

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Приладобудівний факультет
Кафедра виробництва приладів**

«На правах рукопису»
УДК 004.9:621.01

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри
_____ Антонюк В. С.
«__» _____ 2022 р.

**Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра**

зі спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
на тему: «Підвищення параметрів якості виготовлення деталей 3D друком»

Виконав:
студент 2 курсу, групи ПБ-01мн
Яригін Віталій Андрійович

Науковий керівник:
Доцент, к.т.н.,
Вислоух С. П.

Консультант з розділу «Розробка стартап-проектів»
д.е.н., проф., завідувач кафедри економічної кібернетики
Бояриновка К. О.

Рецензент
д.т.н., проф., зав. кафедри КІОНС
Бурау Н. І.

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

Студент _____
(підпис)

Київ – 2022 року

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

Приладобудівний факультет

Кафедра виробництва приладів

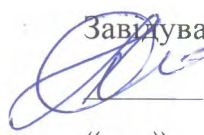
Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність – 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Освітня програма (спеціалізація): Комп'ютерно-інтегровані технології виробництва приладів

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

 Віктор АНТОНЮК

« » 2022 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Яригіну Віталію Андрійовичу

1. Тема дисертації «Підвищення параметрів якості виготовлення деталей 3D друком»

науковий керівник Вислоух Сергій Петрович, к.т.н., доцент

затверджені наказом по університету від «19» травня 2022 р. № НС-300-2022

2. Термін подання студентом проекту «09» червня 2022 р.

3. Об'єкт дослідження: процес FDM 3D друку.

4. Предмет дослідження: температурні режими друку та їх вплив на якість отриманих поверхонь.

5. Перелік завдань, які необхідно розробити: 1.Аналіз існуючих технічних та технологічних рішень, що дозволяють керуючи температурними режимами поліпшити якість деталей.2. Проведення досліджень виготовлення деталей з використанням модифікованих температурних режимів друкування.3. Розробка практичних рекомендацій по використанню модифікованої конструкції 3D принтера з зміненими температурними режимами друкування. 4.Моделювання і оптимізація параметрів точності поверхонь, виготовлених 3D друком 5.Розроблення практичних рекомендацій з підвищення параметрів якості 3D друку 6. Розроблення стартап проекту підвищення параметрів якості деталей, виготовлених 3D друком

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу: 3D друк: схема виготовлення деталей, область використання, переваги і недоліки, експериментальна установка FDM 3D друку, плани проведення експериментів, результати експериментів, математичні моделі шорсткості поверхонь, результати моделювання та оптимізації параметрів якості друку.

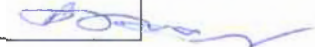
7. Орієнтовний перелік публікацій: статті та тези доповідей за темою магістерської дисертації (надано в додатку в вигляді форми 26).

8. Консультанти розділів дисертації.

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Завдання видав	Завдання прийняв
Розробка стартап проекту	Бояринова К.О., д.е.н., проф.		

9. Дата видачі завдання «05» лютого 2022 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1.	<i>Аналіз існуючих технічних та технологічних рішень, що дозволяють керуючи температурними режимами полішити якість деталей.</i>	24.02.22	Виконано 
2.	<i>Вдосконалення конструкції FDM 3D принтера, що реалізує запропонований метод виготовлення деталей</i>	14.03.22	Виконано 
3.	<i>Проведення досліджень виготовлення деталей з використанням модифікованих температурних режимів друкування</i>	14.04.22	Виконано 
4.	<i>Моделювання і оптимізація параметрів точності поверхонь, виготовлених 3D друком.</i>	12.05.22	Виконано 
5.	<i>Розроблення практичних рекомендацій з підвищення параметрів якості 3D друку.</i>	26.05.22	Виконано 
6.	<i>Розроблення стартап проекту підвищення параметрів якості деталей, виготовлених 3D друком</i>	2.06.22	Виконано 

Студент



Віталій Яригін

Керівник



Сергій Вислоух

АНОТАЦІЯ

Магістерська дисертація складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаної літератури та додатків у вигляді таблиць, тексту програм, креслень, акту впровадження та списку наукових праць. Основний тест складається зі 212 сторінок, включає в себе 121 рисунок та 45 таблиць.

У вступі обґрунтована актуальність проблеми, сформуовано мету та задачі роботи, практичну корисність та наукову новизну, основні положення винесені на захист. Наведена коротка характеристика роботи.

У першому розділі дисертаційної роботи наведено огляд стану якості деталей виготовлених 3D друком, розглянуто методи 3D друкування деталей та процес FDM 3D друку, параметри якості деталей виготовлених зазначеним методом, методи забезпечення якості деталей виготовлених 3D друком. А також приведена постановка задачі дисертаційних досліджень

У другому розділі розглянуто питання придбання 3D принтера визначення його недоліків, розроблення та побудови дослідної установки

У третьому розділі розглянуто питання моделювання параметрів точності поверхонь деталей методами повного факторного експерименту другого порядку, методом евристичної самоорганізації, наведено методологію обробки результатів дослідження.

У четвертому розділі описано проведення та результати дослідження, побудовано й оптимізовано математичні моделі. Проведено аналіз отриманих результатів моделювання.

У п'ятому розділі менеджменту стартап-проекту проведено опис проекту, технологічний аудит ідеї проекту, аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту та розроблення ринкової стратегії проекту.

Ключові слова: 3D друк, технології 3D друку, види кінематики 3D принтерів, факторні експерименти другого порядку, модель, побудова дослідної установки

ANNOTATION

The master's dissertation consists of an introduction, five chapters, conclusions, a list of references and appendices in the form of tables, text of programs, drawings, the act of implementation and a list of scientific papers. The main text consists of 212 pages, includes 121 figures and 45 tables.

In the introduction the urgency of the problem is substantiated, the purpose and tasks of the work, the practical usefulness and scientific novelty are formed, the main provisions are brought to the defense. A brief description of the work is given.

The first section of the dissertation provides an overview of the quality of parts made by 3D printing, methods of 3D printing of parts and the process of FDM 3D printing, quality parameters of parts made by this method, methods of quality assurance of parts made by 3D printing. And also the statement of a problem of dissertation researches is resulted

The second section discusses the purchase of a 3D printer to identify its shortcomings, design and construction of a research facility

In the third section the question of modeling of parameters of accuracy of surfaces of details by methods of full factorial experiment of the second order, by a method of heuristic self-organization is considered, the methodology of processing of results of research is resulted.

The fourth section describes the conduct and results of the study, built and optimized mathematical models. The analysis of the obtained simulation results is carried out.

The fifth section of the startup project management describes the project, technological audit of the project idea, analysis of market opportunities to launch a startup project and develop a market strategy for the project.

Keywords: 3D printing, 3D printing technologies, types of kinematics of 3D printers, factor experiments of the second order, model, construction of experimental setup

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	1
ANNOTATION.....	2
ЗМІСТ	3
СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	6
ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1 . СТАН ПИТАННЯ ЯКОСТІ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ 3D ДРУКОМ	11
1.1 . Методи та засоби виготовлення деталей 3D друком.....	11
1.1.1 . Методи 3D друку.....	11
1.1.2 . Процес 3D друку	20
1.1.3 . Засоби виготовлення деталей 3D друком.	22
1.2 Параметри якості виготовлення 3D друком.	26
1.3 . Методи забезпечення параметрів якості.....	31
Постановка задачі дисертаційних досліджень	35
РОЗДІЛ 2 . РОЗРОБЛЕННЯ ВДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ПРИНТЕРА	37
2.1 . Шляхи створення дослідних установок. Переваги та недоліки	37
2.2 . Види кінематики FDM принтерів.....	40
2.2.1 . Кінематика від Джозефа Прюши.....	40
2.2.2 . Кінематика за конструкцією Felix printers.....	42
2.2.3 . Кінематика типу Ultimaker	44
2.2.4 . Кінематика на основі конструкції фірми Makerbot	45
2.2.5 . Кінематики CoreXY та H-Bot.....	46
2.2.6 . Belt кінематика	50
2.2.7 . Delta кінематика	51
2.2.8 . SCARA кінематика	52
2.2.9 Кінематика оснований на полярних координатах (За конструкцією фірми Polar).....	54
2.2.10 . Кінематика побудована на основі роботизованого маніпулятора	55
2.3 . Вибір 3D принтера	57
2.3.1 . Вибір кінематики для майбутнього 3D принтера.	59

2.3.2 . Критерії вибору 3D принтера	60
2.3.3 . Представлені моделі на ринку	60
2.3.4 Вибір 3D принтера до покупки.....	66
2.4 . Складання та вдосконалення конструкції принтера. Встановлення додаткового обладнання.....	66
2.4.1 . Виклики складання та пусконаладжувальних робіт принтера.	67
2.4.2 . Визначення недоліків та слабких місць конструкції.....	70
2.4.3 . виправлення недоліків й модифікація конструкції, встановлення додаткового обладнання.....	71
Висновки до розділу	76
РОЗДІЛ 3 . МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ТОЧНОСТІ ДЕТАЛЕЙ, ВИГОТОВЛЕНИХ 3D ДРУКОМ.....	78
3.1 . Моделювання засобами планування експериментів	79
3.1.1 . Повний факторний експеримент	79
3.1.2 . Моделювання з використанням ортогональних планів другого порядку	84
3.1.3 . Моделювання з використанням рототабельних планів другого порядку	88
3.1.4 . Методика обробки експериментальних даних.....	91
3.2 . Моделювання на основі методу евристичної самоорганізації	95
3.2.1 . Алгоритми методу групового врахування аргументів.....	95
3.2.2 Методика реалізації методу евристичної самоорганізації групового врахування аргументів.....	99
3.3 . Програмна реалізація обробки результатів дослідження	103
Висновки до розділу	105
РОЗДІЛ 4 . ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ЗА ЗАПРОПОНОВАНОЮ МЕТОДИКОЮ	107
4.1 . Алгоритм проведення дослідження	107
4.2 Проведення експериментальних досліджень.	109
4.3 . Методика визначення параметрів якості поверхневого шару деталей ..	115
4.4 . Математичні моделі параметрів якості.....	122
4.4.1 . Моделювання засобами ортогонального планування	122
4.4.2 . Моделювання засобами рототабельного планування	124

4.4.3 Порівняння результатів ортогонального і рототабельного планування	126
4.5 .Модель засобами евристичної самоорганізації.....	130
4.5.1 . Порівняння методів факторного експерименту з МГВА.....	135
4.6 . Оптимізація параметрів процесу 3D друку.	136
4.7 . Розробка практичних рекомендацій з підвищення параметрів якості 3D друку.	148
Висновки до розділу	149
РОЗДІЛ 5 РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЄКТУ «ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ МІКРОКЛІМАТУ НА ЯКІСТЬ ОТРИМАНИХ КРУПНОГАБАРИТНИХ ДЕТАЛЕЙ».....	152
5.1 . Опис та технологічний аудит ідеї стартап-проєкту.....	152
5.2 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проєкту	155
5.3 . Розроблення ринкової стратегії та маркетингової програми проєкту....	164
5.4 . Організація реалізації стартап-проєкту	170
Висновки до розділу	180
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ДО МАГІСТЕРСЬКОЇ ДИСЕРТАЦІЇ.....	182
ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ.....	185
ДОДАТКИ А	194
ДОДАТОК Б.....	195
ДОДАТОК В	196
ДОДАТОК Г.....	206

СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ТТХ – тактико технічні характеристики.

ПЗ – програмне забезпечення.

МК – мікро контролер.

ПФЕ – повний факторний експеримент.

ШНМ – штучні нейронні мережі.

МГВА – метод групового врахування аргументів.

ЕОМ – електронна обчислювальна машина.

FDM – fused disposed modeling в перекладі з англійської моделювання методом пошарового наплавлення

SCARA - Selective Compliance Articulated Robot Arm в перекладі з англійської зчленований селективний механізм робо-руки

SLA – Stereo-lithography (стерео-літографія).

SLM – Selective Laser Melting (вибіркове (селективне) лазерне спікання).

SLS – Selective Laser Sintering (вибіркове (селективне) лазерне сплавлення).

DMT – Laser-aided Direct Metal Tooling (автоматизоване нанесення металів за допомогою лазера).

DLP – Digital Light Processing (цифрова обробка світлом).

ВСТУП

Актуальність роботи. Адитивне виробництво набуло широкого розповсюдження в промисловості та бізнесі. Велика номенклатура матеріалів дозволяє створювати різноманітні об'єкти починаючи від деталей ракет й закінчуючи дитячими іграшками. Простота використання, швидкість виготовлення та дешевизна установок такого плану в сукупності дали широке розповсюдження деяким адитивним технологіям. Однією з таких технологій є FDM 3D друк. Він має дві основні переваги: дешевизна обладнання та матеріалів. Дана технологія використовується в сферах приладобудування та швидкого прототипування. Основними недоліками технології є низька точність форми отриманих поверхонь наслідком чого є необхідність пост обробки поверхонь отриманої деталі. Ще один суттєвий недолік – різні міцнісні характеристики в залежності від напрямку вектору прикладеної сили, а також висока шорсткість бокових поверхонь. Основною причиною виникнення цих недоліків є метод отримання об'єктів. Якщо його детально розглянути можна побачити, що неточності форми для всіх поверхонь та висока шорсткість торцевих поверхонь виникає через пошарове нанесення матеріалу. Це особливо виражено в деталях великих габаритів, тут окрім описаних вище недоліків з'являється ще один – деформація деталі за рахунок внутрішніх напружень, що призводить до браку. Виникають дані недоліки за рахунок швидкого охолодження та, відповідно, кристалізації полімеру.

В попередніх дослідженнях було показано як температурні параметри друку впливають на якість поверхонь отриманих деталей. Але в сучасних установках підтримуються лише температурні режими, безпосередньо, друку деталі. Тобто режими нагрівання і охолодження сопла й так званого «hotend» сопла. В деяких установках використовуються додаткові нагрівачі що встановлюються на робочу поверхню (плиту-основу) принтера. Це дозволяє незначно знизити швидкість охолодження деталі, але існують суттєві обмеження по діапазону температур та й температурний градієнт при такому виді підігріву

не є оптимальним, адже температура середовища, а отже і якість друку зменшується з віддаленням від нагрівача тобто із зростанням висоти виробу. Для виправлення такого недоліку планується використати додатковий нагрівач та дода що триматиме весь об'єм друку деталі в певному температурному режимі, що дозволить отримати кращі вироби за критерієм зменшення шорсткості поверхонь деталі а також збільшить кінцеву міцність деталей на розрив за рахунок кращої дифузії між шарами нанесеного пластику.

Такі вдосконалення процесу друку призведуть до зменшення часу повного циклу виготовлення виробу, а саме зменшивши необхідність, а отже і час необхідний на його пост обробку, а також покращать міцнісні характеристики. Що в свою чергу дозволить знизити кінцеву вартість виготовлення і обробки виробу.

У зв'язку з вищесказаним актуальною є проблема підвищення якості поверхонь отриманих FDM 3D друком

Об'єкт дослідження – процес FDM 3D друку.

Предмет дослідження – температурні режими друку (в зоні друку та навколо неї) та як вони впливають на кінцеву якість отриманих поверхонь.

Мета роботи – підвищення параметрів якості деталей отриманих 3D друком.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- аналіз існуючих технічних та технологічних рішень отримання поверхонь деталей 3D друком високої якості, їх переваги та недоліки;
- визначення методів підвищення параметрів якості деталей виготовлених 3D друком;
- розроблення модифікованої конструкції 3D принтера, що реалізує методику оброблення з запропонованими температурними режимами;
- проведення експериментальних досліджень виготовлення деталей з використанням модифікованих температурних режимів друкування;
- математичне моделювання та оптимізація режимів 3D друкування;

- розробка практичних рекомендацій по використанню модифікованої конструкції 3D принтера з зміненими температурними режимами друкування;
- створення стартап проекту виготовлення деталей за допомогою модифікованого 3D принтера з запропонованими режимами друкування.

Методи дослідження – поставлені завдання у дисертаційній роботі вирішувалися з використанням методів технології приладобудування, математичного моделювання оптимізації з використанням планів факторних експериментів другого порядку, методу евристичної самоорганізації моделей, методів програмування складних систем.

Наукова новизна роботи полягає в наступному:

- нова методика друкування деталей FDM друком з врахуванням температурних режимів;
- математична модель параметрів процесу FDM 3D друкування.

Практична корисність дисертаційної роботи є такою:

- нова конструкція 3D принтера, що враховує температурні режими FDM 3D друкування;
- оптимальні параметри друкування з врахуванням вдосконаленої конструкції принтера;
- практичні рекомендації по вибору режимів FDM 3D друку

Практична апробація. Основні положення та результати роботи доповідалися та обговорювалися на конференціях з публікацією тез доповідей: XV Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність інженерних рішень у приладобудуванні» 10-11 грудня 2019 р. м. Київ, Україна; X Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю «ПРОЦЕСИ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ, ВЕРСТАТИ ТА ІНСТРУМЕНТ » м. Житомир, 6–9 листопада 2019 р.; XII Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування» 15-16 травня 2019 р. м. Київ, Україна, 13-я Международная научно-техническая конференция молодых ученых и студентов «НОВЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ» 15–17 апреля

2020 г. Минск; Всеукраїнська науково-практична on-line конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених, присвячена Дню науки, м. Житомир, 11–15 травня 2020 року; XIII Науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування», 13-14 травня 2020 р. м. Київ, Україна; I Міжнародної науково-практичної інтернет-«Інтеграція освіти, науки та бізнесу в сучасному середовищі: зимові диспути» 6-7 лютого 2020 р. – Дніпро, 2020; XIV Науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування», 18-19 травня 2021 р. м. Київ, Україна; XVII Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні» 07-08 грудня 2021 р. м. Київ, Україна; XVI Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні» 08-09 грудня 2020 р.; Дев'ята міжнародна науково-технічна конференція «ІНФОРМАТИКА, УПРАВЛІННЯ ТА ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ» Харків – Краматорськ 2022; Всеукраїнська науково-практична on-line конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених «Перспективи розвитку машинобудівної інженерії та транспортних технологій» (присвячена Дню науки) 11-13 травня 2022р. м. Харків

За темою магістерської дисертації опубліковано наукову статтю у науковому журналі: «Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво» м. Луцьк, випуск №43 2021, а також статтю в матеріалах 22-ї міжнародної науково-технічної конференції, м. Київ, перемога в першому турі Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт зі спеціальності «Прикладна механіка (технології машинобудування)» м. Житомир, 2020. Перемога в першому турі Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт зі спеціальності «Прикладна механіка (технології машинобудування)» м. Житомир, 2022. Результати магістерських дисертаційних досліджень впроваджені в ТОВ «Павутина.НЕТ», ТОВ «Ванком» та навчальний процес НТУУ КПІ «ім. Ігоря Сікорського»

РОЗДІЛ 1.

СТАН ПИТАННЯ ЯКОСТІ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ 3D ДРУКОМ

1.1. Методи та засоби виготовлення деталей 3D друком

3D друк є одним із видів адитивного виготовлення деталей. Сьогодні багато провідних світових компаній так чи інакше використовують адитивні технології та 3D друк в тому числі при розробці та виготовленні своїх продуктів від побутових пристроїв до деталей космічних апаратів[1,2]. Сучасний розвиток цих технологій дозволяє використовувати широку номенклатуру матеріалів від пластиків різноманітного складу до металів й їх сплавів (як легко- так і тугоплавких). Варто зазначити, що деталі отримані таким способом в деяких випадках за фізико-механічними параметрами не поступаються аналогічним деталям, що виготовленні за класичними технологіями.

1.1.1. Методи 3D друку

За принципом роботи 3D друк – це виготовлення деталі пошаровим способом. На практиці це виглядає наступним чином: спеціалізоване ПЗ оброблює підготовану заздалегідь модель вносячи в її конструкцію додаткові елементи так звані підтримки та інші необхідні для виготовлення цієї деталі об'єкти, «нарізає» отриману модель на набір шарів заданої товщини (котра дорівнює товщині шару що наноситься) та переводить отримані геометричні конструкти в керуючий програмний код верстата (принтера); наступний етап отриманий код передають безпосередньо на обладнання, котре проводить безпосередній «друк» деталі [30,31,34,35]. Основні існуючі методи 3D друку наведені в таблиці 1.1.1

Таблиця 1.1 Методи 3D друку

Метод	Технології	Використовувані матеріали
-------	------------	---------------------------

Екструзійний	Методом пошарового наплавлення (FDM або FFF)	Термопластмаси (PLA, ABS, Nylone, PVA, тощо.)
Проволочний	Виготовлення довільних форм електронно-дуговою плавкою (EBF3)	Практично будь-які сплави металів
Порошковий	Пряме лазерне спікання металів (DMLS)	
	Електронно-променева плавка (EBM)	Титанові сплави, кобальт-хромові сплави, нержавіюча сталь, алюміній
	Електронно лазерна плавка (SLM)	Порошкові термопластики, металеві та керамічні порошки
	Вибіркове теплове спікання (SHS)	
	Вибіркове лазерне спікання (SLS)	
Струменевий	Струменевий 3D друк (3DP)	Гіпс, пластики, металеві порошки, пісочні суміші
Ламінування	Виготовлення об'єктів методом ламінування (LOM)	Папір, металева фольга, пластикова плівка
Полімеризація	Стереолітографія (SLA)	Фотополімери
	Цифрова світлодіодна проекція (DLP)	

Розглянемо наведені методи більш детально. *Екструзійний* метод, що реалізований технологією FDM передбачає створення шарів за рахунок екструзії швидко застигаючого матеріалу у вигляді мікро крапель або тонких струменів. Як правило, витратний матеріал (наприклад, термопластик) поставляється у вигляді котушок, з яких матеріал подається в друкарську голівку, яку називають «екструдером». Екструдер нагріває матеріал до температури плавлення з наступним вичавлюванням розплавленої маси через сопло. Сам екструдер приводиться в рух за допомогою крокових двигунів або сервомоторів, що забезпечують позиціонування його головки в трьох площинах. Переміщення екструдера контролюється виробничим програмним забезпеченням (CAM), прив'язаним до мікроконтролера. Схематично принцип роботи цього методу зображено на рисунку 1.1. Технологія FDM/FFF має певні обмеження складності створюваних геометричних форм. Наприклад, створення навісних конструкцій (таких, як сталактити) неможливе саме собою, через відсутність необхідної

підтримки. Це обмеження компенсується створенням тимчасових опорних конструкцій, що видаляються після завершення друку.

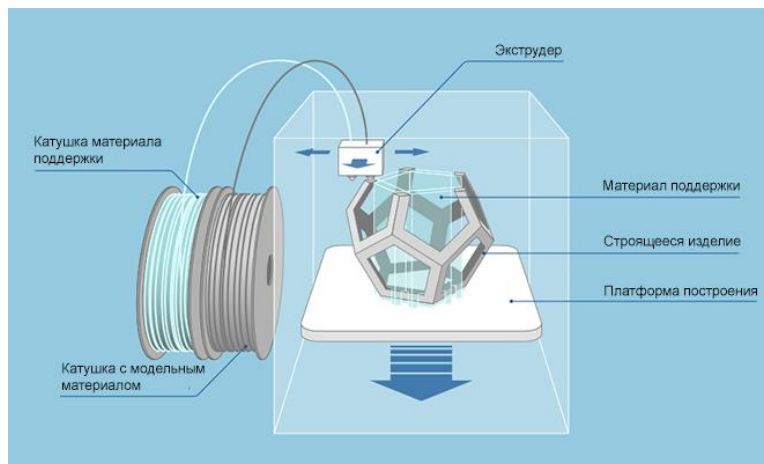


Рис. 1.1. Схема FDM друку.

Екструзійний метод володіє наступними перевагами: вартість матеріалів є досить низькою; отримувані вироби є досить міцними і зносостійкими; мала витрата матеріалу в тому числі для допоміжних конструкцій деталі менша в

порівнянні з класичними методами виготовлення деталей; більшість недоліків, що виникають в процесі друку (крім критичних типу розшарування моделі) досить просто виправити на етапі пост обробки деталі; інструмент для обробки дешевий, а сам процес пост обробки не вимагає складного та дорогого устаткування; матеріали що використовуються легкі в обробленні. До основних недоліків відносять: складність пошуку причин та вирішення проблем, що виникають при друці; відносно невелику точність (в порівнянні з іншими видами) друку (0.1-0.2 мм.); результати друкування в більшості випадків потребують додаткової обробки для отримання заданих параметрів поверхонь.

Концепція *проволочного методу* заснована на будівництві "практично готових форм" ("Near-net-shape" в англійській термінології). Це означає, що вироби створюються на основі тривимірних цифрових моделей з настільки високою точністю, що механічна обробка та доведення виробів практично не потрібна. Технологія, що розробляється фахівцями НАСА для застосування за умов невагомості. Оскільки відсутність гравітації робить роботу з металевими порошками практично неможливою, технологія EBF₃ передбачає використання металевих проволоч. Даний метод використовує електронні випромінювачі високої потужності у вакуумній камері для плавки металу. Електронний пучок пересувається робочою поверхнею, повторюючи контури цифрової моделі, тоді

як металевий дріт поступово подається в точку фокусування пучка. Розплавлений матеріал негайно застигає, утворюючи міцні шари заданої моделі. Процес повторюється до побудови цільної моделі, що вимагає лише мінімальної обробки зовнішньої поверхні. Технологія EBF3 дозволяє створювати об'єкти розміром від кількох міліметрів до кількох метрів. Практичні обмеження за обсягом побудови накладаються фізичними розмірами вакуумної робочої камери та кількістю доступного витратного матеріалу. Суттєвою перевагою даного методу є можливість простого створення деталей зі складними геометричними формами; низька витрата матеріалу; міцність отриманих виробів досить висока; використання тих же металів та їх сплавів, що й у класичному виробництві. Недоліками ж є: висока вартість подібних установок; необхідність використання спеціально обладнаних приміщень; висока витрата електроенергії; низька швидкість виготовлення. На рисунках 1.2 та 1.3 зображено схематичну модель установки, та приклад її роботи.

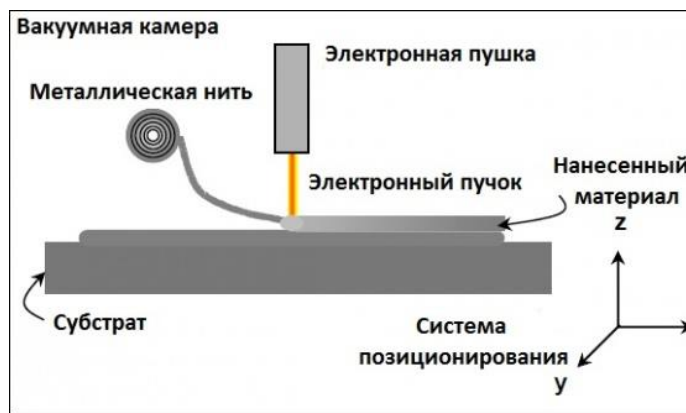


Рис. 1.2. Схематичне зображення роботи технології EBF3.

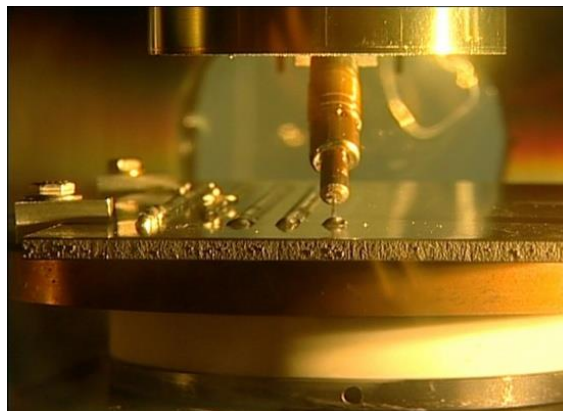


Рис. 1.3. Світлина роботи установки, що реалізує проволочний метод.

Порошковий метод, схематичне зображення принципу роботи показано на рисунку 1.4, на відміну від інших представлених, використовує за матеріал дрібнодисперсну шихту. Сутність методу полягає в тому, що шар розкатої шихти спікається від взаємодії з ним лазера, що рухається за заздалегідь заданим контуром, котрий відповідає, контуру моделі, що виготовляється. Після

завершення роботи над одним шаром шихта, в кількості необхідній для друку нового шару, додається в

робоче поле й процес повторяється знову. Цікавою особливістю даного методу, є відсутність необхідності побудови додаткових конструкцій – опор, при друці навісних поверхонь, адже в такому випадку опорою виступає не використана шихта. Переваги: технологія дозволяє створювати кілька моделей одночасно з

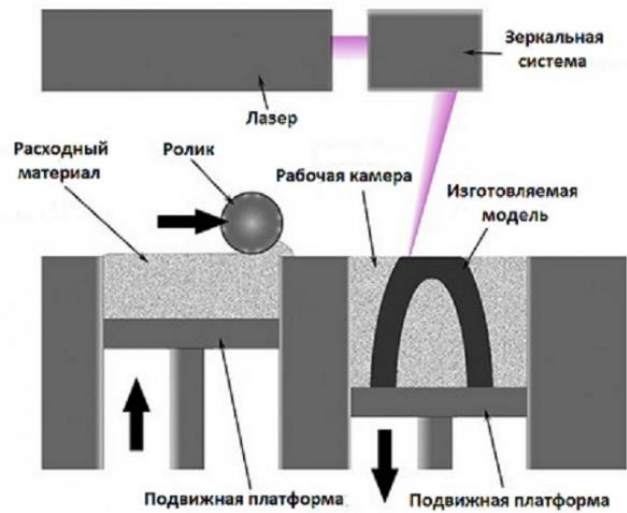


Рис. 1.4. Схема роботи порошкового методу.

обмеженням лише за розміром робочої камери; побудова моделей займає близько кілька годин, що незрівнянно вигідніше, ніж ливарний процес, який може тривати кілька місяців з урахуванням повного виробничого циклу; вища точність результату в порівнянні з литтям; можливість виготовлення малих за діаметром отворів. З іншого боку, деталі, вироблені лазерним спіканням, не мають монолітності, а тому не досягають тих же показників міцності, що і відлиті зразки, або деталі, вироблені субтрактивними методами; при створенні деталей з внутрішніми пустотами, необхідно передбачати місця виходу для невикористаної шихти.

Струменевий метод котрий на сьогоднішній день відображений лише однією технологією Three-Dimensional Printing (3DP), що перекладається як тривимірний друк. Дана технологія є одним з різновидів систем адитивної побудови виробу по його CAD-моделі і відрізняється від численних схожих схем тим, що процес здійснюється за принципом звичайного принтера – через сопла друкуючих головок. -друк. На сьогоднішній день вона досягла досить хороших результатів, наприклад, таких як кольоровий друк. Результати друку на подібних установках зображені на рисунку 1.5.



Рис. 1.5. Фотографії виробів отриманих методом 3DP; а,б – кольорові складні за формою фігури; в,г,д – швидкі прототипи.

Струменевий 3D-друк є не тільки одним із найстаріших методів адитивного виробництва, але й одним з найбільш успішних у плані використання металів як витратних матеріалів. Однак необхідно відразу ж пояснити, що ця технологія дозволяє створювати лише композитні моделі через технологічні особливості процесу. Фактично цей метод дозволяє створювати тривимірні моделі з будь-яких матеріалів, які можуть бути перероблені в порошок. Зв'язування порошку

здійснюється за допомогою полімерів. Таким чином, готові моделі не можна назвати повноцінно "металевими". У той же час, існує можливість перетворення композитних моделей на цільнометалеві за рахунок термічної обробки з метою виплавлення або випалювання сполучного матеріалу та спікання металевих частинок. Отримані таким чином моделі не мають високої міцності через пористість. Збільшення міцності можливе за рахунок просочування отриманої цільнометалевої моделі. Наприклад, можливе просочення сталеві моделі бронзою для отримання міцнішої конструкції. Отримувані подібним чином моделі, навіть з металевим просоченням, не використовуються як механічні компоненти через відносно низьку міцність, але активно використовуються в ювелірній та сувенірній промисловості. На рисунку 1.6 наведено схематичне зображення роботи даного методу.

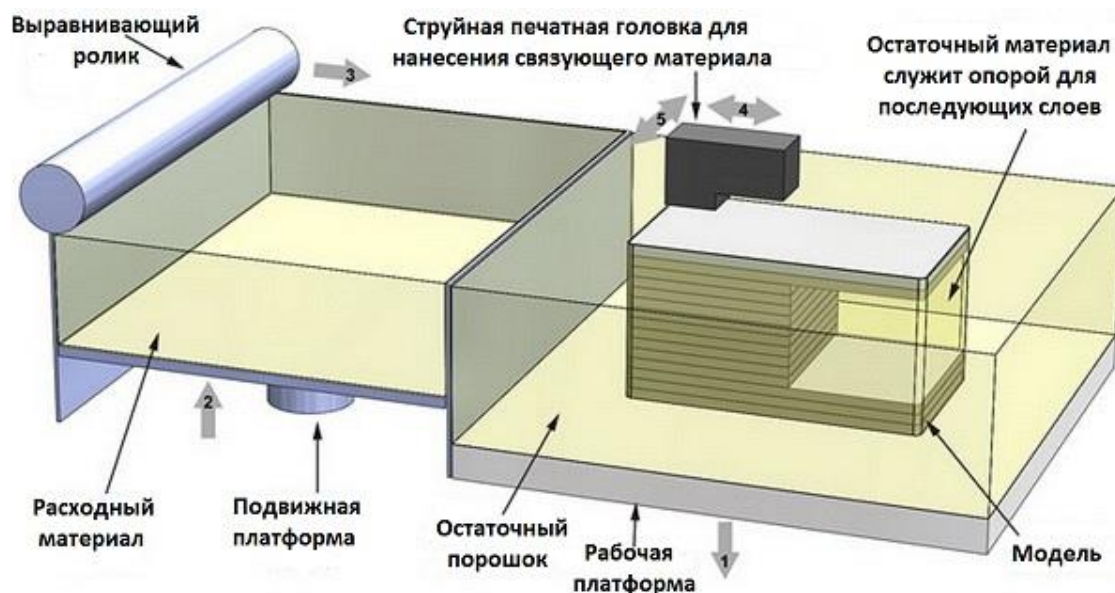


Рис. 1.6. Схематичне зображення роботи струменевої технології.

Недоліки: вироби на гіпсовій основі досить тендітні і можуть використовуватися лише у вузькій сфері діяльності; як прес-форми можуть бути використані лише один раз, після чого руйнуються; Працюючи з гіпсовими порошками виникає багато пилу, тому потрібна хороша витяжка. Переваги: висока швидкість побудови деталей – близько 6 мм за висотою за годину, при розмірі робочої зони 780 x 400 мм це становитиме 1780 см куб., що на порядок перевершує лазерні технології швидкого прототипування; порівняно невелика вартість витратних матеріалів; можливість «кольорового» друку.

Ламінування 3D-друк методом ламінування – послідовне нанесення тонких листів матеріалу з формуванням за рахунок механічного або лазерного різання та склеюванням для отримання тривимірної моделі. Як витратний матеріал може використовуватися і металева фольга. Отримувані моделі є повністю металевими, оскільки їх цілісність заснована на застосуванні клею, що сполучає листи витратного матеріалу. Плюсом даної технології є відносна дешевизна виробництва і висока візуальна схожість одержуваних моделей з цілнометалевими виробами. Як правило, цей метод використовується для макетування. Схема роботи 3D принтера, що використовує цю технологію зображено на рисунку 1.7.

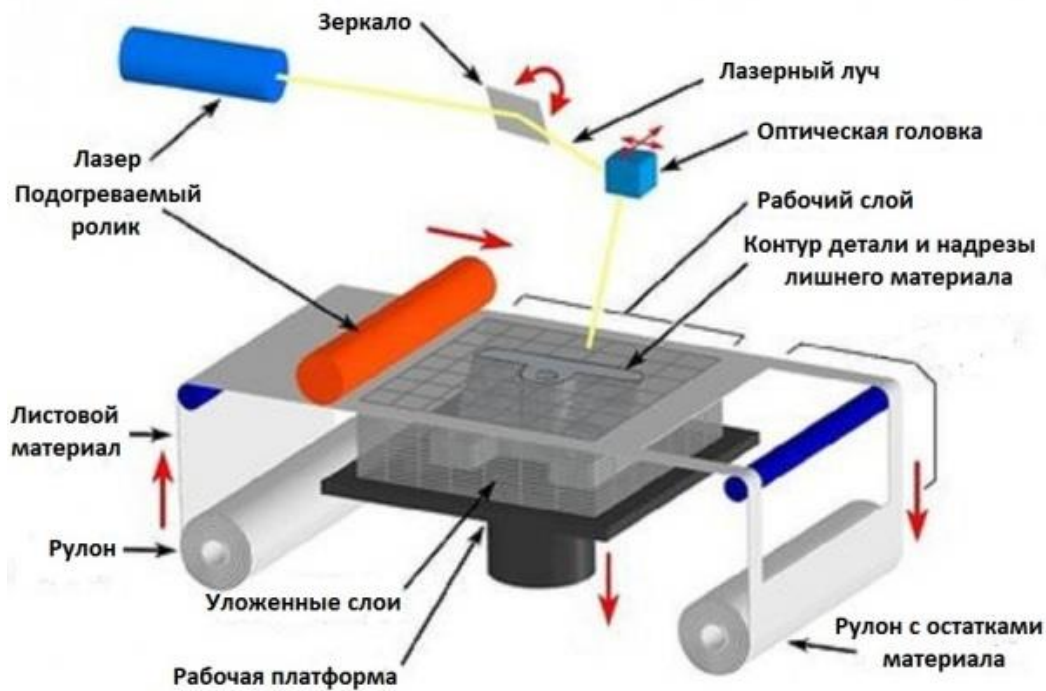


Рис. 1.7. Схема роботи 3D принтера, що використовує технологію ламінування

Стереолітографія. Метод ґрунтується на опроміненні рідкої фотополімерної смоли лазером для створення твердих фізичних моделей. Побудова моделі проводиться шаром за шаром. Кожен шар викреслюється лазером згідно з даними, закладеними в тривимірній цифровій моделі. Опромінення лазером призводить до полімеризації (тобто затвердіння) матеріалу в точках зіткнення з променем. Після завершення побудови контуру робоча платформа занурюється в бак з рідкою смолою на дистанцію, що дорівнює товщині одного шару - як правило, від 0,05 мм до 0,15 мм. Після вирівнювання поверхні рідкого матеріалу починається процес побудови наступного шару. Цикл повторюється до побудови повної моделі. Після завершення споруди виробу промиваються для видалення залишкового матеріалу і, при необхідності, піддаються обробці в ультрафіолетовій печі до повного затвердіння фотополімеру. Стереолітографія вимагає використання підтримуючих структур для побудови навісних елементів моделі, аналогічно технології моделювання методом пошарового наплавлення (FDM). Опори передбачаються у файлі, що містить цифрову модель, і виконуються з фотополімерного матеріалу. По суті,

опори є тимчасовими елементами конструкції, що видаляються вручну після завершення процесу виготовлення. Схематичне зображення роботи установок, що використовують метод полімеризації зображено на рисунку 1.8.

