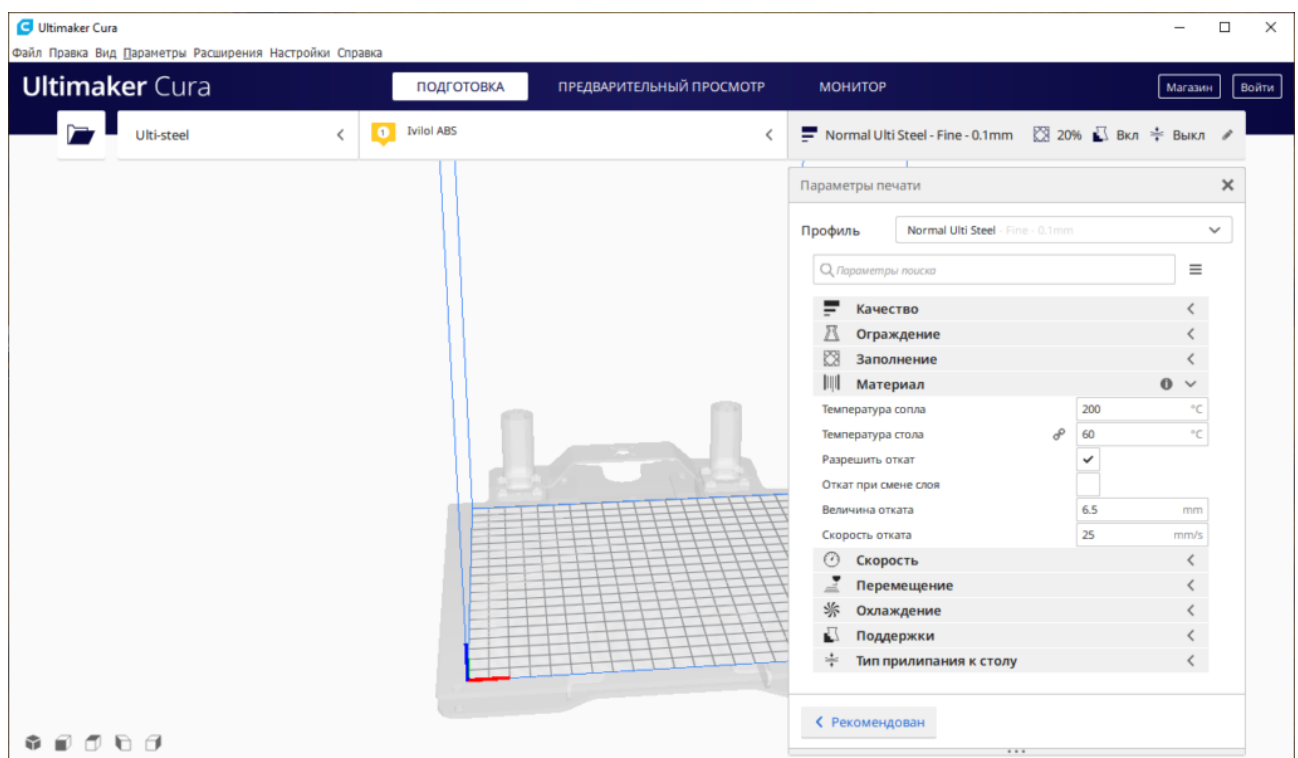


Рисунок 2.11 – Налаштування матеріалу

г) швидкість(рис. 2.12);

1) швидкість друку. Безпосередньо залежить на якість друку. Чим вище швидкість, тим гірше сплавляємість пластика і починають проявлятися артефакти на моделі. Якщо Ви хочете надрукувати максимально швидко модель, можна встановити швидкість на рівні 100-120 мм / с. Рекомендована швидкість друку 60-70 мм / с;

2) швидкість заповнення. На деяких моделях потрібно знижувати цей параметр, але частіше за все швидкість заповнення одно швидкості друку основної моделі;

3) швидкість друку стінок. Щоб отримати максимально якісну зовнішню стінку і не сильно жертвуючи часом друку моделі, можна знизити швидкість друку зовнішнього кордону. Рекомендована швидкість друку 40–50 мм / с;

4) швидкість друку підтримок. На деяких моделях підтримки можуть генеруватися дуже ніжними і тонкими, тому іноді має сенс сильно знижувати швидкість друку підтримок. Зазвичай швидкість друку підтримок дорівнює швидкості основної печатки;

5) швидкість переміщення. Або швидкість холостого проходу. Занадто повільна швидкість переміщення навіть з включеним відкотом може залишати краплі пластика на траєкторії руху сопла. При занадто великій швидкості сопло може зачіпати на тонкі надруковані елементи або підтримки і збивати їх. Рекомендований параметр 100 мм / с;

б) швидкість першого шару. Для кращої адгезії до основи необхідно знизити швидкість друку на першому шарі. Рекомендований параметр 30–40 мм / с.

д) переміщення(рис. 2.13);

1) режим комбінга. Цей режим утримує сопло всередині надрукованій моделі. Це дозволяє зменшити кількість ретракт. Надлишки пластика, які неминуче видавлюються самопливом з сопла залишається всередині моделі. Рекомендація включити цю опцію тільки, якщо у вас є труднощі з ретракт на певних видах пластику;

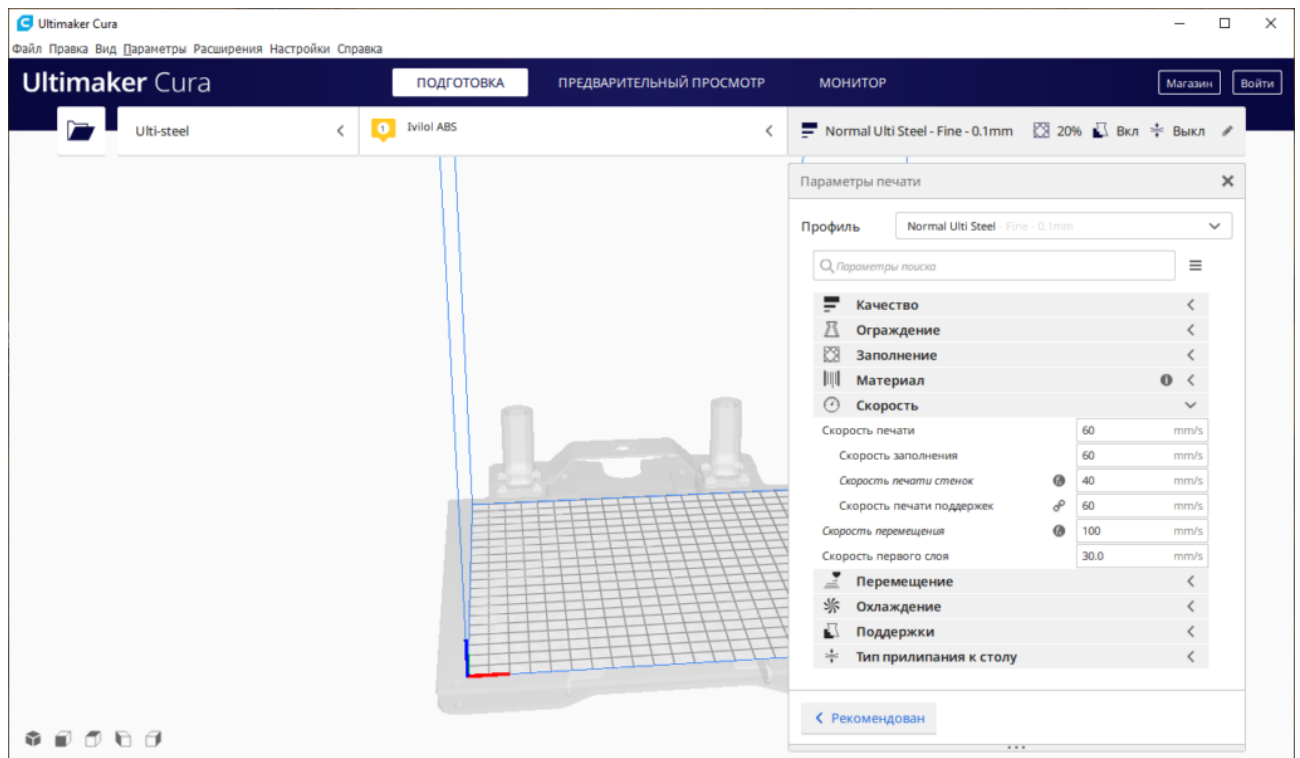


Рисунок 2.12 – Налаштування швидкості

2) уникати надрукованій моделі при переміщенні. Ця опція відноситься в режиму комбінгу;

3) уникати підтримок при переміщенні. Ця опція відноситься в режиму комбінгу;

4) підняти вісь Z при відкат. Корисна опція, що дозволяє уникати заїзду сопла на надруковану модель, при холостому русі. Рекомендація завжди використовувати цю опцію;

5) висота підняття осі Z. Рекомендовані параметри 0,5–1 мм;

е) охолодження. Управляти охолодженням моделі можливо більш точніше, ніж показано в цій інструкції. Можна налаштувати початкову швидкість вентилятора, обмежувати мінімальні і максимальні оберти і т.п. Необхідність використовувати ці опції підбирається в залежності від моделі та досвіду(рис. 2.14);

1) включити вентилятори. Обдув включається в залежності від типу пластика і дана опція може активуватися автоматично, при виборі типу пластику;

2) швидкість вентилятора;

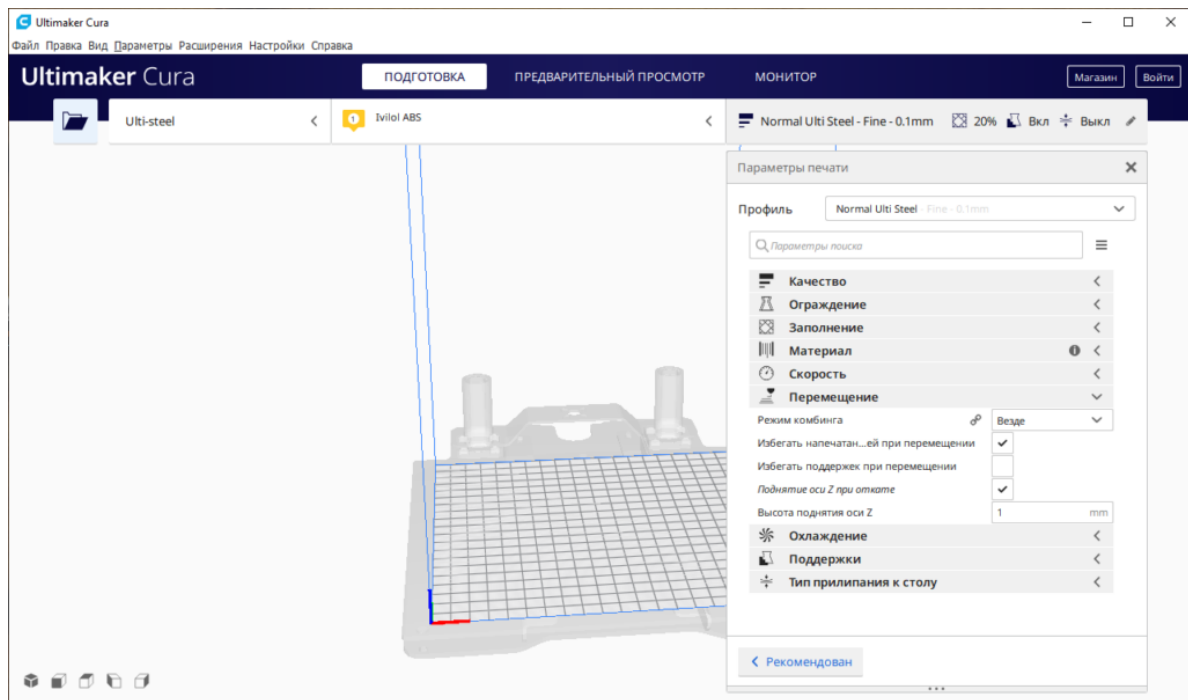


Рисунок 2.13 – Налаштування переміщення

є) підтримки. Як відомо фізику обдурити неможливо, і сила тяжіння діє на всіх нас. При друку сила тяжіння так само діє на модель, і при друку частин моделі, які близькі з горизонталі, починають падати під власною вагою, доки пластик ще недостатньо охолонув. Для цього застосовуються спеціальні генеруються слайсера структури – підтримки(рис. 2.15);

1) генерація підтримок. Не всі моделі вимагають підтримок, іноді вони навіть заважають, тому включайте і вимикайте цю опцію в залежності від складності геометрії моделі і кількості і крутизни нависають елементів;

2) розміщення підтримок. Дві опції: «Від поверхні», «Скрізь». У першому випадку підтримай будуть будується тільки над тими місцями моделі, які нависають над поверхнею столу, і ігноруються місця, де елемент нависає над самою моделлю. У другому випадку генерація підтримок не обмежується;

3) кут нависання підтримок. Залежно від цієї опції будуть генеруватися підтримки. Чим менше кут, тим більше підтримок буде на моделі. Даний параметр зазвичай підбирається виходячи з геометрії моделі;

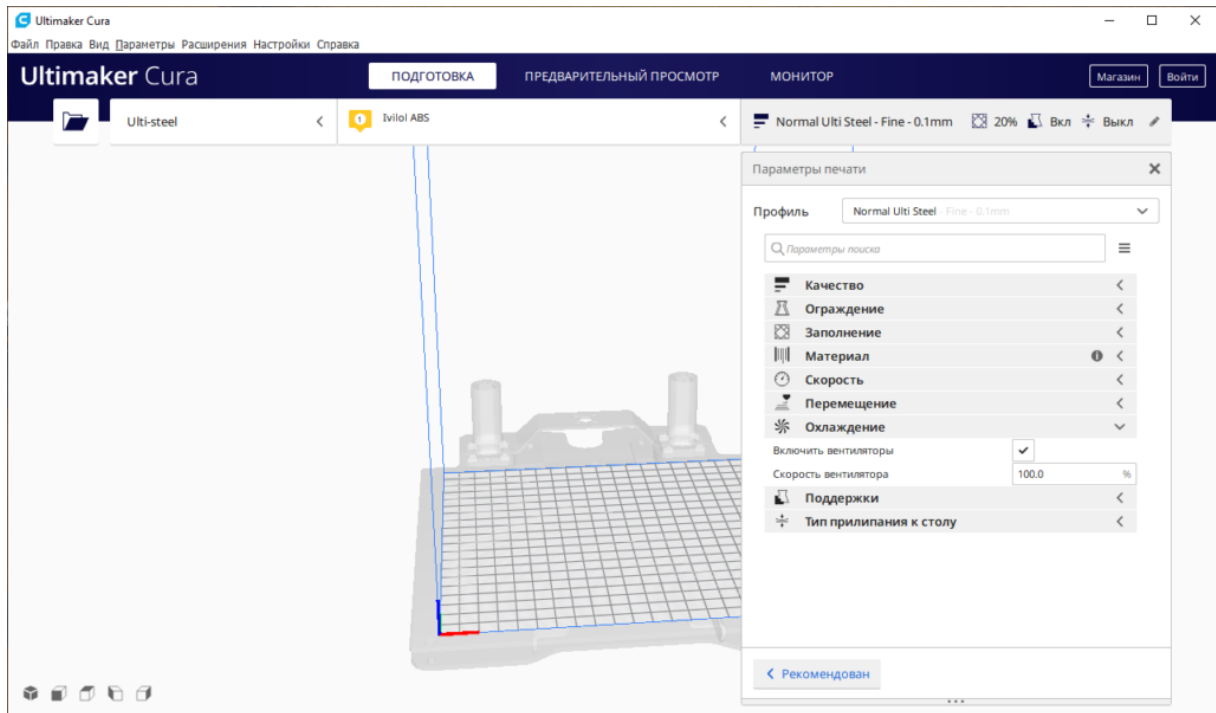


Рисунок 2.14 – Налаштування охолодження

4) шаблон заповнення. Вид генеруються підтримок. Ми рекомендуємо використовувати «Лінії» або «Сітка» ;

5) зазор підтримки по осі Z. Щоб підтримки легко відділялися від моделі краще встановлювати зазор між шарами. Співвідношення в цьому місці буде нижче, але при цьому підтримка буде працювати за своїм прямим призначенням. Зазвичай зазор виставляється рівній товщині шару;

б) зазор підтримки по осях X / Y. Так само як і віссю Z, можна налаштувати відступ підтримок від моделі, необхідно, щоб підтримки не прилипали до основної моделі.

ж) тип прилипання до столу. В цьому розділі вибираються опції, які сприяють збільшенню адгезії до столу(рис. 2.16);

1) спідниця. Ця опція вибивається з контексту збільшення адгезії. Її завдання почати друкувати кілька контурів деталі, щоб в друкувальну голівку почав подаватися пластик в потрібному обсязі. У неї є такі функції як: Кількість ліній спідниці (зазвичай достатньо 1 або 2), Дистанція до спідниці, мінімальна довжина спідниці / облямівки (якщо деталь дуже маленька, цією опцією сопло гарантовано почне друк коли пройде ця відстань);

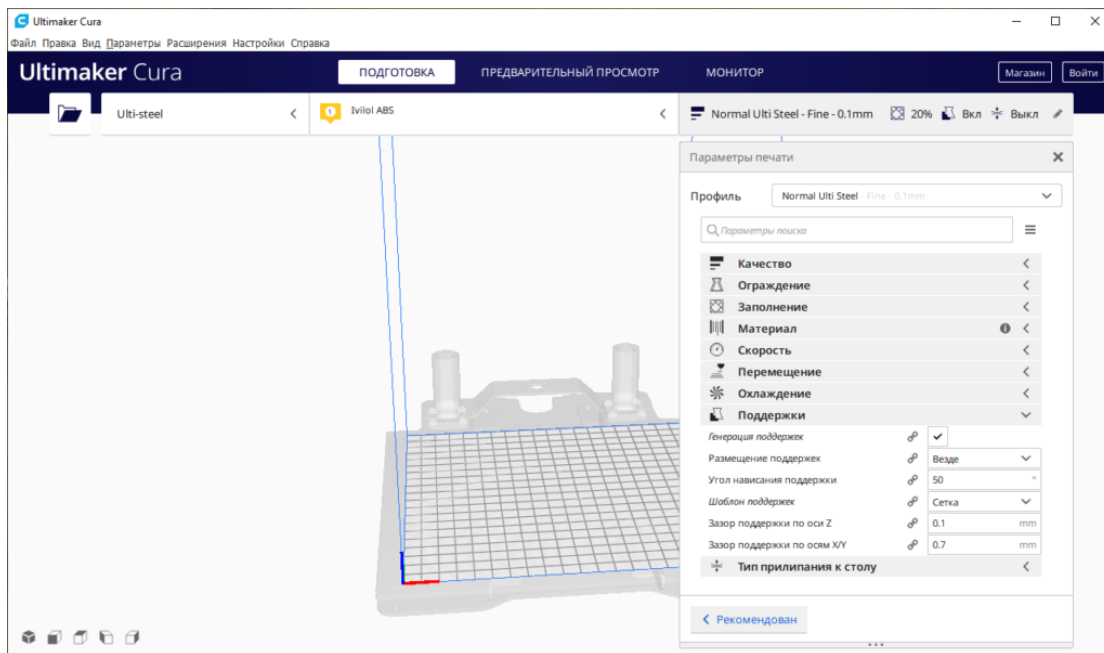


Рисунок 2.15 – Налаштування підтримок

2) кайма. Опція, схожа на спідницю, але в даному випадку друкується безліч контурів навколо першого шару, що б збільшити площу опори моделі. Це іноді допомагає утримати модель, особливо маленькі моделі з дуже не великий площею опори;

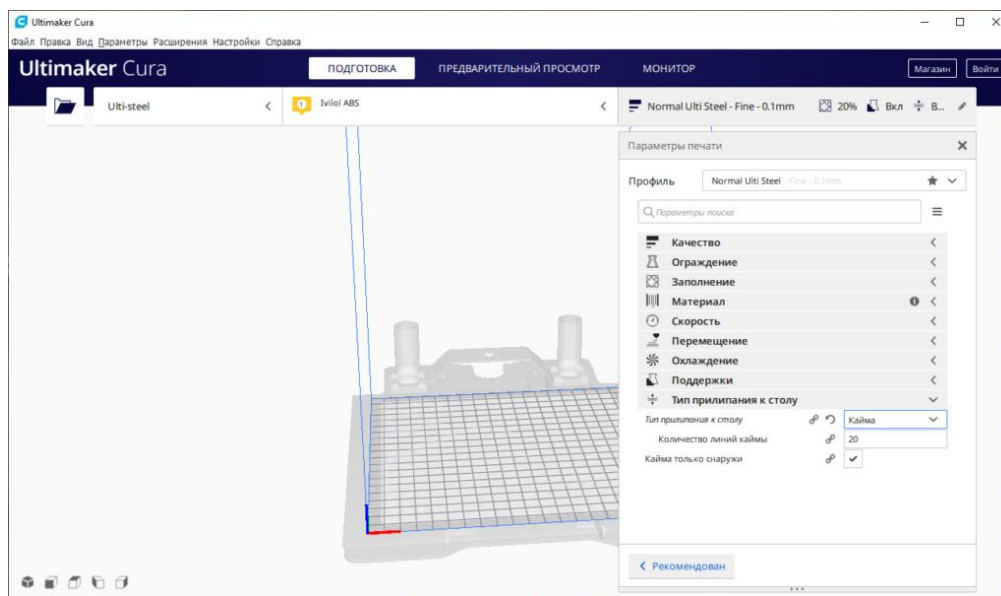


Рисунок 2.16 – Налаштування типу прилипання до столу

3) підкладка. Друк подібності «млинчика» під всю поверхню моделі.

Раніше часто використовувалася спільно з перфорованими підставами, що б надійно механічно закріпити пластик на платформі. Зараз має сенс використовувати, якщо тонкі, але дуже важливі підтримки відклеюються від підстави столу. Підкладка допоможе їм більш міцно приклеїться до того ж самому матеріалу [18].

2.11 Висновки другого розділу

В другому розділі було розглянуто формули необхідні для розрахунку кроків та описано як працюють основні функції програмного забезпечення на базі прошивки Repetier. Після закінчення опису другої частини було проведено конфігурування програмного забезпечення для 3D принтеру на базі кінематики Dual X Carriage з платою управління RURAMPS4D v1.3 та мікроконтролером Arduino DUE. А також розглянуто налаштування слайсеру на прикладі Cura такі як:

- а) якість;
- б) огорожа;
- в) заповнення;
- г) матеріал;
- г) швидкість;
- д) переміщення;
- е) охолодження;
- є) підтримки;
- ж) тип прилипання до столу.

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПРОГРАМНИХ ПАРАМЕТРІВ НА ЯКІСНІ ПОКАЗНИКИ 3D ДРУКУ

3.1 Вибір параметрів для дослідження

Так як параметрами для 3D принтера з кінематикою DualXCarriage які мають вплив на швидкість, точність та час друку є:

- а) baudrate – швидкість передачі даних в бодах;
- б) feedrate – швидкість переміщення в мм/с;
- в) jerk – різкі прискорення (необхідні для обрахунку максимальної швидкості друку);
- г) acceleration – прискорення при друці в мм/с²;
- г) travel acceleration – прискорення при вільному переміщенні в мм/с²;
- д) slicer – програмне забезпечення для конвертації 3D-моделі в пошарову модель для подальшого друку.

Такі параметри як швидкість передачі даних, різкі прискорення, прискорення вільного переміщення та слайсер залишаються незмінні.

При зміні швидкості передачі даних мікроконтролер може не отримувати всі команди а тільки частину їх що може привести до зупинки або неправильного позиціонування 3D моделі на столі.

Різкі прискорення або jerk автоматично зменшуються або збільшуються в залежності від встановлених швидкостей та прискорень, це необхідно для того щоб програмне забезпечення вираховувало максимальну швидкість для одного переміщення.

Прискорення вільного переміщення не значного впливу при використанні такої 3D-моделі як показано на рис.3.1 але вони мають вплив при друці великих та комплексних 3D-моделей.

Слайсер не змінює основні параметри встановлені в програмному забезпечення для мікроконтролеру а тільки встановлює свої межі можливостей для 3D-друку з широким вибором якості друку тим самим впливає на час друку.

3.2 Проведення експериментальних досліджень

Виходячи з описаного в пункті 3.1 для дослідження були обрані такі параметри як:

а) feedrate – швидкість переміщення від 100 до 300 мм/с з кроком 100мм/с та критичним значенням 500мм/с;

б) acceleration – прискорення при друці від 100 мм/с² до 1200 мм/с² з кроком 400 мм/с² в кожному вимірі;

в) реальний час друку, тобто час за який буде надрукована 3D-модель.

Для того щоб дослідити залежності даних параметрів необхідно обрати модель яка буде відповідати таким критеріям як:

а) можливо друкувати двома екструдерами;

б) не має нависаючих частин, для тестування часу друку ;

в) не великі розміри моделі, для тестування невеликих швидкостей;

г) має прямі лінії, для тестування великих прискорень;

г) не має відстані між блоками, для кращого порівняння моделей;

д) має однакові розміри блоків для обох екструдерів, для перевірки на зміщення моделі або розміру при збільшенні швидкості та прискоренні.

На рис. 3.1 вигляд 3D-моделі яка буде друкуватися тільки першим екструдером.

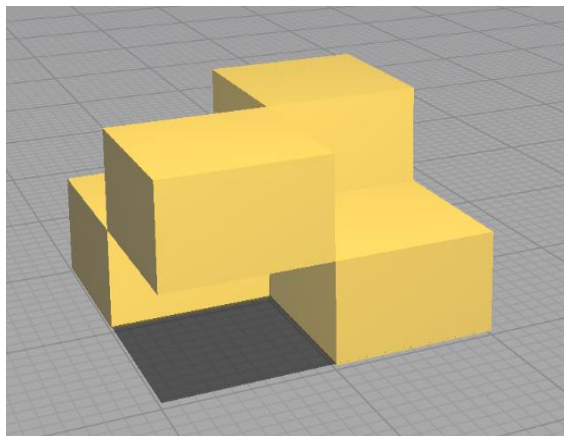


Рисунок 3.1 – Частина 3D-моделі для першого екструдера

На рисунку 3.2 зображена 3D-модель для друку тільки другим екструдером.

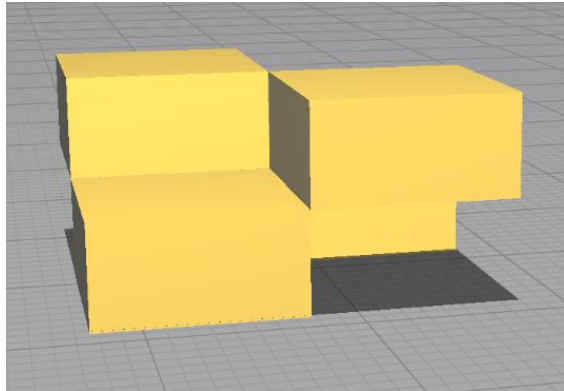


Рисунок 3.2 – Частина 3D-моделі для другого екструдеру

Обрана 3D-модель є дзеркальна для обох екструдерів та має однакові розміри, модель в зборі, за допомогою якої буде проведено дослідження, зображена на рис. 3.3.