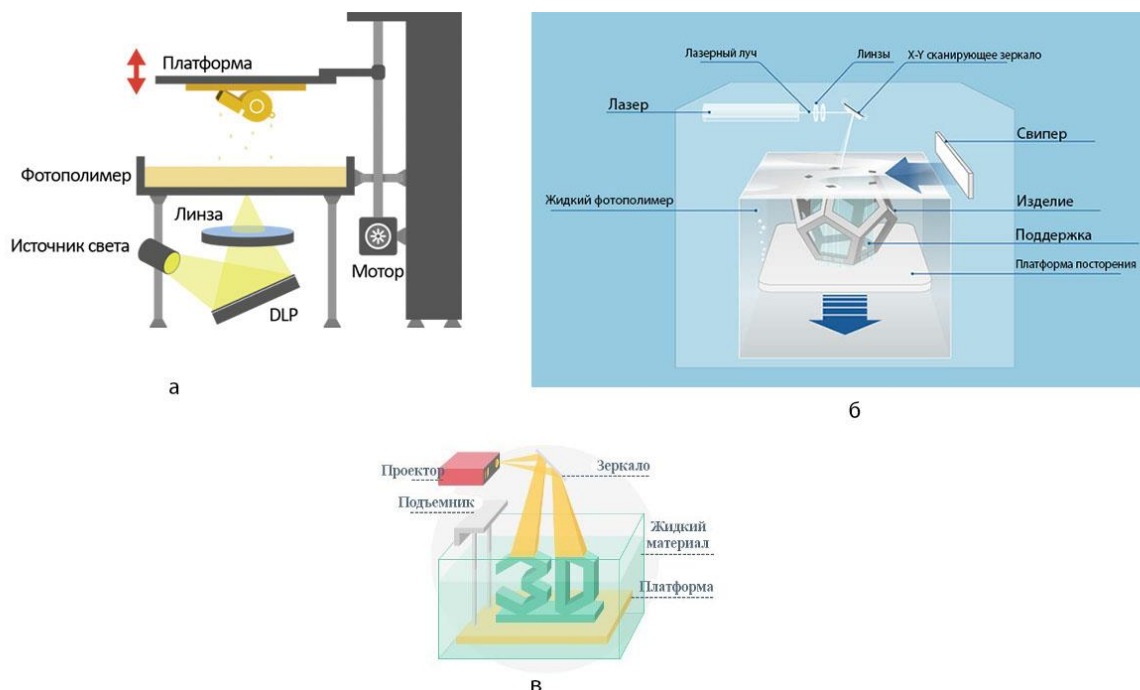


Рис. 1.8. Схематичне зображення роботи методу полімеризації; а, в – технологія DLP (а – «пряма», б – «зворотна») б – технологія стереолітографії

Головною перевагою стереолітографії можна вважати високу точність друку. Існуюча технологія дозволяє наносити шари завтовшки 15 мікрон, що у кілька разів менше за товщину людського волосся. Швидкість друку відносно висока, якщо враховувати високу роздільну здатність подібних пристроїв: час побудови однієї моделі може становити лише кілька годин, але в результаті залежить від розміру моделі та кількості лазерних головок, що використовуються пристроєм одночасно. Готові вироби можуть мати різні механічні властивості залежно від закладених характеристик фотополімеру: існують імітатори твердих термопластиків, гуми та інших матеріалів.

До недоліків даної технології можна віднести високу вартість розхідних матеріалів. Необхідність використовувати додаткове обладнання для повної полімеризації отриманих моделей. На відміну від інших методів де після

завершення процесу друку деталей можна пускати в роботу. Висока вартість обладнання для роботи, особливо якщо порівнювати з FDM технологією.

Кожна з розглянутих технологій сьогодні активно використовується в різних сферах виробництва на позиціях від створення макетів та дослідних зразків до безпосереднього виробництва деталей. Для сфери приладобудування особливо цінними є технології котрі реалізують можливість побудови корпусів та деталей машин та приладів. Такими технологіями на сьогоднішній день є FDM, EBF3, SLM, SHS, SLS, SLA, DLP. На поточний момент розвиток цих технологій дозволяє використовувати їх більше в дослідному, штучному та малосерійному виробництві. Найбільш доступною технологією виробництва деталей з представлених є FDM. Хоч дана технологія реалізує виробництво деталей лише з полімерів, проте на сьогоднішній день розвиток полімерних матеріалів дозволяє широко використовувати цю технологію для виробництва деталей та механізмів.

1.1.2. Процес 3D друку

В загальному розумінні процес виготовлення деталей за допомогою 3D друку містить в собі чотири етапи. Підготовчі етапи в цілому є однаковим для більшості технологій друку. Першим етапом є створення 3D моделі деталі. Тут важливо враховувати особливості процесу друкування за обраним методом друку. Принципово не важливо в якій КАД системі буде створену таку модель, головним критерієм, є збереження моделі в форматі що відповідає одному з форматів котрі може опрацювати система підготовки до друку. Другий етап охоплює в собі одразу кілька процесів, в комплексі ПЗ, що забезпечує керування принтером. Для зручності опису можна розділити його на дві частини. В першій відбувається завантаження в програму та позиціонування моделі або моделей в зоні друку. В другій частині етапу задаються програмні та фізико-механічні параметри друку котрі виступають початковими даними для ПЗ, що перетворює

модель в програмний код керування принтером (слайсера). Сюди входять такі параметри:

- відсоток заповнення. Характеризує у відсотковому складі відношення об'єму пустот в заповненні до об'єму повністю заповненої деталі;
- налаштування прутка. Вказуються параметри прутка – його діаметр, вимоги до нагріву та активного охолодження;
- швидкість друку. Відповідає швидкості переміщення сопла й екструдуювання філаменту. При заданні цього параметра варто враховувати продуктивність системи подачі та нагріваючих елементів сопла.
- тип адгезії. Необхідно обирати враховуючи конструктивні особливості деталі. Використовується для надійного закріплення деталі в процесі друку;
- товщини перекриттів, бокових поверхонь;
- тип матриці заповнення. Від цього параметра залежить кінцева міцність деталі;
- якість. Тривалість друку особливо залежить від цього параметра, він характеризує товщину шару;
- використання підтримок;
- інші параметри котрі дозволяють тонко налаштувати друк моделі.

Вказані вище параметри для обробки 3D та створення G-code для керування 3D принтером. Наступний, третій етап, принципово відрізняється для кожної технології. Так як відрізняються методи отримання деталі, а відповідно й установки. Останнім етапом є пост обробка деталі. Важливо зауважити, що це другий за об'ємом часу (після безпосередньо друку) і перший за складністю етап виготовлення деталі адитивними технологіями. На початкову якість деталі впливають всі попередньо описані параметри. В більшості випадків складність форми деталі, її конструктивні особливості, фізико-механічні властивості матеріалу (особливо виражено полімерів) та в більшій мірі темп випуску подібних виробів не дозволяють використовувати автоматизовані засоби обробки. В більшості випадків використовується або ручний інструмент або

напів-автоматичні засоби обробки деталей. Зрозуміло, що подібна обробка займатиме багато часу та трудовитрат, а отже вартість деталі суттєво зросте. Тому необхідно шукати шляхи підвищення якості поверхонь деталей виготовлених 3D друком

1.1.3. Засоби виготовлення деталей 3D друком.

Розвиток сучасної промисловості спонукає до розробки нових видів устаткування для 3D друку. На ринку такого обладнання представлена велика кількість різноманітних моделей, що відрізняються один від одного як за ТТХ так і за видами кінематики, що використовується. Однак 3D принтери, ще можна класифікувати виходячи з функціональних можливостей і області їх використання. Таким чином принтери можна розділити на 3 групи.

Перша група – домашні 3D принтери. Такі моделі адаптовані для домашнього використання, мають невеликі габарити стола для друку, максимальної висоти друку. Відрізняються низькою вартістю до 1000\$. Від інших типів принтерів їх відрізняє: низька точність друку; необхідність постійного калібрування; низька потужність якої вистачає лише для друку малогабаритних виробів. Також дані машини орієнтовані на кінцевого користувача і намагаються представити максимально простий інтерфейс взаємодії. Найбільш часто принтери такого типу друкують за технологією FDM використовуючи термопластмаси типу ABS та PLA, рідше SLA з використанням найбільш розповсюджених фотополімерних смол. Складні і дорогі технології адитивного виробництва типу друку металами не використовуються в домашніх цілях. Одним з найпопулярніших представників домашніх 3D принтерів є “Wanhao Duplicator i3 PLUS” зовнішній вигляд зображено на рисунку 1.9. Серед основних переваг - автоматична настройка рівня друку, продовження друку після збою електроживлення, металеві запчастини для роботи з більшою температурою. За співвідношенням ціна-якість він отримав високу оцінку споживача і з моменту появи на Українському ринку не вибуває із топів продажу.



Рис. 1.9. Загальний вигляд 3D принтера Wanhao Duplicator i3 PLUS.

3D принтер Wanhao Duplicator i3 PLUS має наступні характеристики [3]:

- робоча площа 200x200 мм;
- діаметр сопла 0.4 мм;
- діаметр використовуваного пластика 1.75мм;
- кількість екструдерів один;
- платформа з підігрівом, робоча температура 60-100°C;
- максимальна висота деталі що друкується 180мм;
- максимальна швидкість переміщення сопла в площині XY 150 мм/с
- швидкість екструзії 100 мм/с;
- діапазон робочих температур екструдера від 190°C до 260°C.

Наступною групою являються професійні 3D принтери. Такі принтери все ще можуть використовуватись в домашніх умовах. Проте це установки більш високого класу, котрі можна використовувати не лише для забав і швидкого прототипування, а й для виготовлення професійних прототипів або деталей високої точності. Відповідно окрім кращої точності моделі 3D принтерів такого типу мають більші робочі габарити, кращі, розширені, діапазони налаштувань. Моделі цього класу часто в своїй конструкції мають декілька сопел, що дозволяє друкувати кількома різними матеріалами одночасно. Ціновий діапазон таких моделей варіюється приблизно від 1000\$ до 10000\$. Сферами використання таких принтерів є невеликі підприємства, ювелірні майстерні (для виготовлення заготовок для майбутнього лиття по виплавлених моделях), промислове

прототипування, тощо. Серед таких 3D принтерів заслужену популярність має CreatBot DX зображений на рисунку 1.10 зі збільшеною областю друку по осі Z для створення великих виробів [4].



Рис. 1.10. Загальний вигляд 3D принтера CreatBot DX.

Корпус принтера виготовлений зі сталі, стійкий під час друку і забезпечує якісний результат з мінімальними вібраціями. Він має наступні характеристики:

- робоча площа 300x250мм;
- діаметр сопла 0.4 мм з можливою заміною на інші розміри;
- діаметр завантажуваного пластика 3.00мм (опціонально 1.75мм);
- кількість екструдерів два, з можливістю встановлення третього;
- платформа з підігрівом, робоча температура 60-100°C;
- максимальна висота деталі що друкується 520мм;
- максимальна швидкість переміщення сопла в площині XY 200 мм/с;
- швидкість екструзії 120 мм/с;

діапазон робочих температур екструдера від 190°C до 350°C.

Останнім видом є промислові 3D принтери. Вони відрізняються конструктивно, можуть бути у формі маніпулятора. Для промислових принтерів доступний друк металами. Такі принтери не лише потребують більших капіталовкладень, а й вимагають спеціальні умови використання, наприклад використання у окремих приміщеннях. Також вони мають досить високу

точність виготовлення, для роботи з ними необхідні спеціально навчені працівники [5].

У 2018 році на ринку з'явилася модель Galaxy 500 зображена на рисунку 1.11, що суттєво різнилася з попередньо випущеними 3D принтерами та вивела промисловий 3D друк на якісно новий рівень. Це рішення для користувачів, які хочуть досягти високої якості друку при створенні великих елементів. Принтер забезпечує швидку роботу з допомогою невеликих сопел (від 0,15 до 0,8 мм) і дозволяє використовувати будь-який тип пластику [6].



Рис. 1.11. Загальний вигляд 3D принтера Galaxy 500. Він має наступні характеристики:

- Робоча площа 400x400мм;
- Конструкція закритої камери з підігрівом до 45°C;
- діаметр сопла 0.15-0.8 мм;
- діаметр завантажуваного пластику 1.75мм;
- кількість екструдерів два;
- платформа з підігрівом, робоча температура 60-140°C, матеріал – гранітна плита;
- максимальна висота деталі що друкується 500мм;
- максимальна швидкість переміщення сопла в площині XY 200 мм/с;
- швидкість екструзії 150 мм/с (залежить від діаметра сопла);
- діапазон робочих температур екструдера до 295°C.

Серед промислових принтерів варто також звернути увагу на модель Metal X представлена на рисунку 1.12, торгової марки Markforged, – це 3D принтер для друку металами, який пропонує комплексне виробниче рішення. Компанія заявляє, що її 3D принтер для друку металами в десять разів дешевше, ніж альтернативні 3D системи друку металами, що означає – до 100 000 доларів [7].



Рис. 1.12. Загальний вигляд 3D принтера Markforged Metal X. Він має наступні характеристики:

- робоча площа 250x220мм;
- конструкція закритої камери з підігрівом;
- кількість екструдерів два;
- платформа з підігрівом, система автоматичного вирівнювання підкладки;
- максимальна висота деталі що друкується 200 мм;
- діапазон робочих температур екструдера 1300 °C.

1.2. Параметри якості виготовлення 3D друком.

Параметри якості деталей що отримані 3D друком за характером виникнення можна розділити на два класи. Перший з них – недоліки друку в цілому котрі виникають через не оптимальні параметри налаштування принтера, похибки в роботі програмно-апаратного комплексу, а також недоліки зв'язані з порушенням вимог зберігання використовуваних матеріалів. Даний клас

недоліків виникає більше при пуско-налагоджувальних роботах по початковому запуску установки або при переході на новий матеріал, тощо. Другий же клас відображає недоліки поверхонь причиною виникнення яких є недоліки методу виготовлення. Як вже описано в роботі [8] повністю викоринити ці недоліки не можливо (через сам принцип роботи методу), проте є можливість суттєво згладити ступінчатий або пошаровий ефект при використанні додаткового обладнання типу мікрокліматичних установок, як описано в роботі [9].



Рис. 1.13. Світлина результатів друку. Зліва нейлон зберігався за нормальних умов, справа - умов зберігання не дотримувались.

Для кращого розуміння причин виникнення та типу недоліків розглянемо описані вище недоліки більш детально. До першого класу відносяться наступні недоліки друку. Недотримання умов зберігання деяких полімерів може суттєво погіршити якість отриманих деталей як показано на рисунку 1.13. В даному випадку відображено випадок недотримання умов зберігання нейлону. Цей полімер дуже гігроскопічний кількість

набраної води настільки висока, що при нагріванні соплом принтера пар спричиняє невеличкий вибух й матеріал частково розплюскується. Подібний ефект можна спостерігати й в PLA пластиках але він досить малий, й більше виражається в обламуванні прутка в механізмі подачі й збільшення його крихкості в цілому. Даний недолік вирішується «прожаркою» або іншими словами сушкою пластику в печі. За досить низької температури щоб прутки в котушці пластику не ставав пластичним, не втрачав форму, не склеювався з сусідніми нитками. Для PLA пластику температура прожарки складає близько 40-50°C. Кількагодинна витримка за такої температури дозволяє практично позбутись описаних вище ефектів.

Недоліки спричинені вибором неправильних режимів друку наведено на рисунках 1.14-1.22. Похибка друку типу «ворс» (рисунок 1.14) виникає через надмірну температуру друкуючої головки, а також через відключене або не вірно

налаштоване втягування філаменту. При не правильному налаштування таких параметрів як діаметр прутка, коефіцієнт екструджування, опції втягування може виникати проблема зображена рисунком 1.15 надмірне екструджування пластику. Надмірно високі температури друку або ж похибки в налаштуванні чи обрахунку швидкості друку поточного шару. Часто вирішити цю похибку допомагає додавання паузи в декілька секунд після завершення друку шару або використання додаткового охолодження яке зазвичай використовується при друці навісних конструкцій.



Рис. 1.14. Вид похибки друку типу «ворс».

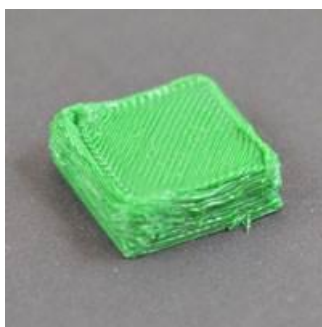


Рис. 1.15. Вид похибки друку типу надмірне екструджування пластику.



Рис. 1.16. Вид похибки друку типу перегрів пластику.

Похибка друку показана на рисунку 1.17 найчастіше за все виникає при виборі надто низької температури друку або при великому значенні висоти шару. Також похибки часто виникають через проблеми пов'язані з кінематикою принтера, роботою ПЗ що відповідає за переміщення сопла, недоліками в мехатронних складових принтера. Один із прикладів подібних похибок показаний на рисунку 1.18. Подібний ефект може виникати через вібрації високої амплітуди та різкі переміщення головки. На рисунку 1.19 зображена похибка, що з'являється з певною періодичністю. Причиною цього може бути: коливаннями температури навколишнього середовища та друку; нерівномірне екструджування викликане наприклад поганою якістю або відхиленням від допусків пластикового прутка; механічними або мехатронними проблемами принтера (мала жорсткість конструкції, вібрації проскакування ремінної передачі, тощо).



Рис. 1.17. Вид похибки друку типу розшарування моделі.

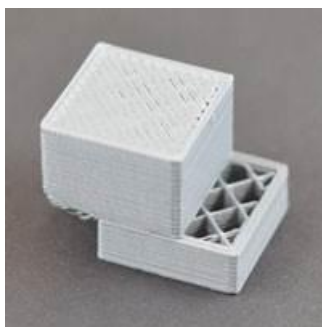


Рис. 1.18. Вид похибки друку типу зміщення шарів.

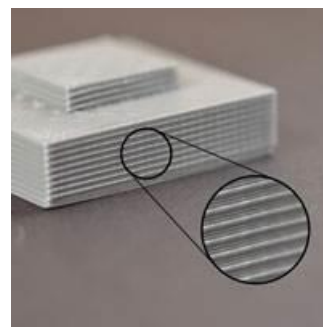


Рис. 1.19. Вид похибки друку типу лінія на бокових поверхнях моделі.

Недоліки в роботі ПЗ що оброблює 3D модель та генерує G-код можуть мати часто досить цікавий ефект, зображений на рисунках 1.20-1.22. Так наприклад на першому рисунку причиною похибки може бути помилка в обрахуванні руху сопла, недостатнє екструдкування, а також мала товщина шару перекриття. Проблема на другому рисунку швидше за все виникає через проблеми з екструдванням пластику, високою швидкістю друку, похибки в шаблоні заповнення. Проблема зображена рисунком 1.22 виникає через малу товщину перекриття низьку температуру друку або через низький відсоток заповнення.



Рис. 1.20. Вид похибки друку типу похибка контурів.

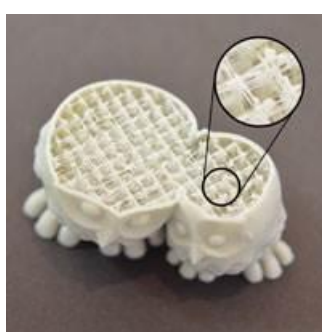


Рис. 1.21. Вид похибки друку типу неякісне заповнення.

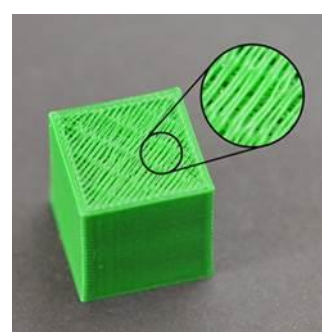


Рис. 1.22. Вид похибки друку типу щілини на шарах перекриття.

Окрім вказаних вище похибок друку причиною котрих є певні недоліки налаштування або несправності принтера, існують похибки або недоліки друку котрі виправити в процесі друку не можливо та такі що виникають через

специфіку виготовлення деталі це можуть бути додаткові структури такі як структури «адгезії», підтримок, тощо. Подібні недоліки відносяться до другого класу похибок друку. На рисунках 1.23 та 1.24 зображено приклад об'єктів надрукованих із підтримками.



Рис. 1.23. Вигляд деталі надрукованої з використанням підтримки



Рис. 1.24. Вигляд фігури, надрукованої з використанням підтримки.

Звісно додаткові конструкції створюються таким чином щоб вплив на поверхню деталі був мінімальний. Проте даний ефект все ж існує хоч і в мінімальній мірі. Також при помилках в розрахунку цих конструкцій ефект з'єднання поверхонь може бути явно виражений або можна бачити відхилення або «провал» частини поверхні.

Окрім похибок друку до параметрів якості поверхонь також відносяться параметри поверхонь що використовуються в класичному процесі виробництва. Такі як паралельність, перпендикулярність поверхонь, їх шорсткість, співвісність, тощо. Із цих параметрів якість безпосередньо поверхні в класичному розумінні визначає її шорсткість. Поверхню вважають якісною, якщо її шорсткість відповідає заданій в кресленні. В більшості випадків критично отримати мінімальну шорсткість. На рисунках 1.25 та 1.26 зображено вигляд надрукованої поверхні та її вимір профілометром, ці дані були зібрані в ході дослідження [10].

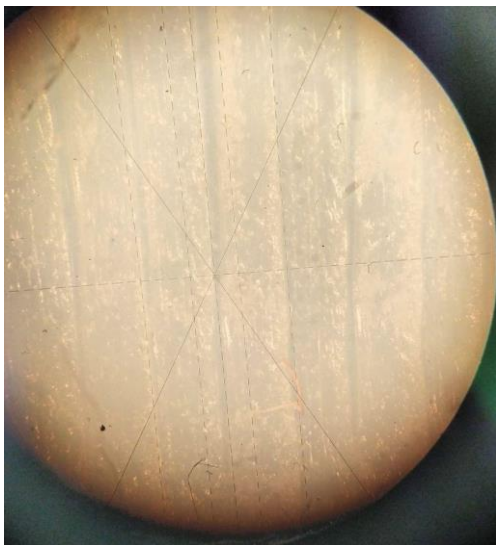


Рис. 1.25. Зображення поверхні отриманої 3D друком в мікроскопі.

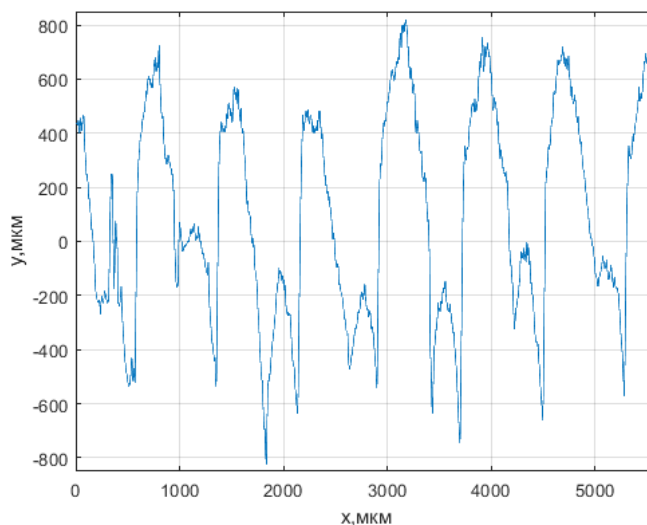


Рис. 1.26. Профілограма поверхні, що отримана 3D друком.

За висвітленими даними, можна зробити висновок, що особливу увагу необхідно надати роботі над зменшенням недоліків друку, що відносяться до другого класу похибок. Особливу увагу варто приділити шорсткості поверхонь.

1.3. Методи забезпечення параметрів якості.

Забезпечення параметрів якості є важливим етапом виготовлення будь-яких деталей як на великому крупносерійному чи масовому так і на малому експериментальному чи штучному. Фактично є два способи забезпечити якість отриманого виробу. Перший – модернізація та продумування технології виготовлення таким чином, щоб мінімізувати можливість виникнення браку. Цей метод зазвичай використовується на великих виробництвах. Другий метод частіше через економічні фактори використовують на малих виробництвах. Окрім дешевизни впровадження метод одночасно з тим вимагає більше трудозатрат на виготовлення деталі. Сутність його полягає в доопрацюванні деталі «по місцю» або в закладанні значних припусків на деталі для виправлення погрешностей. Звісно обидва методи мають місце у виготовленні деталей кожен

за своїх умов, а інколи їх навіть поєднують. Проте в реаліях адитивного виробництва більше часу займає саме пост обробка деталі тому доцільно покращувати якість виготовлення безпосередньо в методі виготовлення. Тому для кращого розуміння впливу факторів та особливостей їх виникнення в процесі друку розглянемо безпосередньо процес більш детально.

Процес друку показаний рисунком 1.27 відбувається наступним чином. За допомогою крокових двигунів система позиціонування сопла переміщує його в необхідну позицію для початку друку. Система подачі подає пруток (рисунок 1.27, 1) в камеру нагріву (рисунок 1.27, 2), де пластик розігрівається до робочої температури. Сама камера в котрій накопичується пластик розташована в корпусі hotend (рисунок 1.27, 3) і з'єднана із соплом (рисунок 1.27, 4). Нагрітий філамент (рисунок 1.27, 5) проходить крізь вузький канал сопла (зазвичай діаметр вихідного отвору становить від 0,1 мм до 0,6 мм) й потрапляє на поверхню стола або на раніше надрукований шар пластику (рисунок 1.27, 6). Враховуючи що розмір шару є достатньо малим (в межах від 0,1 до 0,6 мм) попередньо надруковані шари також певним чином прогріваються. При цьому під час екструдювання відбувається рух сопла, під керуванням електроніки принтера, за раніше розрахованим контуром. При цьому раніше надрукований пластик починає застигати. як можна бачити із схематичного рисунку на краях шару пластик застигає у вигляді півкола що спричиняє великі значення шорсткості в результаті. Також варто зауважити що пластик застигає не миттєво, а проходить проміжну стадію пластичності перед затвердінням. На практиці це означає, що на форму нитки впливає не лише поверхневий натяг і гравітація, а й інші шари надруковані вище. Утворення поверхні в процесі друку відбувається в два етапи. Перший з них – друк контуру поверхні, другий – заповнення поверхні в середині контуру. Схематичне зображення заповнення контуру можна побачити на рисунку 1.28.

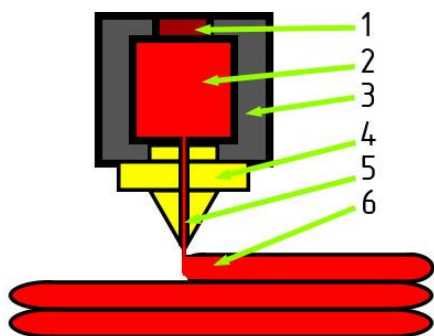


Рис. 1.27. Схематичне зображення процесу друку. 1 – пруток пластику, 2 – камера нагріву; 3 – корпус hotend; 4 – сопло; 5 – потік філаменту що екструдується; 6 – раніше надрукований пластик

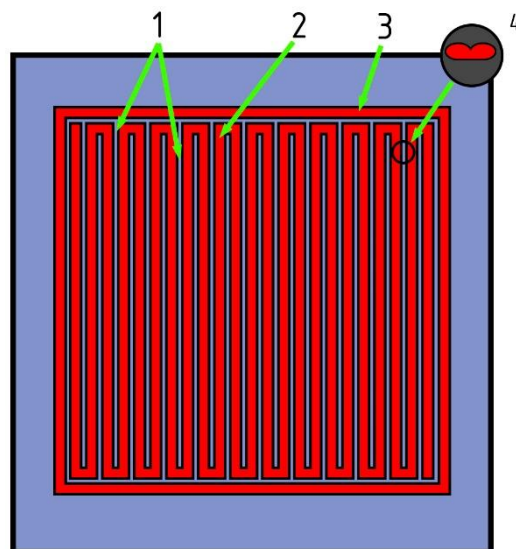


Рис. 1.28. Схематичне зображення надрукованої поверхні. 1 – «пустоти» між нитками філаменту; 2 – нитка філаменту заповнення поверхні; 3 – нитка філаменту заповнення контуру поверхні; 4 – фактичне з'єднання сусідніх ниток філаменту

На рисунку 1.28 червоним кольором позначено філамент (рисунок 1.28, 2 та 3), а світло фіолетовим – попередньо надруковану структуру. Якщо детально розглянути рисунок можна побачити, що контур і заповнення поверхні є суцільними лініями, проте між ними (між контуром і заповненнями та між сусідніми лініями є) «пробіли» 1 (рисунок 1.28, 1) між нитками матеріалу. Якщо розрізати деталь і укрупнити зображення можна побачити реальний вигляд з'єднання сусідніх ліній 4 (рисунок 1.28, 4). Саме ці «горби» та «впадини» найбільше впливають на шорсткість отриманої деталі. Варто зауважити, що при механічній обробці метою якої є отримання гладкої поверхні це навпаки впливає позитивно, адже при появі інших недоліків друку враховуючи достатньо великий шар зняття (в масштабі товщини шару) дозволяє одразу виправити кілька недоліків. Також на якість поверхні друку значно впливають швидкість переміщення сопла, та температура нагріву пластику.

На сьогодні існує два основних напрямки пост обробки деталей отриманих FDM друком: обробка кислотою та обробка за допомогою ручного інструменту.

На перший погляд пост обробка за допомогою кислоти чудовий вибір адже тут фактор складності конструкції практично не грає ролі. Проте подібні методи обробки впливають як на цільову поверхню і її недоліки так і на всю деталь в цілому, на практиці це означає, що прибрати «хвилястість» поверхні або локальні хиби практично не можливо. Немало важливим недоліком також є те що в роботі з деталлю використовуються токсичні речовини, й працівник має безпосередньо з ними взаємодіяти, що в свою чергу висвітлює спосіб не з кращої сторони. Інший метод дозволяє застосовувати обробку безпосередньо в необхідних місцях, але цю перевагу також нівелюють скрупульозність роботи та великий час затрачений на обробку деталі.

Як вже описано вище більшість недоліків друку містять суттєво «програмний» характер й виправляються до налаштуванням параметрів друку як описано в роботі [10]. Але через особливості методу та безпосередньо технології FDM друку, навіть ідеальні налаштування не можуть виправити ефект зображений на рисунку 1.28, 4. В роботі [9] було висвітлено гіпотезу – використання мікрокліматичних установок повинно зменшити наведений ефект покращивши тим самим якість отриманої поверхні. В теорії при використанні подібних установок та при підтримці певної температури в зоні друку нитки пластику довше застигатимуть, а отже «змочуваність» попереднього шару буде підвищуватись. Одночасно з цим отримана поверхня буде більш гладкою, а отже матиме менше значення шорсткості. Також при друкуванні великих за площею поверхонь підтримка сталої температури в об'ємі друку дозволить отримати кращу адгезію між шарами. Це повинно позитивно вплинути не тільки на описані параметри деталі, а також на фізико-механічні властивості деталі певною мірою наблизивши їх до аналогічних деталям отриманих литтям пластмаси.

Описані зміни для FDM технології окрім позитивного впливу також можуть мати негативні наслідки. Однією із «проблем» FDM друку є виготовлення навісних конструкцій. Зазвичай при малому куті звису за додаткового охолодження пластику вдається виготовити подібні поверхні практично без недоліків. Але тут важливу роль грає практично моментальне

застигання пластику після друку, що унеможлиблює його зтікання вниз. Використання додаткового нагріву в цьому випадку призведе до погіршення результату. Тому варто дослідити також вплив даного доопрацювання на основні можливості як принтера так і FDM технології в цілому.

Постановка задачі дисертаційних досліджень

Адитивне виробництво на сьогодні один із найбільш затребуваних методів виготовлення деталей, особливо це виражено в дослідному та малосерійному виробництві. Незважаючи на свою багаторічну історію методологія виготовлення деталей методом 3D друку має певні недоліки котрі відображаються на якості виготовлених поверхонь деталей.

В даному розділі описано шість найбільш розповсюджених методів адитивного виробництва, а також основні технології, що реалізують ці методи на практиці. Хоч наведені методи та технології працюють за одним глобальним принципом – пошарового нанесення матеріалу проте конкретна реалізація технологій суттєво відрізняється. Наведено приклад установок котрі використовують описані технології в своїй роботі. Можна бачити що більш складні та ресурсозатратні технології використовуються для виготовлення деталей з металів та їх сплавів. Хоча для приладобудування також досить актуальним є виготовлення деталей з полімерів. Для подальшого дослідження обрано технологію FDM 3D друку за критеріями перспективності покращення даної технології, простоти (в порівнянні з іншими технологіями) конструкції 3D принтерів на основі цієї технології, доступності витратних матеріалів. Наведено в цілому особливості процесу 3D друкування від підготовки 3D моделі до пост обробки отриманої деталі та фактори як програмного так і фізичного характеру, що впливають на якість друку.

Детально розглянуто безпосередньо процес друкування показано його слабкі місця. Висвітлено основні параметри та критерії якості виготовлення за допомогою FDM друку як деталей в цілому так і їх поверхонь. Розглянуто

основні методи забезпечення якості отримуваних 3D друком деталей, а також запропоновано новий метод котрий реалізує гіпотезу сформульовану в роботі [9]. Розглянуто вплив даного методу на процес друкування деталей і як результат наведено основні гіпотетичні переваги та недоліки запропонованого методу. Для зменшення відсотку браку, трудозатрат та помилок при виготовленні деталей методом FDM 3D друку сформулюємо постановку задачі дослідження. В ході досліджень необхідно:

- модифікувати конструкцію класичного FDM 3D принтера для реалізації вдосконаленої технології друкування;
- провести експерименти з виготовлення деталей з визначенням якості отриманих поверхонь;
- розробити математичні моделі параметрів якості оброблених поверхонь FDM 3D друкуванням;
- виконати аналіз отриманих математичних моделей, параметрів що впливають на точність поверхні;
- визначити оптимальні температурні режими друкування деталей за критерієм мінімізації шорсткості поверхні;
- визначити доцільність використання даного методу в реальних установках з використанням множини конструкційних матеріалів;
- розробити практичні рекомендації з використання нової конструкції принтера і температурних режимів 3D друку;
- розробити стартап-проект реалізації запропонованого методу 3D друку;
- виконати впровадження модифікованої установки FDM 3D друку та режимів друкування.

РОЗДІЛ 2.

РОЗРОБЛЕННЯ ВДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ПРИНТЕРА

Будь-яке дослідження, що направлене на прикладну перевірку висунутої гіпотези, стикається з етапом створення дослідної установки або допоміжного обладнання для проведення експерименту.

В поточному дослідженні для підтвердження висунутої гіпотези в роботі [9] виникла необхідність розробити пристрій що дозволить реалізувати дослідження для перевірки гіпотези.

Розробка конструкції дослідної установки включає декілька етапів:

- створення ідеї, конструктивного ескізу установки;
- вибір шляху розробки;
- значення критеріїв до конструкції;
- доробка або покращення отриманого виробу.

2.1. Шляхи створення дослідних установок. Переваги та недоліки

Дослідники перед створенням дослідної установки проводять предметний пошук, формалізують вимоги до неї й на основі цих даних обирають шлях побудови такої установки. Можна описати три основні шляхи створення дослідних установок.

Перший шлях – придбання обладнання, що найбільше підходить для проведення дослідів й потребує мінімум дороблення. Тобто фактично ми створюємо дослідну установку з кількох готових модулів, при цьому модернізуємо їх за потреби. Насьогодні на ринку існує багато різноманітних пропозицій, котрі задовольняють левину долю потреб. Навіть, якщо всі необхідні функції не представлені в одному виробі, можна знайти декілька пристроїв, котрі покривають весь необхідний функціонал.

Перевагами такого рішення є наступні: швидкість створення установки; низькі трудовитрати на доопрацювання; документація та гарантія від виробника на основні вузли агрегату; фундаментальний компонент або технологія, на основі якої було вибрано даний пристрій вже реалізовано і налагоджено.

Недоліками рішення є: висока вартість; можлива складність втручання в конструкцію; “зайвий” або надмірний функціонал пристрою може заважати експерименту; необхідність відключення та вилучення систем безпеки (систем захисту оператора); режими роботи підсистем або головної системи можуть не відповідати необхідним, що потребує внесення змін в конструкцію (в розумних межах); деякі системи та підсистеми устаткування працюють не зовсім так як необхідно для досліду.

Другий шлях є повністю протилежним до першого — створення установки “з нуля”. Звісно, це складний процес і часто стає викликом для дослідника. Даний шлях вимагає фундаментальних інженерних та конструкторських знань. В основному “з нуля” створюються лише певні конструктивні елементи або технічне забезпечення, альтернативи якому немає на ринку. Інші ж частини або функціональні блоки установки купуються у готовому вигляді.

Перевагами даного рішення є: створення установки “під ключ” — готова установка має весь необхідний функціонал й повністю задовольняє всі вимоги; простота модернізації; простота в налагодженні; відсутність “зайвого” функціоналу.

Недоліки цього шляху: необхідність проектування та виготовлення конструкції установки; специфічні знання або необхідність мати в штаті фахівця з конструювання; в деяких випадках непомірно висока ціна виготовлення складових частин; великі витрати часу на виготовлення деталей та складання конструкції; складність масштабування установки та її технології виготовлення.

На перший погляд, дані два шляхи повністю задовольняють всі потреби в розробленні друкуючого пристрою. Проте часто реальність потребує формування третього напрямку. Безпосередньо він поєднує в собі два попередні — створення дослідної установки шляхом глибокої модернізації та додавання

функціоналу до існуючого пристрою. Відрізняється цей напрямок від першого шляху тим, що додаткові конструктивні елементи або елементи, які використовуються при модернізації, створюються самостійно.

Переваги такого рішення: оптимальне поєднання вартості базового приладу з вартістю робочого часу на створення, реалізацію й інтеграцію додаткових систем та їх дороблення; малі витрати робочого часу в порівнянні з другим шляхом; цільова технологія вже реалізована одним із придбаних засобів.

Недоліками цього напрямку є: необхідність фундаментальних конструкторських та інженерних знань одночасно в кількох галузях; володіння навичками роботи з інструментом; складність втручання в готові конструкції.

Як показує практика, кожен з описаних шляхів в процесі роботи над створенням дослідної установки може в тій чи іншій мірі видозмінюватись, набуваючи атрибутів іншого, в залежності від ситуації з фінансуванням та реальною пропозицією ринку.

Проаналізувавши наведені шляхи розробки конструкції дослідної установи, ринкові пропозиції спочатку було прийнято рішення слідувати першому шляху. Проте на етапі проведення закупівлі додаткового обладнання виявилось, що частину модулів не можливо придбати за поточних умов, а альтернативи, які представлені на ринку, не підходять для використання в запланованій конструкції. Тому довелось реалізувати третій шлях розробки установки.

Як вже описано на початку розділу, перед створенням дослідної установки необхідно визначити перелік вимог, котрі мають забезпечити максимально точно та комфортне виконання експериментальних досліджень. В даній роботі розглядається покращення результатів FDM друку. Таким чином з технологією друку ми визначились. Але на сьогодні існує багато видів кінематичних схем FDM 3D принтерів. Тому спочатку необхідно розглянути існуючі види кінематики для точного надання вимог до майбутньої установки.

2.2. Види кінематики FDM принтерів

Еволюція 3D друку складалась із двох паралельно існуючих напрямків — масштабні виробники та ентузіасти. Множина ідей, що сформовані за час стрімкого розвитку даної галузі виробництва, втілились в реальність. В результаті на сьогодні маємо достатньо велику кількість конкуруючих між собою розробок.

Найбільш розповсюдженими є кінематики [11,12], що засновані на двох системах координат: полярній та картезіанській. На рисунку 2.1 зображено розподіл кінематик за системами координат.