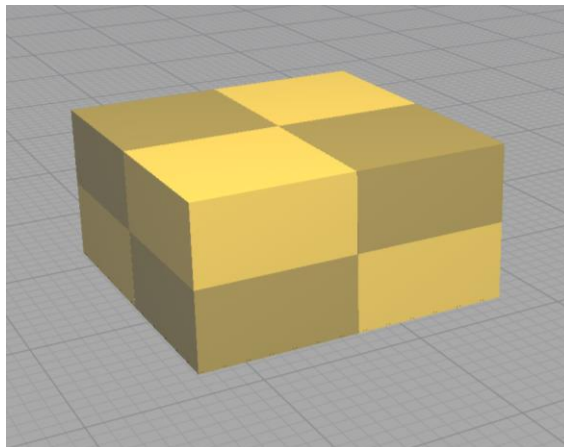


Рисунок 3.3 – Обидві частини 3D-моделі в зборі

Дана 3D-модель, складається яка складається з двох частин, була обрана виходячи з того що принтер має два екструдера на осі X, для створення моделі 3D-принтер буде використовувати осі X та Y, що дозволить визначити на скільки сильно змінюється якість та час друку 3D-моделі зі збільшенням швидкості та прискорення.

Геометричні розміри 3D моделі 20мм x 20мм x 10мм, друк буде проводитися соплом 0.4 мм (400мкр) на обох екструдерах, товщина лінії для друку в слайсері дорівнює 0,39мм (390мкр) а висота одного шару 0,2мм (200мкр), ці параметри необхідні для виявлення зміщень, зміни розмірів та якості друку на моделі на великих прискореннях.

Робота з 3D-принтером та вже пошарово розбитою моделлю буде здійснюватися через програму управління Repetier Host версії 2.1.6, рис. 3.4.

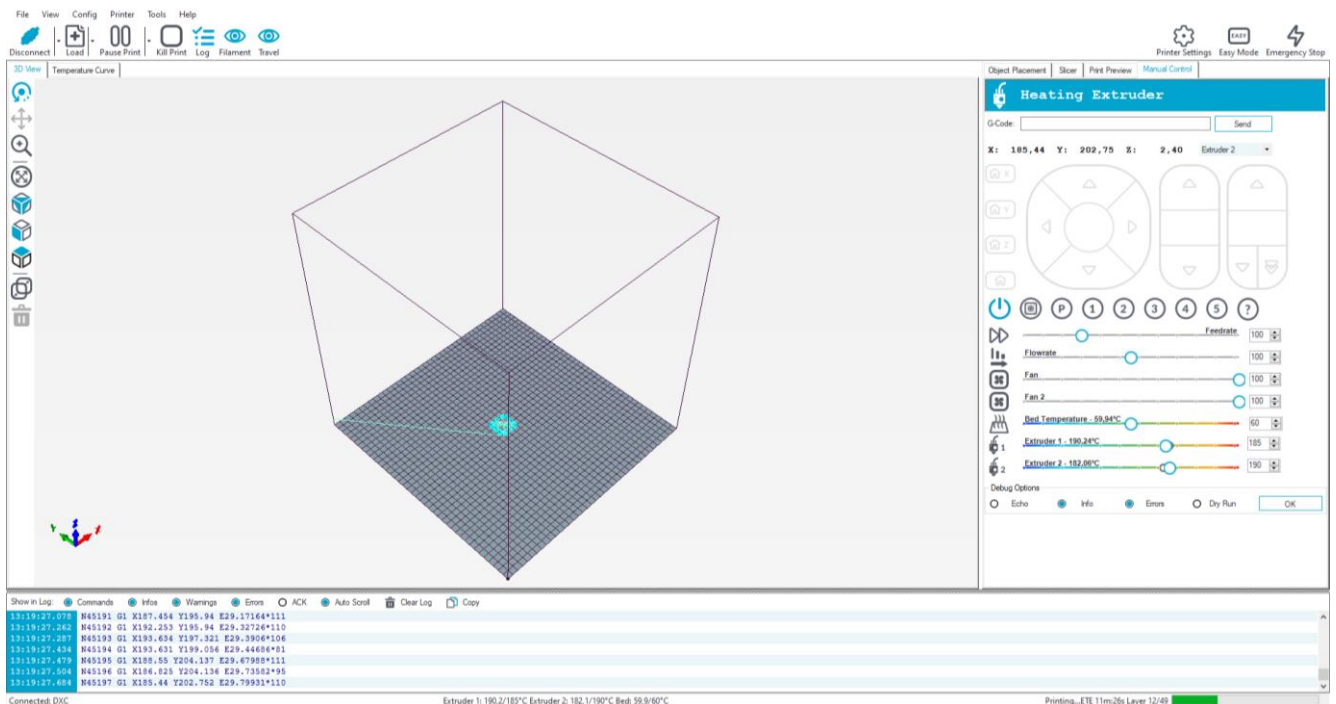


Рисунок 3.4 – Вікно програми Repetier Host

3.3 Аналіз результатів експериментальних досліджень

За результатами експериментальних досліджень необхідно проаналізувати якість поверхні друкованої 3D-моделі в першому та другому експерименті та проаналізувати реальний час друку 3D-моделей.

3.3.1 Аналіз поверхні 3D-моделей експерименту впливу швидкості та прискорення на якість

Після закінчення першої партії моделей було виявлено що під час друку на маленьких швидкостях принтер залишає філамент на сторонах деталі а не в самій моделі. Вигляд надрукованих 3D-моделей та їх якість під мікроскопом зображено на рис.3.5 – рис. 3.12 та в додатку Д.

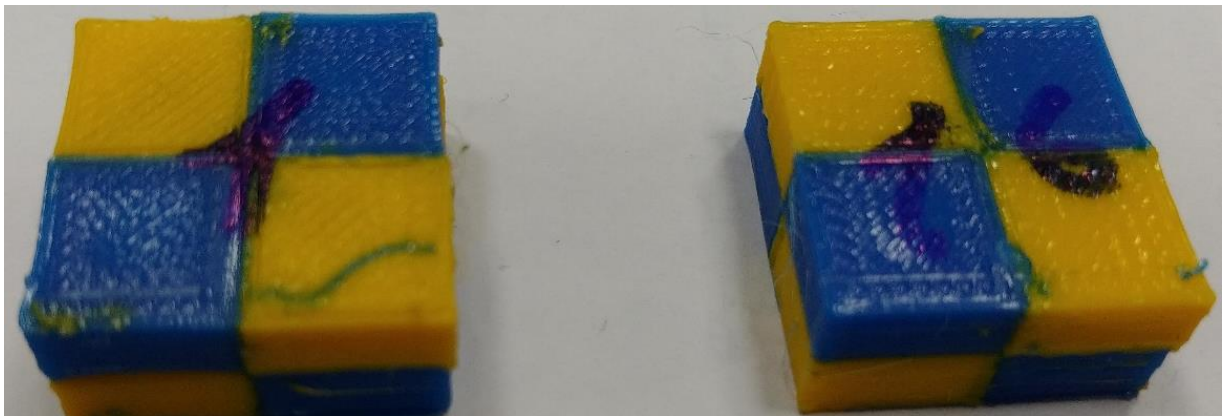


Рисунок 3.5 – Поверхня надрукованої 3D-моделі 1 та 16 куба

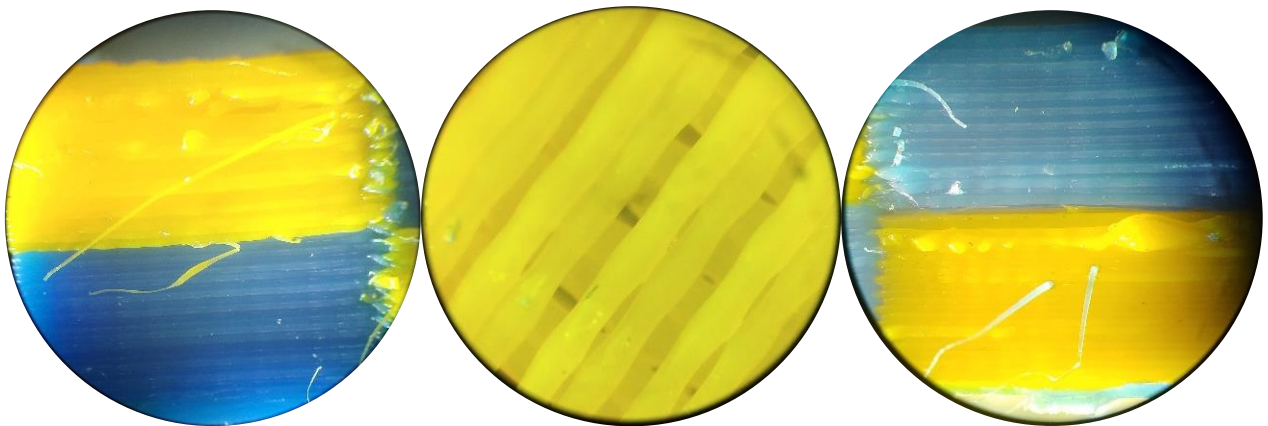


Рисунок 3.6 – Якість поверхні надрукованої 3D-моделі 1 та 16 куба під мікроскопом

Поверхня першого кубу(рис.3.6) має недоліки описані вище так як швидкість та прискорення були настільки малі що 3D-модель розміром 20мм×20мм×10мм друкувалася більше 40 хвилин. Поверхня 16(рис. 3.6) має переплавлення пластику всередині моделі, час друку приблизно 28 хвилин.



Рисунок 3.7 – Поверхня 3D-моделі 65 куба

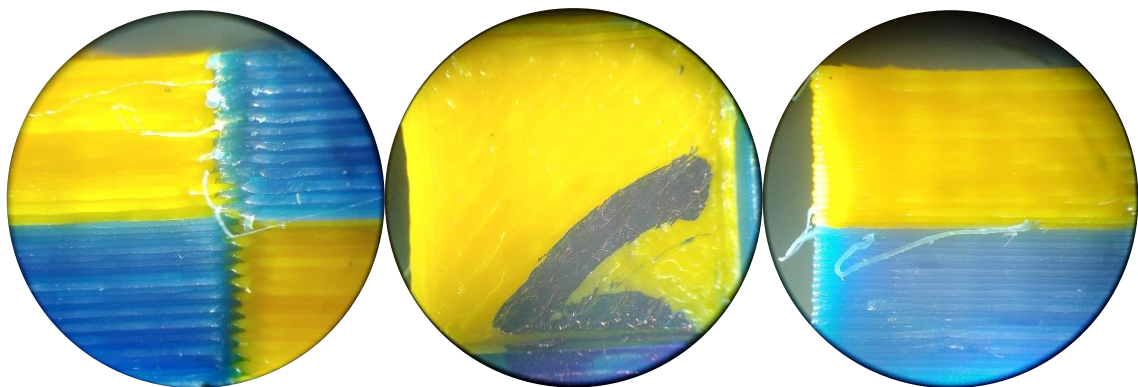


Рисунок 3.8 – Якість поверхні 3D-моделі 65 куба під мікроскопом

Поверхня 65 кубу (рис.3.7) має менше недоліків та ниток зовні при значно більшому прискоренні та швидкості що в свою чергу дає менший час друку, 28 хвилин.



Рисунок 3.9 – Поверхня 3D-моделі 177 та 128 куба

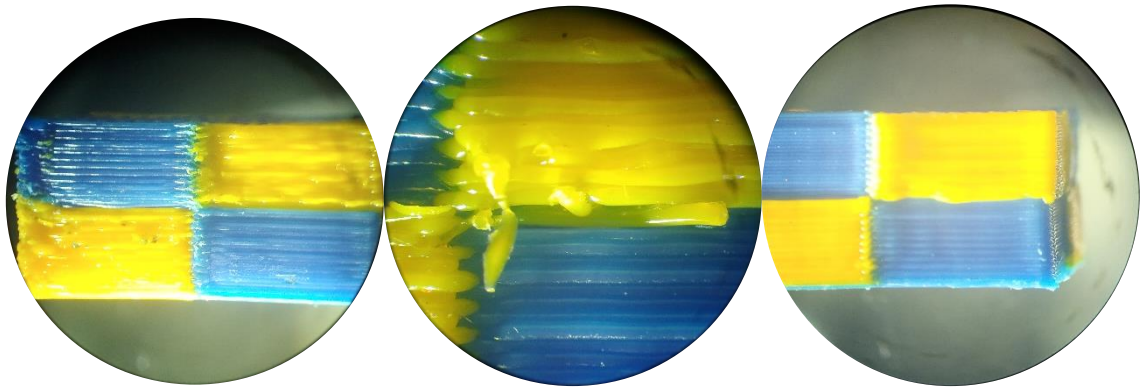


Рисунок 3.10 – Якість поверхні 3D-моделі 177 та 128 куба під мікроскопом

Поверхня 177 (рис.3.9) кубу має недоліки такі ж як і куб 1 та 65 тобто нитки зовні переплавлення пластику через маленьку швидкість екструдера, час друку 177 кубу дорівнює 45 хвилинам.

Поверхня 128 (рис.3.9) кубу має значно менше недоліків при більшому прискоренні та швидкості та в свою чергу час друку теж маленький 26 хвилин.