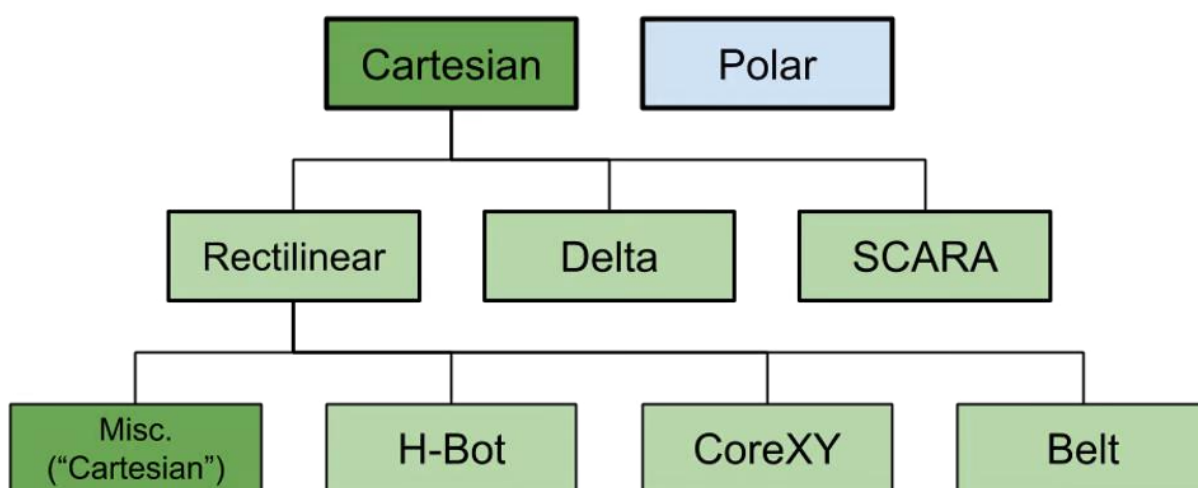


Рис. 2.1. Один із способів інтерпретації зв'язків між кінематиками FDM принтерів

2.2.1. Кінематика від Джозефа Прюши

Ентузіасти 3D друку також називають цю кінематику Prusa від назви ряду популярних 3D принтерів. Приклад такої кінематики зображений на рисунку 2.2..

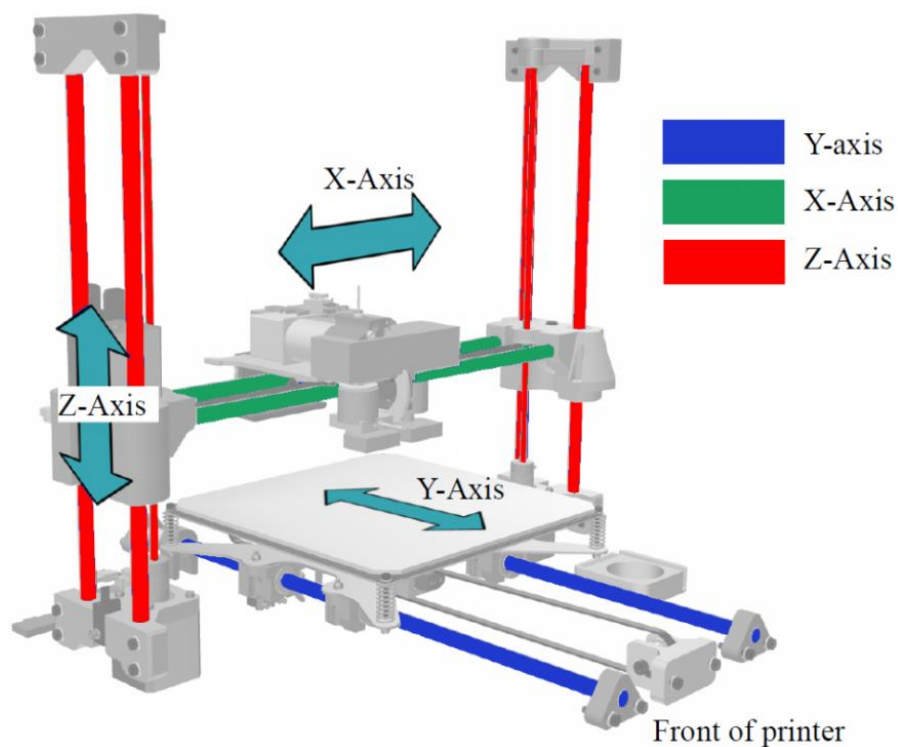


Рис. 2.2. Загальний вигляд кінематики Prusa

Переміщення вздовж кожної з осей забезпечується своїм незалежним двигуном. Переміщення по осі Z (вгору-вниз) забезпечується за допомогою двох синхронізованих двигунів і кінематичної пари типу гвинт-гайка.

Переваги даної кінематики:

- незалежне переміщення кожної з осей. Легко визначити яка вісь пропускає кроки. Кінематика запозичена в принтери від фрезерних станків з ЧПК, тому багато виробників роблять на ній настільні фрезерні верстати, замість екструдера пропонують встановити лазер для гравіювання або різання, шпиндель для фрезерування плат, екструдер для шоколаду або навіть тіста, щоб пекти млинці;
- кінематика досить проста не потребує багато знань та зусиль для реалізації;
- легко видозмінюється під свої потреби.

Недоліки даної кінематики:

- складне калібрування. Оскільки стіл “смикається” складно друкувати якісно. Оскільки деталь і стіл при різкій зміні напрямку мають достатньо високу інерцію. В результаті часто виникають артефакти друку при друкуванні на високих швидкостях;

- деламінація. Через відкритий корпус і платформу, що постійно переміщується гаряче повітря, грубо кажучи, постійно здувається, а надмірне охолодження через протяги збільшує усадку пластику.

2.2.2. Кінематика за конструкцією Felix printers

По суті кінематика аналогічна попередній. Незалежні одна від іншої вісі. Лише тепер столик переміщується не вздовж однієї осі, а одразу вздовж двох (Z та Y). Приклад 3D принтера, на якому реалізовано даний вид кінематики зображено на рисунку 2.3.



Рис. 2.3. Загальний вигляд принтера побудованого за кінематикою конструкції Felix printers

На валах по осі Z їздить платформа. Позаду висить двигун. По рейках за допомогою ремня переміщується стіл. Хотенд пересувається лише вздовж однієї осі. Конструкція досить невдала, оскільки стіл має масу в рази більшу хотенду, хоча його намагаються переміщати по 2 осях відразу.

Переваги даної кінематики:

- відсутній другий двигун по осі Z. Ефект хитання відсутній через те, що є два вали і один гвинт;
- багато місця для встановлення системи типу директ-екструдер. Як і в попередній кінематиці є простір для “творчості” при підборі екструдера, можна встановити будь-який що підходить під конкретну задачу;
- жорстка рама. Є можливість реалізувати нормальну раму, жорстку міцну навіть із чавуну;
- якщо брати приклади конструкції з використанням алюмінієвого профілю то з допомогою заміни кількох елементів із цього профілю і гвинта на осі Z можна збільшити область друку. Приклад реалізації зображений на рисунку 2.4.



Рис. 2.4. Загальний вигляд збільшення області друку.

Варто також зауважити, що при реалізації такого підходу необхідно попіклуватись про жорсткість отриманої конструкції. Щоб запобігти “чуду” конструкторської думки — великому, безглуздому і безпощадному.

До недоліків даної кінематики можна віднести:

- великі маси, що різко переміщуються. Вимагає забезпечення високої жорсткості конструкції;
- немає можливості зробити нормальну термокамеру.

2.2.3. Кінематика типу Ultimaker

Це один із найбільш розповсюджених та найбільш популярних типів кінематики на ринку. Екструдер здійснює переміщення лише в горизонтальній площині тоді як столик у вертикальній. На рисунках 2.5 та 2.6 наведено схематичне зображення даної кінематики, а також зображення її 3D моделі [11,12,13].

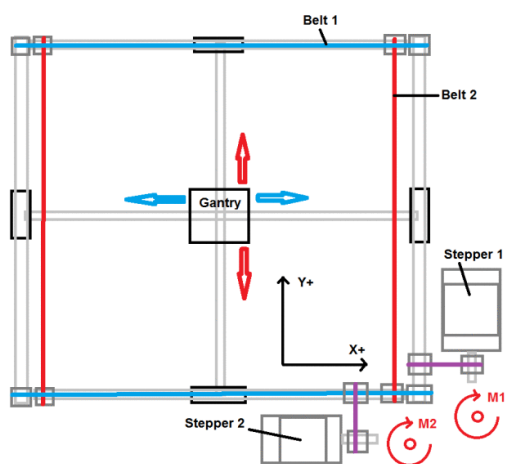


Рис. 2.5. Схематичне зображення картезіанської схеми кінематики.

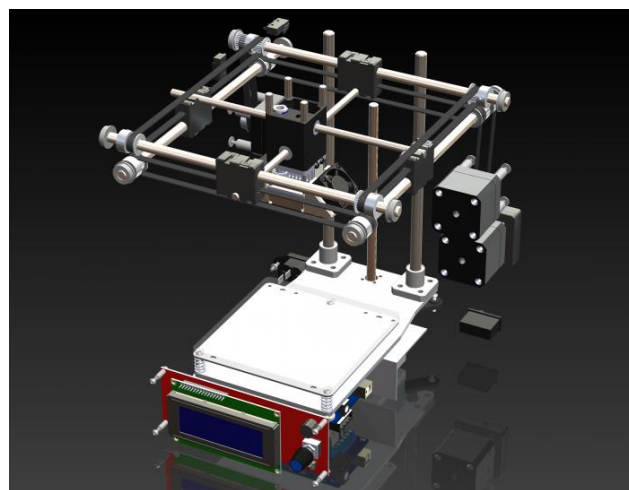


Рис. 2.6. Загальний вигляд зображення 3D моделі картезіанської схеми.

Переваги кінематики:

- Столик рухається лише вздовж вертикальної осі (Z). В результаті градієнт температур ніяким чином не страждає.

- При значній складності на перший погляд кінематична схема проста, кожна вісь приводиться в рух за допомогою свого двигуна.
- Особливості кінематики дозволяють створити закритий корпус. Котрий захищає від протягів і відповідно від деламінації

Недоліки кінематики:

- Для доброї якості друк недостатньо виготовити або придбати рівні (точні) вали. Реалізувати конструкцію з високою точністю установки досить складно.
- Необхідність в правильній установці паралелі валів.
- Конструкція не передбачає простого збільшення області друку.

2.2.4. Кінематика на основі конструкції фірми Makerbot

Також суттєво розповсюджена. В даному випадку столик рухається одразу по двох горизонтальних осях (X та Y), а екструдер лише по вертикальній осі (Z). Подібну кінематику часто використовують в різноманітних мікрофрезерних станках, адже набагато простіше рухати маленьку заготовку (об'єкт друку), ніж важкий інструмент (екструдер). На рисунку 2.7 зображено приклад принтера, що реалізований з даною кінематикою.

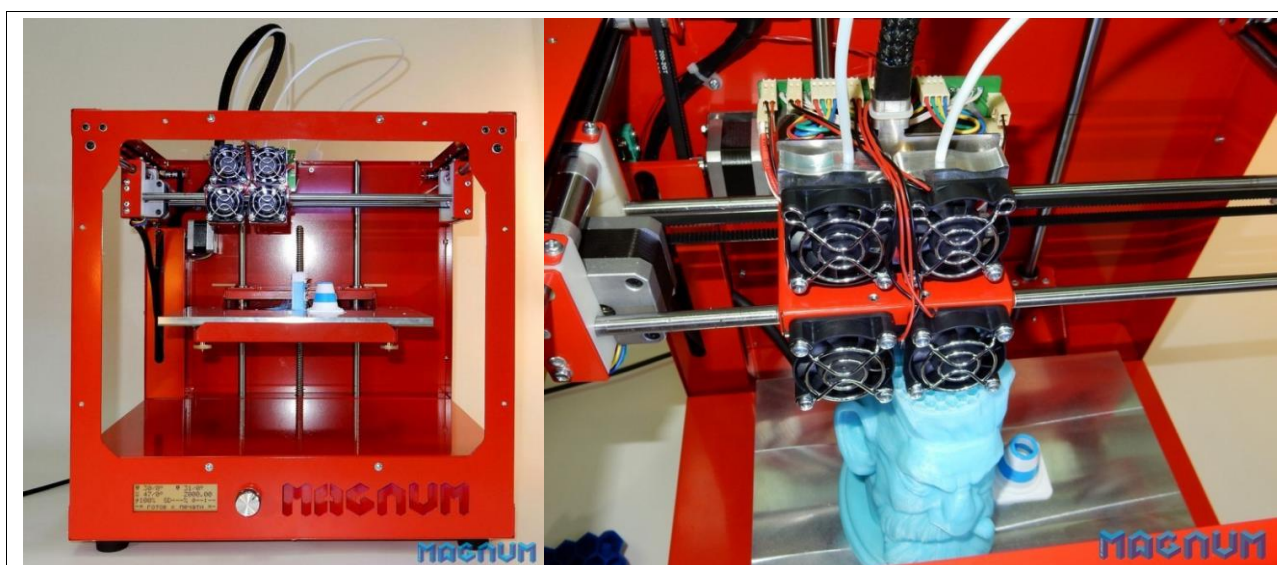


Рис. 2.7. Загальний вигляд принтера з конструкцією кінематики фірми Makerbot

Переваги цієї кінематики:

- Незалежне переміщення по кожній з осей.
- Столик рухається лише по вертикальній осі (Z).
- Легка можливість закрити корпус.
- Практично ідеальна масштабованість даної кінематичної схеми

Недоліки кінематики:

- Неурівноважені маси на балці що рухається, звідси максимальна швидкість друку з прийнятною точністю не більше 60-80 мм/с.
- Громіздкі конструкції на валах, для запобігання виникнення дисбалансу.
- Необхідність слідкувати за однаковим натягом ременів.

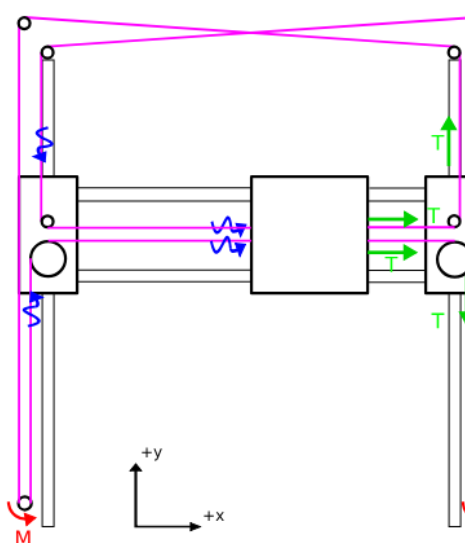
2.2.5. Кінематики CoreXY та H-Bot

Ця кінематика заснована на декартовій системі координат працює на основі трьох осей – “X”, “Y”, “Z”. З використанням такої схеми друкуюча головка переміщується відносно платформи по одній або одночасно по декількох з осей координат. Є декілька варіантів реалізації цієї схеми [10]:

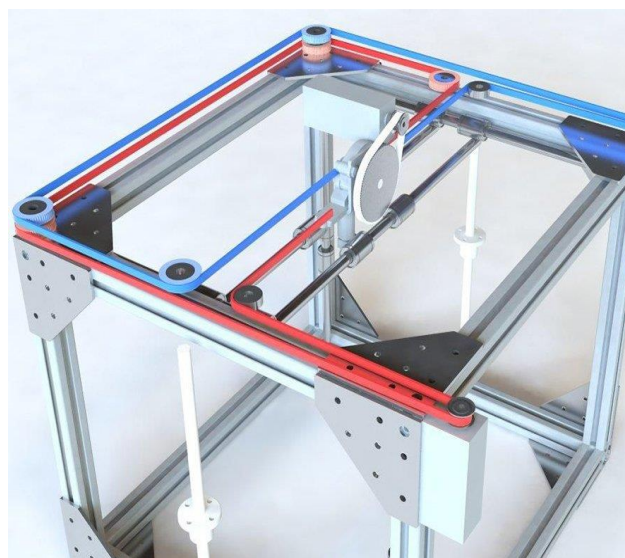
- платформа рухається по одній із горизонтальних осей – “X” або “Y” екструдер рухається по іншій і в висоту;
- платформа виконує переміщення по висоті (вісь “Z”), екструдер – по двох інших площинах вперед-назад і вліво-вправо;
- платформа не рухома, екструдер переміщується по всіх трьох осях;
- платформа рухається по осях “X”, “Y”, екструдер – по висоті.

З таких варіантів реалізації найбільш часто зустрічається другий і третій варіанти реалізації. До переваг такої схеми можна віднести практично ідеальну стабільність результатів і простоту конструкції і кінематики таких принтерів. Картезіанська схема часто використовується в комерційних цілях – для друку на замовлення і для продажу побутових об’єктів і сувенірів. Для комерційних

варіантів реалізації цієї схеми найчастіше зустрічаються два різновиди такого виду кінематики CoreXY і H-Bot, представлені на рисунках 2.8 і 2.9.



а)

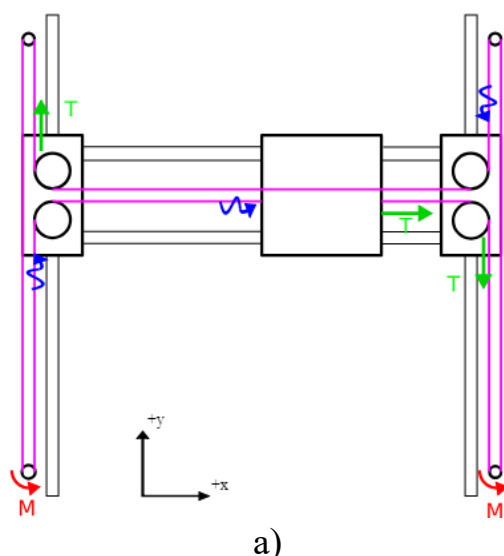


б)

Рис. 2.8. Реалізація картезіанської схеми кінематики виду CoreXY.

а – Кінематична схема, б – загальний вигляд реалізації в реальній конструкції.

Відрізняються ці схеми методом позиціонування екструдера і вартістю та ергономікою впровадження. Варто відзначити що принтери в яких використовується схема CoreXY надають кращу точність друку на високих швидкостях, вищу зносостійкість, та більшу точність переміщення в зоні краю платформи за рахунок приблизно на 30% коротших ременів ніж у схемі H-Bot. В свою чергу схема H-Bot має нижчу вартість, і є простішою при монтажу і в обслуговуванні.



а)



б)

Рис. 2.9. Реалізація картезіанської схеми кінематики виду H-Bot.
а – Кінематична схема, б – загальний вигляд реалізації в реальній конструкції.

Переваги кінематичної схеми H-Bot:

- Необхідний всього один ремінь, схема передбачає його роботу без скручувань.
- Натягувати один ремінь набагато зручніше ніж два, тому в цій схемі необхідний всього один натягувач.

Недоліки кінематичної схеми H-Bot:

- Необхідно постійно слідкувати за натягом ременя. Так як з часом ремінь розтягується, а величина розтягування прямо пропорційна до довжини ременя.
- Необхідно виставляти ролики строго перпендикулярно до площини XOY, так як при невеликому значенні перекосу ролика ремінь буде “з’їдатись” об буртик ролика. Приклад такого пошкодження зображено на рисунку 2.10.



Рис. 2.10. Загальний вигляд пошкодження ременя як результат неправильного позиціонування ролика.

- Складність в обчисленні переміщень, через що на швидкостях вище 100мм/с можуть бути проблеми із достаточністю ресурсів восьми розрядних контролерів.

Переваги кінематичної схеми CoreXY:

- Два коротких ремені простіше знайти ніж один довгий
- Сили зрівноважують балку, а не прагнуть її повернути, тому цей тип кінематики можна збирати на валах.

Недоліки кінематичної схеми CoreXY:

- Є схеми з перекручуванням ременів і переходу ременя з одного рівня на інший, це досить пагубно впливає на ремені.
- Складність натягування ременів. Їх необхідно натягувати однаково, інакше сили натягу будуть прагнути повернути каретку.
- Складність складання і обслуговування. Необхідно витримувати вертикальність роликів відносно горизонтального майданчика для установки двигунів і рейок.

- Загальний недолік кінематики — погана масштабованість. Тобто виготовляти таку кінематику для зони друку більше ніж 300*300 досить проблематично через подовження ременів.

2.2.6. Belt кінематика

Досить незвичайний з класичного погляду вид кінематики заснований на принципі конвеєру. Особливість даного виду кінематики наявність однієї “безкінечної” осі, що дозволяє друкувати. З’явилась дана технологія відносно недавно, й призначена більше для швидкого виробництва великої серії різноманітних або однакових деталей. На рисунку 2.11 зображено 3D принтер, що реалізує даний вид кінематики.

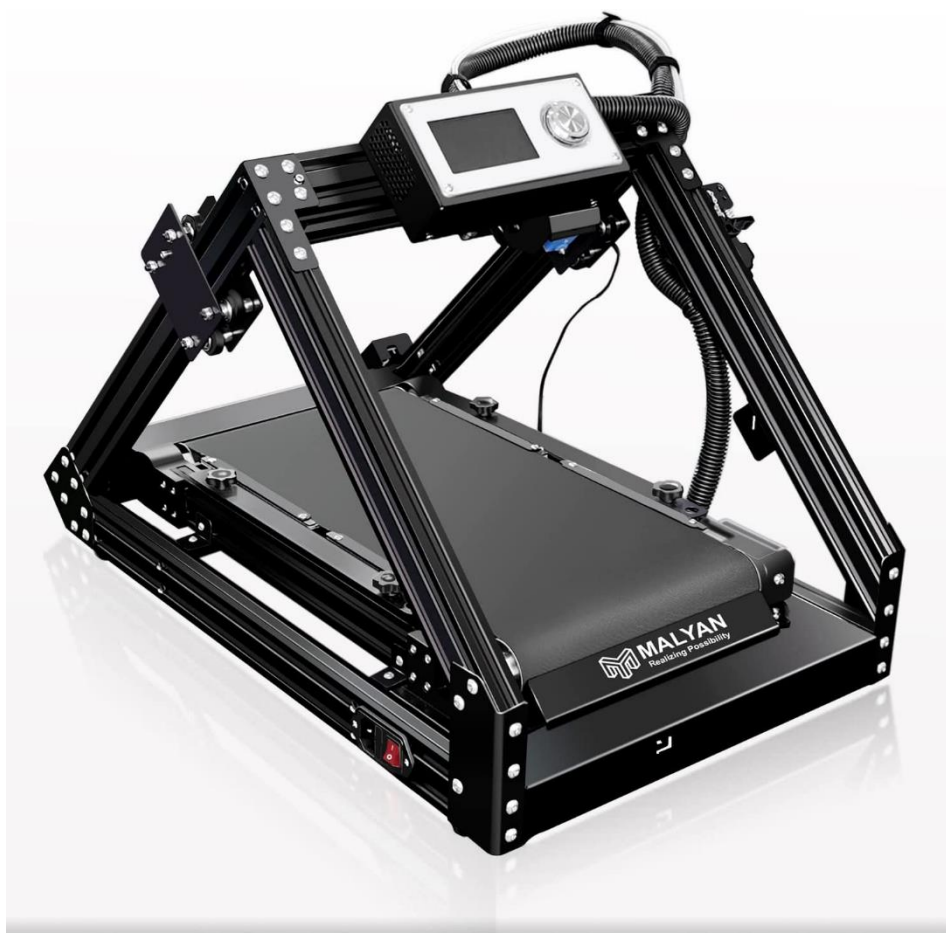


Рис. 2.11. Загальний вигляд 3D принтера MALYAN MA20 з кінематикою Belt

Переваги кінематики:

- Безперервний друк (без зупинки).
- Легке видалення результатів друку.
- Можна друкувати деталі “безкінечної” довжини.

Недоліки кінематики:

- Відносно низька швидкість друку.
- Низька розповсюдженість і як результат обмежена підтримка спільноти.
- Вимагає додаткових підтримок для друку довгих частин.

2.2.7. Delta кінематика

Кінематика основана на рухах дельтат-робота. Замість захватів встановлюється хотенд. Набула широкого розповсюдження завдяки можливості отримання точних розмірів при великій швидкості друку. Від картезіанської схеми відрізняється методом переміщення екструдера відносно столика-платформи. В дельта реалізації столик є нерухомим в той час як екструдер переміщується по трьом осям. Дана кінематична схема представлена на рисунку 2.12, має якості в порівнянні з картезіанською схемою. Має більшу швидкість друку проте меншу точність на краях моделі що друкується.

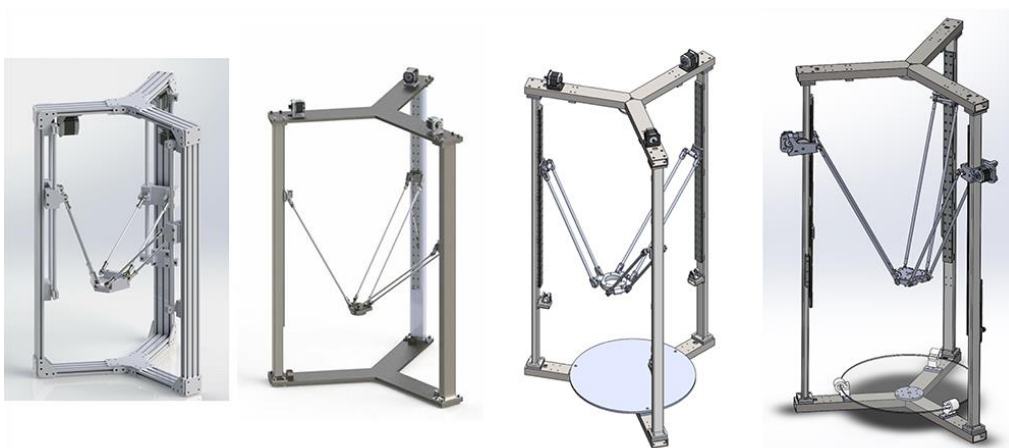


Рис. 2.12. Приклад реалізації Дельта схеми кінематики.

Переваги кінематики:

- Легко видозмінюється. Для збільшення висоти достатньо просто встановити три більш довгих направляючих.
- Займає мало місця. Вона частіше висока ніж громіздка по довжині та ширині.
- Якщо зробити легкий ефектор (каретка на якій встановлюється хотенд), то можна досягти високих швидкостей друку без втрати якості.
- Переміщення по висоті не відрізняється від переміщення по ХОУ.
- Відсутність виступаючих частин дає можливість закрити корпус і надати жорсткість рамі.

Недоліки кінематики:

- Складна механіка переміщень, рекомендується встановлювати 32-розрядні контролери.
- Складне налаштування, при реалізації вертикальних осей як стрижнів.
- Складно і дорого створити жорстку раму.
- Складність із встановленням системи директ-екструдера. Така конструкція буде важкою, а так як ефектор часто кріпиться на магнітах не буде можливості досягнути високих швидкостей.
- Проблеми із точністю виготовлення деталей — будь які нерівності і неспівісності будуть помітні, навіть якщо вони на одній осі.
-

2.2.8. SCARA кінематика

SCARA розшифровується як Selective Compliance Articulated Robot Arm в перекладі з англійської зчленований селективний механізм робо-руки. Кінематика заснована на обертанні платформи по горизонталі. Рух досягається за рахунок зчленування важільного механізму. Такі прилади володіють високою повторюваністю, при роботі утворюють мінімальний рівень шуму та вібрацій. SCARA за деталізацією обробки перевершили картезіанські моделі: різниця ще й в тому, що перші відчутно швидші [14]. На рисунку 2.13 зображено кінематичну схему та систему координат даного типу кінематики.

Прилади на основі такої кінематики це пристрої що суміщають в собі функції 3D принтера з тривимірною технологією маніпулятора.

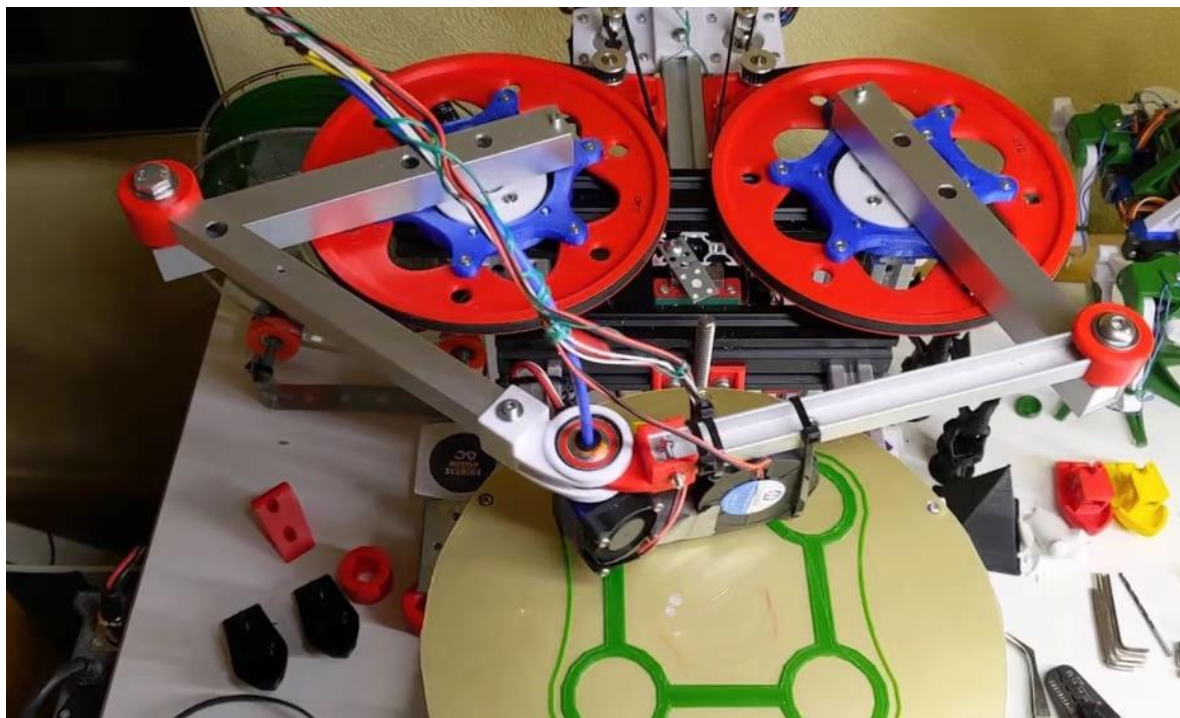


Рис. 2.14. Приклад принтера з кінематикою SCARA

2.2.9 Кінематика основана на полярних координатах (За конструкцією фірми Polar)

Одним із нових видів кінематики, що тільки починає освоювати ринок є кінематика компанії Polar. Відповідно за назвою в установках цієї марки використовується полярна система координат. Тобто позиціонування екструдера задається радіус-вектором. Форма стола — коло, він переміщується в горизонтальній площині лише по одній осі вперед-назад та крутиться навколо своєї осі, натомість екструдер виконує переміщення вгору та вниз по осі Z. [15, 16]. На рисунку 2.15 наведено приклад даного виду кінематики.

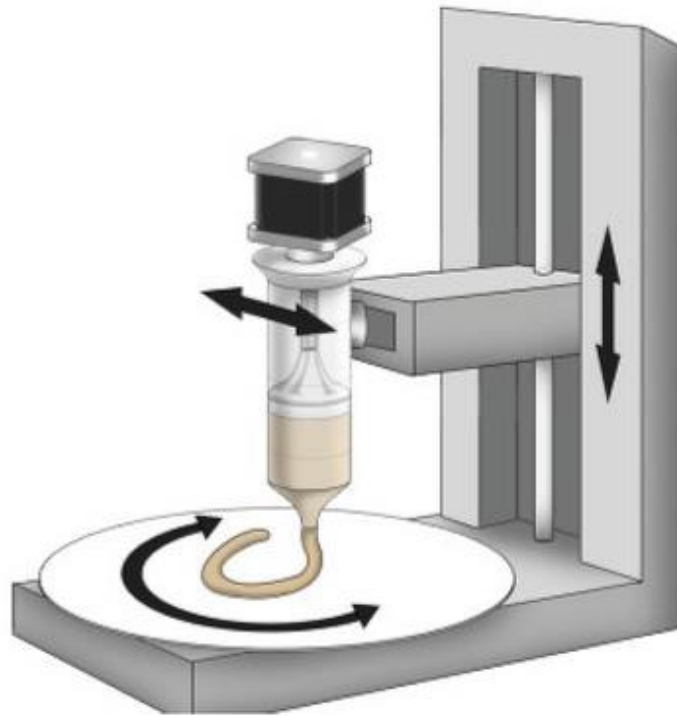


Рис. 2.15. Загальний вигляд реалізації полярної кінематики.

Переваги кінематики:

- Мало двигунів — мало шуму.
- Простота конструкції.
- Низька вартість

Недоліки кінематики:

- Низька якість друку.
- Відносно низька швидкість друку
- Низька популярність та підтримка спільнотою.

2.2.10. Кінематика побудована на основі роботизованого маніпулятора

Промислові роботи так само як і 30-40 років тому перспективний напрямок розвитку та автоматизації виробництва. Сьогодні існують багатофункціональні роботизовані маніпулятори обладнанні різноманітною оснасткою від переміщення заготовок до оснастки для зварювальних робіт тощо. В більшості таких робіт відрізняється лише програма керування та оснастка при цьому

конструкція робо-руки лишається без особливих змін. Популярності набуває встановлення екструдера як спеціалізовану оснастку. Основна особливість даного типу кінематики — екструдер може здійснювати рух по різноманітним складним траєкторіям в трьох вимірах під різними кутами. Завдяки такому набору функцій вдається створювати складні конструкції. На рисунку 2.16 зображено приклад такої установки.



Рис. 2.16. Загальний вигляд робота маніпулятора оснащеного установкою 3D друку.

Переваги кінематики:

- Універсальність. Прилад може здійснювати кілька видів задач при заміні екструдера.
- Підходить для виконання промислових задач. Можна друкувати об'єкти практично без обмеження по габаритах.

Недоліки кінематики:

- Невисока точність. Таке обладнання уступає картезіанській кінематиці.

- Великі розміри. Сам робот маніпулятор займає багато місця на робочій поверхні.
-

2.3. Вибір 3D принтера

Першочергово при виборі будь-якого обладнання необхідно сформулювати ряд вимог та критеріїв згідно з якими буде виконуватись вибір. Керуючись обраним шляхом розробки основою дослідної установки має бути максимально довершена готова машина. За основу такої машини можна взяти 3D принтер, що в своєю конструкцією реалізує переважну частину необхідного функціоналу. Таким чином необхідно сформулювати критерії вибору установки, що максимально підходить під поставлені задачі дослідження. При виборі FDM 3D принтера основними критеріями є:

- Розмір області друку.
- Кінематична схема принтера.
- Вид встановлюваного екструдера.
- Наявність додаткових опцій. Таких як друк з флеш носія, тощо.
- Наявність підігріву стола.
- Кількість екструдерів.
- Діапазон робочих температур екструдера.
- Наявність закритого корпусу.

Додатково необхідно виділити критерії вартості та співвідношення ціна-якість. А також параметр відносної складності модифікації конструкції принтера.

Частину вимог згідно описаних критеріїв можна сформулювати відразу керуючись метою експерименту та запланованими модифікаціями принтера.

Розглянемо їх детальніше. Почнемо із розміру області друку, в даному випадку для забезпечення можливості установки додаткового обладнання. На практиці це означає — розмір стола повинен бути чим більше тим краще, в розумних межах звісно ж. В роботі [10] використовувались зразки шестигранної форми із розміром по діаметру вписаного кола в шестигранник 20мм та 10мм в

висоту. Таких розмірів було цілком достатньо для проведення дослідження зразків. В поточному дослідженні заплановано дотримуватись подібного масштабу розмірів. В представлених на ринку моделях існують столи двох форм круглої та прямокутної (частіше квадратної). У професійних та любительських зразках 3D принтерів розміри стола починаються від 200*200 мм для прямокутного столу та від 180-200 мм для круглого. Провівши не складні розрахунки вийде, що корисний простір котрий займає надрукований зразок складає менше 5% від площі стола. Виходить, такого типорозміру достатньо з урахуванням модернізації принтера для проведення подальшого дослідження. Для області друку також важливий параметр максимальної висоти надрукованої деталі, мінімальне значення цього параметру складає 200мм. В даному випадку, цей критерій не є критичним й мінімального розміру буде цілком достатньо.

Існує дві схеми екструдера bouden та direct. Принципово вони відрізняються методом подачі пластику. В direct екструдерах механізм подачі встановлений в безпосередній близькості (або на мінімальному віддаленні) від гарячої частини, й зазвичай рухається разом із екструдером, це дозволяє набагато швидше відводити прутки перед початком переміщення. Для bouden екструдерів навпаки — механізм подачі жорстко закріплений на корпусі або поруч з ним ближче до котушки з пластиком. Остаточний вибір схеми екструдера необхідно робити відштовхуючись від обраної кінематики.

Кількість екструдерів особливо важлива при використанні принтера в промисловості. Збільшення кількості екструдерів дозволяє друкувати кількома матеріалами або кольорами одночасно, що допомагає полегшити пост-обробку деталі. Для реалізації експерименту достатньо одного екструдера.

Підігрів стола — важлива в цілому опція, а особливо враховуючи мету експерименту точно не буде залишковою. При реалізації мікрокліматичних умов це буде додатковий важіль для підтримки і задання режимів друку. Таким чином в першу чергу необхідно розглядати моделі де ця опція присутня, або є можливість не складної модифікації.

Закритий корпус для реалізації мікроклімату теж важливий. Але враховуючи реалії ринку (принтери із корпусом коштують на порядок або на кілька дорожче ніж моделі без корпусу) це не обов'язковий критерій.

Складність модифікації конструкції повинна бути мінімальна. В більшій мірі цей параметр залежить безпосередньо від складності конструкції та її елементів.

Вартість — мінімальна або середня. Принтери високої вартості можна не розглядати так як в більшості випадків вартість додається за рахунок додаткових опцій, що в даному експерименті задіяні не будуть.

Окремо варто розглянути вид кінематики обраного принтера.

2.3.1. Вибір кінематики для майбутнього 3D принтера.

Вище розглянуто вісім видів кінематики. Цей широкий вибір дозволяє підібрати кінематику яка буде максимально зручна для виконання поставлених перед установкою задач. У кожної з описаних кінематик є свої суттєві переваги й недоліки. За критерієм розповсюдженості та підтримки можна виділити картезіанську схему кінематики. Використовуючи критерії низької вартості та простоти конструкції з переліку описаних кінематик можна виключити SCARA та Belt кінематики надаючи перевагу CoreXY, H-bot, Makerbot, Ultimaker та Delta. Варто зауважити, що більшість описаних вище кінематик використовують рух стола для правильного позиціонування сопла відносно заготовки що друкується. Рухи відбуваються або в горизонтальній площині або у вертикальній. При цьому перший випадок різко негативно впливає на мікрокліматичні умови в зоні друкування від цього часто виникають негативні ефекти, такі як деформація деталі або відклеювання її від столика. Нівелювати цей ефект можна закривши принтер в корпус, але за умови горизонтального переміщення стола це складно й не практично реалізовувати. Другий випадок кінематики (рух столика по вертикалі) дозволяє створити повноцінний корпус, але негативний ефект “збивання” температури все ще може спостерігатись, до того ж реалізувати таку

функцію як підігрів стола складно. Додатково планується встановлювати обладнання функцією якого буде контроль температури в зоні друку. Враховуючи особливості подібних установок реалізувати їх на рухомій платформі складно. Таким чином кінематики, що використовують рух стола в будь-якій площині мало підходять для реалізації повноцінної підтримки мікрокліматичних умов.

В результаті можна виділити дві кінематики — Ultimaker та Delta. За критерієм складності модифікації та вартості кінематика типу Ultimaker суттєво програє кінематиці типу Delta. Окрім цього на вибір саме Delta кінематики вплинуло також наявність досвіду роботи та обслуговування принтерів такого виду кінематики.

2.3.2. Критерії вибору 3D принтера

На даному етапі в підсумку сформуємо основні критерії вибору 3D принтера що будуть враховуватись при покупці:

- Мінімальний розмір столу 200*200мм (квадратний стіл) або 200мм в діаметрі (круглий стіл).
- Мінімальна висота друку 200 мм.
- Кінематична схема Delta.
- Вид екструдера Bouden.
- Кількість екструдерів — один.
- Діапазон робочих температур екструдера 190 — 250°C
- Підігрів стола присутній.

2.3.3. Представлені моделі на ринку

При виконанні предметного пошуку за вказаними вище критеріями було знайдено кілька пасуючих моделей 3D принтера описаних далі.

Класичним представником 3D принтерів побудованих на delta кінематиці є “HE3D K200 delta”, зображений на рисунку 2.17.



Рис. 2.17. Зображення 3D принтера “HE3D K200 delta”

Принтер має наступні характеристики:

- Розмір стола — круглий стіл 200мм в діаметрі.
- Висота друку — 300мм.
- Кількість екструдерів — один.
- Вид екструдера Boudouin.
- Підігрів стола — присутній.

- Закритий корпус — відсутній.
- Вартість 5000 грн.

Цілком класичний дельта 3D принтер, основна перевага — здійснення руху екструдера за допомогою ремінної передачі. Також позитивно позначається використання універсальних алюмінієвих направляючих. Основними ж недоліками є розміщення електроніки під столом що нагрівається в процесі друку, а також складність регулювання натягу ременів.

“Flsun Q5 Delta Kossel”, зображений на рисунку 2.18

FLSUN



Рис. 2.18. Зображення 3D принтера “Flsun Q5 Delta Kossel”

Принтер має наступні характеристики:

- Розмір стола — круглий стіл 200мм в діаметрі.
- Висота друку — 200мм.
- Кількість екструдерів — один.
- Вид екструдера Bouden.
- Підігрів стола — відсутній.
- Закритий корпус — відсутній.
- Вартість 5998 грн.

Від інших дана модель відрізняється тим, що кінематика побудована на направляючих-валах, що може негативно впливати на результат друку. Суттєвою перевагою є те, що дана реалізація кінематики не потребує додаткового налаштування. Також позитивним моментом є розташування електроніки, керування та системи подачі у верхній частині корпусу. Основним недолік — ускладнена можливість модернізації, через присутність окремого корпусу для електронних компонентів, що також ускладнює установку корпусу.

“FLSUN QQ-S-Pro Delta”, зображений на рисунку 2.19.

Large Printing Size

Printing Size: $\Phi 255 \times 360 \text{mm}$



Рис. 2.19. Зображення 3D принтера “FLSUN QQ-S-Pro Delta”

Принтер має наступні характеристики:

- Розмір стола — круглий стіл 255мм в діаметрі.
- Висота друку — 360мм.
- Кількість екструдерів — один.
- Вид екструдера Bouden.
- Підігрів стола — присутній.
- Закритий корпус — відсутній.
- Вартість 9569 грн.

Ще один приклад реалізації дельта кінематики на валах. Корпус для зони друку буде складно реалізувати через заводську реалізацію міні-корпусів для кожної осі. Електроніка розташована під столиком, що теж не дуже добре.

“Kossel Mini”, зображений на рисунку 2.20.



Рис. 2.20. Зображення 3D принтера “Kossel Mini”

Принтер має наступні характеристики:

- Розмір стола — круглий стіл 200мм в діаметрі.

- Висота друку — 170мм.
- Кількість екструдерів — один.
- Вид екструдера Bouden.
- Підігрів стола — відсутній.
- Закритий корпус — відсутній.
- Вартість 9300 грн.

Негативною особливістю є встановлення електроніки відразу під столом. Позитивним моментом є те, що конструкція зібрана з універсальних направляючих, що в рази полегшує модифікацію та установку додаткового обладнання.

2.3.4 Вибір 3D принтера до покупки.

З описаного переліку відразу можна виключити дві моделі компанії Flsun, так як складність їх модифікації набагато вища за інші обрані моделі. Також не дуже вдала реалізація кінематики (особливо ускладнене регулювання) лише підтверджує правильність вибору. З двох принтерів що лишились обрано “NE3D K200 delta” за критерієм мінімальної вартості. Варто зазначити що хоч цей принтер коштує дешевше, проте за свою вартість реалізує значно більше можливостей.

2.4. Складання та вдосконалення конструкції принтера. Встановлення додаткового обладнання.

Вдосконалення та модифікація конструкції завжди виклик для дослідника, точно так сталося і в даному випадку. Для реалізації можливості керувати або задавати мікрокліматичні режими в першу чергу підготовано план модифікації придбаного принтера. Складається план з наступних пунктів:

1. Складання і пуско-наладка принтера.
2. Визначення слабких місць та недоліків конструкції.

3. Виправлення недоліків конструкції.
4. Модифікація конструкції принтера згідно з поставленою задачею.
5. Встановлення додаткового обладнання.

2.4.1. Виклики складання та пусконаладжувальних робіт принтера.

Одним зі найбільш трудозатратних етапів був етап складання та пусконаладки принтера. Принтер прийшов в розібраному вигляді. Пакунок містив в собі деталі, метизи та схему для збірки принтера. В цілому процес складання досить простий, але в схемі складання на жаль було багато недоліків і з першого разу важко було зрозуміти як правильно скласти той чи інший вузол. Також, як це часто буває з подібним обладнанням, частина вузлів не відповідала тому що було намальовано на схемі. Так наприклад система подачі пластику котру фактично вдалось зібрати, зображена на рис. 2.21 відрізнялась від зображеної на схемі (рис. 2.22)

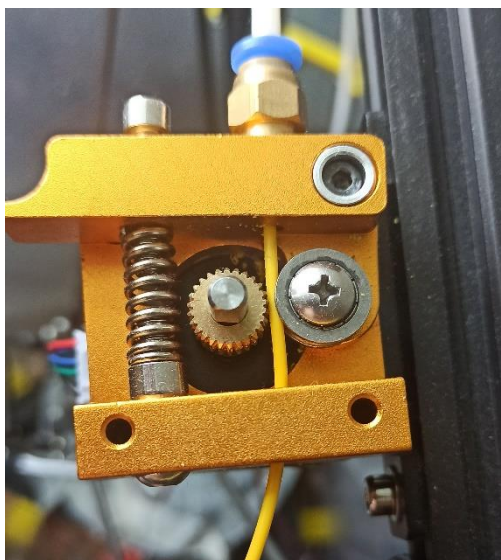


Рис. 2.21. Вигляд система подачі пластику

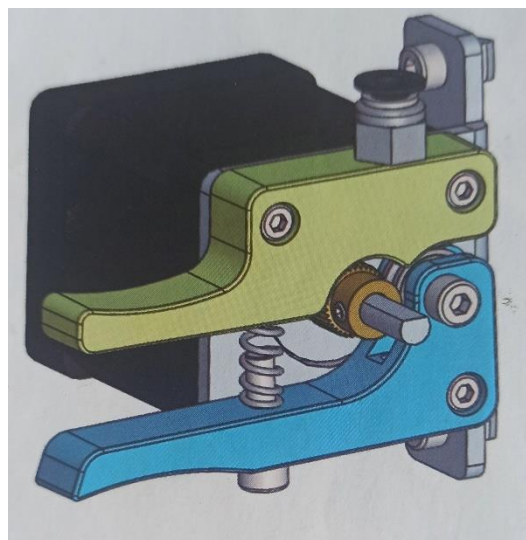


Рис. 2.22. Вигляд системи подачі пластику, що зображена на схемі

Звісно ідеологічно обидві системи працюють однаково, проте відмінності в вигляді деталей достатньо сильно заплутують при складанні.

Але ці фактори вплинули лише на час складання. В результаті за два дні плідної роботи конструкцію було зібрано, всі кабелі під'єднано в свої роз'єми й підготовано до проведення пусконаладжувальних робіт. В даному випадку пусконаладжувальні роботи складаються з чотирьох етапів.

Перший етап найскладніший — регулювання натягу ременів за допомогою яких здійснюється переміщення кареток та в кінцевому результаті екструдера. Конструктивно система переміщення екструдера досить проста. Складається з трьох направляючих по кожній з яких переміщується каретка. Сама каретка приводиться в рух за допомогою ремінної передачі. На відміну від класичного способу тут використовуються розрізні ремені котрі обома кінцями закріплюються на каретці. Сама направляюча закріплена та забазована у вертикальному положенні трьома рамками. Дві з них знаходяться знизу й між ними закріплений кроковий двигун з привідним зубчатим шківом, третя — скріплює всю конструкцію зверху, на ній встановлено паразитний зубчатий шків. Рамки складаються з трьох алюмінієвих профілів скріплених між собою за допомогою полімерного кутника-направляючої. Конструкція кутника забезпечує також систему регулювання та встановлення паразитного зубчатого шківа. Перша складність регулювання натягу була в низькій якості системи регулювання. Сам алгоритм регулювання наступний: спочатку верхня рамка опускається на кілька міліметрів вниз по направляючих та фіксується далі необхідно закріпити ремені на каретках з мінімальним натягом, після чого за допомогою регулювальних гвинтів шляхом їх загвинчування сама рамка піднімається й ремені відповідно натягуються. Через низьку якість конструкції (фактично регулювальний гвинт сам нарізає собі нарізь в пластиковій деталі) рівномірно відрегулювати натяг вдалось далеко не з першого разу. Було вирішено за допомогою розробки додаткового обладнання змінити конструкцію системи регулювання.

Другий етап — регулювання системи подачі. Система подачі досить проста, складається із крокового двигуна, що приводить в рух бронзову шестерню, котра в свою чергу через прокручування проштовхує пластиковий пруток філаменту. Сам пруток піджимається до шестерні шківом, що обертається

навколо своєї осі, на важелі. Піджим реалізується з протилежної сторони за допомогою пружини та регулювального гвинта відкручуючи гвинт збільшується нажим пружини — шків сильніше натискає на філамент. Необхідно забезпечити такий натиск пружини, щоб пруток добре проштовхувався без прослизань при цьому шестерня не повинна надмірно “вгризатись” в матеріал (перевіряється наявністю стружки). Саме регулювання досить не відрізняється зручністю. Незручність полягає в тому що для проведення регулювання необхідно кожного разу знімати пружину, що ускладнює процес регулювання в цілому. В майбутньому планується вдосконалити цю систему також.

Третій етап і найпростіший етап — калібрування стола. Стіл встановлюється на основу за допомогою шести опор дві з яких закріплені нерухомо інші рухаються для можливості правильного прижиму стола. Для регулювання необхідно підключити додатковий датчик торкання й встановити його на сопло. Далі запускається відповідна програма й принтер обмацує поверхню столу в 15-х точках формуючи карту поверхні й в подальшому вносить корективи при друкуванні деталі.

Четвертий етап — тестовий друк для визначення правильності регулювань в цілому. Для пробного друку можна підібрати будь-яку модель бажано невелику. Налаштування режимів друку можна залишити за замовчуванням. Головне спостерігати за процесом й відслідковувати похибки в роботі систем котрі було відрегульовано на попередніх етапах. Так правильність установки та калібрування стола можна перевірити при друкуванні перших шарів філамент має рівномірно лягати по всій своїй поверхні, якщо цього не відбувається — десть є суттєвий перекося столу або калібрування стола пройшло не правильно. За подачею філаменту необхідно слідкувати відразу в двох місцях: при нанесенні на деталь (має бути рівномірне нанесення) та в самій системі подачі. Якщо перший момент відслідковувати в процесі друку складно, оцінку простіше робити при перевірці надрукованої деталі оцінюючи правильність форми вертикальних та горизонтальних поверхонь, наявність напливів, наявність непродукту, тощо. Другий момент відслідковувати простіше, необхідно підстелити під систему

подачі білий листок й спостерігати чи не сиплеться туди пластикова стружка. Варто додати що на результати друку на даному етапі суттєво впливає також правильність обраних режимів. По суті нас цікавить не результат друку, а сам процес та факт того що деталь надрукована від початку до кінця. Таким чином якщо деталь надрукувалась правильно, враховуючи недоліки режимів друку — регулювання проведене правильно.

2.4.2. Визначення недоліків та слабких місць конструкції

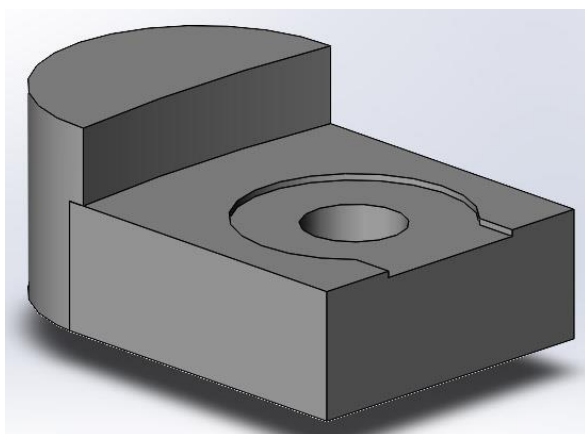
Частину недоліків конструкції було визначено ще на етапі складання принтера. Але в процесі друкування зразків та невеликих деталей стало помітні ще деякі недоліки. Так як принтер має вбудований підігрів стола із самого початку друкування ним користувались. Моделі малих розмірів друкувались без проблем, а от з великим виникали незрозумілі труднощі. Принтер неначе пропускав частину команд й час від часу відключався від комп'ютера. Спершу було висунуто припущення, що причиною такої поведінки є пошкодження даних (команд) при їх передачі від комп'ютер до принтера USB кабелем через наведення від електромережі. Для вирішення цієї проблеми було замінено існуючий кабель на екранований, що ніяк не вплинуло на результат. Проблема крилась в більш простому. Конструкція принтера не передбачає активного охолодження а сам центральний процесор системи керування — взагалі не мав навіть найменшого радіатора. Враховуючи близькість столу до плати керування при нагріві через малий повітряний зазор температура передавалась на центральний процесор, що й сам по собі нагрівався. Через що виникало явище “тротлінг” коли через великий нагрів процесор пропускає деякі команди і операції. Для вирішення цього недоліку було заплановано виготовити опори стола з більшою товщиною для забезпечення збільшення повітряного зазору й в результаті зменшення впливу нагріву стола на температуру центрального процесора. Додатково встановлено комплект пасивного охолодження.

Також значний недолік, хоча й більшою мірою косметичний — відсутність тримача катушки з матеріалом. В процесі друку необхідно щоб катушка прокручувалась навколо своєї осі. Без тримача, коли катушка рухається без окремої фіксації, пластик виходить не рівномірно й може заплутатись та зламатись що призведе до зупинки друку якщо це вчасно помітить оператор або до змарнування вже надрукованої деталі якщо принтер продовжить друкувати повітрям.

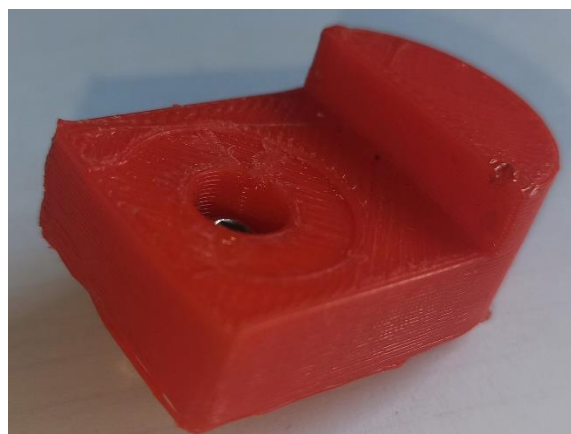
Окремий недолік конструкції — відсутність закритого корпусу, що унеможливорює реалізацію мікрокліматичних умов в зоні друку. Прийнято рішення виготовити корпус самостійно.

2.4.3. Виправлення недоліків й модифікація конструкції, встановлення додаткового обладнання.

Основні два недоліки конструкції — погане кріплення (базування) стола та відсутність корпусу. Для виправлення першого недоліку виготовлено нові опори-кріплення стола зображені на рисунку 2.23.



а)



б)

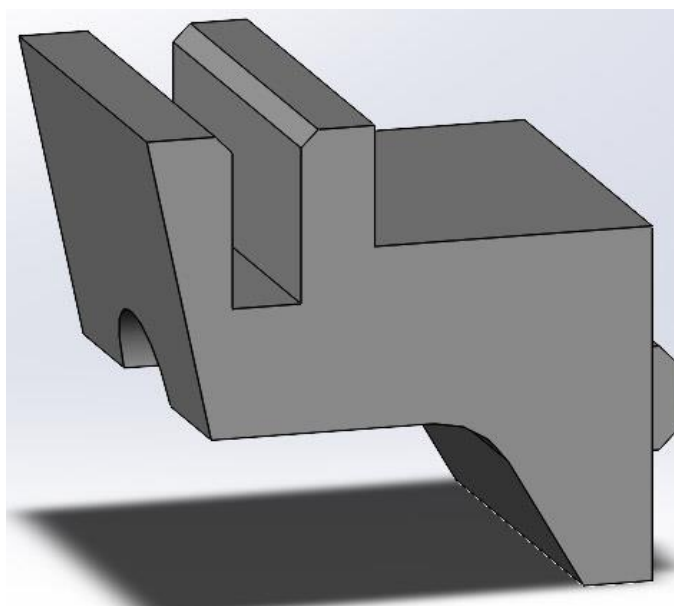
Рис. 2.23. Опори кріплення стола, а – зображення 3D моделі опори, б – отриманий результат.

Виправлення другого недоліку складніше, адже необхідно виготовити корпус. Конструкція принтера з універсальними направляючими дозволяє досить

просто встановити додаткове обладнання. Найпростіший варіант для виготовлення корпусу — орг. скло було придбано три листи товщиною 2.5 мм та розмірами 1000 мм в висоту та 500 мм в ширину котре буде кріпитись на консольні кріплення зображені на рисунку 2.24 та вставлятись в консольні тримачі зображені рисунком 2.25.

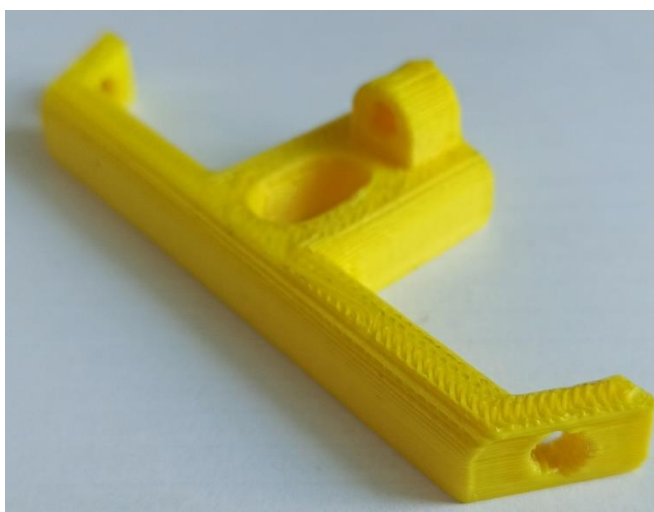


а

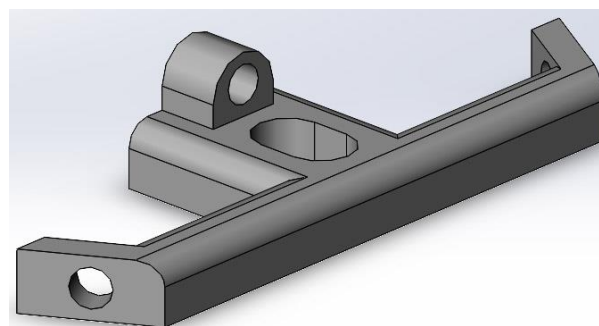


б

Рис. 2.24. Зображення консольного кріплення. а – виготовлена деталь, б – 3D модель деталі.



а



б

Рис. 2.25. Зображення консольного тримача. а – виготовлена деталь, б – 3D модель.

Плити обрізані в розмір в одній з плит встановлені дверцята для зручного доступу до деталі після завершення друку.

Для виправлення проблеми з катушкою як тимчасове рішення було виготовлено консольний тримач зображений на рисунку 2.26 так для виготовлення додаткових деталей використовується сам принтер. Після готовності до встановлення корпусу виготовлено горизонтальну систему закріплення філаменту, зображену на рисунку 2.27.



Рис. 2.26. Зображення консольного тримача катушки



Рис. 2.27. Зображення тримача катушки

Після виправлення всіх недоліків принтера перейдемо безпосередньо до створення установки. Для реалізації мікрокліматичних умов необхідно встановити додаткові нагрівачі котрі будуть прогрівати об'єм камери друку.

Спочатку було заплановано придбати гнучкі нагрівальні стрічки або керамічні нагрівачі. Знайти підходящі зразки не вдалось. На ринку представлені або промислові зразки які неможливо замовити в одиничному варіанті або виробу які не підходять за розмірами. Тому довелось спроектувати свою систему нагріву. На рисунку 2.28 зображена функціональна схема системи нагріву.

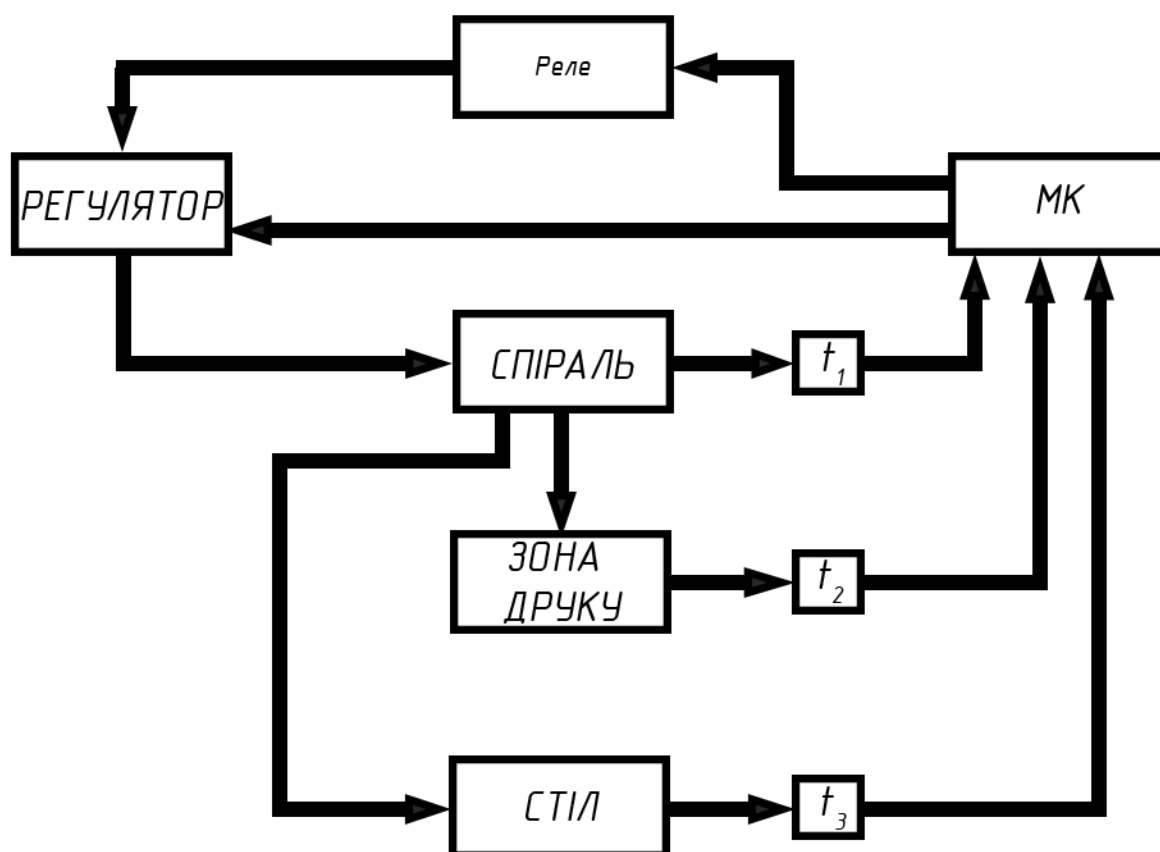


Рис. 2.28. Функціональна схема системи нагріву.

Як видно із схеми система нагріву складається з мікроконтроллера (МК) котрим виступає контролер Arduino Nano, нагрівача (Спіраль) — ніхромової спіраль, регулятор потужності — PWR2000 (220В, 2кВт), електромагнітне реле — BRD-SS-105D . За допомогою зворотного зв'язку у вигляді термодатчиків контролер отримує інформацію про реальні значення температури як спіралі так і в зоні друку. Програма керування враховує ці значення та підтримує задані режими керуючи потужністю через регулятор та активуючи та деактивуючи нагрів за допомогою реле. Програма керування працює за наступним алгоритмом: обирається температурний режим; зчитуються значення з термодатчиків; якщо температура менша заданої температурним режимом вмикається спіраль нагріву; поки температура менше заданої система керування знаходиться в режимі очікування; при наборі заданої температури система переходить в режим підтримки температури значення температури перевіряється раз на 5 секунд і за потреби вмикається нагрів; якщо температура вище заданої

нагрів відключається й алгоритм повторюється знову. Схему алгоритму представлено на рисунку 2.29.

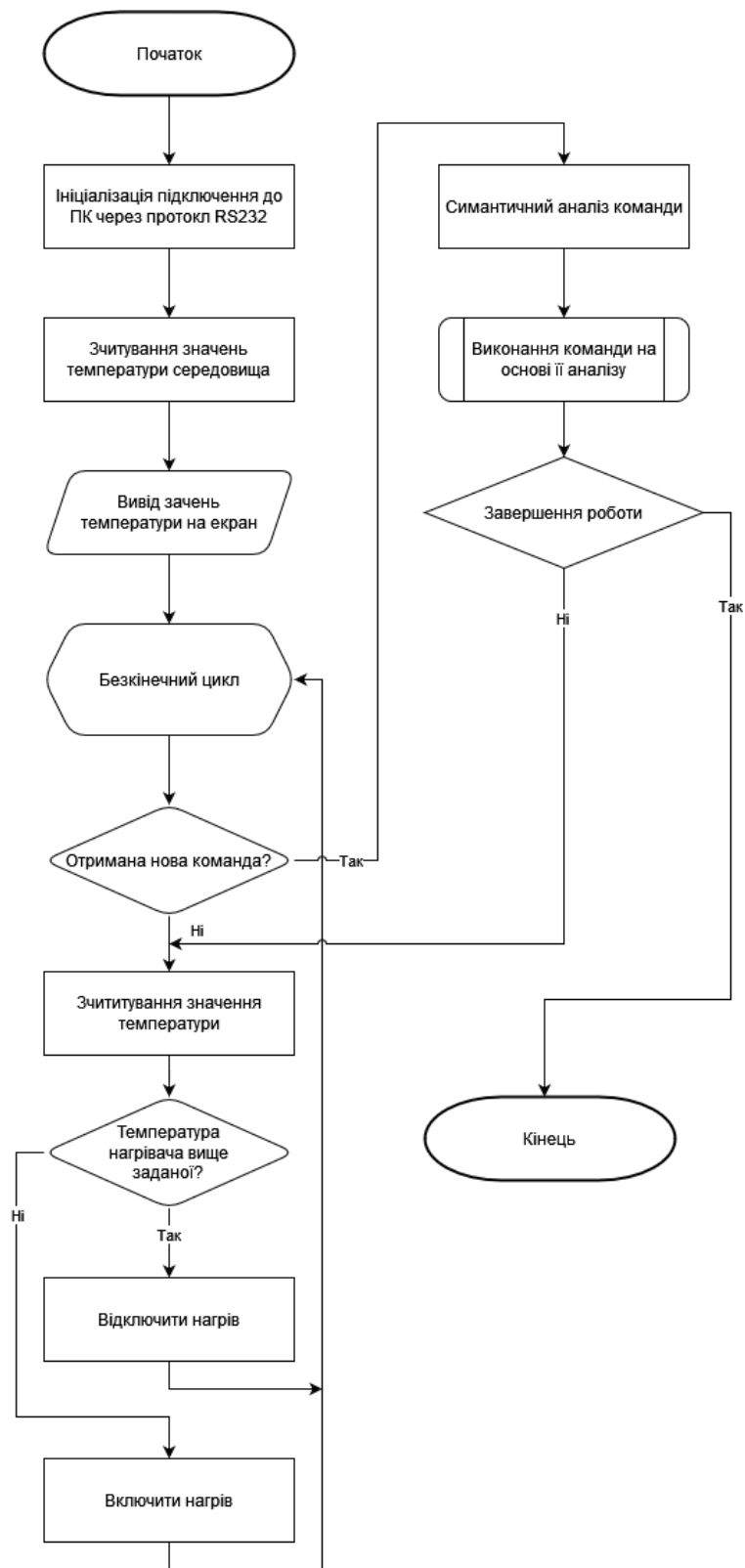


Рис. 2.29. Схema алгоритму роботи мікроконтроллера

Основним елементом системи є ніхромова спіраль. Для намотки спіралі спочатку були проведені розрахунки в результаті яких для намотки обрано ніхромовий дріт діаметром 0.32 мм та довжиною 11м. Котрий був намотаний діаметром 25 мм.

Систему нагріву встановлено по контуру стола як зображено на рисунку 2.4.10. Електронні компоненти винесені в окремий корпус. Система нагріву оснащена додатковим вимикачем для запобігання випадкового увімкнення.

Перед проведенням друку виконано дослідження температурного градієнту наступним чином. Встановлено три термодатчики один в центрі стола, другий біля спіралі третій — посередині між першими двома (рисунок 2.4.11). Проведено два досліді один з вимкненим нагрівом стола інший з включеним. В результаті отримано наступні температурні карти, зображені рисунками 2.4.12 (без увімкнення підігріву стола) та 2.4.13 (з увімкненим підігрівом).

Висновки до розділу

Для реалізації однієї із основних задач створення експериментальної установки визначено головні етапи виконання відповідних робіт.

Розглянуто шляхи створення дослідних установок та визначено їх переваги і недоліки. На основі їх комплексного аналізу встановлено, що найкращим шляхом для реалізації поточного дослідження є використання гібридного підходу (покупки основних компонентів, й створення принципово нових, що відсутні на ринку).

Визначено вимоги до експериментальної установки, що забезпечать найкраще проведення експериментальних досліджень, які включають в себе технологію друку й вимоги по функціональному наповненню 3D принтера.

Виконано аналіз кінематичних схем установок FDM 3D принтерів. Визначено, що для дослідження доцільно використовувати delta кінематику. Так як використання саме цієї схеми дозволяє в простий спосіб створити корпус принтера (що досить ускладнено або взагалі неможливо в інших описаних

схемах). Також кінематика заснована на delta схемі дозволяє досить просто виконувати калібрування стола, набагато вищу точність переміщення відносно інших описаних схем.

Складено та вибрано критерії вибору 3D принтера для проведення дослідження. Проведено огляд ринку та за описаними критеріями обрано модель на основі якої побудується майбутня установка, що дозволило з найменшими затратами перейти до наступного етапу дослідження.

Надано опис придбаного принтера. В чотири етапи проведено пусконаладжувальні роботи по введенню конструкції принтера в експлуатацію. В результаті цього отримано налагоджену, працюючу установку, що готова створювати деталі необхідні для модифікації установки.

Визначено основні недоліки конструкції та методи їх виправлення. Наведено план модифікації котрий включає: виправлення існуючих недоліків, встановлення корпусу, встановлення системи підтримки мікрокліматичних режимів в зоні друку.

Для реалізації підтримки мікрокліматичних режимів проведено дослідження ринку на предмет готових комплектів нагрівачів та регуляторів. Як виявилось придбати готовий комплект неможливо. Тому складена функціональна схема роботи нагрівальної системи із зворотними зв'язками у вигляді термодатчиків.

Таким чином проведені модифікації принтера дозволяють приступити до виконання експериментальних досліджень.

РОЗДІЛ 3.

МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ТОЧНОСТІ ДЕТАЛЕЙ, ВИГОТОВЛЕНИХ 3D ДРУКОМ

Для проведення дослідів в першу чергу необхідно сформулювати методику проведення дослідження. В свою чергу для формування методики необхідно розуміти та визначити параметри, що впливають на точність отриманого результату. В роботі [9] описано гіпотезу, що друк за умови підтримки певного мікрокліматичного режиму в зоні друкування показуватиме кращі результати якості ніж друк з хаотичною зміною мікроклімату (звичайний друк). Таким чином окрім класичних параметрів таких як: температура друку, швидкість друку, висота друкованого шару, тощо. Також впливають мікрокліматичні умови в яких друкується деталь: температура навколишнього середовища в зоні друку, температура нижнього підігріву, вологість повітря. На практиці вплив параметра вологості повітря в приміщенні малий [26] (практично відсутній). Параметр вологості більше впливає на зберігання сировини (особливо деяких видів пластиків як Nylone наприклад), через високу гігроскопічність пластику необхідно їх зберігати в приміщеннях з мінімальною вологістю. Тому в даному дослідженні варіювання параметром вологості повітря не буде використовуватись, вологість підтримуватиметься в межах кімнатної (в межах 40-60 % [18]). Таким чином при проведенні експерименту будуть варіюватись наступні параметри: температура друку, температура нижнього підігріву; температура в об'ємі друку; швидкість друку.

Як описано в першому розділі даної роботи якість друку вимірюється багатьма факторами, основні – відсутність критичних недоліків друку (брак), відповідність шорсткості, лінійні розміри. Від чого залежить результат та як його оцінити розібрались, визначимо методику обробки результатів експериментальних досліджень.

Для створення математичної моделі необхідно зібрати достатньо велику вибірку даних. Для створення більш точного та всебічного опису вирішено скористатись одразу кількома методами математичного моделювання. Систематизацію отриманих даних та побудову математичних моделей на їх основі будемо здійснювати за допомогою методів повних факторних експериментів (ПФЕ) другого порядку типу 2^4 . При проведенні дослідів використовуватимемо таблиці ортогонального та рототабельного планування. Третій метод створення математичної моделі буде реалізований з використанням нейромережевого програмування з допомогою комплексу програмного забезпечення GMDH Shell [19].

3.1. Моделювання засобами планування експериментів

Плани ПФЕ один зі найпростіших способів створити математичну модель досліджуваного процесу. Велика зручність використання цих планів – за недостатнього ступеня опису моделі можна відносно легко та мало затратно продовжити експеримент шляхом переходу до планів вищого ступеня. Відбувається це шляхом добудови плану до плану вищого ступеня, тобто основа плану (кістяк) залишається без змін.

3.1.1. Повний факторний експеримент

Перевага факторних експериментів над класичними полягає в одночасному варіюванні всіма незалежними змінними. [37,39] Експеримент, в результаті якого всі незалежні змінні варіюються на всіх обраних рівнях, називається повним факторним експериментом. Кількість дослідів при ПФЕ підраховується за формулою (3.1).

$$N = k^n \quad (3.1)$$

де k – кількість рівнів, n – число факторів.

Якщо експерименти проводяться тільки на двох рівнях (при двох значеннях факторів) і в експерименті здійснюються всі в можливі комбінації з n факторів, то постановка дослідів за таким планом носить назву повного факторного експерименту типу 2^n .

З огляду на те що фактори різні за фізичною природою і змінюються в різних динамічних діапазонах, для подальшої формалізації процесу аналізу і незалежності отриманих результатів від зміни масштабу вхідних величин фактори попередньо кодують. Для цієї мети використовують співвідношення (3.2).

$$x_i = \frac{X_i - X_{i\text{cp}}}{X_{i\text{max}} - X_{i\text{cp}}} = \frac{X_i - X_{i\text{cp}}}{X_{i\text{cp}} - X_{i\text{min}}} \quad (3.2)$$

де $X_{i\text{cp}} = (X_{i\text{max}} + X_{i\text{min}})/2$; $X_{i\text{max}}$, $X_{i\text{min}}$ – граничні значення варіювання незалежних змінних, котрі або задані або вибираються експериментатором самостійно на основі апріорної інформації про об'єкт.

Таким чином, операція кодування незалежних змінних полягає в перенесенні центру координат в точку $X_{i\text{cp}}$ звану надалі центром плану експерименту. В кодованій системі на підставі виразу (3.2) будуть дотримуватися відповідності (3.3):

$$X_{i\text{min}} \rightarrow x_i = -1; \quad X_{i\text{cp}} \rightarrow x_i = 0; \quad X_{i\text{max}} \rightarrow x_i = 1 \quad (3.3)$$

У разі парної залежності для визначення лінії регресії досить провести два досліді при граничних значеннях фактора x_1 , тобто план експерименту має вигляд $X = |-1; 1|^t$. Якщо кількість вхідних величин дві - x_1 і x_2 тобто реалізується двофакторний експеримент то для побудови матриці плану повно факторного експерименту, що дозволяє оцінити коефіцієнти моделі $y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2$, необхідно користуватися таким правилом: при додаванні нового фактора кожна комбінація рівнів східного плану зустрічається двічі - в поєднанні з нижнім (-1) і верхнім (+ 1) рівнями нового фактора. Іншими словами, матрицю вихідного плану (однофакторного експерименту) необхідно повторити двічі - при нижньому рівні ($x_2 = -1$) і верхньому рівні ($x_1 = + 1$) доданого фактора. Виходячи з цього правила можна побудувати і матрицю плану трифакторного

експерименту. У таблиці 3.1 показана поетапна побудова матриць плану по мірі збільшення числа факторів в моделі. Якщо розглянути матрицю плану двофакторного експерименту, побудовану по викладеному вище правилом, то видно, що в ній присутні всі $N = 2^2 = 4$.

Таблиця 3.1 План ПФЕ 2^3

№	x_1	x_2	x_3
1	-1	-1	+1
2	+1	-1	+1
3	-1	+1	+1
4	+1	+1	+1
5	-1	-1	-1
6	+1	-1	-1
7	-1	+1	-1
8	+1	+1	-1

Геометрично, план такого експерименту інтерпретується точками, що розташовані по вершинах квадрату (Рис. 3.1)

Побудована таким чином матриця має низку цінних властивостей:

1) ортогональності, яке забезпечує незалежність оцінок коефіцієнтів моделі (3.4)

$$\sum_{i=1}^N x_{ij} x_{jk} = 0; j \neq k, j, k = \overline{1, n} \quad (3.4)$$

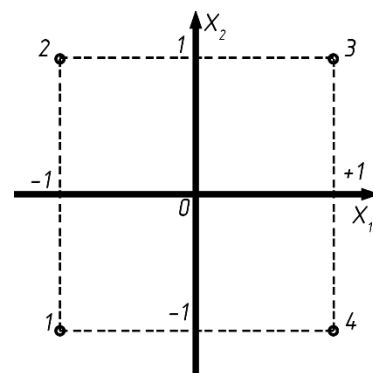
де j, k - номери векторів стовпців відповідних факторів; i – поточна точка факторного простору, в котрій виконується експеримент.