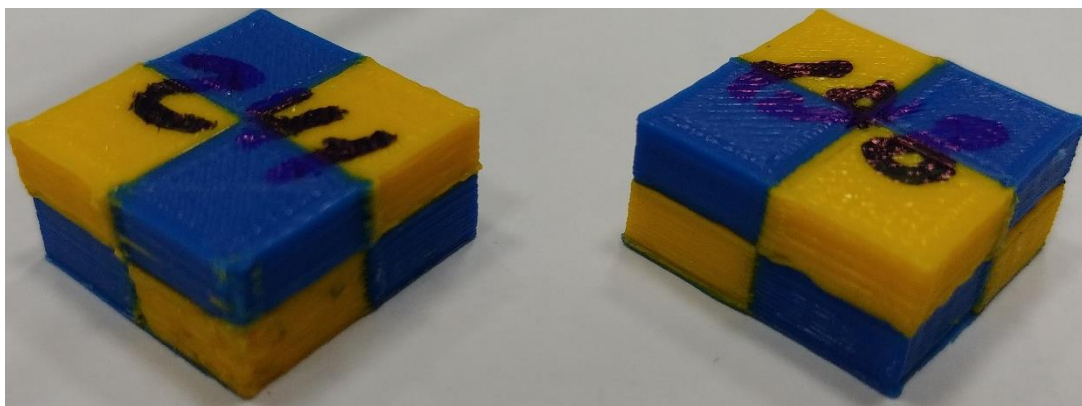


Рисунок 3.11 – Поверхня 3D-моделі 241 та 198 куба

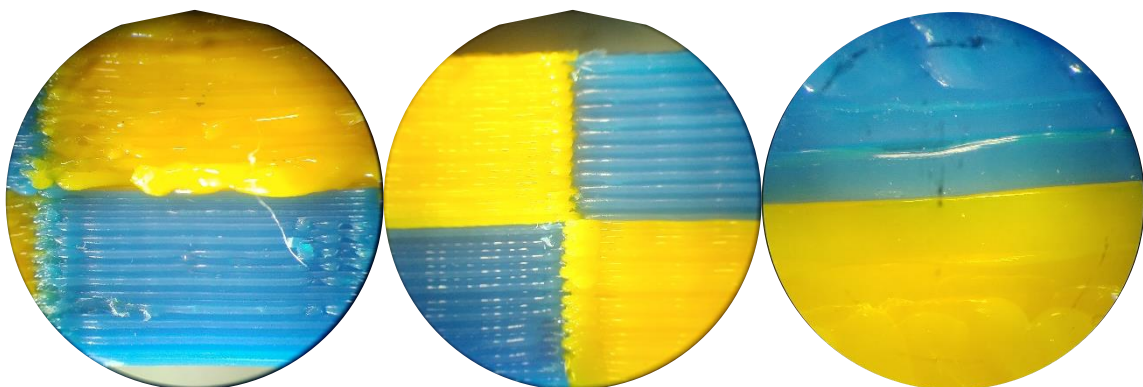


Рисунок 3.12 – Якість поверхні 3D-моделі 241 та 198 куба під мікроскопом

Поверхня 241 кубу(рис.3.11) має недоліки такі ж як і куб 1, 65 та 177, тобто вплив прискорення має більше значення на якість деталі ніж швидкість, нитки ззовні, переплавлення пластику через маленьку швидкість екструдера, час друку 241 кубу дорівнює 45 хвилинам.

Поверхня 198 кубу(рис.3.11) має майже ідеальну якість для точності 100 мкр, недоліків не видно навіть при перевірці кубу під мікроскопом(рис.3.12) швидкість друку 100мм/с по X осі та 500мм/с Y , час друку 33 хвилин так як прискорення дорівнює 400мм/с^2 на X та Y осях.

3.3.2 Аналіз поверхні 3D моделей експерименту з впливу прискорення на якість

Проведення першого експерименту показало що вплив швидкості на час друку та якість деталі не такий сильний як вплив прискорення на час друку. Після цього було вирішено що необхідно зробити додатковий експеримент для виявлення оптимального параметру прискорення який в свою чергу впливає на якість моделі та час друку. Вигляд надрукованих 3D моделей в цьому експерименті та їх якість під мікроскопом зображено на рис.3.14 – рис. 3.19.



Рисунок 3.13 – Моделі надруковані для експерименту з прискореннями

Для експерименту було надруковано 16 тестових 3D-моделей, при прискоренні в 4000мм/с принтер відмовився друкувати взагалі, кожна з них має швидкість друку 200мм/с на осях X та Y при цьому різні прискорення на осях X та Y та різний час друку, а також дефекти поверхні такі як зміщення та переплавлення.

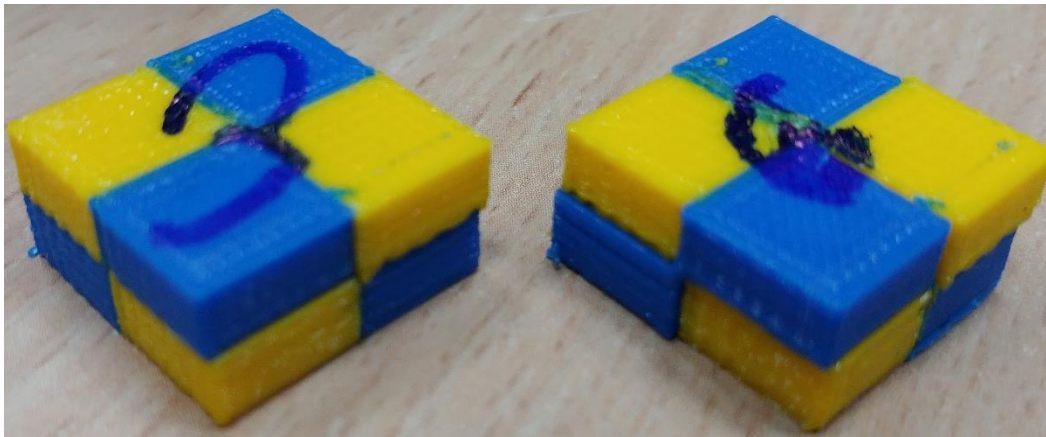


Рисунок 3.14 – Поверхня 3D-моделі 3 та 6 куба

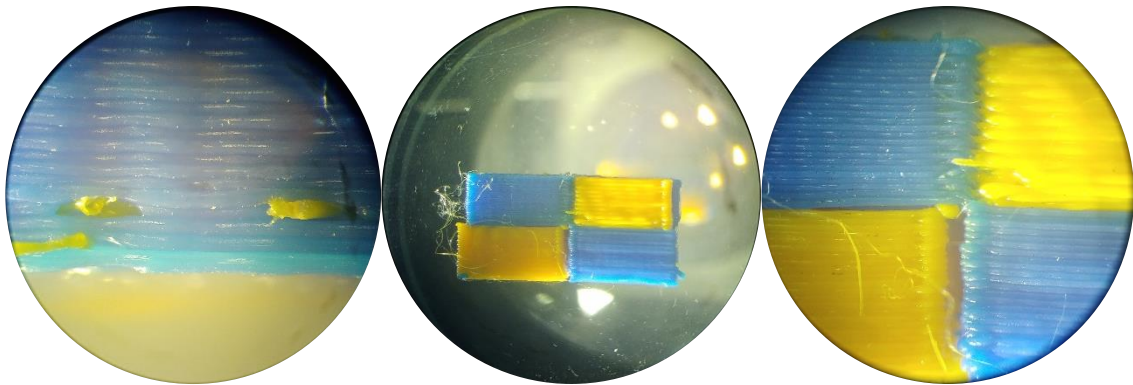


Рисунок 3.15 – Якість поверхні 3D-моделі 3 та 6 куба під мікроскопом

Поверхня 3 кубу має незначні недоліки такі як нитки ззовні, невелике переплавлення пластику, недоліки зображені на рис. 3.15, прискорення для 3 куба:

а) ось X = 1800 мм/с²;

б) ось Y = 2600 мм/с².

Час друку 3 кубу – 22 хвилини 53 секунди.

Поверхня 6 кубу має зміщення між шарами першого та другого екструдера, зазвичай таке відбувається коли мікроконтролер 3D принтеру не встигає посилати команди для одного з екструдерів або драйвер двигуну не підтримує велику частоту передачі сигналу ШІМ, недоліки зображені на рисунку 3.15, прискорення для 6 куба:

а) ось X = 2400 мм/с²;

б) ось Y = 1800 мм/с².

Час друку 6 кубу – 23 хвилини 06 секунди.

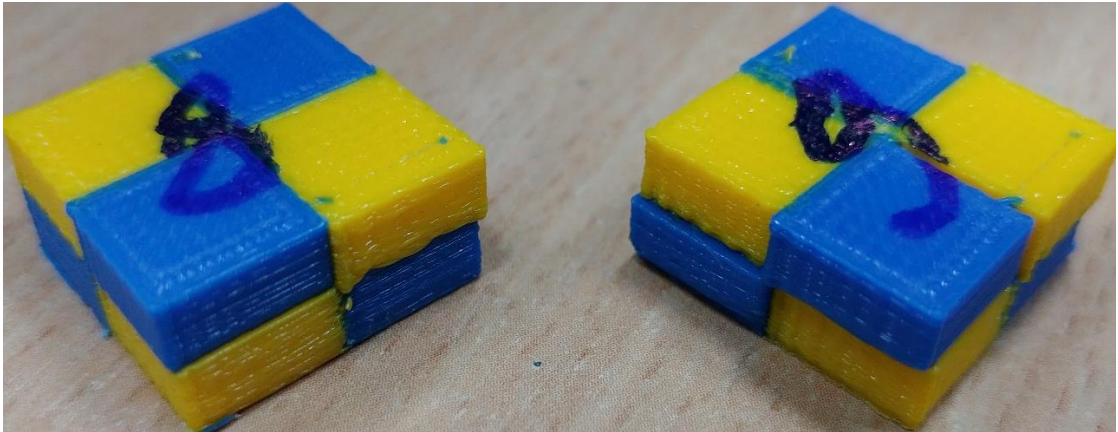


Рисунок 3.16 – Поверхня 3D-моделі 8 та 9 куба

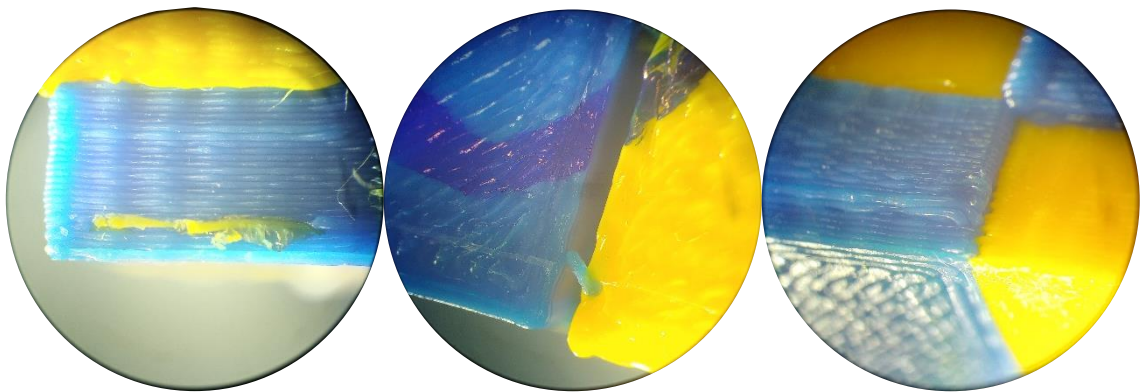


Рисунок 3.17 – Якість поверхні 3D-моделі 8 та 9 куба під мікроскопом

Поверхня 8 кубу має ті ж самі недоліки як і куб №3, тобто нитки ззовні, невелике переплавлення пластику, недоліки зображені на рис. 3.17, прискорення для 8 куба:

а) ось X = 2400 мм/ с²;

б) ось Y = 2600 мм/ с².

Час друку 8 кубу – 22 хвилини 32 секунди.

Поверхня 9 кубу має зміщення між шарами першого та другого екструдера, тобто такі ж недоліки як в 6 кубі , недоліки зображені на рис.3.17, прискорення для 9 куба:

а) ось X = 2400 мм/ с²;

б) ось $Y = 3000 \text{ мм/с}^2$.

Час друку 9 кубу – 22 хвилини 23 секунди.