2) симетричності, яке забезпечує незалежність вільного члена (3.5)

$$\sum_{i=1}^N x_{ij} = 0; j = \overline{1, n} \quad (3.5)$$

тобто сума елементів вектор-стовпців x_1 дорівнює нулю, точки, в яких проводяться досліди, розташовані симетрично по відношенню до центру плану

3) нормування, що забезпечує однакову дисперсію оцінки коефіцієнтів (3.6)

Рис. 3.1. Розташування точок при ПФЕ $2n$

$$\sum_{i=1}^N x_{ij}^2 = N \quad (3.6)$$

Останнім рівність випливає з того, що кодовані фактори приймають тільки значення ± 1 .

Розрахунок і статистична оцінка коефіцієнтів рівняння регресії отриманих на підставі плану ПФЕ, засновані як і при пасивному експерименті, на застосуванні регресійного, аналізу. З огляду на те що матриця плану має властивість ортогональності, всі розрахунки надзвичайно спрощуються.

Кожен коефіцієнт розраховується незалежно від інших, причому загальне число коефіцієнтів не повинно перевищувати числа рівнянь, з яких вони визначалися, а це число збігається з числом рядків матриці планування, що визначається співвідношенням $N = 2^n$. Відповідно до властивості нормування матриці плану повного факторного експерименту вираз для визначення оцінки коефіцієнтів рівняння регресії при дворівневому експерименті (3.7)

$$\hat{a}_i = \frac{\sum_{i=1}^N x_{ij} \tilde{y}_i}{N} \quad (3.7)$$

Якщо в кожній точці факторного простору досвід проводиться паралельно n раз, то вираз (3.7) видозміниться в (3.8)

$$\hat{a}_i = \frac{\sum_{i=1}^N x_{ij} \bar{y}_i}{N} \quad (3.8)$$

де $y_i = \sum_{k=1}^m \frac{\tilde{y}_{ik}}{m}$ - «середнє порядкове» значення вихідної величини об'єкта в i -ому рядку матриці плану.

Для визначення оцінки коефіцієнта a_0 необхідно матрицю плану доповнити вектор-стовпцем фіктивної змінної x_0 , тотожно рівній одиниці, як це показано в табл. Таблиця 3.2.

З огляду на те що вектор-стовпці матриці плану володіють умовою симетричності, то (3.9)

$$\sum_{i=1}^N x_{ij} x_{i0} = \sum_{i=1}^N x_{ij} = 0; \quad j = \overline{1, n} \quad (3.9)$$

Таблиця 3.2. План ПФЕ 2² з результатами дослідження

№	x ₀	x ₁	x ₂	x ₁ x ₂	y _i
1	+1	-1	-1	+1	y ₁
2	+1	+1	-1	-1	y ₂
3	+1	-1	+1	-1	y ₃
4	+1	+1	+1	+1	y ₄

Отже, вектор-стовпець фіктивної змінної буде ортогональним вектор-стовпцям незалежних змінних, і тому оцінка вільного члена буде визначатися незалежно від оцінок a_i (3.10), відповідно до виразу (3.8):

$$\hat{a}_0 = \sum_{i=1}^N \frac{x_{i0} \tilde{y}_i}{N} = \sum_{i=1}^n \frac{\tilde{y}_i}{N} \quad (3.10)$$

Якщо модель містить лінійні парні взаємодії факторів $x_i x_k$, то для визначення оцінок коефіцієнтів при них матриця плану доповнюється вектор-стовпцем для взаємодії. При чому чергування знаків в цьому вектор-стовпці отримують шляхом перемноження знаків входять до нього вектор-стовпців x_1 і x_k . У табл. 3.2 дана процедура проведена для визначення оцінки коефіцієнта a_{12} при взаємодії $x_1 x_2$. Отриманий таким чином вектор-стовпець буде володіти трьома перерахованими вище властивостями матриці планування - ортогональності, симетричності і нормування. Отже, оцінка коефіцієнта (3.11) при лінійному взаємодії знаходиться незалежно на підставі того ж виразу (3.7):

$$\hat{a}_{ik} = \sum_{i=1}^N \frac{(x_i x_k)_i}{N} = \sum_{i=1}^N \frac{x_{ii} x_{ki}}{N} \quad (3.11)$$

Знайдені таким чином оцінки коефіцієнтів моделі показують ступінь впливу факторів і їх взаємодії на вихідну величину. Якщо перед коефіцієнтом стоїть знак плюс, то зі збільшенням даного чинника вихідна величина збільшується, а якщо стоїть знак мінус, то навпаки. Регресійний аналіз виходить з передумови про випадковість похибок, які накладаються на вхідні і вихідні величини. Однак, якщо проводити досліди в тому порядку, в якому йдуть рядки

матриці планування, побудованої відповідно -з правилом (тим більше для випадку проведення серії паралельних дослідів в кожній точці факторного простору), то чим більший порядковий номер фактора, тим при більшій кількості дослідів його рівень не змінюється. Для самого «старшого» фактора p його рівень залишається незмінним (зафіксованим) протягом $N/2$ дослідів. При цьому реалізація випадкової похибки завдання чинників буде зафіксована і стає систематичною. Таким чином, протягом великого числа дослідів фактор, наприклад x_n , буде поставлено з систематичною похибкою, що призведе до зміщення оцінок коефіцієнтів. Відомо, що випадковість величини проявляється в безлічі її вибірок. Тому, щоб залишити тільки випадкову похибку в установці рівнів факторів з нульовим математичним очікуванням, всі досліді здійснюються у випадковому порядку - виконують рандомізацію експерименту. Рандомізація полягає в проведенні дослідів у випадковому порядку. На закінчення слід зауважити, що можливі випадки, коли рандомізацію здійснити не можна. Це буває в тих випадках, коли послідовність умов проведення дослідів є визначений ним параметром. Наприклад, випробування котушки індуктивності з залізним сердечником, коли форма петлі гістерезису залежить від попередньої робочої точки.

3.1.2. Моделювання з використанням ортогональних планів другого порядку

Від класичних планів повно факторного експерименту ортогональні плани відрізняються додатковими точками в яких проводиться дослід. Фактично ядром планів другого порядку є відповідні плани ПФЕ першого порядку. Побудова центрально-композиційного плану при наявності ядра зводиться до нарощування точок, що розташовані в центрі плану та на відстані d від центру (рисунок 3.2). Значення параметрів ортогональних планів наведено в таблиці 3.3 [20,21].

Таблиця 3.3 Параметри ортогональних планів другого порядку.

Ядро плану	Загальна кількість дослідів n	φ	d
2^2	9	$2/3 \approx 0,6667$	1,0000
2^3	15	$\sqrt{\frac{8}{15}} \approx 0,7303$	1,2154
2^4	25	$4/5 \approx 0,8$	1,4142
2^{4-1}	27	$\frac{4\sqrt{3}}{9} \approx 0,7698$	1,5467
2^5	43	$\frac{4\sqrt{86}}{43} \approx 0,8627$	1,5960
2^{6-1}	45	$\frac{4\sqrt{10}}{15} \approx 0,8433$	1,7244
2^6	77	$8\sqrt{\frac{1}{77}} \approx 0,9117$	1,7606
2^{7-1}	79	$8\sqrt{\frac{1}{79}} \approx 0,9001$	1,8848
2^7	143	$8\sqrt{\frac{2}{143}} \approx 0,9461$	1,9095

Приклад ортогонального плану для трьох змінних наведено в таблиці 3.4

Таблиця 3.4. Центральнo композиційне ортогональне планування типу 2^2

Дослід	x0	x1	x2	x3	x12- 11/15	x22- 11/15	x32- 11/15	x1x2	x1x3	x2x3	y
Планування типу 2k	+1	-1	-1	-1	4/15	4/15	4/15	+1	+1	+1	y1
	+1	+1	-1	-1	4/15	4/15	4/15	-1	-1	+1	y2
	+1	-1	+1	-1	4/15	4/15	4/15	-1	+1	-1	y3
	+1	+1	+1	-1	4/15	4/15	4/15	+1	-1	-1	y4
	+1	-1	-1	+1	4/15	4/15	4/15	+1	-1	-1	y5
	+1	+1	-1	+1	4/15	4/15	4/15	-1	+1	-1	y6
	+1	-1	+1	+1	4/15	4/15	4/15	-1	-1	+1	y7
	+1	+1	+1	+1	4/15	4/15	4/15	+1	+1	+1	y8
Зіркові точки	+1	-1.215	0	0	23/30	-11/15	-11/15	0	0	0	y9
	+1	+1.215	0	0	23/30	-11/15	-11/15	0	0	0	y10
	+1	0	-1.215	0	-11/15	23/30	-11/15	0	0	0	y11
	+1	0	+1.215	0	-11/15	23/30	-11/15	0	0	0	y12
	+1	0	0	-1.215	-11/15	-11/15	23/30	0	0	0	y13
	+1	0	0	+1.215	-11/15	-11/15	23/30	0	0	0	y14
Нульова точка	+1	0	0	0	-11/15	-11/15	-11/15	0	0	0	y15

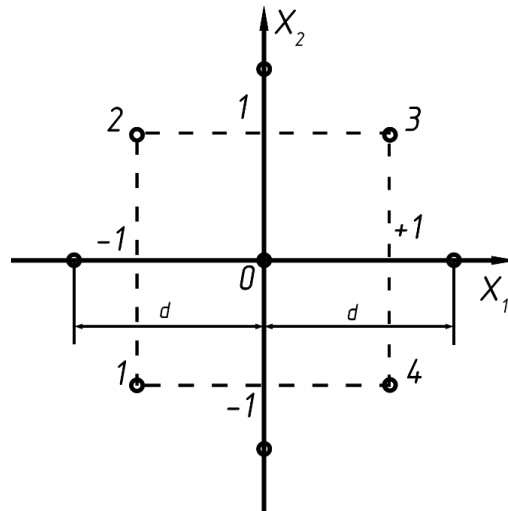


Рис. 3.2. Розташування точок при центрально композиційному плануванні.

Значення відстані визначається за формулою (3.12)

$$d = \sqrt{\frac{n\varphi - 2^k}{2}} \quad (3.12),$$

де φ визначається за формулою (3.13)

$$\varphi = \sqrt{\frac{2^k}{n}} \quad (3.13).$$

Для збереження ортогональності плану необхідно при побудові матриці другого порядку забезпечити умови (3.14)

$$\sum_{u=1}^n x_{ou} x_{iu}^2 = 0 \quad \text{та} \quad \sum_{u=1}^n x_{iu}^2 x_{uj}^2 = 0 \quad (3.14)$$

Забезпечивши ортогональність плану, тим самим отримаємо можливість визначати коефіцієнти регресії за досить простою формулою (3.15) незалежно один від одного

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^n x_{iu} y_u}{\sum_{u=1}^n x_{iu}^2} \quad (3.15)$$

В додатку А наведено таблицю з прикладом ортогонального плану ПФЕ. Де значення y_i – результат дослідів виконаного за параметрами вказаними у відповідному рядку; x

Дисперсії коефіцієнтів регресії оцінюються за формулою (3.16)

$$s_{b_i}^2 = \frac{s_y^2}{\sum_{u=1}^n x_{iu}^2} \quad (3.16)$$

Залишкова сума квадратів (3.17) та число ступенів свободи (3.18)

$$S_R = \sum_{u=1}^n y_u^2 - \sum_{i=0}^{k_1} b_i \sum_{u=1}^n x_{iu} y_u \quad (3.17)$$

$$f_R = n - k_1, \quad k_1 = 0.5(k+2)(k+1) \quad (3.18)$$

Рівняння регресії (3.19) дещо відрізняється від класичного запису

$$y = b'_0 + \sum_{1 < i < k} b_i x_i + \sum_{1 < i < j < k} b_{ij} x_i x_j + \sum_{1 < i < k} b_{ij} (x_i^2 - \varphi) \quad (3.19)$$

Для переходу до звичної форми знаходять величину (3.20), що оцінюється дисперсією (3.21)

$$b_0 = b'_0 - \sum_{1 < i < k} \varphi b_{ij} \quad (3.20)$$

$$s_{b_0}^2 = s_{b'_0}^2 + \sum_{1 < i < k} \varphi^2 s_{b_{ii}}^2 \quad (3.21)$$

Далі отримана модель оцінюється за різноманітними критеріями для визначення адекватності опису отриманого процесу, що детально описано в підрозділі 3.1.4.

3.1.3. Моделювання з використанням рототабельних планів другого порядку

На відміну від ортогональних рототабельні дають можливість передбачити значення функції відгуку з дисперсією, однаковою на рівних відстанях від центру плану [50,51]. Так само як і в ортогональних планах конструювання рототабельних заключається в додаванні точок до ядра. Особливістю рототабельних планів є кілька повторень дослідів на нульовому рівні й на відстані d від центру. Значення параметра d можна розрахувати за формулою (3.22) для повного факторного ядра та за формулою (3.23) для пів репліки.

$$d \approx 2^{k/4} \quad (3.22)$$

$$d \approx 2^{(k-1)/4} \quad (3.23)$$

Дані для побудови рототабельних планів наведено в таблиці 3.5.

За результатами дослідів проводиться розрахунок коефіцієнтів регресії наведений формулами (3.24)-(3.27) [21]

$$b_0 = \frac{A}{n} \left[2\lambda^2(k+2) \sum_{u=1}^n y_u - 2\lambda c \sum_{i=1}^k \sum_{u=1}^n x_{iu}^2 y_u \right] \quad (3.24)$$

$$b_i = \frac{n}{c} \sum_{u=1}^n x_{iu} y_u \quad (3.25)$$

$$b_{ij} = \frac{c^2}{n\lambda} \sum_{u=1}^n x_{iu} x_{ju} y_u \quad (3.26)$$

$$b_{ii} = \frac{A}{n} \left\{ c^2 [(k+2)\lambda - k] \sum_{u=1}^n x_{iu}^2 y_u + c^2 (1-\lambda) \sum_{i=1}^k \sum_{u=1}^n x_{iu}^2 y_u - 2\lambda c \sum_{u=1}^n y_u \right\} \quad (3.27)$$

В цих формулах прийняті наступні означення (3.28)

$$c = \frac{n}{\sum_{u=1}^n x_{iu}^2} \quad \lambda = \frac{n2^k}{\left(\sum_{u=1}^n x_{iu} \right)^2} \quad A = \frac{1}{2\lambda [(k+2)\lambda - k]} \quad (3.28)$$

Отримавши поліноміальну модель, необхідно провести статистичні оцінки. Відмінність від попереднього плану полягає в тому, що коефіцієнти регресії визначаються з різними дисперсіями, котрі визначаються за формулами (3.29) - (3.32)

$$s_{b_0}^2 = \frac{2A\lambda^2(k+2)}{n} s_y^2 \quad (3.29)$$

$$s_{b_i}^2 = \frac{c}{n} s_y^2 \quad (3.30)$$

$$s_{b_{ij}}^2 = \frac{A[(k+2)\lambda - (k-1)]c^2}{n} s_y^2 \quad (3.31)$$

$$s_{b_{ij}}^2 = \frac{c^2}{n\lambda} s_y^2 \quad (3.32)$$

Похибка досліду при рототабельному плануванні визначається за дослідями в центрі плану (3.33)

$$s_0^2 = \frac{\sum_{u=1}^{n_0} (y_{0u} - \bar{y}_0)^2}{n_0 - 1} \quad (3.33)$$

Чисельник виразу (3.33) являє собою залишкову суму квадратів в центрі плану (3.34)

$$S_0 = \sum_{u=1}^{n_0} (y_{0u} - \bar{y}_0)^2 \quad (3.34)$$

Залишкова сума квадратів плану розраховується за формулою (3.35)

$$S_{\text{заг}} = \sum_{u=1}^n (y_u - y_{u \text{ розрах}})^2 \quad (3.35)$$

З числом ступенів свободи (3.36)

$$f_{\text{заг}} = n - \frac{(k+2)(k+1)}{2} \quad (3.36)$$

Дисперсія адекватності моделі характеризується сумою (3.37)

$$S_{\text{ад}} = S_{\text{заг}} - S_0 \quad (3.37)$$

з числом ступенів свободи (3.38)

$$f_{\text{ад}} = n - \frac{(k+2)(k+1)}{2} - (n_0 - 1) \quad (3.38)$$

3.1.4. Методика обробки експериментальних даних

В результаті виконання експериментів за планами описаними в розділах 3.1.2 та 3.1.3 отримаємо достатньо велику вибірку результатів експерименту. Для виключення впливу похибок вимірювань й для проведення перевірки отриманих даних необхідно провести додатковий аналіз [24].

Перший етап – виключення грубих похибок

Для включення помилкових результатів експериментальних досліджень, які можуть в подальшому негативно позначитись на отриманому рівнянні регресії, в кожному рядку планів здійснюється перевірка однорідності рішень y_{ui} за допомогою критерію Стюдента, значення якого визначають за формулою (3.39):

$$t_p = \frac{|y_U^* - \tilde{y}_U|}{S_U} \quad (3.39)$$

де y_U^* – найменше або найбільше значення вихідної величини y_{ui} в u -му рядку плану досліджень;

$$\tilde{y}_U = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} y_{Ui}}{n-1} - \text{середнє значення в } u\text{-му рядку без врахування } y_U^*;$$

S_U – оцінка середньо квадратичного відхилення в u -му рядку (3.40):

$$S_U = \sqrt{\frac{1}{n_U - 1} \sum_{i=1}^{n-1} (y_{Ui} - \tilde{y}_U)^2} \quad (3.40)$$

n_U – кількість повторень в u -му рядку.

Якщо розрахункове значення $t_p > t_{табл., \alpha, f}$, де α – рівень значущості, а $f = n_u - 1$ – кількість степенів свободи, то вважається, що y_U^* є грубою похибкою і її треба виключити із таблиці результатів експериментальних досліджень.

Для спрощення подальшої обробки результатів доцільно повторити дослід на цьому ж рівні, для того щоб забезпечити однакову кількість повторень на кожному із рядків плану.

Другим етапом буде перевірка однорідності вимірів.

Для перевірки однорідності вимірів в кожному рядку планів визначається $\tilde{y}_U$

.

Із всіх середніх значень визначаємо найбільше і найменше значення, а потім обчислюють розрахункове значення критерію Стюдента за формулою (3.41):

$$t_p = \frac{\tilde{y}_{U \max} - \tilde{y}_{U \min}}{S_y \sqrt{\frac{1}{n_{\max}} + \frac{1}{n_{\min}}}} \quad (3.41)$$

$n_{\max}, n_{\min}$ – кількість повторень дослідів в рядках з максимальним та мінімальним середніми значеннями $\tilde{y}_{U \max}, \tilde{y}_{U \min}$ відповідно;

S_y – оцінка дисперсії відтворюваності, що визначається за формулою (3.42):

$$S_y = \sqrt{\frac{1}{N(n-1)} \sum_{U=1}^N \sum_{i=1}^n (y_{Ui} - \tilde{y}_U)^2} \quad (3.42)$$

Якщо $t_p > t_{табл., \alpha, f}$, де α – рівень значущості, а $f = n_{\max} + n_{\min}$ – кількість степенів свободи, то вважають, що значення вихідної величини в різних точках плану сильно відрізняється. Тому ці результати експерименту можна вважати

результативними і можна перейти до наступного етапу обробки результатів експерименту.

На третьому етапі визначимо однорідності дисперсій.

При однаковій кількості повторень дослідів на кожному рівні в кожному рядку плану, тобто:

$$n_U = n = \text{const}, \quad U = \overline{1, N}$$

перевірка однорідності дисперсій здійснюється за G -критерієм Кохрена, розрахункове значення якого визначається за формулою (3.43):

$$G_p = \frac{S_{U \max}^2}{\sum_{U=1}^N S_U^2} \quad (3.43)$$

де $S_U^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{U=1}^N (y_{Ui} - \tilde{y}_U)^2$ – дисперсія в u -му рядку плану;

$S_{U \max}^2$ – максимальне значення дисперсії із всіх визначених.

Визначене розрахункове значення G_p порівнюється з табличним $G_{\text{табл}}$, що взяте з кількістю степенів свободи $f_1 = n-1$ і $f_2 = N$ та рівнем значущості α .

Якщо $G_p \leq G_{\text{табл}}$, то гіпотеза про однорідність дисперсії приймається, а це означає, що сильно в досліді немає дисперсій, що сильно відрізняється інших, тобто в досліді немає системних похибок.

Інакше, якщо $G_p > G_{\text{табл}}$, то вважають, що виміри не є однорідними і потрібно виконати деякі неформальні дії, а саме: перейти до іншої функції, а бо ж виключити грубі похибки серед вимірів, або ж зменшити інтервал варіювання вхідних факторів.

Четвертим етапом визначимо статистичну значимість коефіцієнтів рівняння регресії

Після визначення значень коефіцієнтів рівняння регресії у вигляді (3.44) або (3.45)

$$\tilde{y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{123} x_1 x_2 x_3 \quad (3.44)$$

$$\tilde{y} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{\substack{n, j=1 \\ i \neq j}}^k b_{ij} x_i x_j + \sum_{\substack{i, j, e=1 \\ i \neq j \neq e}}^k b_{ije} x_i x_j x_e \quad (3.45)$$

треба перевірити їх значимість за t - критерієм Стюдента, розрахункове значення обчислюється за формулою (3.46):

$$t_p = \frac{|b_i|}{S_b} \quad (3.46)$$

де $S_b = \frac{S_y}{\sqrt{nN}}$, в свою чергу $S_y = \sqrt{\frac{1}{N(n-1)} \sum_{U=1}^N \sum_{i=1}^n (y_{Ui} - \tilde{y}_U)^2}$.

Визначене розрахункове значення t - критерію Стюдента порівнюється з $t_{табл.}$, що взятє з рівнем значущості α та кількістю степенів свободи $f = N(n-1)$.

Якщо виконується умова, що $t_p > t_{табл., \alpha, f}$, то вважається, що відповідний коефіцієнт рівняння регресії є статистично значимим і його можна використовувати в моделі, яка відповідає рівнянню регресії, інакше його порівнюють нулю і його не включають в отриману модель.

Значимість коефіцієнта сильно залежить від кількості дослідів N та кількості повторень дослідів n на кожному рівні плану.

При їх збільшенні точність моделі зростає.

П'ятий етап дозволяє перевірити адекватність отриманої математичної моделі, що представлена в вигляді рівняння регресії

Перевірка адекватності отриманої моделі, описуваному ним об'єкту дослідження здійснюється за F - критерієм Фішера.

Розрахункове значення цього критерію визначається за формулою (3.47):

$$F_p = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2} \quad (3.47)$$

де $S_{ad}^2 = \frac{1}{(N-k-1)} \sum_{U=1}^n (\bar{y}_U - \tilde{y}_U)^2$ – дисперсія адекватності отриманої моделі, що характеризує розкид середніх значень $\bar{y}_U$, що отримане в результаті проведення експериментів і значень вихідної величини $\tilde{y}_U$, які отримані за допомогою рівняння регресії.

k – кількість факторів в експерименті.

Розрахункове значення критерію порівнюється з $F_{табл.\alpha, f_1, f_2}$, що взятє з рівнем значущості α та кількістю степенів свободи f_1 та f_2 що визначаються за формулами (3.48):

$$\begin{aligned} f_1 &= N - k - 1; \\ f_2 &= N(n - 1). \end{aligned} \quad (3.48)$$

Якщо виконується умова, що $F_p \leq F_{табл.\alpha, f_1, f_2}$, то гіпотеза про адекватність опису досліджуваного об'єкта отриманою математичною моделлю приймається.

Якщо вказана умова не виконується, то дана модель неадекватно описує досліджуваний процес (об'єкт).

3.2. Моделювання на основі методу евристичної самоорганізації

Використання різноманітних підходів для створення математичної моделі допомагає краще описати досліджуваний процес й всебічно оцінити результати моделювання. Сучасні пакети математичного ПЗ не дають готових рішень для вирішення задачі створення моделі за ортогональними та рототабельними планами ПФЕ. Альтернативою звісно може бути розробка свого рішення (включаючи обрахунки вручну), але це несе в собі людський фактор, що може негативно вплинути на якість отриманих результатів.

Вирішенням цієї проблеми є використання інших підходів для створення математичної моделі. Одним із таких підходів є побудова математичної моделі на основі використання засобів моделювання штучними нейронними мережами (ШНМ). Особливо добре для дослідження великої кількості змінних підходить метод групового врахування аргументів [24,26].

3.2.1. Алгоритми методу групового врахування аргументів

Даний метод застосовується у випадках коли не обхідно на основі дослідних даних побудувати модель виду $Y = F(x_1, x_2, \dots, x_n)$, при чому отримана модель повинна мати оптимальну складність. При розв'язанні задач прогнозування

використовуються моделі виду $Y(M) = x_i, (M + K)$, де K — величина інтервалу дослідження.

Основна ідея методу МГВА базується на наступному принципі. Зібрані дані про об'єкт спостережень розділяють на дві частини А і В. Частину даних А (навчальну послідовність даних) використовують для визначення параметрів моделі. Частину В (перевірочну послідовність даних) використовують при виборі моделі оптимальної складності. До таблиці даних В можуть відноситись тільки ті дані що не використовувались при визначенні параметрів моделі претендента. [27, 28,29]

Основна структура алгоритмів індуктивної самоорганізації математичних моделей складається з таких етапів [50]:

- 1) попередня обробка вихідної інформації з врахуванням системі вибраних опорних функцій для зменшення множини початкових змінних;
- 2) генерація множин моделей-претендентів;
- 3) визначення критеріїв селекції, які є зовнішнім доповненням, та вибір моделі оптимальної складності.

До переваг МГВА можна віднести:

— Не вимагає завдання моделі в явному вигляді — модель конструюється сама в процесі роботи алгоритму, метод працює на коротких вибірках (коли кількість обумовлених коефіцієнтів моделі n менше кількості точок дослідження m). Цей індуктивний метод моделювання, який базується на принципі самоорганізації, потребує незначного об'єму апіорної інформації.

— Відсутні відомості про об'єкт моделювання ЕОМ одержує за допомогою перебору (послідовної оцінки) великої кількості варіантів моделей по деяким зовнішнім критеріям. Він відноситься до комбінованих методів — в ньому використовується достовірна інформація про об'єкт та індуктивний перебір моделей — претендентів.

— Оцінка моделей визначається по порівняно невеликій кількості початкових дослідних даних. Всі інші дані використовується для одержання коефіцієнтів та визначення оптимальної структури моделі.

— Для одержання коефіцієнтів математичної моделі індуктивний метод самоорганізації використовує метод найменших квадратів, але існують інші методи, де коефіцієнти знаходяться таким же чином як і структура моделі оптимальної складності, за допомогою перебирання варіантів дискретних значень.

— Чисельність невідомих параметрів може бути більшою за число точок навчальної послідовності.

— Можливість адаптації параметрів для одержання нових даних експериментів.

В МГВА зазвичай використовується наступні алгоритми:

— Однорядний алгоритм самоорганізації. Використання цього алгоритму доцільне в задачах прогнозування, алгоритм може працювати із зашумленими даними та дозволяє виконувати дослідження нестационарних процесів.

— Багаторядні алгоритми – для розв’язання не до кінця визначених або некоректних задач моделювання. Тобто у випадку коли кількість дослідних даних менша кількості аргументів, що входять в синтезовану модель.

— Комбінаторний алгоритм дозволяє покращити прогнозування моделей складних об’єктів. Такий алгоритм доцільно використовувати: для довгострокового прогнозу; вибору виду опорної функції та класу рівнянь; вибору множини вхідних і вихідних змінних; можливості прогнозування при не повному інформаційному базисі; самоорганізації фізичних і прогнозуючих моделей при сильно зашумлених вхідних даних. [17,24,50,51]

Один із варіантів реалізації алгоритму МГВА є його реалізація на базі штучної нейронної мережі.

Основна перевага використання ШНМ моделювання полягає в кращому визначенні зв’язків між змінними ніж це вдається виконати класичними методами. Реалізується ця перевага завдяки ключовій особливості нейронних мереж – зв’язків кожного з нейронів попереднього шару з наступним. Таким чином фактично враховується вплив як окремої змінної на результат так і поєднання впливів різних змінних. До інших переваг можна також віднести: високу надійність роботи

(інформація зберігається та кодується не в окремих елементах пам'яті, а у вигляді розподілених зв'язків між нейронами. Таким чином стан кожного окремого нейрона визначається станом багатьма інших це означає, що втрата одного нейрона або зв'язку не несе істотного впливу на роботу всієї мережі.); висока завадо та шумостійкість.

До недоліків такого підходу можна віднести необхідність великої кількості початкових даних для навчання мережі що буде добре відображати досліджувані залежності.

ШНМ представляє собою набір штучних нейронів та зв'язків між ними. Мережа може містити як один шар (такі мережі називають одношаровими) так і кілька шарів (багатошарова мережа). Кожен шар моделі складається з так званих нейронів котрі зв'язані між собою зв'язками з певними ваговими коефіцієнтами. В середині кожного нейрона існує функція активації яка в свою чергу підбираються відповідно до задачі моделювання. Виконує роль регулятора або ключа на виході може передавати значення в межах $[-1;1]$.

Фактично робота по отриманню моделі за допомогою ШНМ складається з трьох етапів [25]: конфігурація мережі – вибір кількості шарів, функції активації, кількості входів, виходів, вибір алгоритму навчання; навчання мережі; апробація отриманої моделі. На етапі навчання мережі змінюються значення вагових коефіцієнтів за певним алгоритмом, що відповідає методу навчання. На даному етапі розвитку цього методу обробки даних існує три парадигми навчання: «з вчителем», «без вчителя» (самонавчання), змішана. В першому випадку при навчанні ШНМ окрім початкових даних додаються також цільові виходи (результат що повинна видати мережа). Ваги налаштовуються таким чином щоб мережа надавала результат максимально близький до результату навчального прикладу. Другий випадок не потребує правильних відповідей на кожен приклад вибірки. У даному випадку розкривається внутрішня структура даних й кореляція між зразками у навчальній множині – дозволяє розподілити зразки за категоріями. В останньому випадку частина ваг визначається за допомогою самонавчання, інша за допомогою навчання зі вчителем.

3.2.2 Методика реалізації методу евристичної самоорганізації групового врахування аргументів

При проведенні літературного пошуку було знайдено велику кількість рішень, що допомагають вирішити дану задачу, від розширень для MS Excel до фреймворків та повноцінних програм. Найбільш популярними є наступні програмні рішення:

Модуль системи MatLab Neural Network Toolbox. Дозволяє згенерувати нову, навчити та використати вже існуючу нейронну мережу. Містить три алгоритми для навчання: алгоритм зворотного розповсюдження Левенберга-Марквардта (Levenberg-Marquardt); алгоритм спряжених градієнтів що підлягають масштабування (Scaled Conjugate Gradient); алгоритм байєсової регуляризації (Bayesian Regularization).

Фреймворк «PARIS». Поєднує в собі алгоритми МГВА та алгоритм Барендона. [52]

Oskham – інноваційний інструмент глобального аналізу на базі Excel, який поєднує в собі можливості МГВА з явними можливостями апроксимації функцій моделі за допомогою методу представлення моделі вищих порядків. Це дозволяє ефективно обчислювати індекси чутливості Соболя без необхідності попереднього скринінгу. [52,53]

GMDH Shell DS. Оболонка GMDH не вимагає попередньої нормалізації даних і не дотримується абсолютно точного припасування, що значно скорочує час обчислень. GMDH Shell автоматично тренує нейронні мережі та застосовує їх для аналізу, таким чином отримання точних прогнозів не вимагає особливих зусиль чи часу. Реалізує алгоритм МГВА на основі нейромережевого моделювання. Тип навчання мережі – із вчителем. [52]

Для зручності вирішення даної задачі було зроблено вибір на користь програмного комплексу GMDH Shell. Вибір програми заснований на простоті використання, можливості візуалізації даних засобами програми, та наявності

досвіду користування. Що дозволяє з мінімальними затратами (на відміну від інших пакетів ПЗ) отримати математичну модель. Дана програма дозволяє обробити отримані дані буквально в кілька кроків. Інструкція з користування програмою GMDH SHELL наведена в додатку В. Програмний комплекс реалізує алгоритм МГВА на основі ШНМ. Алгоритм роботи обраної програми є наступним.

Спочатку в програму завантажуються вхідні дані, що включають в себе параметри процесу й результат (результати якщо за одним процесом виконується моделювання кількох параметрів). Ця інформація може бути завантажена як в вигляді зведеної таблиці так і у вигляді окремих файлів. На рисунку 3.3 зображено вигляд вікна завантаження початкових даних до програми.

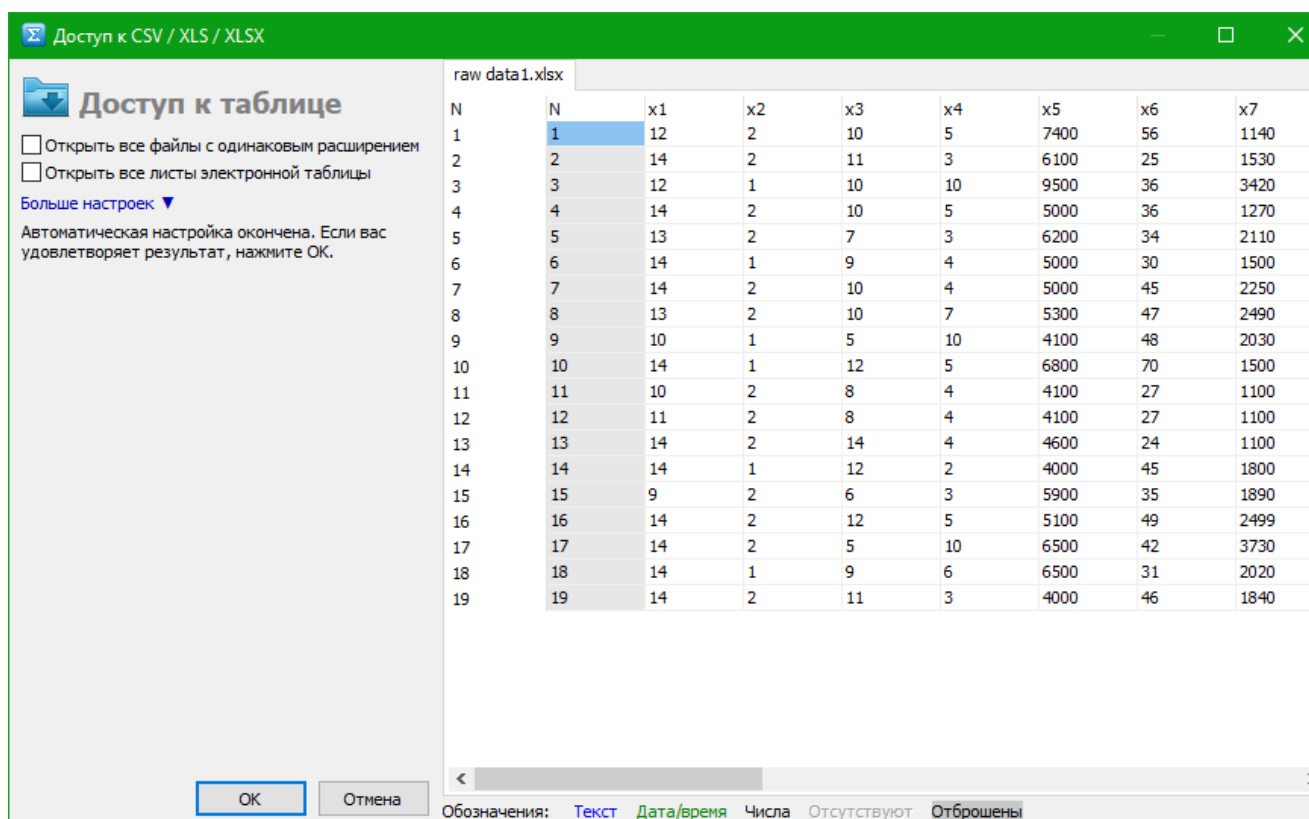


Рис. 3.3. Вікно завантаження початкових даних.

Далі програма пропонує обрати метод за яким буде виконана обробка даних. Окрім потрібного нам виду аналізу GMDH Shell дозволяє вирішувати задачі: класифікації, кластеризації, підгонки кривих, прогноз попиту, прогноз навантаження, регресійного моделювання, прогноз часових рядів.

Далі необхідно вибрати змінні результатів експерименту (рисунок 3.4) та його вхідних параметрів (рисунок 3.5).

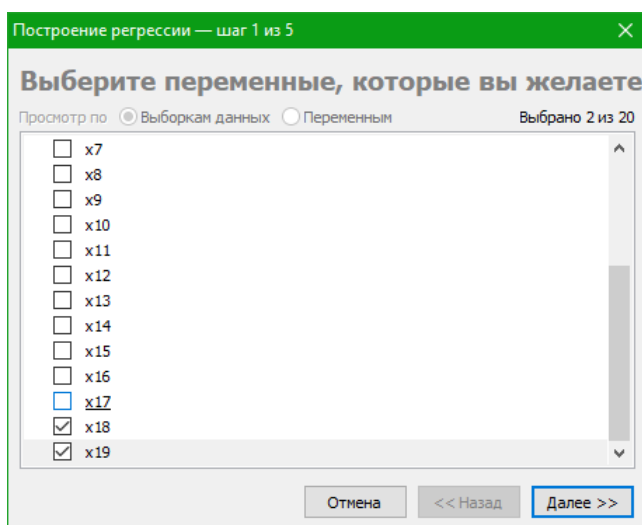


Рис. 3.4. Вибір змінних що відображають результат експерименту

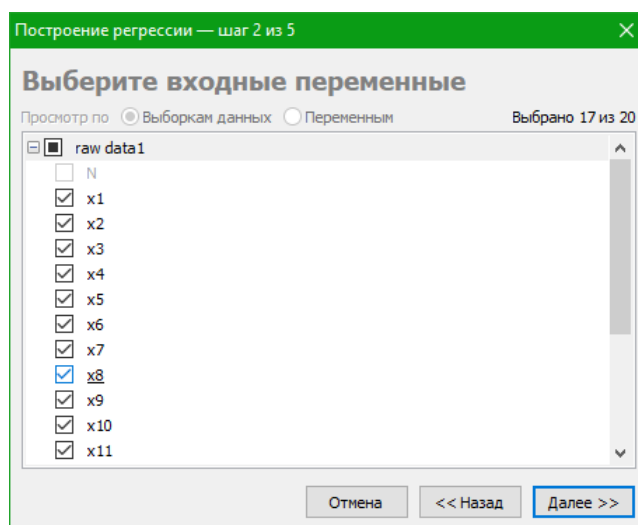


Рис. 3.5. Вибір вхідних змінних.

Далі проводиться вибір додаткових параметрів що використовуються при моделюванні (розмір контрольної вибірки, метод отримання моделі, тощо.). Після чого програма проводить автоматизований розрахунок результати якого представлені на рисунках 3.6 та 3.7.

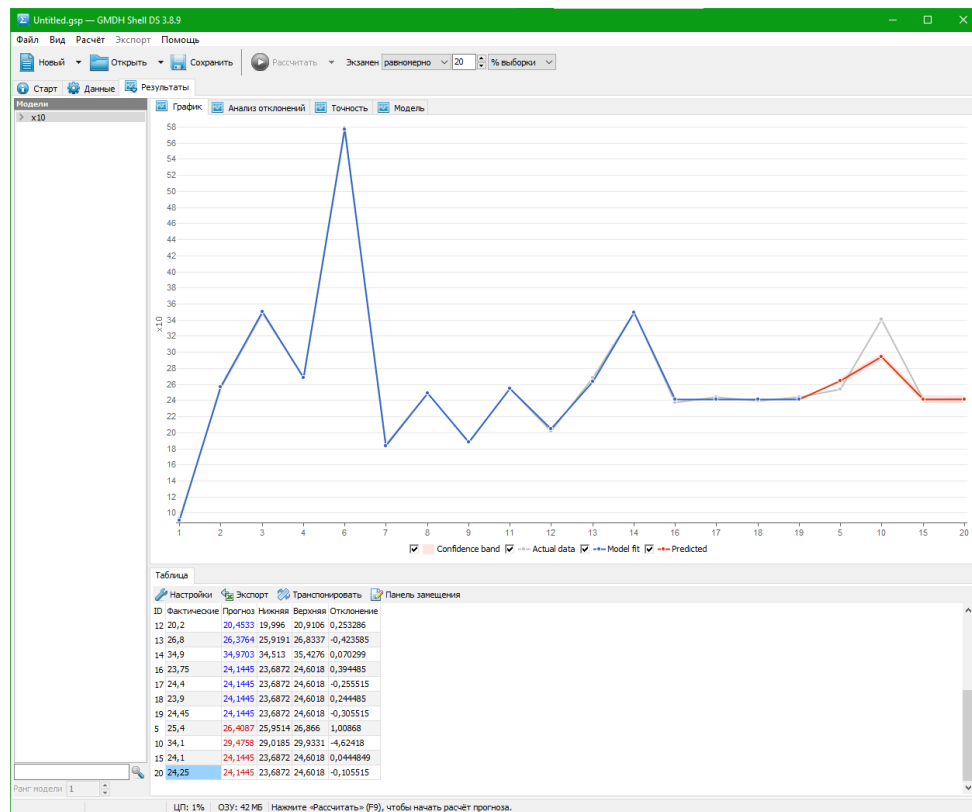


Рис. 3.6. Результат створення математичної моделі програмою GMDH Shell DS

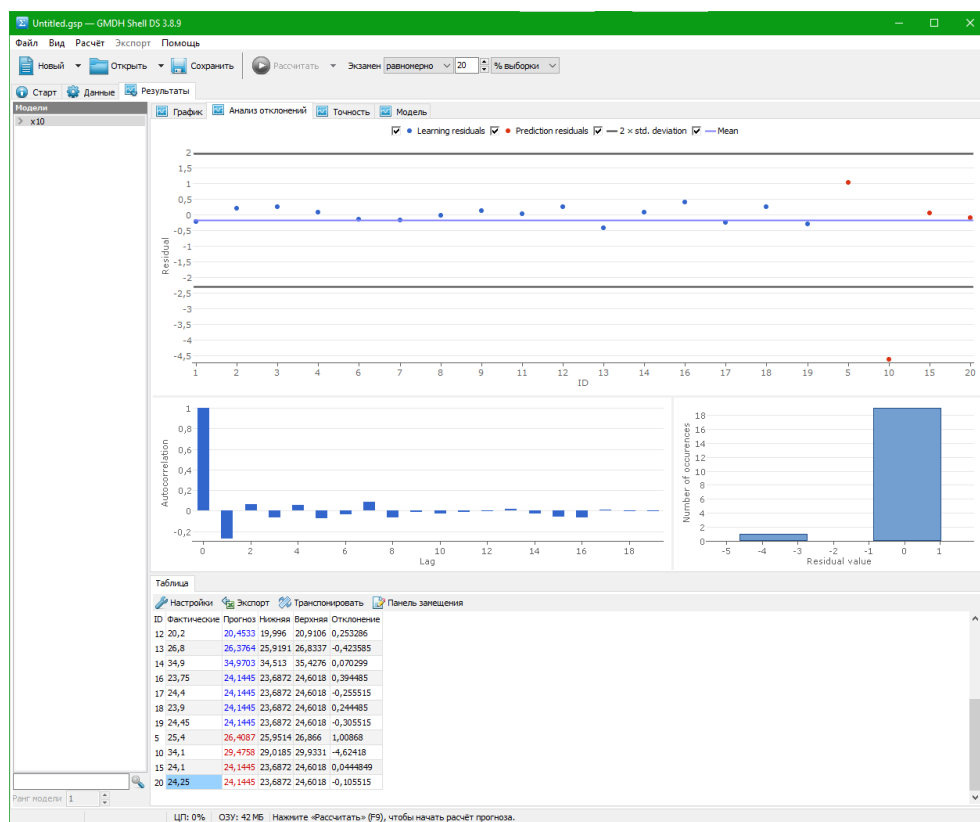


Рис. 3.7. Анализ відхилень математичної моделі програмою GMDH Shell DS

Таким чином в результаті роботи програми GMDH Shell отримаємо математичну модель що описує процес.

3.3. Програмна реалізація обробки результатів дослідження

Для швидкої обробки результатів експериментальних досліджень було створено програму OrtRotCalc в середовищі MatLab, що дозволяє швидко та з мінімальною похибкою проаналізувати отримані в результаті експерименту дані та створити математичну модель на їх основі. Текст програми наведений в додатку Г.

Інтерфейс програми – текстовий. Програма передбачає інтерактивний вибір побудови математичної моделі (вибір початкових даних) й на виході представляє інформацію про результат моделювання, перевірку вхідних даних на адекватність. В окремих вікнах відображаються побудовані графіки у вигляді ілюстрацій.

Задача котру вирішує програма – виконання обробки результатів експерименту, представлення результатів моделювання, візуалізація отриманих результатів в межах поточного дослідження.

По суті обробка отриманих результатів зводиться до двох етапів. Перший – оцінка адекватності отриманої моделі та результатів експериментального дослідження за алгоритмом описаним в розділі 3.3. Другий – оптимізація отриманих моделей й візуалізація результатів у вигляді графіків та таблиць.

Для написання програм обробки результатів досліджень та оптимізації математичної моделі використано мову програмування MATLAB. В результаті створено три програмних компоненти.

Як вхідні дані програма приймає таблиці ортогонального та рототабельного планів в кодованій шкалі виміру, а також результати експерименту у вигляді таблиці. Дані зручно попередньо імпортувати в середовище MatLab та записати в окремий файл.

Перший виконує аналіз початкових даних та генерує математичні моделі основуючись на алгоритмах обробки планів факторних експериментів другого порядку.

Результатом роботи першого програмного компоненту є оцінка вхідних даних, представлення математичної моделі у вигляді полінома другого ступеня.

Другий компонент призначений безпосередньо для роботи з отриманою математичною моделлю. А саме для її оптимізації та візуалізації різноманітних даних на основі отриманої моделі. На жаль на даному етапі розвитку програмного компоненту необхідно вручну вводити отримані на попередньому етапі математичні моделі.

Результатом роботи другого компоненту є виведення результатів оптимізації моделі, та побудова й візуалізація графіків (дво- та тривимірних), що дозволяють оцінити результати моделювання.

Третій компонент призначений для візуалізації додаткових графіків отриманої математичної моделі, а також для побудови профілограм досліджуваних зразків. Тут як вхідні данні можуть використовуватись як створені вище математичні моделі так і данні для побудови профілограм.

Результатом роботи останнього компоненту є наведення графіків за вказаними параметрами

Враховуючи особливості обраної мови програмування вимоги до апаратного забезпечення відповідають вимогами для використання безпосередньо пакету ПЗ MatLab. Таким чином мінімальні вимоги для запуску програми наступні:

- Наявність перед встановленого комплексу ПЗ MatLab
- Операційна система Windows 7
- Оперативна пам'ять 4 ГБ
- Пам'ять на диску 8 ГБ
- Розрядність ОС x64

В цілому робота програм повторює порядок аналізу математичних моделей описаний в розділі 3.1.4, а також реалізує обробку вимірів описану в розділах 3.1.2 та 3.1.3.

Окремим компонентом готової програми є візуалізація графічних даних. Створена програма дозволяє візуалізувати як раніше зібрані дані (профіль поверхні

отриманий профілометром) так і динамічна будувати тривимірні графіки по отриманих математичних моделях.

Висновки до розділу

Для об'єктивної обробки результатів експериментів та побудови математичної моделі обрано три методи побудови математичних моделей: ортогональне планування другого порядку, рототабельне планування другого порядку, метод групового врахування аргументів.

Розглянуто методи рототабельного та ортогонального планування, що дозволило створити відповідні алгоритми обробки результатів дослідження використані в створеній програмі.

Окремо розглянуто методи аналізу якості математичних моделей та зібраних в результаті експерименту даних, що дозволяє побудувати математичні моделі високої якості.

Розглянуто метод евристичної самоорганізації що дозволило обрати програму для обробки результатів дослідження. Проведено літературний пошук за результатами якого наведено найбільш розповсюджені програми і їх компоненти для побудови математичних моделей методом групового врахування аргументів. З описаного переліку вибрано програму GMDH Shell DS, що реалізує метод МГВА й дозволяє на основі нього побудувати математичну модель.

Для побудови математичних моделей на основі планів повного факторного експерименту другого порядку написано програму OrtRotCalc на мові програмування MATLAB. Створена програма має текстовий інтерфейс, складається з трьох компонентів, котрі вирішують наступні задачі: аналіз зібраних даних; побудова математичних моделей за рототабельними та ортогональним планами другого порядку; оптимізація отриманих математичних моделей методом градієнтного спуску, критерієм оптимізації є мінімізація параметру шорсткості; візуалізація графіків за отриманими математичними моделями та візуалізація

виміряних профілограм. Що дозволяє швидко, обробити результати отримані в ході експериментів.

РОЗДІЛ 4.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ЗА ЗАПРОПОНОВАНОЮ МЕТОДИКОЮ

4.1. Алгоритм проведення дослідження

Проведення експериментального дослідження один із найважливіших етапів виконання дослідницької роботи. Й включає в себе наступні етапи:

- Підготовка до експерименту.
- Проведення експерименту.
- Збір і систематизація результатів (проведення вимірів).
- Обробка експериментальних даних.
- Побудова математичних моделей.
- Оптимізація математичних моделей.
- Аналіз отриманих результатів.

Розглянемо наведені етапи детальніше. Підготовка до проведення експерименту включає в себе підготовку креслень досліджуваного зразка, плану проведення експерименту, а також підготовку дослідного стенду. Тобто необхідно, щоб станом на початок проведення експериментального дослідження експериментальна установка в цілому та всі її системи й допоміжні пристрої були готові до роботи, налагоджені й випробувані в режимах проведення експерименту.

Саме проведення експерименту до банального просте необхідно лише слідкувати за правильністю задання параметрів виконання дослідження згідно плану експерименту. Та слідкувати за дотриманням обраних режимів.

Збір результатів для кожного дослідження відрізняється. В деяких випадках збір результатів можливий лише в процесі роботи установки, в інших можна відразу виконати всі експерименти і зібрати результати пізніше. Під терміном збір результатів мається на увазі проведення вимірів для оцінки результату проведеного дослідження. Перед початком процесу вимірювання необхідно визначити які параметри і яким чином будуть виміряні, скільки повторень вимірювань буде проведено які

інструменти при цьому будуть використовуватись. Систематизація результатів проводиться в зручному для обробки вигляді, зазвичай у вигляді таблиці. Доцільно також проводити мінімальний аналіз отриманих результатів, щоб пізніше не витрачати лишній час на побудову моделей за неактуальними даними. Так при дослідженні одразу кількох параметрів якщо після проведення вимірів видно, що вплив обраних факторів на параметр реально малий або взагалі відсутній, зібрані результати за цим параметром можна відкинути й не проводити відповідну обробку результатів надалі.

Обробка експериментальних даних також досить важливий етап проведення дослідження. Фактично являє собою перевірку та за необхідності виправлення (через повторення експерименту) отриманих результатів й перевірку їх на адекватність й наявність критичних відхилень, описана в розділі 3.1.4. В результаті цієї обробки отримаємо вибірки котрі можна використовувати для подальшого моделювання.

Побудова математичних моделей заключається в реалізації обраного методу моделювання з використанням отриманих результатів. Реалізувати метод побудови математичної моделі можна трьома шляхами – розрахунок моделі в ручну, що не доцільно хоча б за наявністю людського фактору та часу затраченого на роботу з великим об'ємом даних; побудова моделі з використанням готового програмного забезпечення, один з найоптимальніших варіантів за критерієм трудозатрат проте не завжди можна реалізувати; написання програмного додатку що реалізує обраний метод при роботі з великими об'ємами даних дозволяє досить серйозно зекономити затрачений на розрахунки час. На даному етапі також важливо перевіряти отримані моделі на адекватність опису.

Оптимізація моделей показує розраховані оптимальні значення параметрів процесу за вибраним критерієм оптимальності (мінімізація значення шорсткості наприклад). В деяких дослідженнях доцільно використовувати одразу дві сторони оптимізації (тобто мінімізацію й максимізацію отриманого результату) для кращого розуміння впливу досліджуваних параметрів на результат.

Аналіз отриманих результатів показує як впливають ті чи інші досліджувані параметри, їх поєднання на отриманий результат. В результаті аналізу фактично дослідник наводить обґрунтований опис процесу й як наслідок може підтвердити або спростувати наведені раніше гіпотези, показати доцільність використання того чи іншого запропонованого методу.

4.2 Проведення експериментальних досліджень.

Для поточного дослідження важливо підготувати необхідну кількість 3D моделей за спроектованим кресленням досліджуваного зразка (наведено в додатку Д).

На рисунку 4.1 наведено фото 3D моделі друкованого зразка. Цифра на кожному із зразків відрізняється й відображає номер досліджуваного зразка (досліді).

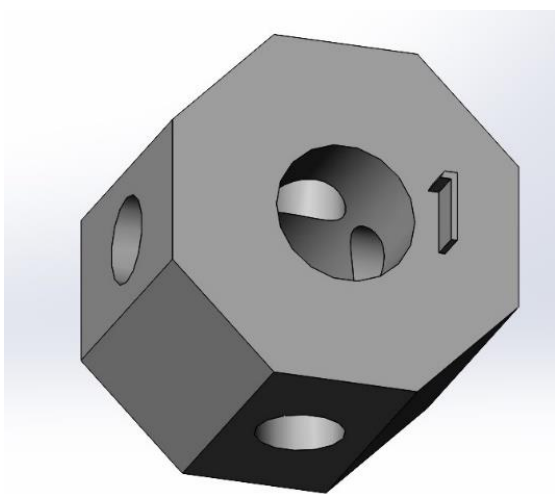


Рис. 4.1. Зображення 3D моделі зразка №1

Використання в дослідженнях планів ПФЕ вищих порядків дозволяє побудувати один цілісний план. Результати втілення якого підійдуть для використання одразу обома видами планування. В таблиці 4.1 наведено порівняння ядер рототабельного та ортогонального планування. Відповідно маємо дві таблиці планування для рототабельного та ортогонально (додаток А)

планів. Рототабельний план (наведено в додатку Б) за структурою частково включає в себе ортогональне планування. З порівняння таблиць можна бачити, що єдина відмінність між планами відстань в зіркових точках, при чому різниця складає всього 30% і в деяких дослідженнях можна знехтувати цією відмінністю. Таким чином зведений план міститиме 39 дослідів.

Таблиця 4.1 Порівняння ядра ортогонального та рототабельного планування

Рототабельне планування					Ортогональне планування				
Дослід	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	Дослід	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄
Класичний ПФЕ	-1	-1	-1	-1	Класичний ПФЕ	-1	-1	-1	-1
	1	-1	-1	-1		1	-1	-1	-1
	-1	1	-1	-1		-1	1	-1	-1
	1	1	-1	-1		1	1	-1	-1
	-1	-1	1	-1		-1	-1	1	-1
	1	-1	1	-1		1	-1	1	-1
	-1	1	1	-1		-1	1	1	-1
	1	1	1	-1		1	1	1	-1
	-1	-1	-1	1		-1	-1	-1	1
	1	-1	-1	1		1	-1	-1	1
	-1	1	-1	1		-1	1	-1	1
	1	1	-1	1		1	1	-1	1
	-1	-1	1	1		-1	-1	1	1
	1	-1	1	1		1	-1	1	1
	-1	1	1	1		-1	1	1	1
	1	1	1	1		1	1	1	1
Зіркові точки	-2	0	0	0	Зіркові точки	-1.4142	0	0	0
	2	0	0	0		1.4142	0	0	0
	0	-2	0	0		0	-1.4142	0	0
	0	2	0	0		0	1.4142	0	0
	0	0	-2	0		0	0	-1.4142	0
	0	0	2	0		0	0	1.4142	0
	0	0	0	-2		0	0	0	-1.4142
	0	0	0	2		0	0	0	1.4142
Нульова точка	0	0	0	0	Нульова точка	0	0	0	0
	0	0	0	0					
	0	0	0	0					
	0	0	0	0					
	0	0	0	0					
	0	0	0	0					
	0	0	0	0					

Але для виконання експерименту необхідно сформулювати план в натуральній шкалі. На його формування впливає два фактори які необхідно враховувати при виборі діапазону зміни параметрів – перший всі контрольовані фактори в експериментальному дослідженні не повинні виходити за діапазони можливостей процесу. Другий – обрані діапазони повинні бути в рамках які можна реалізувати

створеною дослідною установкою. Для цього треба розуміти реальні використовувані діапазони роботи систем. Так температура друку не може бути меншою температури плавлення пластику. Їй зазвичай становить 200 – 250 °С. Температура нагріву стола в виробництві зазвичай використовують з діапазону 20 – 70 °С. Варто зауважити, що нижня границя діапазону відображає повністю відключений нагрів стола, зрозуміло що цей параметр відображатиме кімнатну температуру. З температурою нагрівача все трохи складніше, так як цей параметр не використовується в промисловому виробництві. Тому пропонується обрати діапазон вимірювання змінних аналогічний діапазону температури стола. Діапазон швидкості друку обрано спираючись на класичний робочий діапазон швидкості. На основі цих даних в таблиці 4.2 наведено діапазони вимірювання змінних.

Таблиця 4.2 Діапазони вимірювання змінних.

Назва параметра	Мінімальне значення	Максимальне значення	Середнє	Позначення
Температура друку	200	240	220	x_1
Температура стола	25	70	47.5	x_2
Температура нагрівача	25	70	47.5	x_3
Швидкість друку	30	60	45	x_4

Варто зазначити, наведені в таблиці діапазони не є граничними, що дозволяє без перешкод виконати переведення планів в натуральну шкалу виміру.

Зрозуміло, що значення на границях діапазону відповідають значенням плану наступним чином: -1 – нижня границя, 1 – верхня границя. Скориставшись формулами (посилання буде пізніше) розрахуємо проміжні значення й переведемо план в натуральну шкалу вимірювання змінних. Для кращої об'єктивності експерименту рандомізуємо порядок виконання дослідів (таблиця 4.3). Літерою «О» в колонці «номер дослідів» позначено додані експерименти за ортогональним планом. Всі значення в таблиці наведені з врахуванням округлення до розрядності котру може обробити програма керування 3D принтером.

Таблиця 4.3. План проведення дослідження в натуральній шкалі вимірювання

Номер досліджу	x1(Температура друку)	x2(Температура стола)	x3(Температура нагрівача)	x4(Швидкість друку)
27	220	47.5	47.5	45
12	240	70	25	60
16	240	70	70	60
25	220	47.5	47.5	45
23	220	47.5	47.5	15
10	240	25	25	60
8	240	70	70	30
30	220	47.5	47.5	45
26	220	47.5	47.5	45
22	220	47.5	92.5	45
28	220	47.5	47.5	45
21	220	47.5	2.5	45
17O	191.8	47.5	47.5	45
15	200	70	70	60
22O	220	47.5	79.3	45
1	200	25	25	30
20O	220	79.3	47.5	45
21O	220	47.5	15.7	45
18	260	47.5	47.5	45
24	220	47.5	47.5	75
4	240	70	25	30
20	220	92.5	47.5	45
9	200	25	25	60
6	240	25	70	30
24O	220	47.5	47.5	66.2
14	240	25	70	60
5	200	25	70	30
13	200	25	70	60
29	220	47.5	47.5	45
31	220	47.5	47.5	45
17	180	47.5	47.5	45
19	220	2.5	47.5	45
11	200	70	25	60
3	200	70	25	30
2	240	25	25	30
7	200	70	70	30
18O	248.3	47.5	47.5	45
19O	220	15.7	47.5	45
23O	220	47.5	47.5	23.8

Як вже описано вище для проведення дослідів на рівні з готовим планом також необхідно, щоб був готовий досліджуваний стенд. На рисунку 4.2 наведено світлину експериментальної установки.

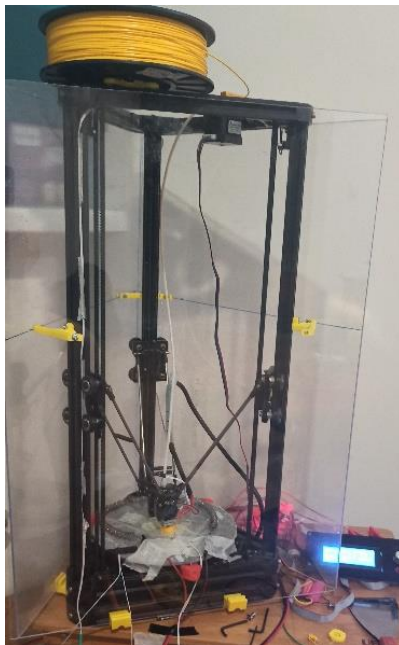


Рис. 4.2. Світлина досліджуваного стенду

Процес виконання експерименту (друкування зразка) зображено на рисунку 4.3.



Рис. 4.3. Світлина процесу друкування деталі.

По завершенню проведення експериментів (використовуючи план наведений в таблиці 4.3) отримано 39 зразків зображених на рисунку 4.4.



Рис. 4.4. Загальний вигляд надрукованих зразків

Розглянемо результати друку детальніше. Світлина отриманих зразків зображена рисунком 4.5.



Рис. 4.5. Світлина отриманих зразків 1,6,11,18 крупним планом.

Можна бачити що якість поверхонь отриманих зразків суттєво відрізняється одне від одного. Варто також зауважити, що якість цифр для зразків 6 й 18 вийшла кращою ніж для зразків 1 та 11. Справа в тому, що цифри з надруковані краще друкувались із набагато меншою швидкістю друку (15 мм/с). Варто зауважити, в даному випадку мінімальною була лише швидкість друкування цифр, тоді як швидкість друку поверхні відповідає наведеній в плані експерименту.

4.3. Методика визначення параметрів якості поверхневого шару деталей

Після проведення експерименту необхідно зібрати результати. Для цього може використовуватись безліч інструментарію починаючи від еталонних лінійок закінчуючи профілометрами та електронними мікроскопами. Дослідження безпосередньо поверхонь вимагає використання дорогого обладнання. Для проведення такого дослідження можна використовувати профілографи, інтерферометри, мікрометри на індикаторних стійках. Без сумнів один із найкращих приладів для вимірювання якості поверхні – профілометр. Даний прилад дозволяє відобразити одразу декілька параметрів – шорсткість поверхні, а також її профілограма (фактично карта бугрів та впадин). Процес вимірювання шорсткості поверхні деталі слід виконувати спеціалізованим



Рис. 4.6. Зображення профілометра MarSuf PS1.

інструментом таким як профілометр MarSurf PS1 що зображений на рисунку 4.6. Дана модель профілометра є зручною, часто використовується для досліджень якості поверхонь отриманих деталей. Суттєвою перевагою даного профілометра є вбудований акумулятор як додаткове джерело живлення, що сильно підвищує мобільність установки,

простий в використанні інтерфейс дозволяє в короткі строки освоїти основні функції та налаштування приладу.

Характеристики профілометра:

- одиниці вимірювання: метричні і дюймові;
- принцип вимірювання: методом обмацування;
- датчик: індуктивно опорний датчик;
- радіус голки щупа 2 мкм (80 in);
- вимірювальне зусилля $\sim 0,7$ мН;
- вимірювані параметри: R_a , R_q , R_z відпов. R_y (JIS), R_z (JIS) (з допусковим контролем), R_{max} , R_p , R_p (ASME), R_{pm} (ASME), R_{pk} , R_k , R_{vk} , M_{r1} , M_{r2} , A_1 , A_2 , V_o , R_t , R_{3z} , R_{Pc} , R_{mr} соотв. t_p (JIS, ASME), R_{Sm} , R , A_r , R_x ;
- діапазон вимірювання: 350 мкм, 180 мкм, 90 мкм;
- роздільна здатність профілю: 32 nm, 16 nm, 8 nm;
- довжина трасування L_t : 1.75 мм, 5.6 мм, 17.5 мм;
- довжина трасування (MOTIF): 1 мм, 2 мм, 4 мм, 8 мм, 12 мм, 16 мм;
- довжина оцінки l_n (0.050 in, 0.15 in, 0.50 in);
- число базових довжин n за вибором від 1 до 5;
- функція калібрування: динамічна;
- обсяг пам'яті максимум: 15 профілів, 20000 результатів вимірювань.

Сучасні профілометри окрім значення шорсткості дозволяють одразу отримати профілограму поверхні. Шорсткість поверхні за означенням – характеристика нерівностей, що виражається числовими величинами, котрі характеризують ступінь їхнього відхилення від теоретично гладких поверхонь заданої геометричної форми.

Міждержавним стандартом ГОСТ 2789-73 визначено номенклатуру з 6-ти параметрів оцінки шорсткості поверхні, з яких для характеристики шорсткості вибирається один або декілька. При цьому перевага надається першому. Такі параметри бувають висотними: R_a – середнє арифметичне відхилення профілю; R_z – висота нерівностей профілю по 10 точках (середнє значення п'яти найбільших висот та впадин); R_{max} – найбільша висота профілю. Та крокові: S – середній крок виступів профілю; S_m – середній крок нерівностей профілю по середній лінії. Електронні засоби, що сьогодні використовуються для вимірювання шорсткості

дозволяють відразу отримати результат по одному з показників. Для деталей отриманих 3D друком доцільно використовувати параметр R_a , даний параметр характеризує середнє значення нерівностей. Отримана профілограма сьогодні являється побічним, не обов'язковим, результатом вимірів і характеризує реальний вигляд відхилення профілю поверхні по середній лінії. [54,22,23] .

Методика вимірювань шорсткості за допомогою профілометра MarSurf PS1 є наступною: спочатку необхідно встановити профілометр у вимірювальний стенд; слідуючим кроком встановлюється щуп відповідної точності в профілометр; далі об'єкт вимірювань закріплюється в пристосуванні; на наступному кроці за допомогою механізму переміщення стола, підводиться до щупа профілометра до доторку (бажано в середину діапазону вертикального переміщення щупа); після чого на профілометрі проводяться налаштування вимірювання, такі як параметр, довжина вимірювання, необхідність збереження профілю поверхні, тощо; останнім етапом є запуск вимірювання, після проведення якого профілометр видає результат як числове значення на екрані, і зберігає в пам'яті данні вимірювання в файл в якому міститься сам результат, додаткові параметри, а також координати вершин профілограми. При проведенні вимірів профілометр визначав параметр R_a з наступними параметрами профілометра: довжина проходу $L_t=1.75$ мм, відсічення $L_c=0.8$ мм.

На рисунку 4.7 наведено світлину вимірювального стенду.



Рис. 4.7. Загальний вигляд вимірювального стенду з встановленим зразком

Схема вимірювання зображена на рисунку 4.8. Процес вимірювання шорсткості зображено на рисунку 4.9.

Отримані результати вимірювання було систематизовано в таблицю 4.4. Параметри Ra_1 , Ra_2 та Ra_3 – відображають шорсткість поверхні досліджуваних зразків в трьох напрямках..

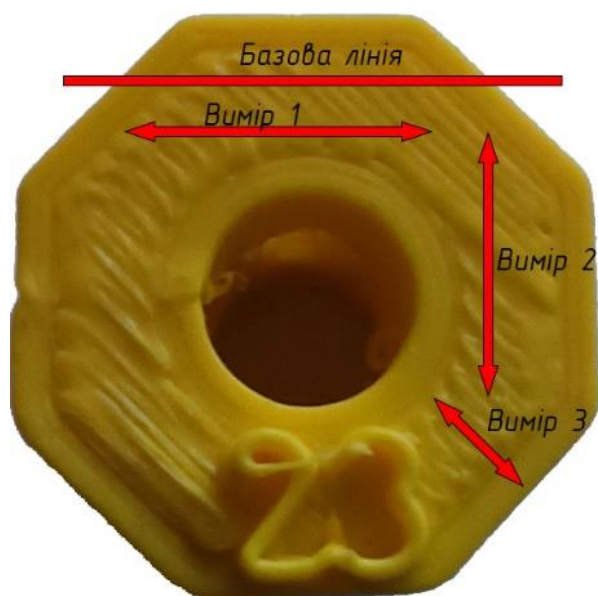


Рис. 4.8. Схема вимірювання досліджуваного зразку



а



б

Рис. 4.9. Світлини процесу вимірювання шорсткості.

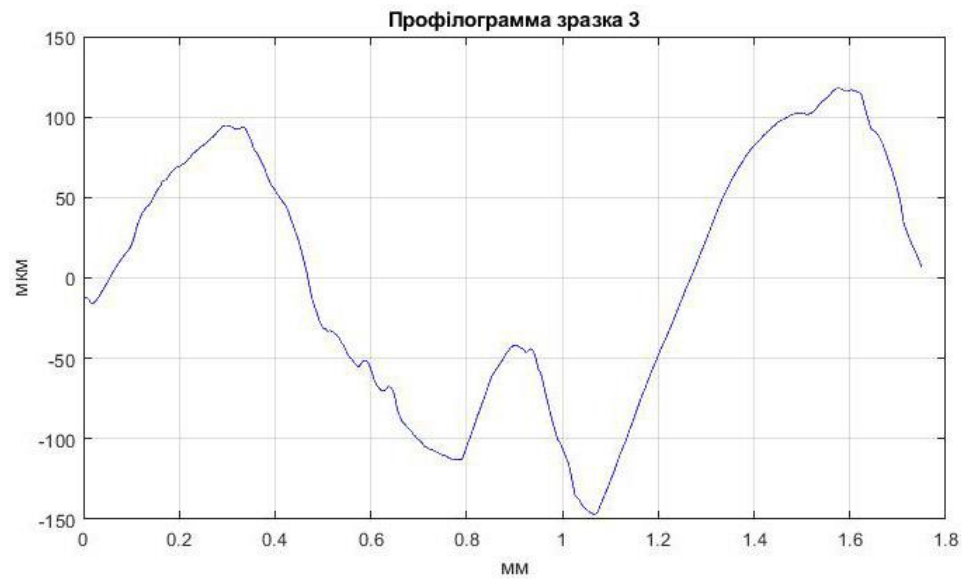
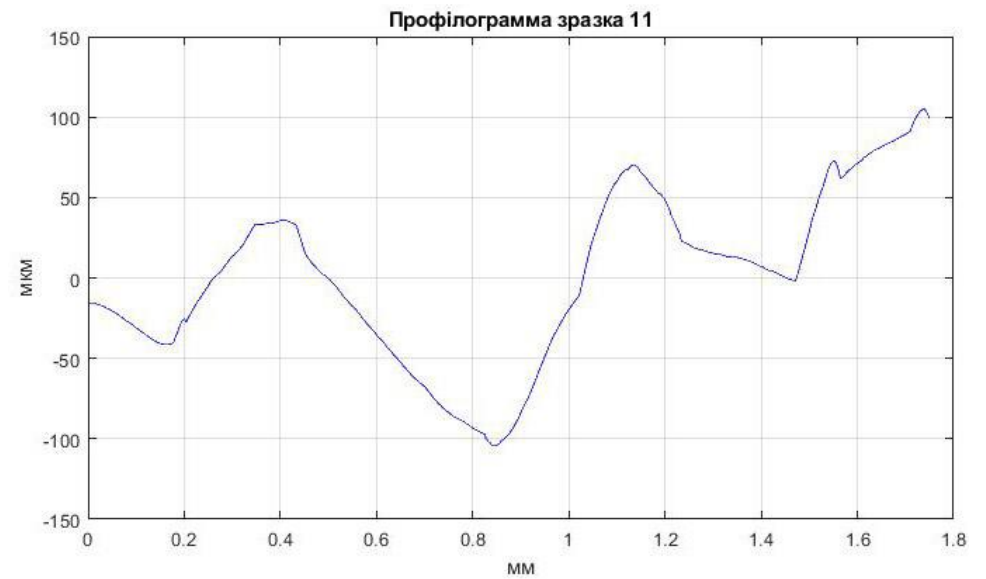
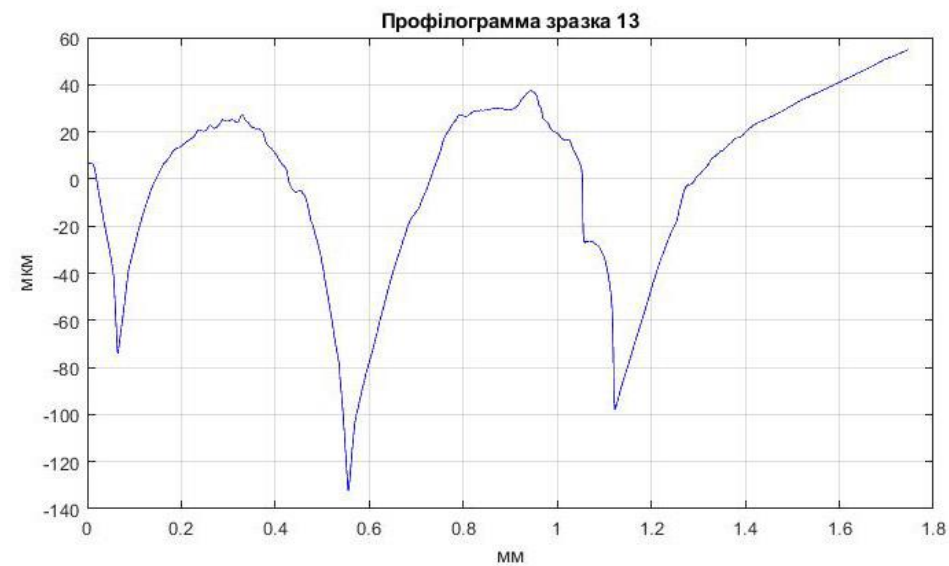
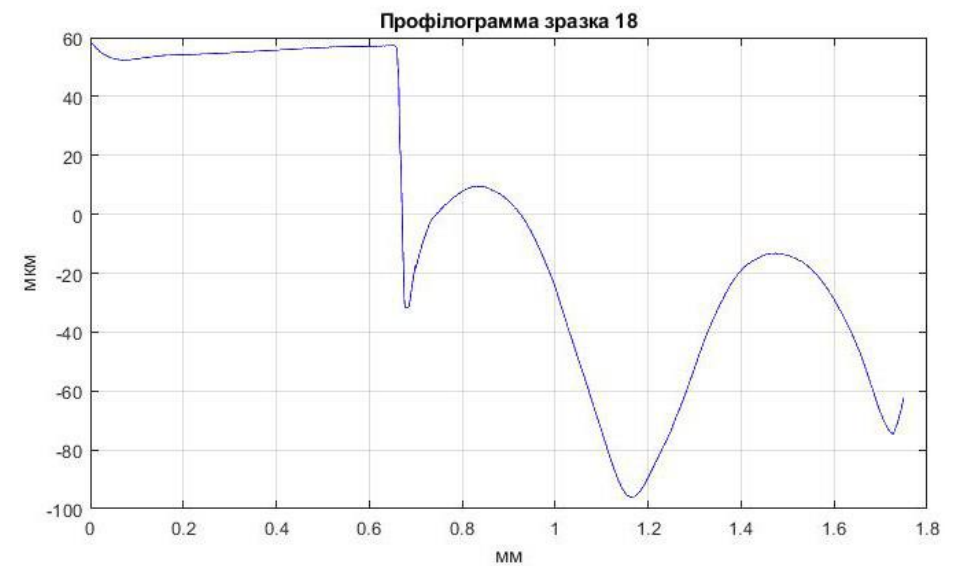
Всі вимірювання проводились відносно базової лінії котра є паралельною до номера зразка. Таким чином вимір один що паралельний до базової лінії відображає параметр Ra_1 й характеризує горизонт поверхні (те на скільки рівно лягли нитки пластику одна відносно одної). Вимір 2 проводиться перпендикулярно до базової лінії й відображає параметр Ra_2 , характеризує горизонт поверхні в іншому напрямі. Вимір 3 в свою чергу проводиться під кутом 45° до базової лінії й фактично є паралельним рисці заповнення, відображає параметр Ra_3 , характеризує шорсткість поверхні однієї нитки пластику.