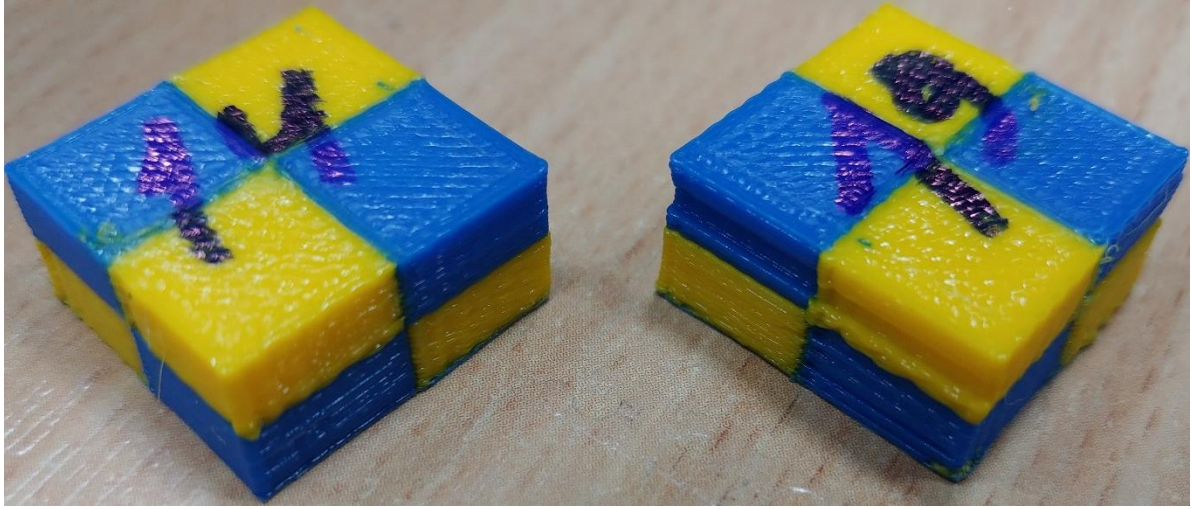


Рисунок 3.18 – Поверхня 3D моделі 14 та 19 куба

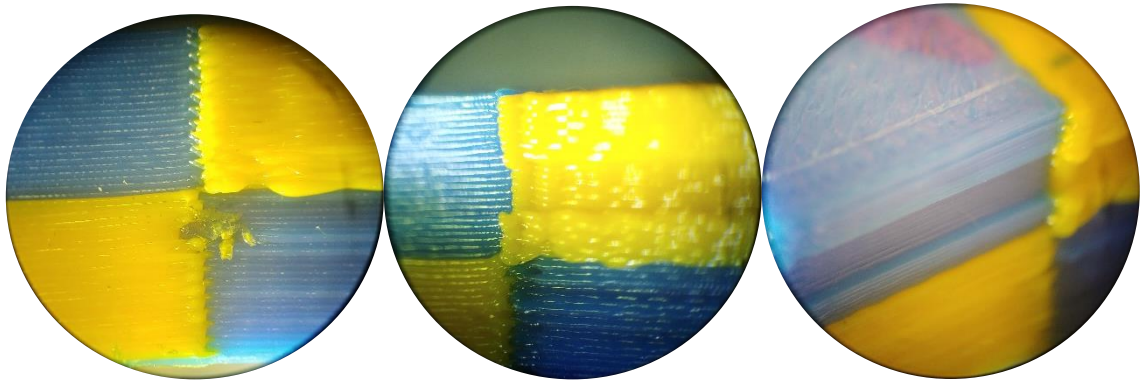


Рисунок 3.19 – Якість поверхні 3D моделі 14 та 19 куба під мікроскопом

Поверхня 14 кубу має ті ж самі недоліки як і куб №3 та №8 тобто нитки ззовні, невелике переплавлення пластику, недоліки зображені на рис. 3.19, прискорення для 14 куба:

а) ось $X = 2600 \text{ мм/с}^2$;

б) ось $Y = 3000 \text{ мм/с}^2$.

Час друку 14 кубу – 22 хвилини 17 секунди.

Поверхня 19 кубу має зміщення між шарами першого та другого екструдера, тобто такі ж недоліки як в 6 та 9 кубі , недоліки зображені на рис.

3.19, прискорення для 19 куба:

а) ось X = 3000 мм/ с²;

б) ось Y = 3000 мм/ с².

Час друку 19 кубу – 22 хвилини 02 секунди.

3.4 Висновки третього розділу

В третьому розділі дипломного проекту було проаналізовано та обрано параметри за допомогою яких буде проводитися експериментальне дослідження, обрано та описано 3D модель за допомогою якої буде перевірятися час, необхідний для дослідження.

Проаналізовано результати експериментального дослідження впливу швидкості та прискорення на якість та час друку а також окремо досліджено вплив прискорення на час друку.

4 РЕГРЕСІЙНИЙ АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1 Основи регресійного аналізу

Основна мета регресійного аналізу полягає у визначенні зв'язку між деякою характеристикою Y спостережуваного явища або об'єкта і величинами x_1, x_2, \dots, x_n , які обумовлюють, пояснюють зміни Y . Змінна Y називається залежною змінною (відгуком), що впливають змінні x_1, x_2, \dots, x_n називаються факторами (регресори). Встановлення форми залежності, підбір моделі (рівняння) регресії і оцінка її параметрів є завданнями регресійного аналізу.

У регресійному аналізі вивчаються моделі виду $Y = \varphi(X) + \varepsilon$, де Y - результуюча ознака (відгук, випадкова залежна змінна); X - фактор (невипадкова незалежна змінна); ε - випадкова змінна, яка характеризує відхилення фактору X від лінії регресії (залишкова змінна). Рівняння регресії записується у вигляді:

$$Y_x = \varphi(x, b_0, b_1, \dots, b_p), \quad (4.1)$$

де x – значення величини X ;

b_0, b_1, \dots, b_p – параметри функції регресії φ .

Таким чином, завдання регресійного аналізу полягає у визначенні функції та її параметрів і подальшого статистичного дослідження рівняння.

Залежно від типу обраного рівняння розрізняють лінійну і нелінійну регресію (в останньому випадку можливе подальше уточнення: квадратична, експоненціальна, логарифмічна і т.д.). Залежно від числа взаємопов'язаних ознак розрізняють парну і множинну регресію. Якщо досліджується зв'язок між двома ознаками (результативним і факторним), то регресія називається парної, якщо між трьома і більше ознаками - множинної (багатофакторної) регресією.

Для виконання регресійного аналізу результатів експерименту впливу швидкості та прискорення на час друку а також експерименту впливу

прискорення на час друку була використана парна регресія.

На першому етапі регресійного аналізу дані спостережень або експерименту представляють графічно.

Залежність між змінними X та Y зображують точками на координатній площині (x, y) і з'єднують їх ламаною лінією. Цей ламаний графік називається емпіричною лінією регресії Y по X . По виду емпіричної лінії регресії роблять припущення про вид (формі) залежно змінної Y від X . В даному випадку логічно припустити лінійну залежність.

Якщо вид функції φ в рівнянні регресії обраний, то для оцінки невідомих параметрів b_0, b_1, \dots, b_p використовується метод найменших квадратів (МНК). Згідно з методом невідомі параметри функції вибираються таким чином, щоб сума квадратів відхилень експериментальних (емпіричних) значень y_i від їх розрахункових (теоретичних) значень була мінімальною, тобто

$$S = \sum_{i=1}^n (y_{i \text{ експ}} - y_i^p)^2 = \sum_{i=1}^n (y_{i \text{ експ}} - \varphi(x_i, b_0, b_1, \dots, b_p))^2 \rightarrow \min, \quad (4.2)$$

де y_i^p – значення, обчислене рівнянням регресії;

$y_i - y_i^p = \varepsilon$ – відхилення (помилка, залишок);

n – кількість пар вихідних даних.

Якщо в якості рівняння регресії обраний поліном ступеня m :

$$Y = A + BX + CX^2 + \dots + KX^m, \quad (4.3)$$

При $m = 1$ значення $Y = A + BX$.

Визначимо параметри рівняння регресії за методом найменших квадратів.

Для цього необхідно:

а) скласти систему рівнянь за кількістю розраховуються параметрів:

$$\frac{\partial \Delta}{\partial A} = 0; \quad \frac{\partial \Delta}{\partial B} = 0; \quad \frac{\partial \Delta}{\partial C} = 0; \quad \dots \quad \frac{\partial \Delta}{\partial K} = 0, \quad (4.4)$$

$$\text{де } \Delta = \sum_1^n \left(Y_i - A - BX - CX^2 - \dots - KX^m \right)^2.$$

Для лінійного рівняння регресії система рівнянь має вигляд:

$$\left. \begin{aligned} B \sum_1^n X_i^2 + A \sum_1^n X_i &= \sum_1^n X_i Y_i \\ B \sum_1^n X_i + nA &= \sum_1^n Y_i \end{aligned} \right\} \quad (4.5)$$

б) вирішити систему рівнянь і визначити невідомі. Для лінійного рівняння регресії рішення має вигляд [19]:

$$A = \frac{\sum X_i^2 \sum Y_i - \sum X_i \sum X_i Y_i}{n \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2}, \quad (4.6)$$

$$B = \frac{n \sum X_i Y_i - \sum X_i \sum Y_i}{n \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2}, \quad (4.7)$$

Для перевірки правильності вибору виду рівняння регресії. Необхідно виконати такі кроки:

а) розрахувати відхилення експериментальних значень Y_i від відповідних значень Y_{pi} , розрахованих для того ж аргументу X_i через отримане рівняння регресії $\Delta Y_i = Y_i - Y_{pi}$;

б) побудувати в осях координат $X, \Delta Y$ отримані значення ΔY_i для відповідних X_i ;

в) записати послідовність значень ΔY_j за мірою зростання $X_j, X_j \in (1, n)$;

Можливо збільшити степінь полінома m на одиницю и повторити обчислення. Для поліному степені: $Y = A + Bx + Cx^2$.

З метою визначення параметрів рівняння регресії в цьому випадку необхідно вирішити систему рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} C \sum_1^n X_i^4 + B \sum_1^n X_i^3 + A \sum_1^n X_i^2 &= \sum_1^n X_i^2 Y_i; \\ C \sum_1^n X_i^3 + B \sum_1^n X_i^2 + A \sum_1^n X_i &= \sum_1^n X_i Y_i; \\ C \sum_1^n X_i^2 + B \sum_1^n X_i + nA &= \sum_1^n Y_i \end{aligned} \right\} \quad (4.8)$$

Парна лінійна регресійна модель

Парна лінійна регресійна модель взаємозв'язку двох змінних, для якої функція регресії $\varphi(x)$ лінійна. Позначимо через y_x умовну середню ознаки Y в генеральній сукупності при фіксованому значенні x змінної X . Тоді рівняння регресії матиме вигляд:

$$y_x = a_x + b. \quad (4.9)$$

де a - коефіцієнт регресії (показник нахилу лінії лінійної регресії).

Коефіцієнт регресії показує, на скільки одиниць в середньому змінюється змінна Y при зміні змінної X на одну одиницю. За допомогою методу найменших квадратів отримуємо формули, за якими можна обчислювати параметри лінійної регресії, таблиця 1.

Напрямок зв'язку між змінними визначається на підставі знаку коефіцієнта регресії. Якщо знак при коефіцієнті регресії позитивний, зв'язок залежної змінної з незалежною буде позитивною. Якщо знак при коефіцієнті регресії негативний, зв'язок залежної змінної з незалежною є негативною (зворотного).

Таблиця 1 – Формули для розрахунку параметрів лінійної регресії

Вільний член b	Коефіцієнт регресії a	Коефіцієнт детермінації
$b = \frac{\bar{y} \cdot \overline{x^2} - \bar{x} \cdot \overline{xy}}{\overline{x^2} - (\bar{x})^2}$	$a = \frac{\overline{xy} - \bar{x} \cdot \bar{y}}{\overline{x^2} - (\bar{x})^2}$	$R^2 = \frac{\sum(y_i^p - \bar{y})^2}{\sum(y_i - \bar{y})^2}$

Для аналізу загальної якості рівняння регресії використовують коефіцієнт детермінації R^2 , званий також квадратом коефіцієнта множинної кореляції. Коефіцієнт детермінації (міра визначеності) завжди знаходиться в межах інтервалу $[0; 1]$. Якщо значення R^2 близько до одиниці, це означає, що побудована модель пояснює майже всю мінливість відповідних змінних. І навпаки, значення R^2 близьке до нуля, означає погану якість побудованої моделі.

Коефіцієнт детермінації R^2 показує, на скільки відсотків знайдена функція регресії описує зв'язок між вихідними значеннями Y і X . Відповідно, величина показує, скільки відсотків варіації параметра Y обумовлені факторами, які не включені в регресійну модель.

При високому значенні коефіцієнта детермінації ($>75\%$) можна робити прогноз для конкретного значення в межах діапазону вихідних даних. При прогнозах значень, що не входять в діапазон вихідних даних, справедливість отриманої моделі гарантувати не можна. Це пояснюється тим, що може проявитися вплив нових факторів, які модель не враховує.

Регресійний аналіз зручно проводити за допомогою можливостей Excel. Режим роботи «Регресія» служить для розрахунку параметрів рівняння лінійної регресії і перевірки його адекватності досліджуваного процесу. У діалоговому вікні слід заповнити такі параметри:

а) вхідний інтервал Y – це діапазон даних за результативною ознакою, він повинен складатися з одного стовпчика.

б) вхідний інтервал X – це діапазон комірок, що містять значення факторів (незалежних змінних). Число вхідних діапазонів (стовпців) 16.

в) прапорець Мітки, встановлюється в тому випадку, якщо в першому рядку діапазону варто заголовки.

г) прапорець Рівень надійності активізується, якщо в поле, що знаходиться поруч з ним необхідно ввести рівень надійності, відмінний від встановленого за замовчуванням (95%).

г) константа нуль. Даний прапорець необхідно встановити, якщо лінія регресії повинна пройти через початок координат ($b = 0$).

д) прапорці в групі Залишки і Графік залишків встановлюються, якщо необхідно включити в вихідний діапазон відповідні стовпці або графіки.

4.2 Регресійний аналіз експериментів

Множинний R – коефіцієнт кореляції

R-квадрат – це коефіцієнт лінійної детермінації. Коефіцієнт є однією з найбільш ефективних оцінок адекватності регресійної R^2 моделі, мірою якості рівняння регресії в цілому (або, як кажуть, мірою якості підгонки регресійній моделі до значень спостереження).

Якщо R-квадрат $> 0,95$, кажуть про високу точність апроксимації (модель добре описує явище). Якщо R-квадрат лежить в діапазоні від 0,8 до 0,95, кажуть про задовільну апроксимації (модель в цілому адекватна описуваного явища).

Нормований R-квадрат – скоригований (адаптований, поправлений) коефіцієнт детермінації.

Недоліком коефіцієнта детермінації R-квадрату є те, що він збільшується при додаванні нових пояснюють змінних, хоча це і не обов'язково означає поліпшення якості регресійній моделі. У цьому сенсі краще використовувати нормований, який на відміну від R-квадрат може зменшуватися при введенні в модель нових пояснюють змінних, що не додає істотного впливу на залежну змінну.

Спостереження – число спостережень (256 вимірювань для експерименту з впливу швидкості та прискорення на якість).

df – число ступенів свободи пов'язано з числом одиниць сукупності і з числом визначаються по ній констант.

F і Значимість F дозволяють перевірити значимість рівняння регресії, тобто встановити, чи відповідає математична модель, що виражає залежність між змінними, експериментальними даними і чи достатньо включених в рівняння пояснюючих змінних (однієї або декількох) для опису залежною змінною.

SS – Сума квадратів відхилень значень ознаки Y.

MS – Дисперсія на одну ступінь свободи.

F – Спостережуване (емпіричне) значення статистики F, за яким перевіряється гіпотеза рівності нулю одночасно всіх коефіцієнтів моделі. Значимість F – теоретична ймовірність того, що при гіпотезі рівності нулю одночасно всіх коефіцієнтів моделі F-статистика більше емпіричного значення F.

На рівні значущості $\alpha = 0,05$ гіпотеза $H_0: b_1 = 0$ відкидається, якщо Значимість F < 0.05 , вона приймається, якщо Значимість F ≥ 0.05 . В регресійному аналізі впливу швидкості та прискорення на якість Значимість має значення $2,215^{83}$. В регресійному аналізі впливу прискорення на якість. Значимість дорівнює $1,377^{83}$. Тобто якщо F < 0.05 то це говорить про адекватність моделі. Слід розуміти, що отримана оцінка моделі важлива для її подальшого осмислення, тому що подальший аналіз може вивести які з незалежних змінних незначущі і погіршують якість моделі.

Значення коефіцієнтів регресії знаходяться в стовпці Коефіцієнти і відповідають:

а) У-перетин – a;

б) змінна X1 – b1;

в) змінна X2 – b2 і т.п.

Таким чином, отримана наступна моделі регресії для експерименту впливу швидкості та прискорення на якість друку:

а) $Y = 0.0742X_1 + 0.0122X_2$;

б) $Y = 0.0748X_1 + 0.0748X_2$.

Моделі регресії для експерименту впливу прискорення на якісний показник:

$$a) Y = 0.00456X_1 + 0.00450X_2.$$

t-статистика відповідного коефіцієнта.

P-Значення – ймовірність, що дозволяє визначити значимість коефіцієнта регресії. У випадках, коли P-Значення > 0,05, коефіцієнт може вважатися нульовим, що означає, що відповідна незалежна змінна практично не впливає на залежну змінну.

У випадку з регресійним аналізом експерименту впливу швидкості та прискорення на якість P-значення має коефіцієнти:

- a) для швидкості $x = 5,20^{-38}$;
- б) для прискорення $x = 4,49^{-09}$;
- в) для швидкості $y = 1,36^{-38}$;
- г) для прискорення $y = 9,28^{-09}$.

У випадку з регресійним аналізом експерименту впливу прискорення на якість P-значення має коефіцієнти:

- a) для швидкості $y = 0,00696$;
- б) для прискорення $y = 0,00755$.

У нашому випадку усі шість коефіцієнтів «впливають», а значить незалежні змінні впливають на модель.

Нижні 95% - Верхні 95% – довірчий інтервал для параметра, тобто з надійністю 0.95 цей коефіцієнт лежить в даному інтервалі. Оскільки коефіцієнт регресії в дослідженнях мають чітку інтерпретацію, то межі довірчого інтервалу для коефіцієнта регресії не повинні містити суперечливих результатів. Так, наприклад, «Прискорення x» не може лежати в інтервалі $-0,1 \geq b_1 \geq 20$. Такого роду запис вказує, що справжнє значення коефіцієнта регресії одночасно містить позитивні і негативні величини і навіть нуль, чого не може бути.

Передбачене $Y(\text{підбор})$ – це теоретичні (розрахункові) значення результативної ознаки.

Залишки – це різниці між значеннями що спостерігаються і значеннями, передбачені досліджуваною регресійною моделлю.

Для регресійного аналізу експерименту впливу швидкості та прискорення на якість друку створено графіки на основі даних про залишки моделі регресії були побудовані графіки залишків які зображені на рис. 4.1 - 4.4 та в Додатках Б та В та графік підбору – тобто поле кореляції фактичних і теоретичних (розрахункових) значень результативної змінної які зображені на рис. 4.5 - 4.8 та в Додатках Б та В.