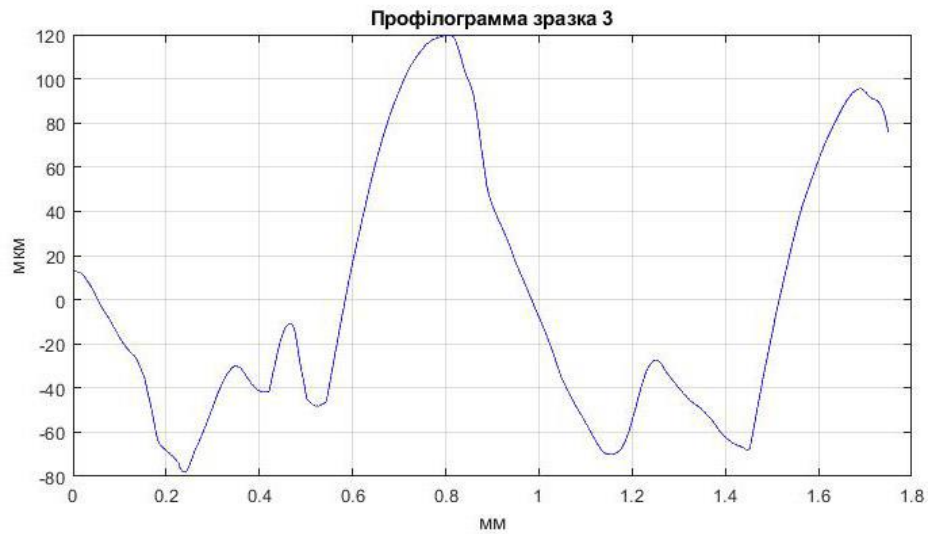
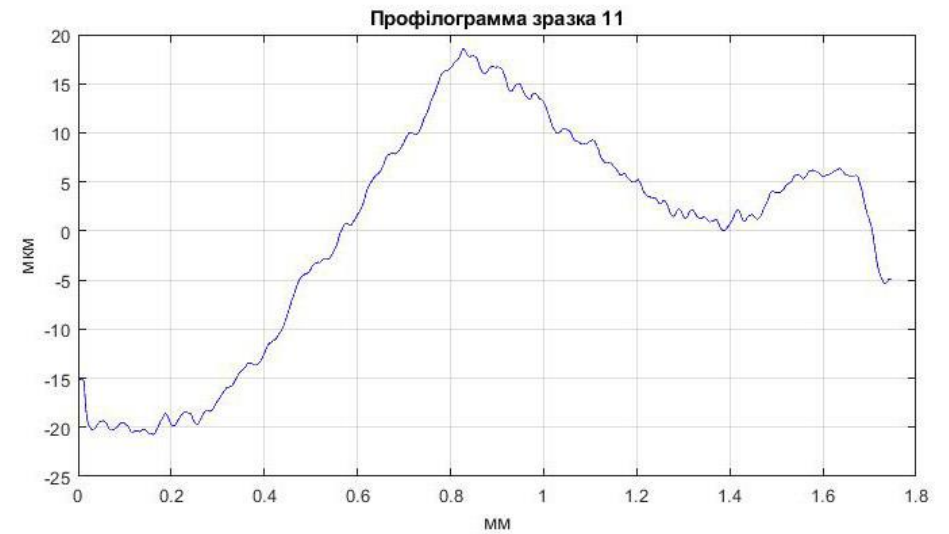
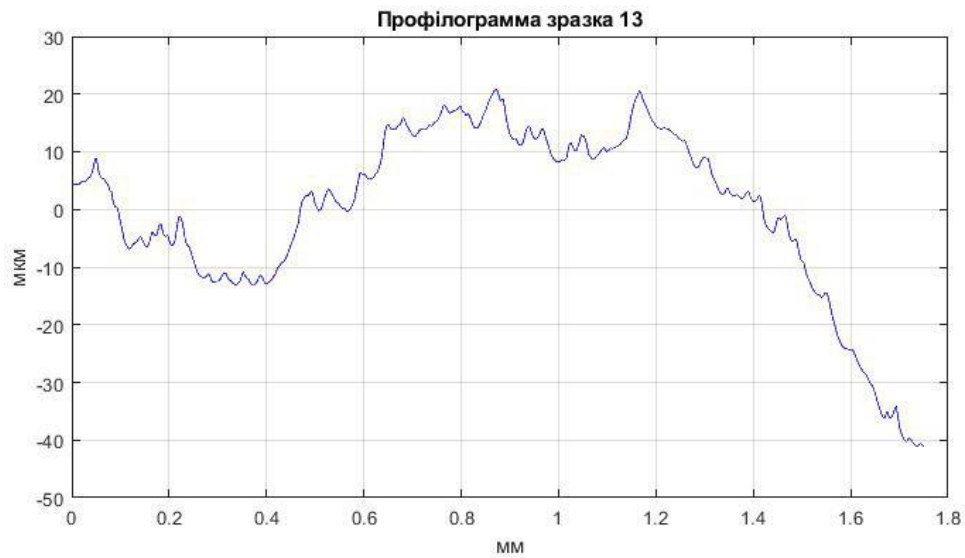
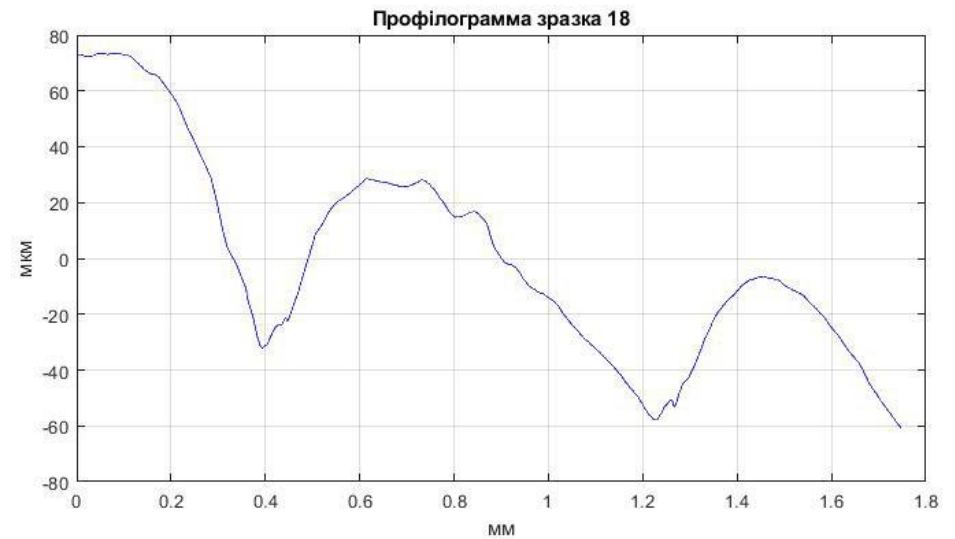
Таблиця 4.4 Результати вимірювання шорсткості зразків

№ Досліду	Ra_1	Ra_2	Ra_3	№ Досліду	Ra_1	Ra_2	Ra_3
1	5.674	3.145	2.748	21	4.286	4.067	3.336
2	4.993	5.027	3.716	22	2.250	2.750	0.632
3	5.959	3.360	6.920	23	3.039	2.280	0.180
4	1.122	3.851	1.285	24	3.900	1.547	0.929
5	2.357	3.392	1.285	25	2.050	4.365	0.640
6	2.357	3.392	0.307	26	2.001	4.020	0.390
7	2.321	2.824	0.747	27	2.346	1.955	0.889
8	1.902	1.968	1.919	28	2.415	2.351	1.265
9	3.859	3.544	1.800	29	3.476	2.167	1.065
10	4.041	2.018	1.647	30	1.982	1.942	0.345
11	3.935	2.764	0.523	31	2.240	2.467	0.895
12	3.028	2.042	0.892	170	3.609	4.321	0.472
13	4.257	5.640	1.570	180	1.821	3.623	0.320
14	2.009	2.120	0.821	190	2.418	4.968	0.360
15	2.209	4.572	2.055	200	1.428	3.964	1.371
16	2.676	2.345	0.766	210	3.683	4.092	2.188
17	5.155	2.842	0.606	220	1.647	3.900	0.225
18	1.481	3.928	1.103	230	2.900	2.709	0.328
19	2.385	4.777	0.268	240	2.835	2.291	0.775
20	2.668	2.980	0.858				

Разом з із значенням шорсткості поверхні було отримано їх профілограми. На рисунках 4.10 - 4.12 зображено профілограми деталей з найгіршим показником шорсткості (по виміру Ra_1), на рисунку 4.13 показана профілограма зразка з найкращою отриманою шорсткістю.

На рисунках 4.14-4.16 зображено профілограми деталей з найгіршим показником шорсткості (по виміру Ra_3), на рисунку 4.17 показана профілограма зразка з найкращою отриманою шорсткістю

Рис. 4.10. Профілограмма зразка 3 (вимір Ra_1)Рис. 4.11. Профілограмма зразка 11 (вимір Ra_1)Рис. 4.12. Профілограмма зразка 13 (вимір Ra_1)Рис. 4.13. Профілограмма зразка 18 (вимір Ra_1)

Рис. 4.14. Профілограмма зразка 3 (вимір Ra_3)Рис. 4.15. Профілограмма зразка 11 (вимір Ra_3)Рис. 4.16 Профілограмма зразка 13 (вимір Ra_3)Рис. 4.17. Профілограмма зразка 18 (вимір Ra_3)

4.4. Математичні моделі параметрів якості.

Виконано обробку результатів експериментів (таблиця 4.4), в результаті чого отримано математичні моделі. На основі цих моделей можна зробити початкові висновки про сам об'єкт дослідження, а також про вплив описаних у моделі факторів на результат. Так як досліджувана поверхня формується з багатьох ниток котрі по суті накладаються на попередній шар. Шорсткість поверхні залежить від двох критичних факторів – розтікання нитки після друку та точність горизонту підкладки. Фактично сукупність отриманих моделей характеризує ці два фактори і як наслідок якість формування поверхні в цілому. Параметри Ra_1 та Ra_2 характеризують розташування ниток одна відносно одної а також їх поперечну форму. Параметр Ra_3 в свою чергу характеризує «гладкість» поверхні нитки. Варто зазначити, що під позитивним впливом на шорсткість мається на увазі її (шорсткості) зменшення. А під негативним впливом – збільшення.

4.4.1. Моделювання засобами ортогонального планування

Особливістю моделювання шляхом повних факторних експериментів є те, що початкова модель отримується в кодованій шкалі виміру. Це з одного боку ускладнює роботу з моделлю (так як змінні треба вказувати в кодованій шкалі) з іншого ж – дозволяє визначити реальний вплив параметрів на отриманий результат.

Проведено аналіз початкових даних, що використовувались при моделюванні. Визначено, що виміри за t -критерієм Стьюдента однорідні.

Математична модель, в кодованій шкалі, що побудована на вимірах Ra_1 представлена залежністю (4.1)

$$\begin{aligned}
 y_{Ra_1} = & 2.715 - 0.632x_1 - 0.350x_2 - 0.720x_3 - 0.023x_4 + \\
 & + 0.230(x_1^2 - \frac{4}{5}) - 0.166(x_2^2 - \frac{4}{5}) + 0.205(x_3^2 - \frac{4}{5}) + 0.306(x_4^2 - \frac{4}{5}) - \\
 & - 0.122x_1x_2 + 0.190x_1x_3 + 0.277x_1x_4 + 0.228x_2x_3 + 0.047x_2x_4 + 0.381x_3x_4
 \end{aligned} \quad (4.1)$$

Проведено аналіз математичної моделі в результаті якого визначено: дисперсії моделі (за G-критерієм Кохрена) однорідні; всі коефіцієнти моделі статистично значимі; модель (за F-критерієм Фішера) адекватно описує досліджуваний процес.

З моделі видно, що самостійний вплив досліджуваних параметрів позитивно впливає на шорсткість деталі. В той же час поєднання параметрів x_1x_3 , x_1x_4 , x_2x_3 , x_2x_4 , x_3x_4 має навпаки негативний вплив. В даній моделі всі коефіцієнти значущі. Середнє значення відносної похибки моделювання становить 10,3%.

Математична модель в кодованій шкалі, побудована на вимірах Ra_2 представлена залежністю (4.2).

$$y_{Ra_2} = 3.637 - 0.247x_1 - 0.355x_2 - 0.068x_3 - 0.148x_4 + \\ + 0.039(x_1^2 - \frac{4}{5}) + 0.286(x_2^2 - \frac{4}{5}) + 0.051(x_3^2 - \frac{4}{5}) - 0.697(x_4^2 - \frac{4}{5}) - \\ - 0.009x_1x_2 - 0.420x_1x_3 - 0.595x_1x_4 - 0.070x_2x_3 + 0.085x_2x_4 + 0.507x_3x_4 \quad (4.2)$$

Проведено аналіз математичної моделі в результаті якого визначено: дисперсії моделі (за G-критерієм Кохрена) однорідні; всі коефіцієнти моделі статистично значимі; модель (за F-критерієм Фішера) адекватно описує досліджуваний процес.

Так само як і в попередній моделі, самостійний вплив досліджуваних параметрів на шорсткість позитивний. В той же час на відміну від попередньої моделі негативно впливає лише поєднання параметрів x_2x_4 , x_3x_4 . Середнє значення відносної похибки моделювання становить 8,9%

Математична модель, побудована на вимірах Ra_3 наведена залежністю (4.3)

$$y_{Ra_3} = 1.648 - 0.280x_1 + 0.102x_2 - 0.694x_3 - 0.390x_4 + \\ + 0.297(x_1^2 - \frac{4}{5}) + 0.151(x_2^2 - \frac{4}{5}) + 0.862(x_3^2 - \frac{4}{5}) + 0.147(x_4^2 - \frac{4}{5}) - \\ - 0.279x_1x_2 + 0.163x_1x_3 + 0.166x_1x_4 + 0.112x_2x_3 - 0.276x_2x_4 + 0.673x_3x_4 \quad (4.3)$$

Проведено аналіз математичної моделі в результаті якого визначено: дисперсії моделі (за G-критерієм Кохрена) однорідні; всі коефіцієнти моделі

статистично значимі; модель (за F-критерієм Фішера) адекватно описує досліджуваний процес.

З наведеної моделі можна побачити, що на шорсткість нитки позитивно впливають параметри x_1, x_3, x_4 та поєднання параметрів x_1x_2, x_2x_4 , в той же час як всі інші параметри і їх поєднання мають негативний вплив на результат. Середнє значення відносної похибки моделювання становить 11,1%

Підставивши формулу 4.2 в отримані моделі (4.1)-(4.3) отримаємо моделі в натуральній шкалі виміру (4.4) - (4.6).

$$\begin{aligned} Ra_1 = & 56.74 - 0.333T_1 + 0.0476T_2 - 0.235T_3 - 0.3873V + \\ & + 0.000575T_1^2 - 0.0003279T_2^2 + 0.000405T_3^2 + 0.00136V^2 - \\ & - 0.000271T_1T_2 + 0.00042T_1T_3 + 0.000923T_1V + 0.00045T_2T_3 + \\ & + 0.00014T_2V + 0.00113T_3V \end{aligned} \quad (4.4)$$

$$\begin{aligned} Ra_2 = & -18.264 + 0.079283T_1 - 0.069T_2 + 0.62195V + \\ & + 0.0001T_1^2 + 0.00056T_2^2 + 0.0001T_3^2 - 0.0031V^2 - \\ & - 0.00002T_1T_2 - 0.00093T_1T_3 - 0.002T_1V - 0.00014T_2T_3 + 0.00025T_2V + \\ & + 0.0015T_3V + 0.13171T_3 \end{aligned} \quad (4.5)$$

$$\begin{aligned} Ra_3 = & 53.555 - 0.35336T_1 + 0.1389T_2 - 0.37253T_3 - 0.2624V + \\ & + 0.0007425T_1^2 + 0.0003T_2^2 + 0.0017T_3^2 + 0.00065V^2 - 0.00062T_1T_2 + \\ & + 0.00036T_1T_3 + 0.00055T_1V + 0.00022T_2T_3 - 0.0008T_2V + 0.0019T_3V \end{aligned} \quad (4.6)$$

4.4.2. Моделювання засобами рототабельного планування

Проведено аналіз початкових даних, що використовувались при моделюванні. Визначено, що виміри за t -критерієм Стьюдента однорідні.

Математична модель, побудована на вимірах Ra_1 наведена залежністю (4.7)

$$\begin{aligned} y_{Ra_1} = & 2.359 - 0.616x_1 - 0.285x_2 - 0.650x_3 + 0.002x_4 + \\ & + 0.254x_1^2 + 0.056x_2^2 + 0.242x_3^2 + 0.292x_4^2 - \\ & - 0.122x_1x_2 + 0.190x_1x_3 + 0.277x_1x_4 + 0.228x_2x_3 + 0.047x_2x_4 + 0.381x_3x_4 \end{aligned} \quad (4.7)$$

Проведено аналіз математичної моделі в результаті якого визначено: дисперсії моделі (за G-критерієм Кохрена) однорідні; всі коефіцієнти моделі

статистично значимі; модель (за F-критерієм Фішера) адекватно описує досліджуваний процес.

В даній моделі видно, що параметри x_1 - x_3 позитивно впливають на шорсткість, тоді як параметр x_4 має незначний негативний вплив. Поєднання параметрів x_1x_2 позитивно впливають на шорсткість поверхні, тоді як інші мають негативний вплив. Середнє значення похибки моделювання становить 7,1%

Математична модель, побудована на вимірах Ra_2 наведена залежністю (4.8)

$$\begin{aligned} y_{Ra_2} = & 2.753 - 0.179x_1 - 0.339x_2 - 0.089x_3 - 0.141x_4 + \\ & + 0.175x_1^2 + 0.299x_2^2 + 0.181x_3^2 - 0.192x_4^2 - 0.009x_1x_2 - \\ & - 0.420x_1x_3 - 0.595x_1x_4 - 0.070x_2x_3 + 0.085x_2x_4 + 0.507x_3x_4 \end{aligned} \quad (4.8)$$

Проведено аналіз математичної моделі в результаті якого визначено: дисперсії моделі (за G-критерієм Кохрена) однорідні; всі коефіцієнти моделі статистично значимі; модель (за F-критерієм Фішера) адекватно описує досліджуваний процес.

Можна бачити, що за результатами моделювання на параметр Ra_2 самостійний вплив досліджуваних параметрів позитивний. Поєднання параметрів також має в основному позитивний вплив окрім параметрів x_2x_4, x_3x_4 .

Середнє значення похибки моделювання становить 5,9%

Математична модель, побудована на вимірах Ra_3 наведена залежністю (4.9)

$$\begin{aligned} y_{Ra_3} = & 1.784 - 0.221x_1 + 0.1x_2 - 0.645x_3 - 0.306x_4 + \\ & + 0.155x_1^2 + 0.082x_2^2 + 0.437x_3^2 + 0.08x_4^2 - 0.279x_1x_2 + \\ & + 0.163x_1x_3 + 0.166x_1x_4 + 0.112x_2x_3 - 0.276x_2x_4 + 0.673x_3x_4 \end{aligned} \quad (4.9)$$

Проведено аналіз математичної моделі в результаті якого визначено: дисперсії моделі (за G-критерієм Кохрена) однорідні; всі коефіцієнти моделі статистично значимі; модель (за F-критерієм Фішера) адекватно описує досліджуваний процес.

В результаті моделювання параметра Ra_3 видно що самостійний вплив параметрів процесу позитивно впливає на шорсткість, тоді як їх поєднання, окрім поєднання x_2x_4 , впливають негативно. Середнє значення похибки моделювання становить 6,5%

Підставивши формулу 4.2 в отримані моделі (4.7)-(4.9) отримаємо моделі в натуральній шкалі виміру (4.10)-(4.12).

$$\begin{aligned} Ra_1 = & 60.24 - 0.3589T_1 + 0.0088T_2 - 0.239T_3 - 0.38V + \\ & + 0.0013V^2 + 0.0006T_1^2 + 0.00011T_2^2 + 0.00048T_3^2 + 0.0013V^2 - \\ & - 0.0003T_1T_2 + 0.0004T_1T_3 + 0.0009T_1V + 0.00045T_2T_3 + \\ & + 0.00013T_2V + 0.0011T_3V \end{aligned} \quad (4.10)$$

$$\begin{aligned} Ra_2 = & 1.4748 - 0.066T_1 - 0.0715T_2 + 0.106T_3 + 0.42041V + \\ & + 0.00044T_1^2 + 0.00059T_2^2 + 0.00036T_3^2 - 0.00085V^2 - \\ & - 0.00002T_1T_2 - 0.0009T_1T_3 - 0.0019T_1V - 0.00014T_2T_3 + \\ & + 0.00025T_2V + 0.0015T_3V \end{aligned} \quad (4.11)$$

$$\begin{aligned} Ra_3 = & 33.869 - 0.194T_1 + 0.152T_2 - 0.2906T_3 - 0.23V + \\ & + 0.00039T_1^2 + 0.00016T_2^2 + 0.00086T_3^2 + 0.00035V^2 - \\ & - 0.00062T_1T_2 + 0.00036T_1T_3 + 0.00055T_1V + 0.00022T_2T_3 - \\ & - 0.00082T_2V + 0.002T_3V \end{aligned} \quad (4.12)$$

4.4.3 Порівняння результатів ортогонального і рототабельного планування

На рисунках 4.18 - 4.20 наведено порівняння результатів моделювання за ортогональними та рототабельними планами.

Розглянувши результати моделювання параметра Ra_1 видно, що модель побудована на основі рототабельного планування (4.10) в цілому краще описує і як наслідок показує кращі результати ніж модель побудована за ортогональним плануванням.

Порівнявши результати моделювання зображені на рисунку 4.19 можна помітити, що аналогічно попередній моделі рототабельні плани (4.11) в цілому дають кращий опис досліджуваного процесу.

Порівнявши результати моделювання параметра Ra_3 зображені на рисунку 4.20 видно що на відміну від попередніх моделей кращий результат моделювання показала модель (4.6) побудована за ортогональними планами.

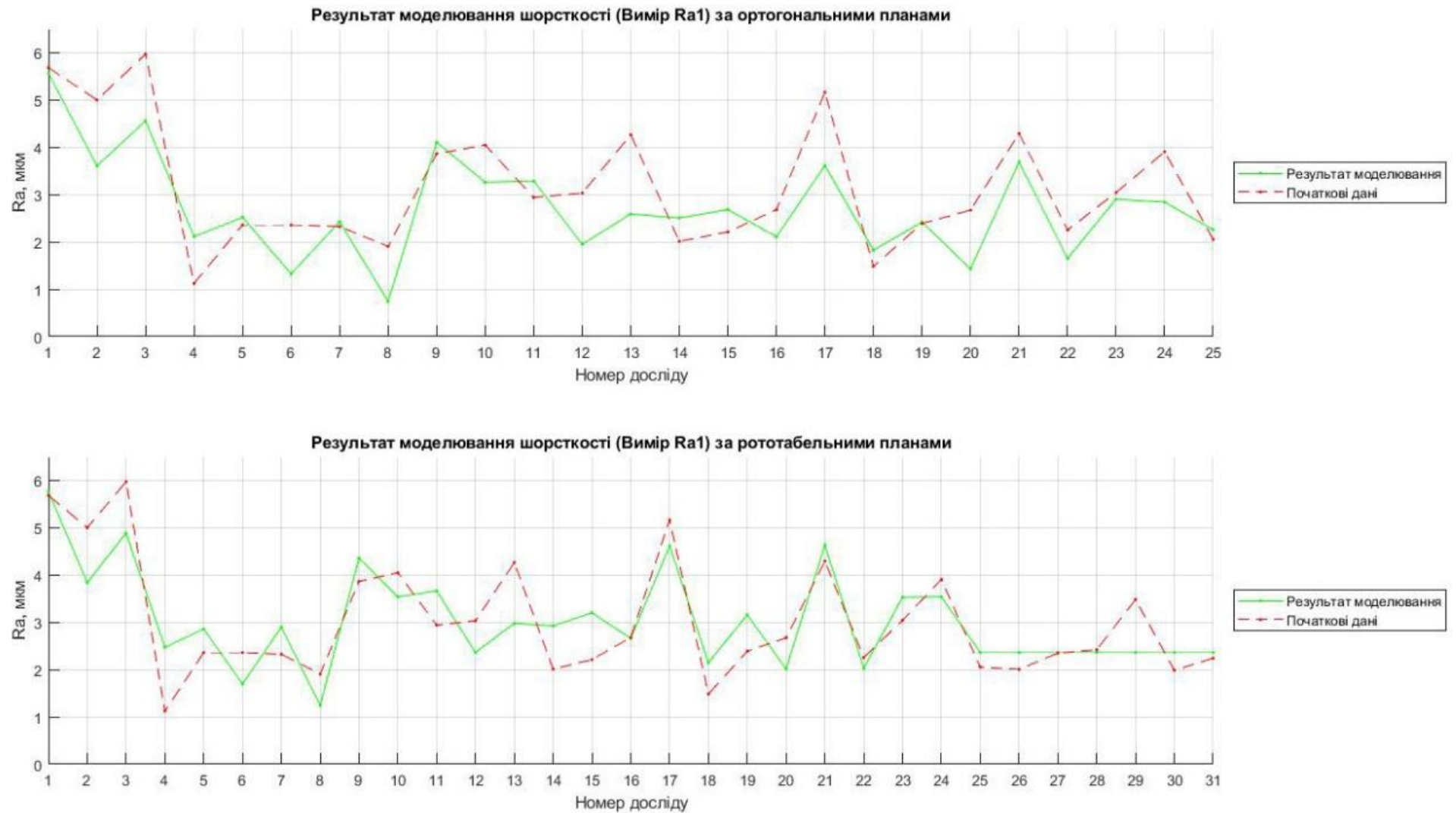


Рис. 4.18. Порівняння моделювання параметра Ra_1 за рототабельними та ортогональним плануваннями.

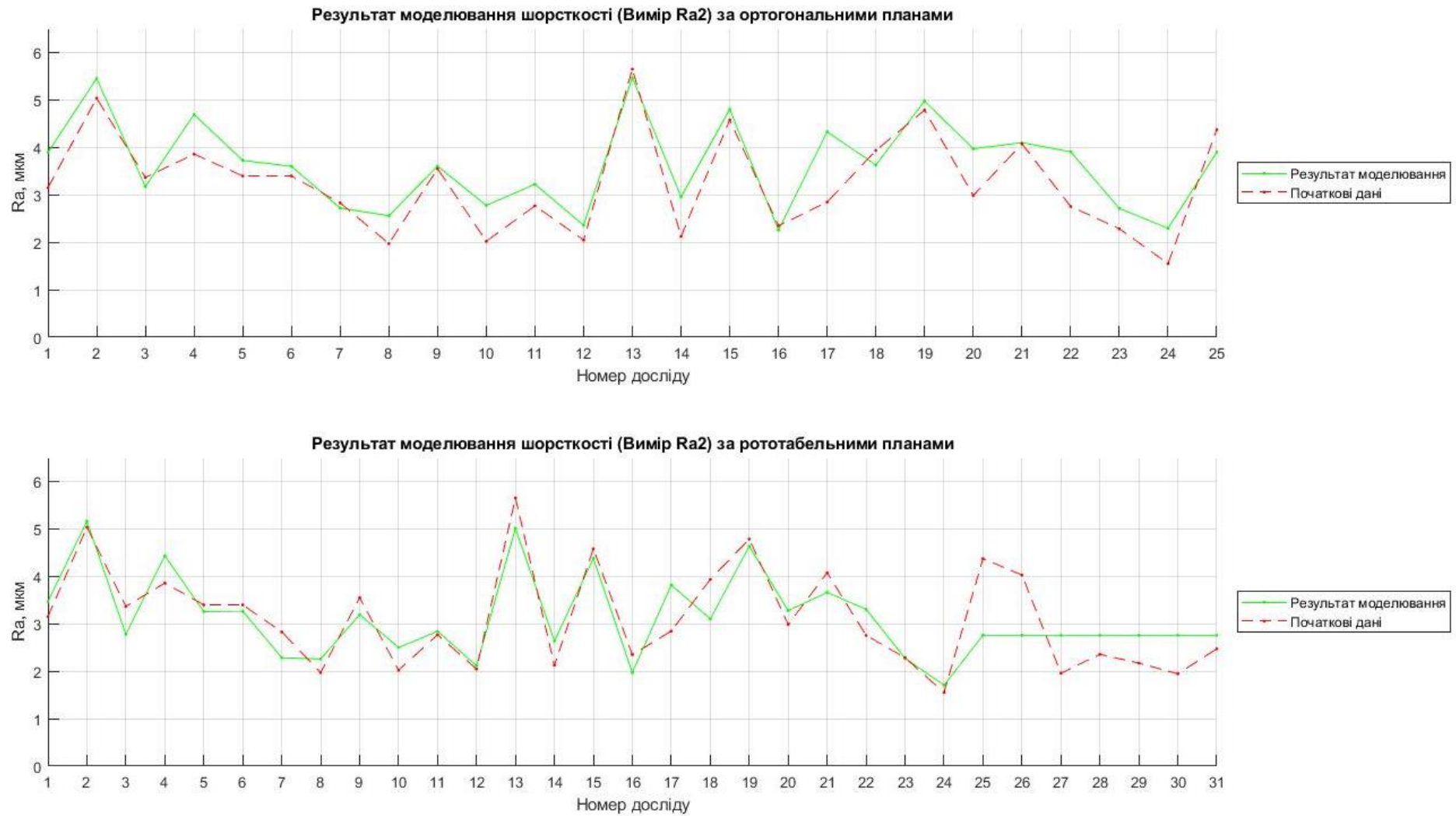


Рис. 4.19. Порівняння моделювання параметра Ra_2 за рототабельним та ортогональним плануваннями.

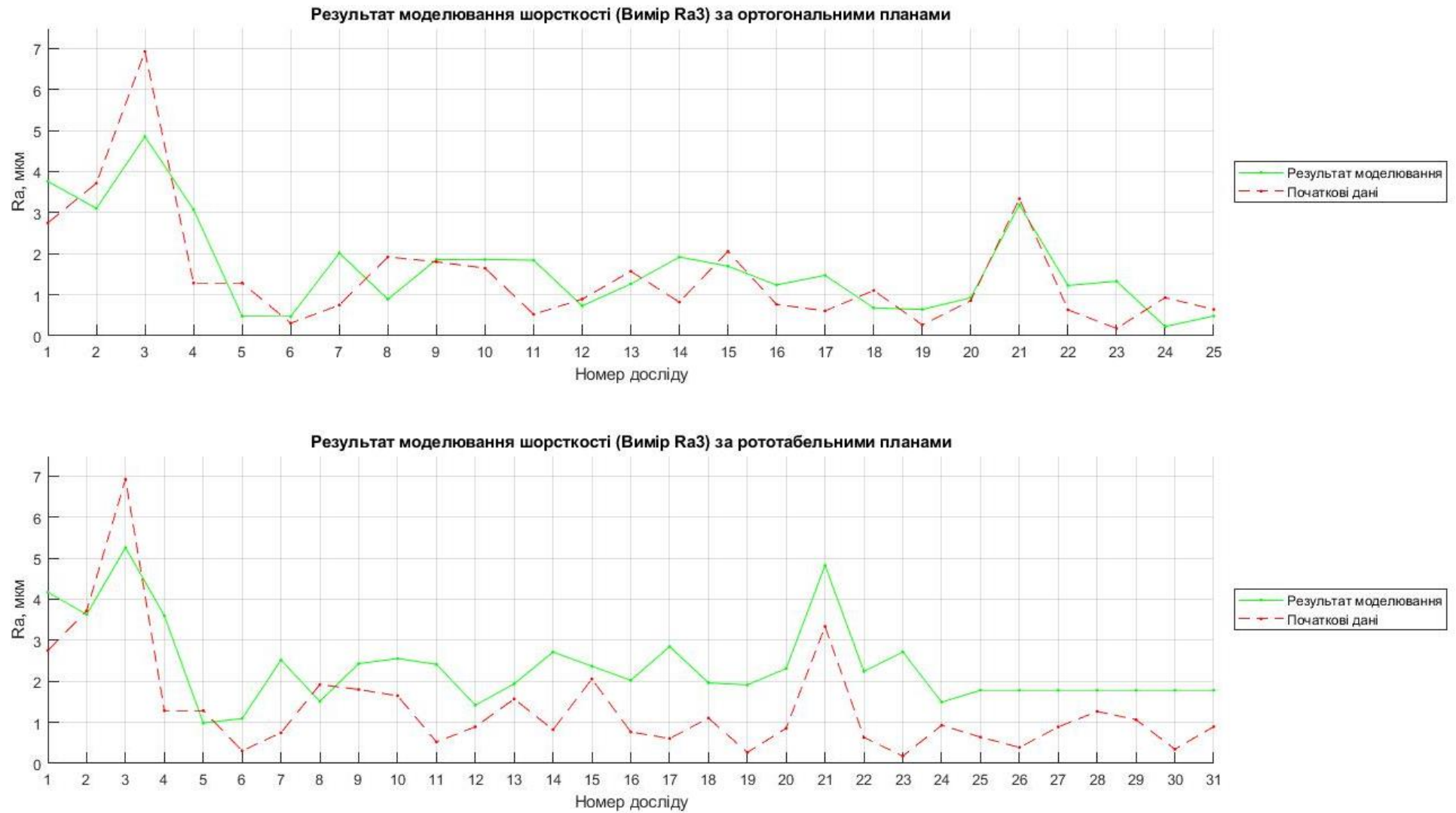


Рис. 4.20. Порівняння моделювання параметра Ra_3 за рототабельним та ортогональним плануваннями

4.5. Модель засобами евристичної самоорганізації

В результаті моделювання досліджуваного процесу в додатку GMDH Shell DS згідно отриманими з експерименту даними синтезовано наступні математичні моделі (4.13) - (4.15). Враховуючи особливості моделювання методом МГВА в класичному вигляді представити моделі не вдалось. Так як при розгортанні моделі в один поліном і розкритті дужок виходить великий за кількістю доданків поліном (більше сотні доданків. При цьому для використання на ЕОМ він підходить

$$\begin{aligned}
Ra_1 = & -0.0942 + N385 * 0.0039 - N385 * N58 * 0.057 + \\
& + N58 * 1.125 + N58^2 * 0.027; \\
De, N58 = & 0.199 + N86 * 2.131 - N86 * N213 * 0.313 - \\
& - N213 * 1.249 + N213^2 * 0.327; N213 = -0.07 - \\
& - N253 * 1.147 - N253 * N283 * 4.404 + N253^2 * 2.477 + \\
& + N283 * 1.971 + N283^2 * 1.961; N283 = 1.35403 + \\
& + N339 * N395 * 1.4633 - N339^2 * 0.666574 - \\
& - N395^2 * 0.591251; N395 = 0.21667 + N420 * N431 * 0.30109; \\
N431 = & 2.9147 - x3 * 0.673653 + x3 * x4 * 0.378586 + \\
& + x4^2 * 0.205021; N339 = -0.0870702 + N418 * N428 * 0.334823; \\
N418 = & 3.07135 - x1 * 0.587524 + x1 * x14 * 0.493213; \\
N253 = & 1.36148 + N287 * N370 * 0.402564 - \\
& - N287^2 * 0.0766457 - N370 * 0.0801907 - N370^2 * 0.129291; \\
N370 = & 0.931927 - N417 * 0.971021 + N417^2 * 0.34058 + \\
& + N425^2 * 0.179291; \\
N425 = & 3.08141 - x3 * 0.686654 - x3 * x13 * 0.529302; \\
N417 = & 3.07147 - x1 * 0.659266 - (x2^2) * 0.0270469; \\
N287 = & -0.527632 + N407 * N452 * 0.384222; \\
N452 = & 3.02861 - x4 * x24 * 0.785802 + x24 * 0.376968 \\
N86 = & -0.290291 + x4 * 0.266083 + x4^2 * 0.228657 + \\
& + N225 * 1.0354; \\
N225 = & 14.7505 - N407 * 3.76438 + N407 * N428 * 1.07637 + \\
& + N407^2 * 0.286058 - N428 * 6.87983 + N428^2 * 0.826807; \\
N428 = & 3.09409 - x3 * 0.770872 - x3 * x14 * 0.296579; \\
N407 = & 3.06943 - x1 * 0.683863 + x1 * x13 * 0.541561; \\
N385 = & -0.175985 + N420 * N429 * 0.344129; \\
N429 = & 2.9471 - x3 * 0.688484 + (x2^2) * 0.520204 - \\
& - (x2^2)^2 * 0.156338; \\
N420 = & 2.84559 - x1 * 0.9185 + x1 * (x4^2) * 0.422671 + \\
& + (x4^2) * 0.24964;
\end{aligned} \tag{4.13}$$

$$\begin{aligned}
Ra_2 &= -0.444678 - N468 * N150 * 0.0305587 - N468^2 * 0.0349706 + \\
&+ N150 * 1.47612 - N150^2 * 0.0355778; \\
De, N150 &= -0.777945 + N307 * 1.52764 + N307 * N334 * 1.07167 - \\
&- N307^2 * 0.651184 - N334 * 0.347084 - N334^2 * 0.367379; \\
N334 &= 4.34322 + N419 * 0.844165 + N419^2 * 0.0172016 - \\
&- N520 * 3.34395 + N520^2 * 0.640068; \\
N520 &= -193.125 + N562 * 73.3095 - N562 * N563 * 16.4624 - \\
&- N562^2 * 3.75519 + N563 * 52.7293; \\
N563 &= 3.0875 - x1 * 0.199595; \\
N562 &= 3.28565 - x4^2 * 0.226392; \\
N419 &= 2.08018 - N478 * 1.12494 + N478^2 * 0.305491 + \\
&+ N503^2 * 0.149493; \\
N503 &= 3.26164 + x3 * x4 * 0.684289 - x4^2 * 0.230394; \\
N478 &= 2.7875 - x2 * 0.311456 + x2^2 * 0.27275 + \\
&+ (x4^2) * 0.422402 - (x4^2)^2 * 0.160225; \\
N307 &= -1.45653 + N403 * 0.745997 + N467 * 0.724539; \\
N467 &= -0.106351 - x4 * 2.90521 + x4 * N528 * 0.961238 + \\
&+ N528 * 1.04232; \\
N528 &= 2.52348 - x1 * (x2^2) * 0.482272 + x1^2 * 0.267307 + \\
&+ (x2^2) * 0.390682; \\
N403 &= 12.1747 - N479 * 3.73355 + N479 * N525 * 1.50276 - \\
&- N525 * 3.85503; \\
N525 &= 2.87552 - x1 * x3 * 0.462706 + x1^2 * 0.195754; \\
N479 &= 2.83036 - x3^2 * 0.0200909 + x24 * 0.663976 + \\
&+ x24^2 * 0.485037; \\
N468 &= 0.34456 + N519 * N554 * 0.286035; \\
N554 &= 2.80302 + (x2^2) * 0.34817; \\
N519 &= 3.0057 + x1 * 0.2715 - x1 * (x4^2) * 0.743881 + \\
&+ (x4^2) * 0.496813 - (x4^2)^2 * 0.192466;
\end{aligned}
\tag{4.14}$$

$$\begin{aligned}
Ra_3 &= 0.00853997 - N291*0.164059 + N72*1.15816; \\
De, N72 &= -0.0427 + N132*0.467 - N132*N138*0.0056 + N138*0.578; \\
N138 &= -0.0435 + x13*0.496 - x13*N289*0.105 + x13^2*0.199 + \\
&+ N289*0.938; \\
N289 &= 0.373 + x1*0.419 - x1*N370*0.401 + N370*0.547 + \\
&+ N370^2*0.082; \\
N370 &= 0.852916 - N516*2.73217 + N516*N561*1.81356 + \\
&+ N561*2.12785 - N561^2*1.20235; \\
N561 &= 0.7071 + x1*x14*0.46375 + x1^2*0.03685 + x14^2*1.3998; \\
N516 &= 0.732 - x4*0.244 - x4*x24*0.596 + x24*0.614 + x24^2*1.264; \\
N132 &= -0.0438 + N256*1.02 - N256*N279*0.315 + N279^2*0.313; \\
N279 &= 6.6851 - N656*6.90314 + N656*N376*1.39936 + \\
&+ N656^2*1.74191 - N376*1.61096 + N376^2*0.0980855; \\
N376 &= 0.659 + x4*0.776 - x4*N517*0.702 + N517^2*0.269; \\
N256 &= 0.345661 - N366*1.3663 + N366*N544*0.795339 + \\
&+ N366^2*0.113355 + N544*1.67653 - N544^2*0.704256; \\
N544 &= 0.585553 + N636*N657*1.7514 - N636^2*0.539306 + \\
&+ N657*0.00241545 - N657^2*0.658719; \\
N636 &= 0.7654 + (x2^2)*0.138476 + (x2^2)*(x3^2)*1.25147 - \\
&-(x2^2)^2*0.0472689; \\
N366 &= 1.47785 + N518*N653*0.675665 - N653*2.18879 + \\
&+ N653^2*0.70656; \\
N518 &= 0.7071 + x1*x13*0.682274 + x1^2*0.03685 + x13^2*1.41661 \\
N291 &= -0.0416902 + N365*N377*0.25908 + N377*1.03078 - \\
&- N377^2*0.239368; \\
N377 &= 3.39878 - N517*2.08064 + N517*N657*2.12958 - \\
&- N657*2.34936; \\
N657 &= 1.43425 - x4*0.328702; \\
N517 &= 0.7071 - x1*x24*0.417378 + x1^2*0.03685 + \\
&+ x24*0.644711 + x24^2*1.28243; \\
N365 &= 13.6003 - N653*6.09853 + N653*N656*2.4864 + \\
&+ N653^2*1.31041 - N656*14.4366 + N656^2*4.18386; \\
N656 &= 1.46547 - x1*x2*0.451728; \\
N653 &= 1.51774 + x1*x3*0.380577 - x3*0.616715;
\end{aligned} \tag{4.15}$$

Для моделі, що характеризує параметр Ra_1 середнє значення відносної похибки становить 12,5%. Для моделі, що характеризує параметр Ra_2 – 15,1%. Для моделі, що характеризує параметр Ra_3 14,5%

На рисунках 4.21 - 4.23 наведено результати моделювання в графічному вигляді.