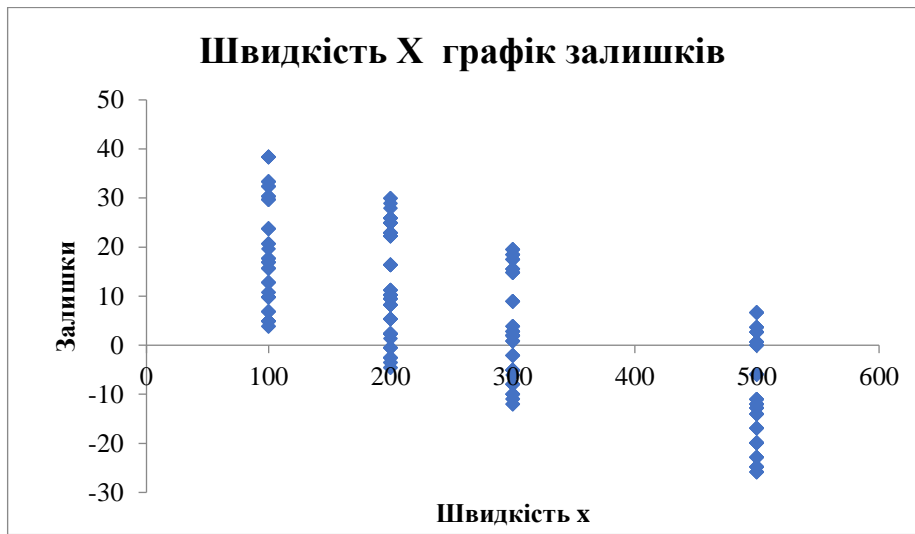


Рисунок 4.1 – Графік залишків швидкості для осі X

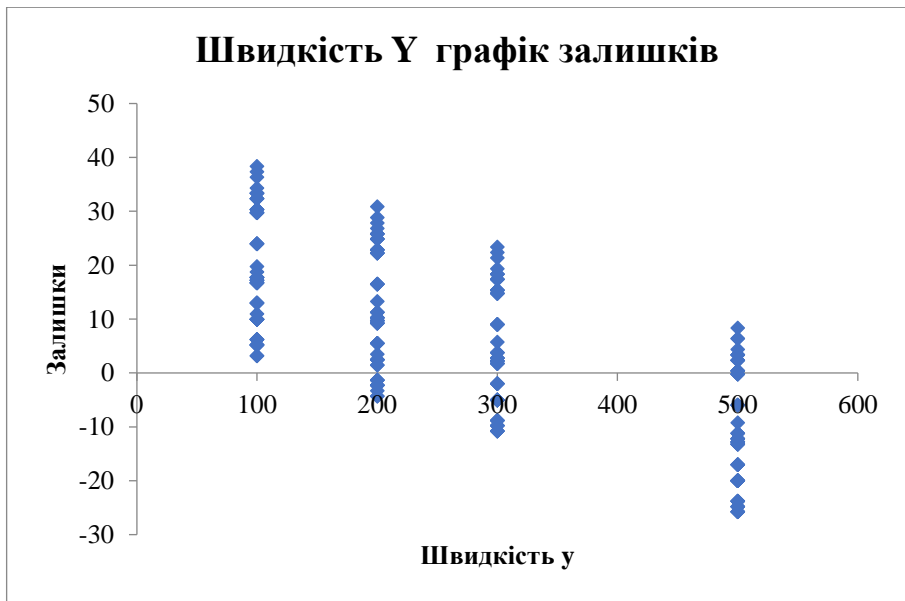


Рисунок 4.2 – Графік залишків швидкості для осі Y

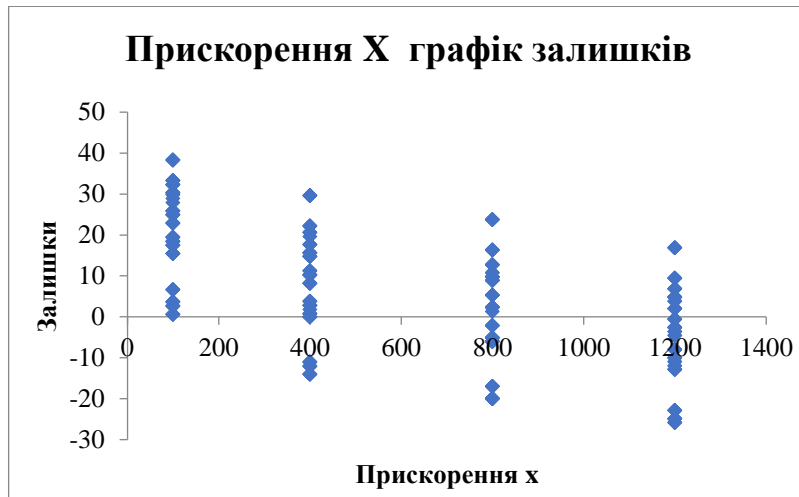


Рисунок 4.3 – Графік залишків прискорення для осі X

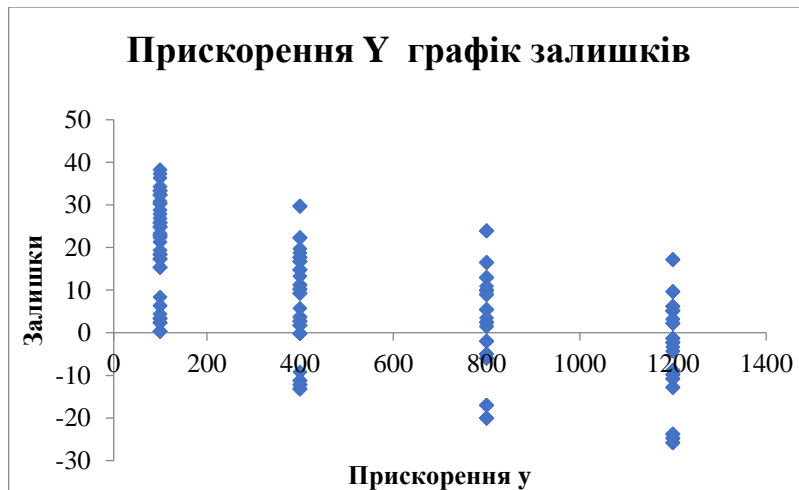


Рисунок 4.4 – Графік залишків прискорення для осі Y

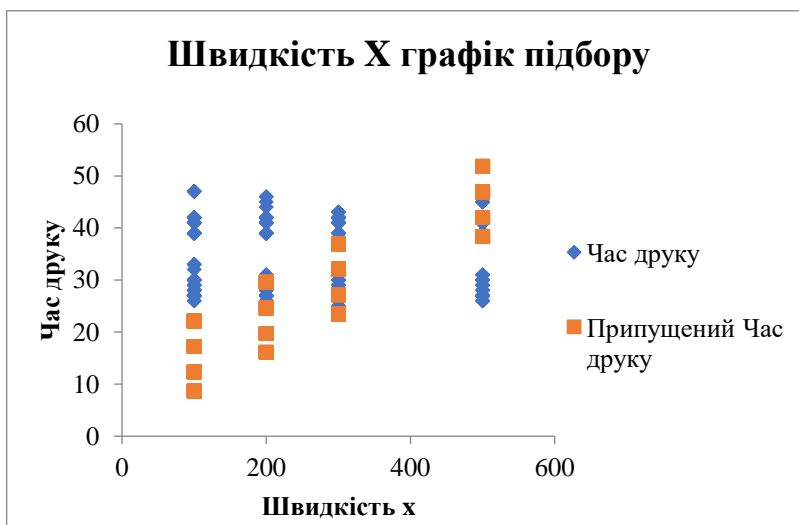


Рисунок 4.5 – Графік підбору швидкості для осі X

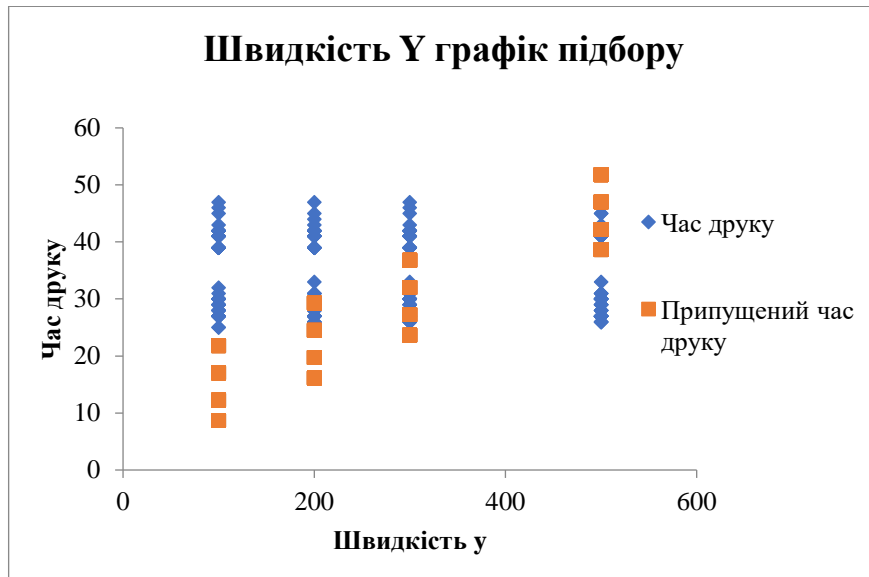


Рисунок 4.6 – Графік підбору швидкості для осі Y

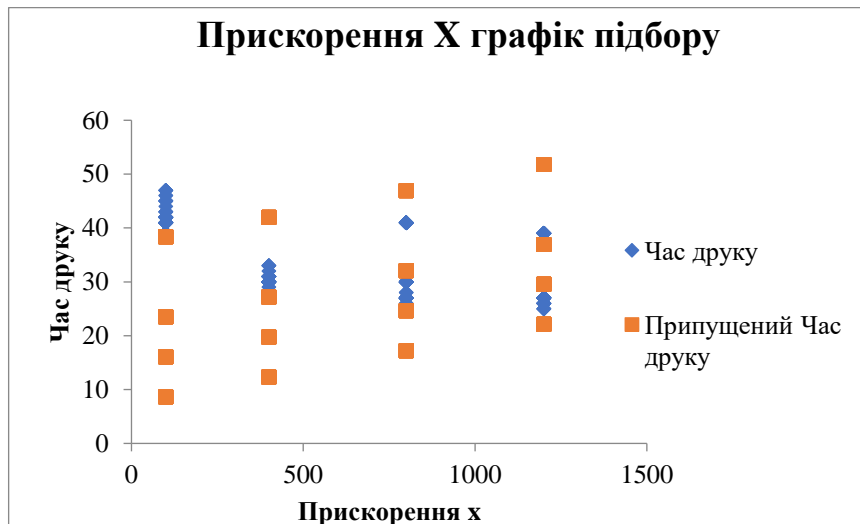


Рисунок 4.7 – Графік підбору прискорення для осі X

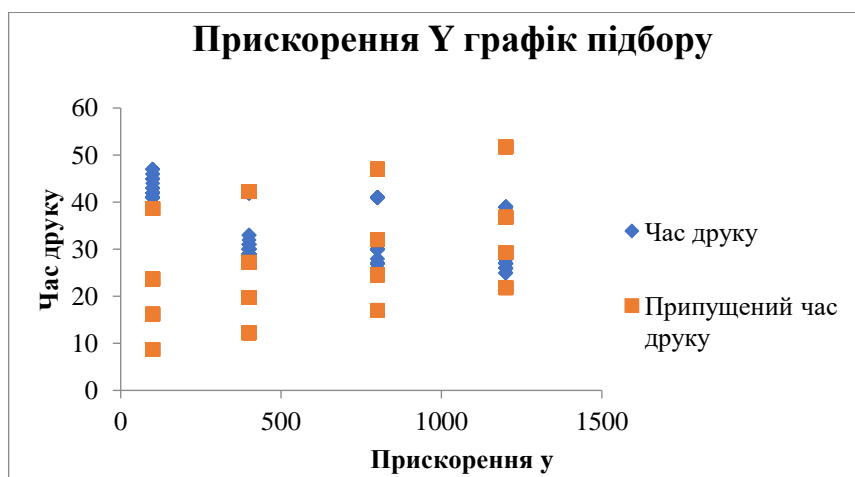


Рисунок 4.8 – Графік підбору прискорення для осі Y

Для регресійного аналізу експерименту впливу прискорення на якість друку також створено графіки на основі даних про залишки моделі регресії які зображені на рис. 4.9 та 4.10 та в Додатку Г. Також побудований графік підбору який зображений на рис. 4.11 - 4.12 та в Додатку Г.

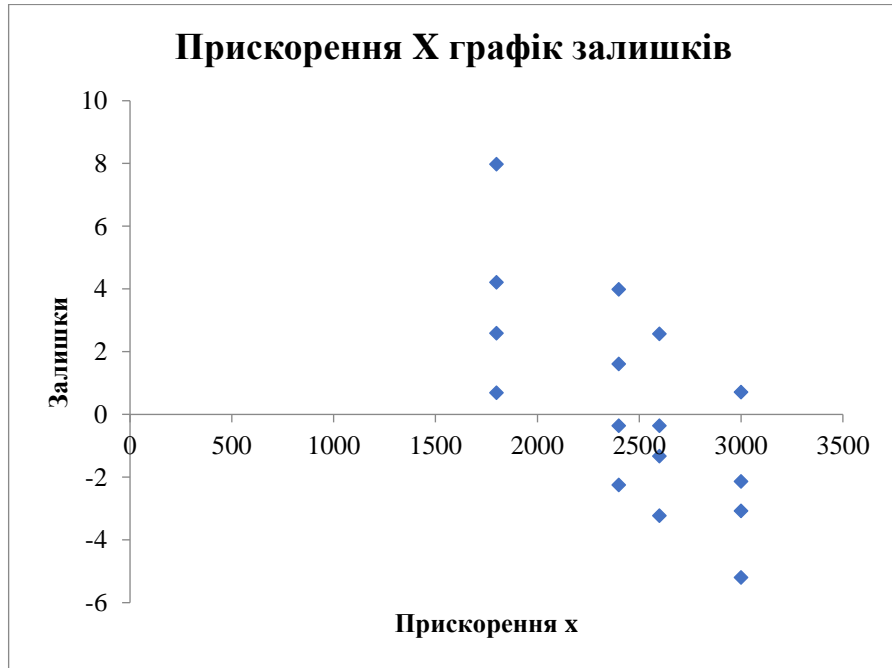


Рисунок 4.9 – Графік залишків прискорення для осі X

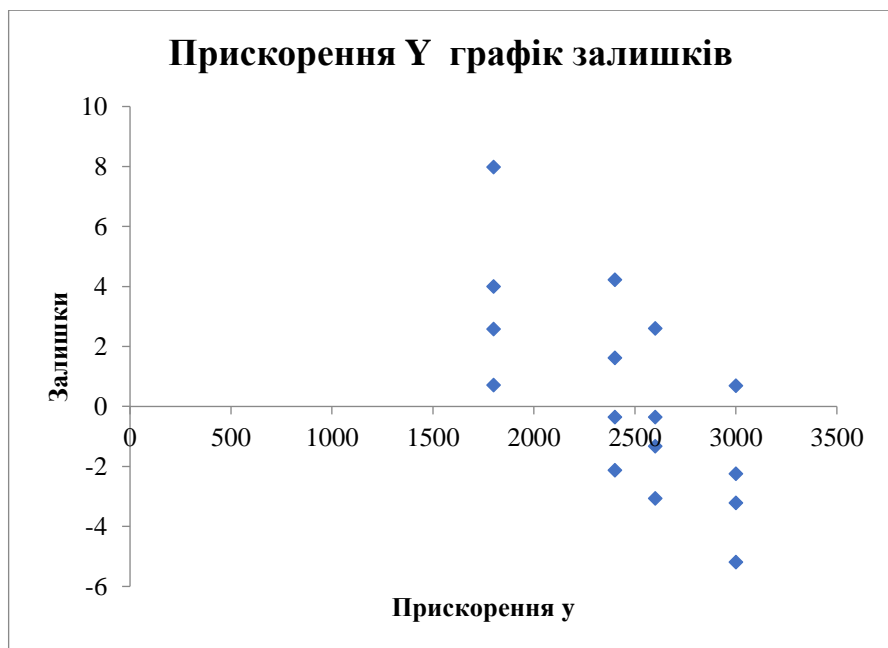


Рисунок 4.10 – Графік залишків прискорення для осі Y



Рисунок 4.11 – Графік підбору прискорення для осі X



Рисунок 4.12 – Графік підбору прискорення для осі Y

4.3 Висновки четвертого розділу

В четвертому розділі було описано основні рівняння та виконано регресійний аналіз експериментів через програмний засіб Excel та проаналізовано вплив таких параметрів як: множинний R; нормований R - квадрат; значимість F; F-статистика; t-статистика; P-значення. Виходячи з

результатів регресії 20% персентиля достатньо для нормальної якості друку при високих прискореннях, оптимальними параметрами для дослідження впливу швидкості та прискорення на якість друку є:

- а) прискорення по осі X – 1200 мм/с^2 ;
- б) прискорення по осі Y – 1200 мм/с^2 ;
- в) швидкість по осі X – 200 мм/с ;
- г) швидкість по осі Y – 200 мм/с .

А для дослідження впливу прискорення на якість друку:

- а) прискорення по осі X – 2600 мм/с^2 ;
- б) прискорення по осі Y – 2600 мм/с^2 .

5 ОХОРОНА ПРАЦІ

Лабораторія, в якій виконувалась дипломна робота, оснащена персональними комп'ютерами (ПК) типу IBM PC/AT та РК-моніторами та мають наступні характеристики: розміри приміщення лабораторії та мають такі характеристики: розміри приміщень лабораторії складають 5 м х 6 м х 3,4 м, що складає площу 30 м², об'ємі 102 м³. У приміщенні знаходиться три вікна площею 9 м² і одні двері . Кількість працюючих на комп'ютерах одночасно 5 чоловік; обладнання складається з 5 ПЕОМ.

Розглянуте приміщення відповідає санітарно-технічним нормам, згідно з якими площа, яка припадає на одну людину повинна бути не менше 6 м², а об'єм 20 м³. В даному приміщенні на одного працюючого припадає 6 м² площі і 20,4 м³ об'ємі.

Оскільки праця людини в сучасному автоматизованому виробництві є процесом взаємодії людини, машини і навколишнього середовища, які об'єднуються в систему «Людина-Машина-Середовище», то аналіз умов праці доцільно починати з аналізу системи «Людина» – «Машина» – «Середовище»

Елемент «Людина» – група програмістів, елемент «машина» – ПК типу IBM PC/AT, «середовище» – внутрішнє середовище в лабораторії.

Елементи системи можна розділити на наступні функціональні частини: «Людина» – робітник виробництва:

а) Л1 – людина, керуючий "машиною" для виконання основного завдання системи – аналізує статистичні дані;

б) Л2 – людина, як біологічний об'єкт, безпосередньо впливає на виробниче середовище (споживання кисню, тепло і волого виділення)

в) Л3 – людина, яка розглядається з точки зору її психофізіологічного стану під впливом факторів, що виникають в процесі виконання поставлених завдань.

«Машина» – обладнання в лабораторії:

а) М1 – машина, що виконує основну технологічну функцію – ПК;

- б) М2 – машина, що виконує функції аварійного захисту;
 в) М3 – машина, впливає на стан виробничого середовища.
 «Середовище» – виробниче середовище.

Предмет праці – створення методу теплового неруйнівного контролю якості друкованих плат на виробництві РЕА.

Безпека праці в системі «Л-М-С» визначає негативні зв'язки, які є причиною існування небезпек в приміщенні. Дана система представлена на рис. 5.1.

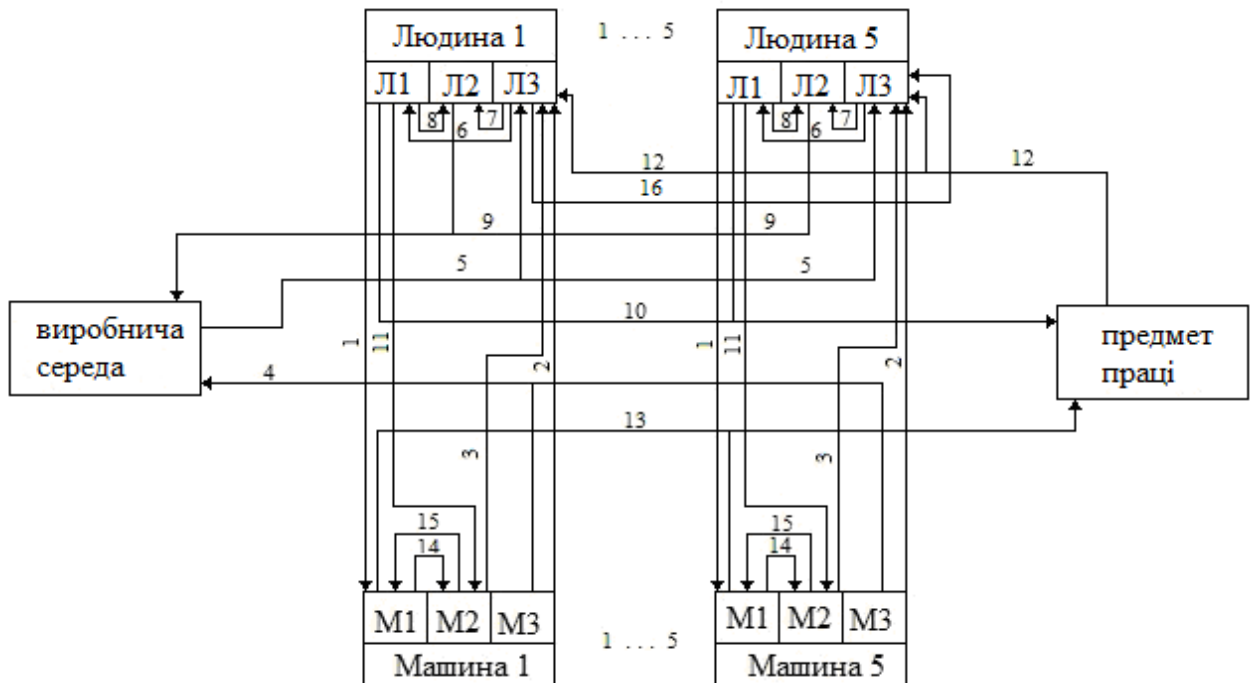


Рисунок 5.1 – Система «Людина - Машина - Среда»

У структурі є такі зв'язки:

а) Л1 - М1 - вплив людини на основне технологічне обладнання (виконання технологічних операцій, обробка інформації);

б) М3 - Л3 - вплив шкідливих факторів, які виробляє обладнання, на психофізіологічний стан працівника (підвищений рівень шуму викликає перенапруження слухових аналізаторів, що може привести до приглухуватості; впливає на серцево-судинну систему, викликає роздратування і швидку

стомлюваність; підвищений рівень шуму на робочому місці несприятливо впливає не тільки на органи слуху, але і на весь організм людини в процесі роботи через центральну нервову систему, у людини послаблюється увага, погіршується пам'ять, що призводить до значного зниження продуктивності праці і зростання кількості помилок в роботі);

в) М2 - Л3 – вплив функцій аварійного захисту на психофізіологічний стан людини (якщо в приміщенні відсутній захист людини від впливу небезпечних чинників, то людина може отримати травму, наприклад ураження людини електричним струмом може викликати порушення функцій життєдіяльності організму: втрату свідомості, зупинку дихання або припинення роботи серця);

г) М3 - ВС – вплив машини на виробниче середовище (зміна параметрів мікроклімату, підвищений рівень ЕМВ, що посередньо (через виробничу середу) негативно впливає на психофізіологічний стан людини, викликаючи захворювання, швидке стомлення);

г) ВС - Л3 – вплив середовища на психофізіологічний стан організму (підвищена вологість або температура повітря в приміщенні викликає роздратування, швидку стомлюваність і в результаті зниження працездатності);

д) Л3 - Л1 – вплив психофізіологічного стану людини на працездатність людини (якщо людина втомилася або захворіла, то працездатність падає);

е) Л3 - Л2 – вплив психофізіологічного стану на ступінь інтенсивності обміну речовин між організмом, середовищем і виділенням тепла людини (високе емоційне напруження веде до зміни швидкості протікання біохімічних процесів в організмі, що призводить до збільшення потовиділення, прискорене дихання – більшого поглинання кисню);

є) Л1 - Л2 – вплив тяжкості і напруженості праці на ступінь інтенсивності обміну речовин між організмом і середовищем (інтенсивна робота викликає збільшення споживання кисню, виділення вуглекислого газу, підвищене потовиділення);

ж) Л2 - ВС – вплив людини як біологічного об'єкта на виробниче середовище (споживання кисню, тепло і волого виділення);

з) Л1 - ПП – вплив людини на предмет праці (працівник налагоджує програму або виконує інші дії але, якщо людина втомлена, то якість предмета праці падає);

і) Л1 - М2 – вплив людини на функції аварійного захисту (безпечний стан робочого місця – застосування методів захисту від впливу небезпечних виробничих факторів);

и) ПП - Л3 – вплив предмета праці на психофізіологічний стан людини (якість предмета праці може викликати як позитивні, так і негативні емоції, воно може привести до нервового зриву або інших негативних наслідків);

ї) М1 - ПП – вплив машини на предмет праці (на технологічному обладнанні безпосередньо проводиться предмет праці);

й) М1 - М2 – інформація про несправності технологічного обладнання (необхідно для спрацьовування функції аварійного захисту);

д) М2 - М1 – аварійний керуючий вплив (спрацьовування аварійного захисту, в результаті несправності обладнання);

л) Л3 - Л3 – взаємний вплив працюючих один на одного (відношення між працівниками в процесі праці).

В результаті взаємодії всіх елементів системи «Л-М-С» можуть виникнути небезпечні ситуації. Згідно ГОСТ 12.0.003-74, виділяють фізичні, біологічні, хімічні та психофізіологічні небезпечні та шкідливі виробничі фактори.

Основними фізичними шкідливими і небезпечними виробничими факторами є:

а) підвищена або знижена температура повітря робочої зони, підвищена або знижена вологість повітря, підвищена рухливість повітря;

б) підвищений рівень шуму на робочому місці;

в) підвищене значення напруги в електричному ланцюзі, замикання якого може відбутися через тіло людини;

- г) підвищений рівень статичної електрики;
- г) підвищений рівень електромагнітних випромінювань;
- д) відсутність або нестача природного світла;
- е) недостатня освітленість робочої зони.

Основними психофізіологічними шкідливими виробничими факторами являються:

- є) фізичні (статичні) перевантаження, дрібні стереотипні рухи рук;
- ж) нервово-психічні:
 - 1) розумове перенапруження;
 - 2) перенапруження зорових аналізаторів;
 - 3) монотонність праці;
 - 4) емоційні перевантаження.

Хімічні фактори – відсутні. Біологічні фактори - відсутні.

Результати оцінки факторів виробничого середовища і трудового процесу занесені в таблиця 5.1.

Для визначення шкідливих і небезпечних факторів проведена оцінка умов праці та була заповнена карта оцінки факторів виробничого середовища і трудового процесу представлена в таблиці 5.1.

Згідно з проведеним аналізом умов праці, результати якого занесені в карту оцінки умов праці, було визначено декілька домінуючих шкідливих виробничих факторів – підвищена температура повітря робочої зони та підвищений рівень шуму на робочому місці.

Таблиця 5.1 – Оцінка факторів виробничої середовища та трудового процесу

Фактори виробничого середовища і трудового процесу	значення фактора (ГДК, ПДУ)		3 клас – небезпечні та шкідливі умови праці			Тривалість дії фактора, в% за зміну
	норма	Факт.	1 ст	2 в	3 в	
1	2	3	4	5	6	7
1. Шум, дБ	50	50				87,5
2. Неіонізуючі випромінювання:	10	9				
– Радіочастотного діапазону 6 Гц – 2 кГц, В/м						
– Радіочастотного діапазону 2 кГц – 400 кГц, В/м	1	1				
3. Рентгенівське випромінювання, мкР/год	100	14				87,5
4. Мікроклімат:						
– Температура повітря, 0С	23–25	26	+			87,5
– Швидкість руху повітря, м/с	<0,1	0,1				87,5
– Відносна вологість,%	40–60	50				87,5
5. Атмосферний тиск, мм рт.ст.	760 ± 30	763				100
6. Освітленість:						
–природні, %	> 1,2	1,5				87,5
–штучне, Лк	300–500	335				87,5
7. Тяжкість трудового процесу:	до 40000	35000				
– Дрібні стереотипні рухи кистей і пальців рук (кількість за зміну)						

Продовження таблиці 5.1

1	2	3	4	5	6	7
– Робоча поза (перебування в похилому положенні протягом зміни)	Періодичне знаходження в незручній позі і / або у фіксованій позі до 25% часу зміни, знаходження в позі «стоячи» до 60% часу зміни	Періодичне перебування в незручній позі з незручним розташуванням кінцівок і фіксованій позі – стоячи				50
8. Напруженість трудового процесу – Інтелектуальні навантаження: 1) зміст роботи	Рішення простих альтернативних завдань згідно з інструкцією	Рішення складних завдань з вибором по відомим алгоритмом	+			10
2) розподіл функцій за ступенем складності завдання	Обробка, виконання завдання і його перевірка	Обробка, виконання завдання і його перевірка				87,5
3) характер виконуваної роботи	Робота за встановленим графіком з можливістю його коригування	Робота за встановленим графіком з можливістю його коригування				50
– Навантаження на зоровий аналізатор: 1) розмір об'єкта відмінності в мм / % часу спостереження	5,0– 1,1 мм більше 50 % часу; 1,0 0,3 мм до 50 % часу; менше 0,3 мм до 25 % часу	5,0– 1,1 мм більше 50 % часу;	+			50

Продовження таблиці 5.1

1	2	3	4	5	6	7
2) спостереження за екранами ВДТ, годин в зміну	2–3	5	+			62,5
– Навантаження на слуховий аналізатор (сприйняття мови або сигналів),%	Чіткість слів або сигналів 90–70%	90 %				90
– Емоційне напруження	Несе відповідальність за якість робіт, вимагає додаткових зусиль з боку керівництва	Несе відповідальність за якість робіт				87,5
9. Режим роботи						100
– Фактична тривалість робочої зміни, годин	8–9	8				
– Змінність роботи	Двозмінна робота (без нічної зміни)	Перша зміна				87,5
– Наявність регламентованих перерв і їх тривалість,% часу зміни	Перерви регламентовані, недостатньої тривалості: 3–7% від часу зміни	12,5 % – перерва				12,5
Загальна кількість факторів	22					

ВИСНОВКИ

В результаті виконання атестаційної роботи на рівень магістра отримано наступні результати:

а) проаналізоване програмне забезпечення яке використовується в 3D-принтерах;

б) проаналізоване програмне забезпечення для пошарового нарізання 3D-моделей так звані слайсери;

в) проаналізоване технічне завдання, визначені задачі, які необхідно вирішити;

г) виконано налаштування програмного забезпечення, необхідне для мікроконтролера, для точного позиціонування екструдерів в кінематиці DualXCarriage;

г) проаналізовані фактори, що впливають на якісні показники надрукованої моделі;

д) проаналізовано основні формули та параметри які використовуються при вирішенні багатofакторної регресії;

е) проведено експериментальні дослідження, з використання двохфакторної регресії, в результаті якої було визначено вплив кожного з значущих факторів, які безпосередньо впливають на якість друку 3D-моделі.

В результаті проведення експериментальних досліджень було підтверджено залежність якості друку 3D-принтеру, збудованого за технологією FFF, від швидкості та прискорення.

В рамках виконання атестаційної роботи було прийнято участь в таких виставках як «Зброя та безпека 2019» та «Tech Fest 2019». Прийнято участь у конференції III International Conference Manufacturing & Mechatronic systems 2019 «M&MS-2019».

Також було опубліковано 3 статті в журналі «Автоматизація та приладобудування» ADED-2018 випуск 2, ADED-2019 випуск 2, ADED-2020 випуск 1.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. 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.
2. ДСТУ 3008-15. Документація. звіти у сфері науки і техніки. структура і правила оформлення [Текст] – Введ. 2015-06-22. – К. Держстандарт України, 2017 – 29 с.
3. 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.
4. Slicers and user interfaces for 3D printers. [Електронний ресурс]; режим доступу (http://edutechwiki.unige.ch/en/Slicers_and_user_interfaces_for_3D_printers); дата використання [2.03.2019].
5. Optimized firmware for RepRap 3D printers based on the Arduino platform [Електронний ресурс]; режим доступу (<https://github.com/MarlinFirmware/Marlin>); дата використання [8.02.2019].
6. Repetier-Firmware startpage [Електронний ресурс]; режим доступу (<https://github.com/repetier/Repetier-Firmware/wiki>); дата використання [15.09.2019].
7. Klipper is a 3D-Printer firmware [Електронний ресурс]; режим доступу (<https://www.klipper3d.org/>); дата використання [16.04.2019].
8. MK4duo [Електронний ресурс]; режим доступу (<https://reprap.org/wiki/MK4duo>); дата використання [16.04.2019].
9. OO C++ RepRap Firmware [Електронний ресурс]; режим доступу (<https://github.com/reprappro/RepRapFirmware>); дата використання [16.04.2019].

10. Aprinter 3D printer firmware written in C++ [Електронний ресурс]; режим доступу (<https://github.com/ambrop72/aprinter>); дата використання [16.04.2019].
11. Sailfish, faster than a Marlin [Електронний ресурс]; режим доступу (<https://github.com/jetty840/Sailfish-MightyBoardFirmware>); дата використання [16.04.2019].
12. Slicer (3D printing) [Електронний ресурс]; режим доступу ([https://en.wikipedia.org/wiki/Slicer_\(3D_printing\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Slicer_(3D_printing))); дата використання [16.04.2019].
13. SelfCAD is an online computer-aided design software for 3D modeling and 3D printing [Електронний ресурс]; режим доступу (<https://en.wikipedia.org/wiki/SelfCAD>); дата використання [20.05.2019].
14. Pathio – новий слайсер для 3D-принтерів FDM / FFF [Електронний ресурс]; режим доступу (<https://3dprinter.ua/pathio-novyj-slajser-dlja-3d-printerov-fdm-fff/>); дата використання [21.06.2019].
15. III Міжнародна Конференція Виробництво & Мехатронні системи 2019 (« III International Conference Manufacturing & Mechatronic systems 2019» M&MS-2019), Харків, 24–25 жовт. 2019р. / Харківський національний університет радіоелектроніки ; [редкол.: І.Ш. Невлюдов та ін.]. – Харків : ХНУРЕ, 2019 - 88 с.
16. Автоматизація та приладобудування 2019 (« Automation and Development of Electronic Devices» ADED-2019), Харків 2019р. / Харківський національний університет радіоелектроніки ; [редкол.: І.Ш. Невлюдов та ін.]. – Харків : ХНУРЕ, 2019- Вип. 2.- 147 с.
17. Установка и настройка CURA на русском - слайсер для 3d принтера [Електронний ресурс]; режим доступу (<https://3dnetprint.ru/blog/ustanovka-i-nastroyki-cura-na-russkom-programma-dlya-3d-printera/>); дата використання [20.09.2020].

18. Установка и настройка Cura 4.x для UlTi и Ulti-Steel [Электронный ресурс]; режим доступа (<http://ulti-steel.ru/instructions/install-cura-4-x-ulti-steel/>); дата використання [25.09.2020].

19. Бизнес-прогнозирование [Текст] - Москва. 2003, 256-270 с./ Джон Э. Ханк, Артур Дж. Райтс, Дин. У. Уичерн - Москва: ИД «Вильямс», 2003. - 656 с.