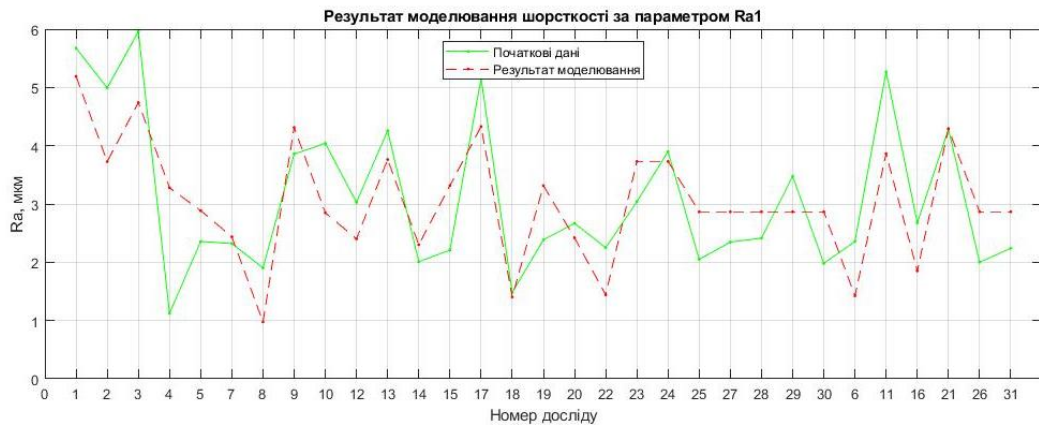


Рис. 4.21. Результат моделювання параметра Ra_1 методом МГВА

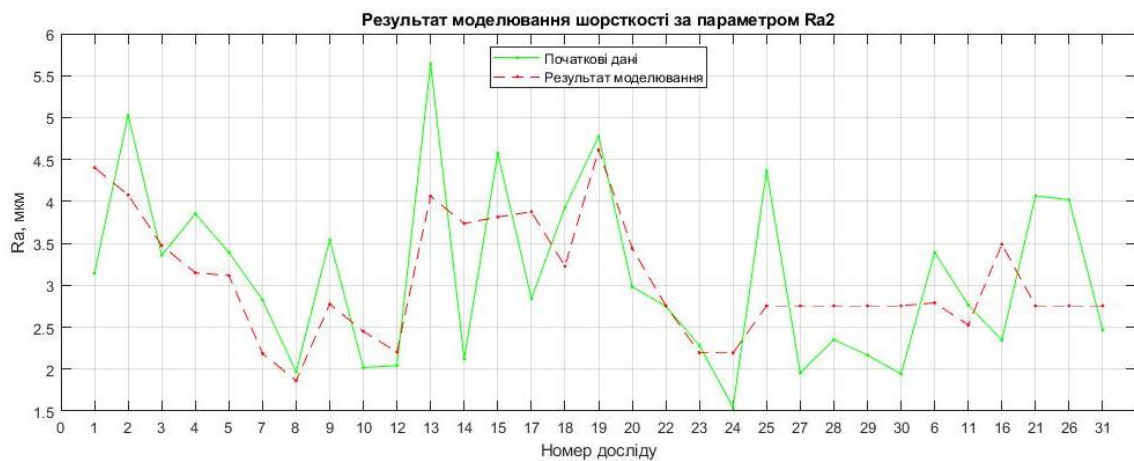


Рис. 4.22. Результат моделювання параметра Ra_2 методом МГВА

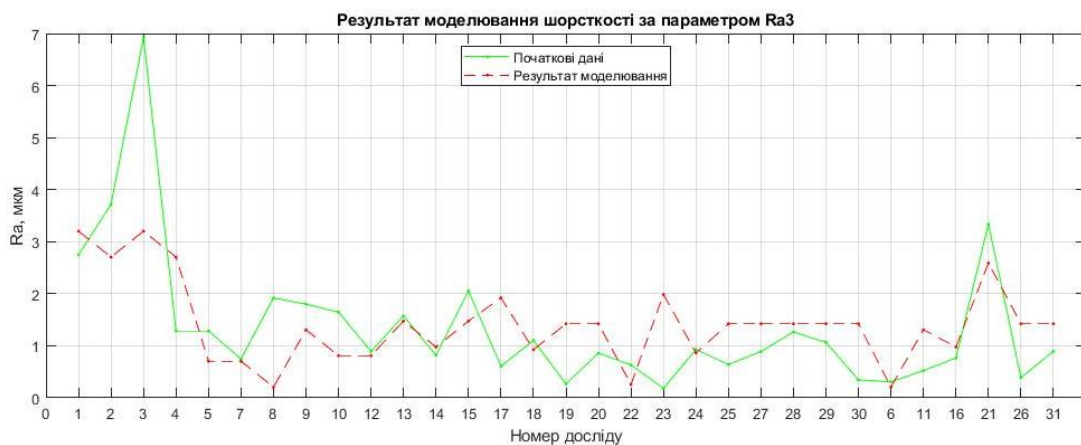


Рис. 4.23. Результат моделювання параметра Ra_3 методом МГВА

4.5.1. Порівняння методів факторного експерименту з МГВА

Для порівняння створених моделей за методами факторного експерименту побудовано графіки зображені на рисунках 4.24 – 4.26

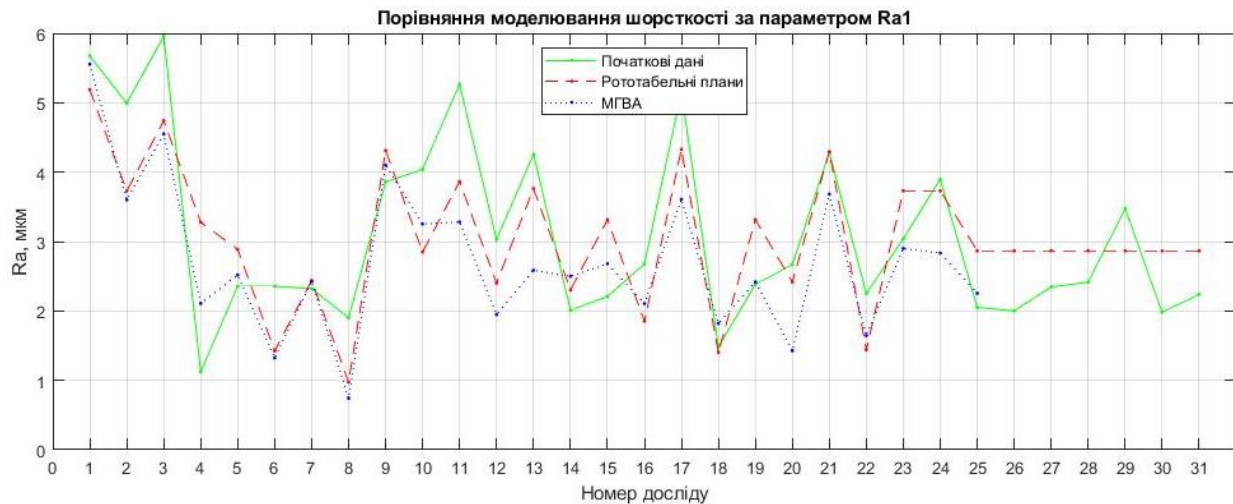


Рис. 4.24. Порівняння моделей, що описують параметр Ra_1 , отриманих за допомогою факторного експерименту та МГВА

З даного графіка можна бачити що за якістю опис математичних моделей побудованих за рототабельним планом та МГВА близький. Модель побудована за планами факторного експерименту показує кращий результат.

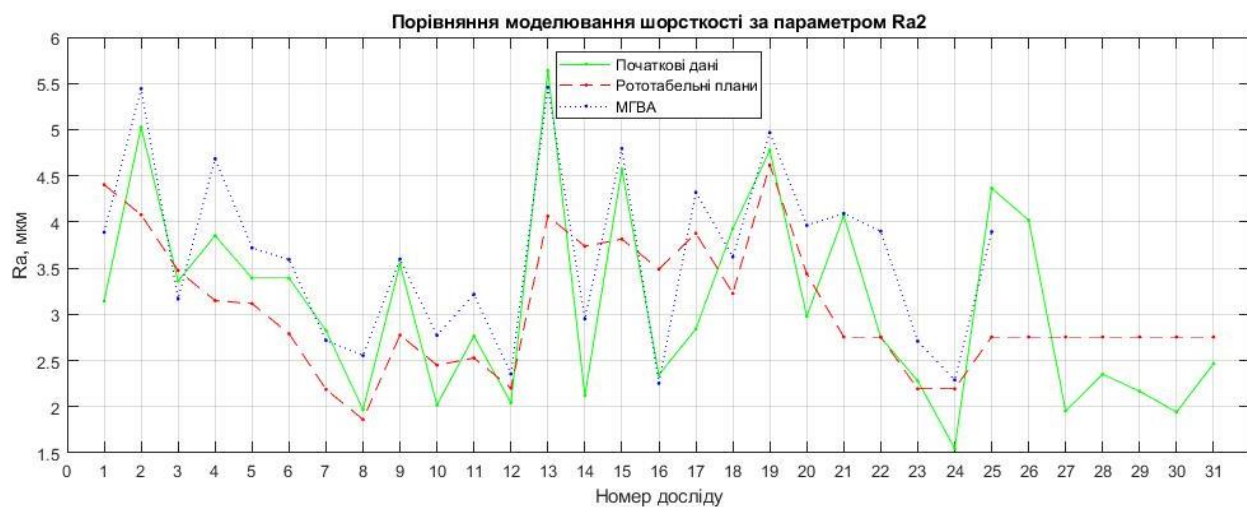


Рис. 4.25. Порівняння моделей, що описують параметр Ra_2 , отриманих за допомогою факторного експерименту та МГВА

З результатів моделювання параметра Ra_2 видно, що в цілому якість моделювання різними методами практично однаково описує досліджуваний процес. При цьому «відгук» моделі побудованої через МГВА більш різкий, проте в свою чергу модель побудована рототабельними планами в більшості точок проходить ближче до отриманих результатів.

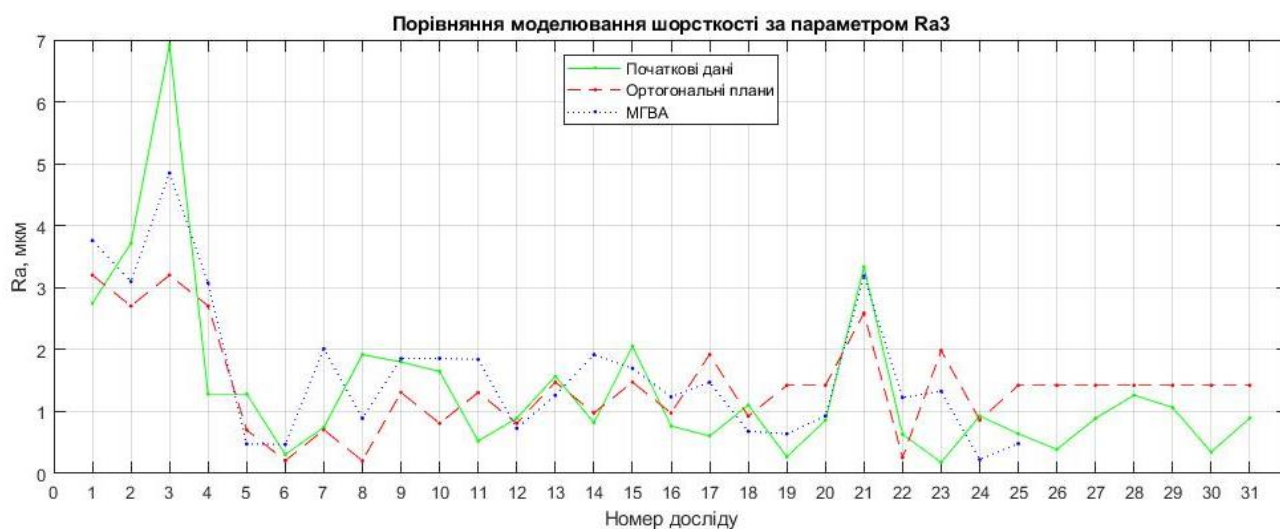


Рис. 4.26. Порівняння моделей, що описують параметр Ra_1 , отриманих за допомогою факторного експерименту та МГВА

Порівняння моделей при моделюванні параметра Ra_3 . Видно що в даному випадку модель побудована МГВА помітно програє моделі побудованій за допомогою методів планування.

4.6. Оптимізація параметрів процесу 3D друку.

Для оптимізації було обрано моделі, що найкраще описують процес ((4.6), (4.10), (4.11)). Критерієм оптимальності в даному випадку виступає мінімізація шорсткості отриманої поверхні.. Оптимізацію проведено за методом найшвидшого спуску (градієнтним методом). Основна ідея методу полягає в тому щоб «іти» в напрямку оптимуму найшвидшим шляхом. Визначити напрямок спуску допомагає антиградієнт. Алгоритм роботи методу зображений на рисунку 4.27 є наступним: задається початкове наближення; розраховується антиградієнт й відбувається рух



Рис. 4.27. Схема алгоритму градієнтного методу

в сторону оптимуму; перевірка чи досягнуто оптимум, якщо так розрахунок завершується, інакше повертаємось на попередній крок.

Отримано наступні результати для моделі (4.10) що описує параметр Ra_1 : $T_1 = 244\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_2 = 99\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_3 = 41\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V = 34\text{ мм/с}$. При виборі цих параметрів значення шорсткості отримано $Ra = 1.18$.

Оптимальні параметри для моделі (4.11) побудованій на основі параметра Ra_2 : $T_1 = 249\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_2 = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_3 = 95\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V = 30\text{ мм/с}$. При виборі цих параметрів значення шорсткості отримано $Ra = 1.702$.

Розраховані оптимальні параметри для моделі (4.6) Ra_3 : $T_1 = 244\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_2 = 95\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_3 = 44\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V = 60\text{ мм/с}$. Результат шорсткості при виборі цих значень параметрів отримано $Ra = 0.93$.

Можна бачити, що для параметрів температури друку, температури стола та температури нагрівача отримано досить однозначні результати. В той же час для швидкості

друку отримано результати що фактично протирічать одне одному, розглянемо детальніше чому так сталося.

Можна бачити що результати перекривають весь діапазон зміни цього параметра. Доцільно зауважити, що з високою швидкістю отримано краще значення «горизонту» поверхні в цілому, тоді як з малою – кращу шорсткість самої нитки. Спираючись на візуальний ефект, можна також помітити, що при друкуванні високою швидкістю об'єкти малого розміру (мається на увазі цифри що відображали порядковий номер деталі) й складної форми отримували низьку якість ніж аналогічні об'єкти надруковані повільно. Тому в даному випадку доцільно

обирати вищу швидкість, якщо більш важливо отримати рівну поверхню деталі в цілому коли на останніх кількох шарах поверхні нема складних за формою малих об'єктів. Й так само доцільно обирати малу швидкість коли необхідно на поверхні отримати в гарній якості малі об'єкти складної форми. Сучасні слайсери дозволяють змінювати швидкість друку при друкуванні шарів малого об'єму (мається на увазі об'єм використаного на друк шара пластику), що дозволяє частково вирішити дану проблему. Варто також зауважити, що мінімальна швидкість друку може бути на порядок меншою ніж використовувана в при дослідженні, але менші значення швидкості друку не використовуються через і так великий час на створення зразків принтером. Виходячи з цього доцільно виконати додаткове дослідження якості поверхонь при друкуванні із швидкостями 5-30 мм/с.

Для кращої наочності в рисунках 4.28 - 4.42 наведено графічне представлення результатів моделювання математичної моделі (4.10), що моделює параметр Ra_1 .

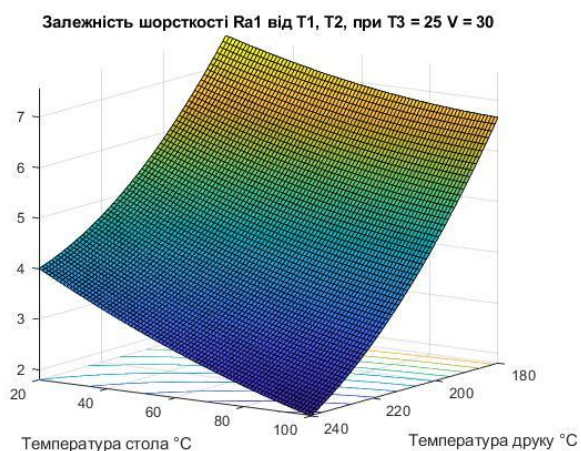


Рис. 4.28. Залежність шорсткості від температури друку (T_1), температури стола (T_2) при сталих значеннях температури нагрівача (T_3) 25 °C і швидкості (V) 30 мм/с

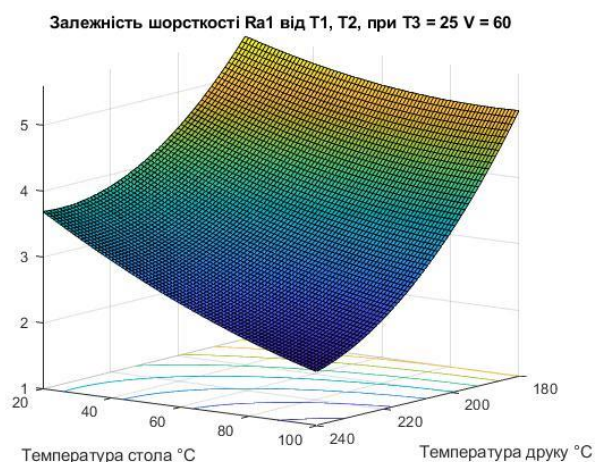


Рис. 4.29. Залежність шорсткості від температури друку (T_1), температури стола (T_2) при сталих значеннях температури нагрівача (T_3) 25 °C і швидкості (V) 60 мм/с

З графіків зображених рисунками 4.28 та 4.29 можна бачити, що при відключеному нагрівачі шорсткість поверхні в цілому суттєво зменшується при високих швидкостях друку, при цьому для отримання кращого результату треба використовувати температурні режими ближчі до верхніх меж робочих значень.

Відповідно при зниженні температур стола та друку якість поверхні суттєво зменшується.

Як можна бачити з рисунків 4.30 - 4.31, що відображають друк з увімкненим нагрівачем при низьких швидкостях друку мінімальну шорсткість можна отримати при будь-якому значенні температури стола. При цьому температура друку має бути близькою до максимального значення. На високих швидкостях в цілому результат гірший, для отримання оптимальних значень шорсткості необхідно зменшувати температуру друку при цьому вплив температури стола по мірі її збільшення негативно впливає на результат.

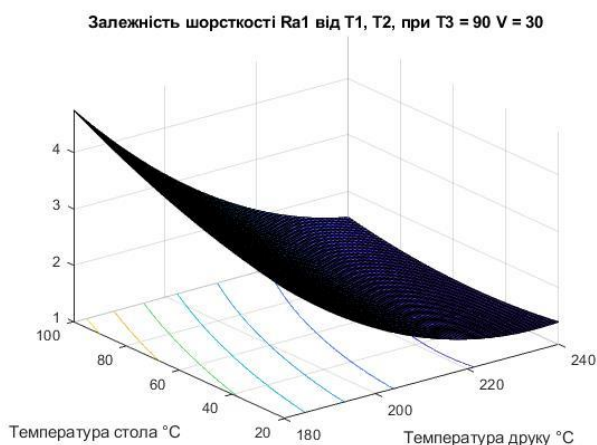


Рис. 4.30. Залежність шорсткості від температури друку (T_1), температури стола (T_2) при сталих значеннях температури нагрівача (T_3) 90 °C і швидкості (V) 30 мм/с

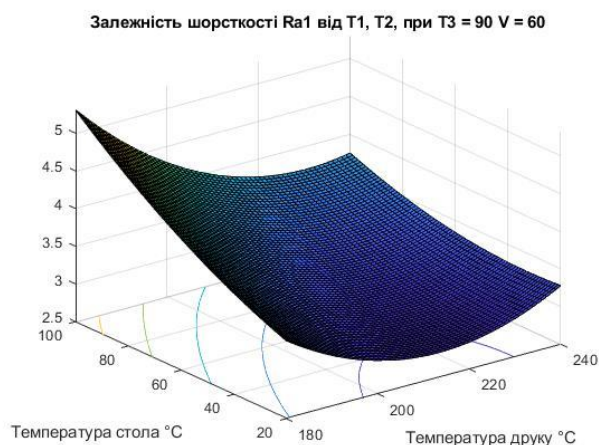


Рис. 4.31. Залежність шорсткості від температури друку (T_1), температури стола (T_2) при сталих значеннях температури нагрівача (T_3) 90 °C і швидкості (V) 60 мм/с

На рисунках 4.32 - 4.35 зображено залежності шорсткості від впливу температури друку та температури нагрівача за сталих параметрів температури стола і швидкості.

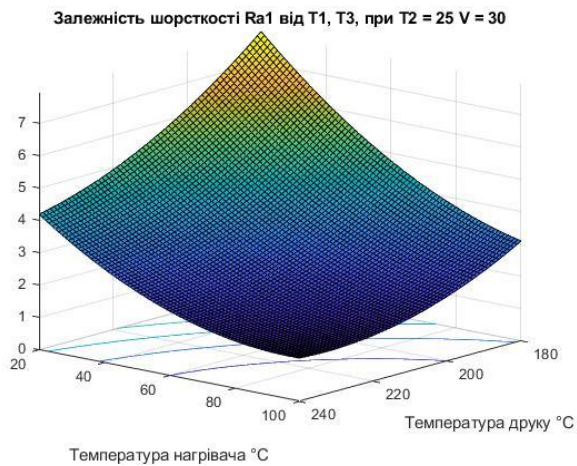


Рис. 4.32. Залежність шорсткості від температури друку (T_1), температури нагрівача (T_3) при сталих значеннях температури стола (T_2) 25 °C і швидкості (V) 30 мм/с

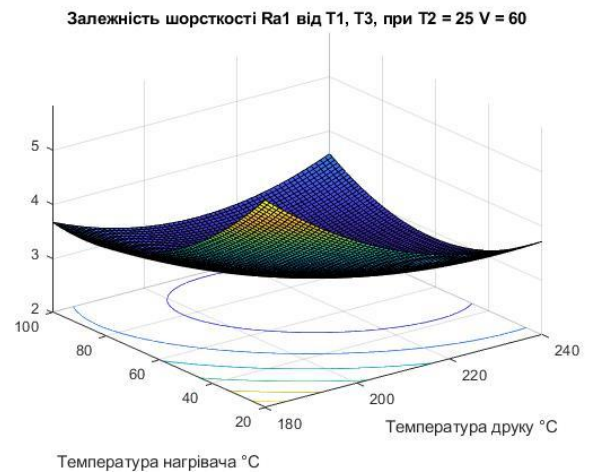


Рис. 4.33. Залежність шорсткості від температури друку (T_1), температури нагрівача (T_3) при сталих значеннях температури стола (T_2) 25 °C і швидкості (V) 60 мм/с

На рисунках '4.32 - 4.33 видно що при відключеному нагріві стола на низькій швидкості друку оптимального результату можна досягти при високих температурних параметрах при високих швидкостях друку результат помітно гірший й як і в попередніх випадках необхідно зменшувати температурні параметри для максимально хорошого результату.

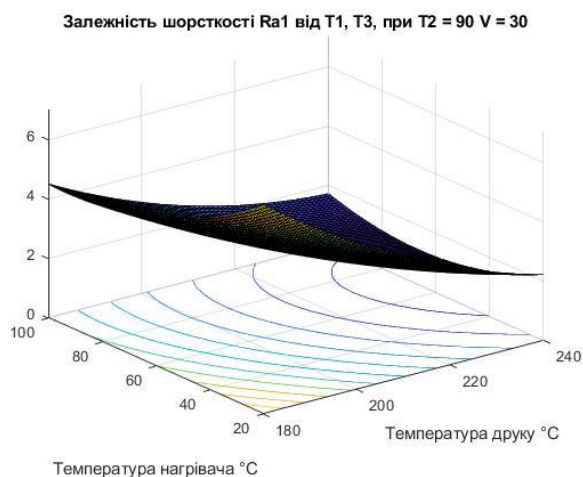


Рис. 4.34. Залежність шорсткості від температури друку (T_1), температури нагрівача (T_3) при сталих значеннях температури стола (T_2) 90 °C і швидкості (V) 30 мм/с

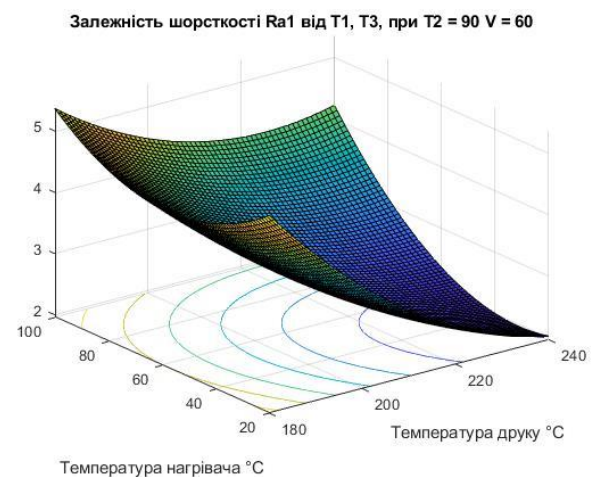


Рис. 4.35. Залежність шорсткості від температури друку (T_1), температури нагрівача (T_3) при сталих значеннях температури стола (T_2) 90 °C і швидкості (V) 60 мм/с

З рисунків 4.34, 4.35 видно, що при включеному нагріві при низьких швидкостях результат шорсткості мало залежить від температури нагрівача, більший вплив дає саме температура друку. На високих швидкостях при збільшенні температури друку видно що зменшення температури нагрівача приводить до покращення результату.

На рисунках 4.36 - 4.39 показано вплив змінних параметрів температури стола та нагрівача, при сталих параметрах швидкості та температури друку.

З графіків зображених на рисунках 4.36 та 4.37, котрі відображають випадок використання низької температури друку, видно, що з малою швидкістю друкування кращі результати можна отримати при високій температурі нагрівача й низькій температурі стола. Як і в попередніх випадках висока швидкість друкування показує гірші результати шорсткості.

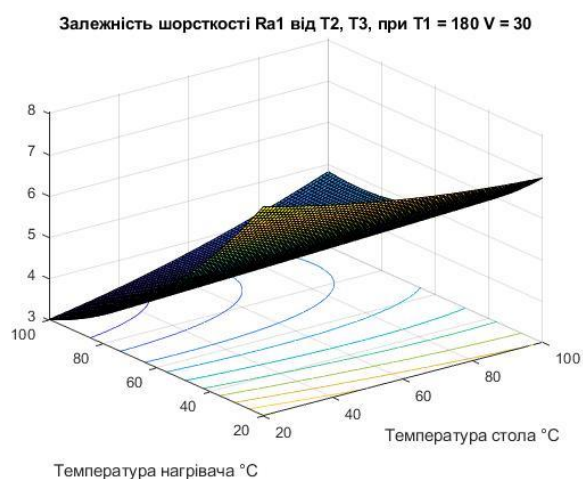


Рис. 4.36. Залежність шорсткості від температури стола (T_2), температури нагрівача (T_3) при сталих значеннях температури друку (T_1) 180 °C і швидкості (V) 30 мм/с

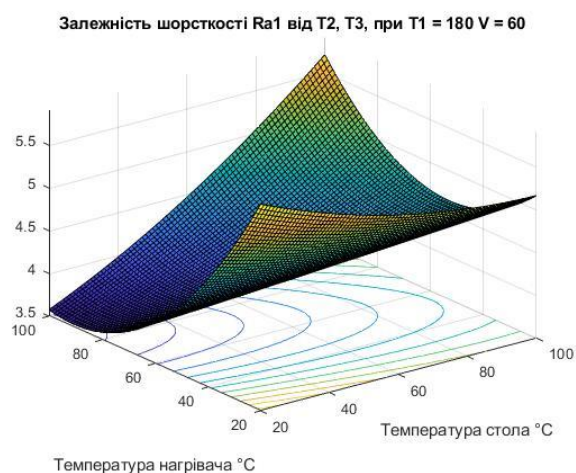


Рис. 4.37. Залежність шорсткості від температури стола (T_2), температури нагрівача (T_3) при сталих значеннях температури друку (T_1) 180 °C і швидкості (V) 60 мм/с

Рисунки 4.38, 4.39 дають показують результати моделювання з обраною високою температурою друку. Помітно, що при максимальній температурі нагрівача й низькій швидкості друку температура стола мінімально впливає на отриманий результат. В той же час при високих швидкостях друку кращий результат показує висока температура стола з відключеним нагрівачем

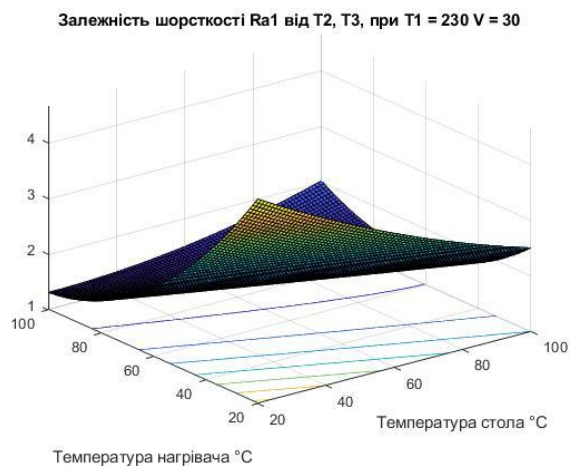


Рис. 4.38. Залежність шорсткості від температури стола (T_2), температури нагрівача (T_3) при сталих значеннях температури друку (T_1) 230 °C і швидкості (V) 30 мм/с

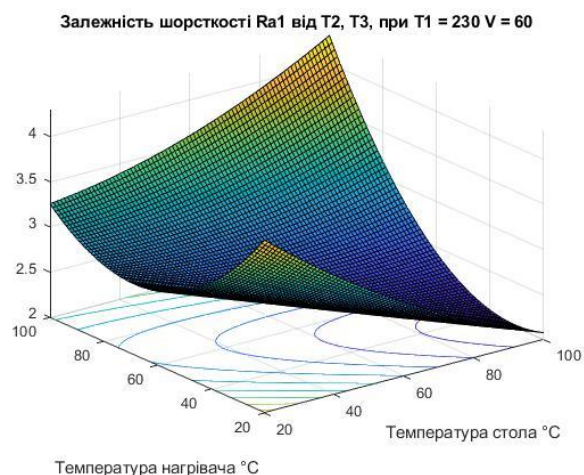


Рис. 4.39. Залежність шорсткості від температури стола (T_2), температури нагрівача (T_3) при сталих значеннях температури друку (T_1) 230 °C і швидкості (V) 60 мм/с

На рисунках 4.40- 4.42 показано вплив на шорсткість при змінних параметрах температури нагрівача та при сталих параметрах температури стола й середньостатистичної температури друку.

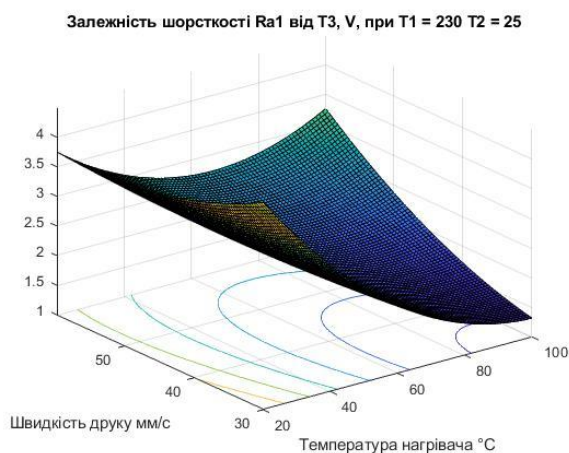


Рис. 4.40. Залежність шорсткості від температури нагрівача (T_3), швидкості (V) при сталих значеннях температури друку (T_1) 230 °C і температури стола (T_2) 25 °C

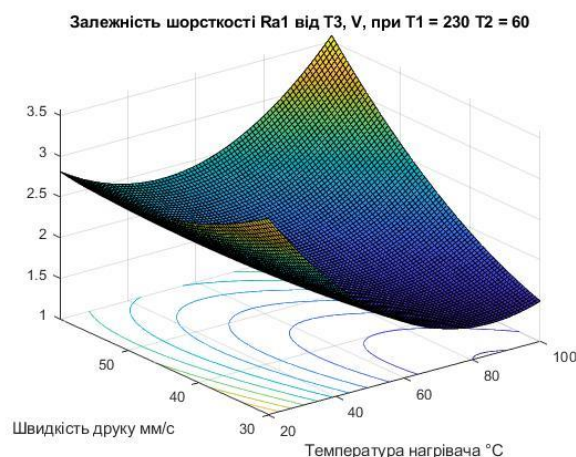


Рис. 4.41. Залежність шорсткості від температури нагрівача (T_3), швидкості (V) при сталих значеннях температури друку (T_1) 230 °C і температури стола (T_2) 60 °C

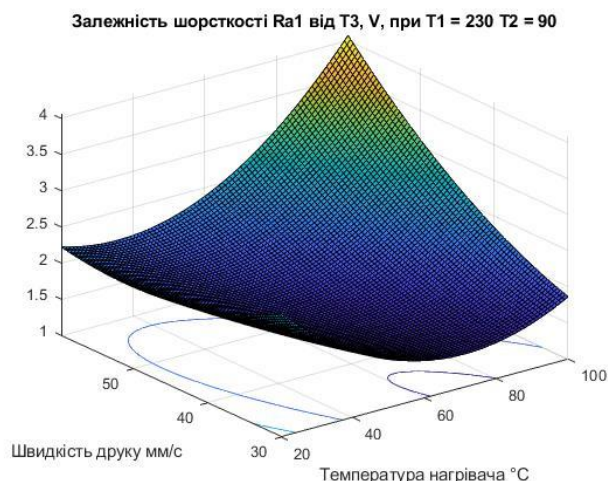


Рис. 4.42. Залежність шорсткості від температури нагрівача (T_3), швидкості (V) при сталих значеннях температури друку (T_1) 230 °C і температури стола (T_2) 90 °C

Видно що при мінімальних швидкостях друку з відключеним нагрівом стола кращий результат отримано при високій температурі нагрівача. При помірній температурі стола кращі результати мають місце за високої температури нагрівача й низької швидкості друку. При використанні високої температури стола найкращий результат отримано при мінімальній швидкості друку й при температурі нагрівача в діапазоні від 60 °C до 80 °C.

Таким чином додатковий нагрівач фактично змінює нагрів столика при використанні високих температур друку. Кращу шорсткість деталі можна отримати при зменшенні швидкості друкування, якщо ж це не можливо на високих швидкостях друку необхідно зменшувати температуру друкування для забезпечення прийнятної якості поверхні.

На рисунках 4.43 - 4.55 наведено графічне представлення результатів моделювання математичної моделі (4.6) що характеризує параметр Ra_3 .

Рисунки 4.43, 4.44 показують результати друкування з відключеним нагрівачем. Можна бачити, що найкращий результат при низькій швидкості можна досягти при використанні максимальної температури друку з температурою підігріву стола близькою до мінімальної. При високих швидкостях кращий

результати можна досягти можливо при максимальних температурах друку й підігріву стола.

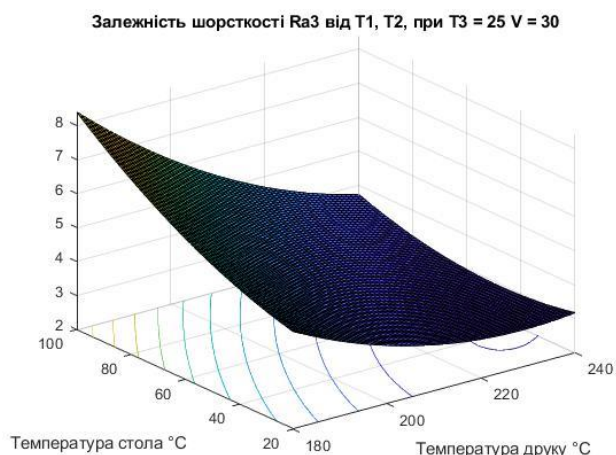


Рис. 4.43. Залежність шорсткості від температури друку (T_1), температури стола (T_2) при сталих значеннях температури нагрівача (T_3) 25 °C і швидкості (V) 30 мм/с

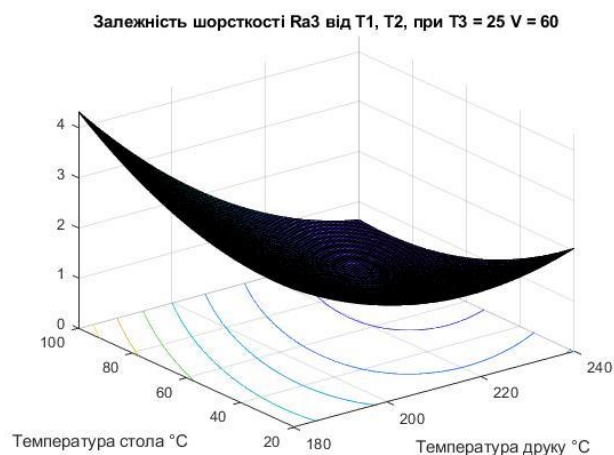


Рис. 4.44. Залежність шорсткості від температури друку (T_1), температури стола (T_2) при сталих значеннях температури нагрівача (T_3) 25 °C і швидкості (V) 60 мм/с

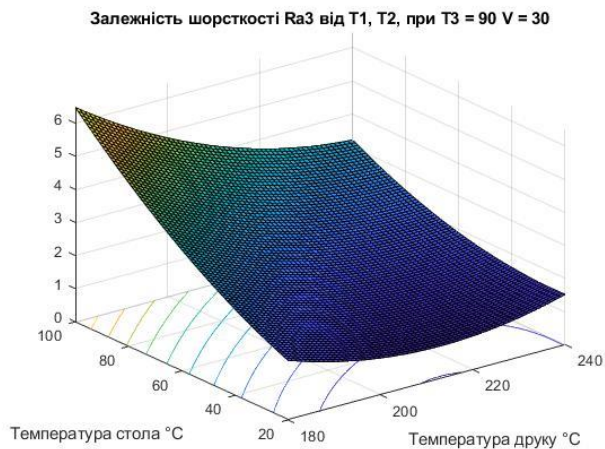


Рис. 4.45. Залежність шорсткості від температури друку (T_1), температури стола (T_2) при сталих значеннях температури нагрівача (T_3) 90 °C і швидкості (V) 30 мм/с

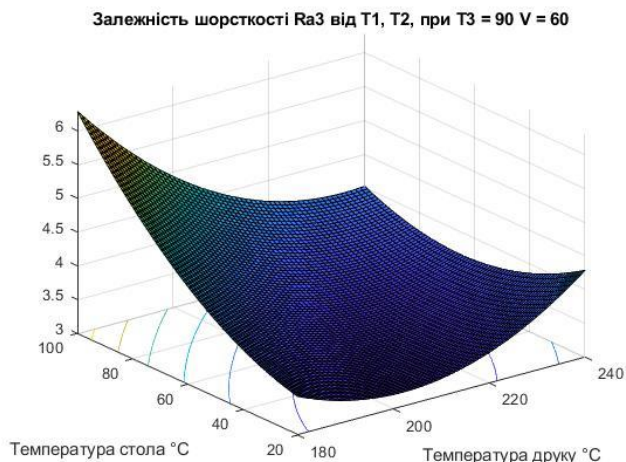


Рис. 4.46. Залежність шорсткості від температури друку (T_1), температури стола (T_2) при сталих значеннях температури нагрівача (T_3) 90 °C і швидкості (V) 60 мм/с

На рисунках 4.45, 4.46 показано результат із використанням максимальної температури нагрівача. У всіх діапазонах швидкості друку кращий результат

отримано з відключеним нагрівом стола та з температурою друку близькою до мінімальної.

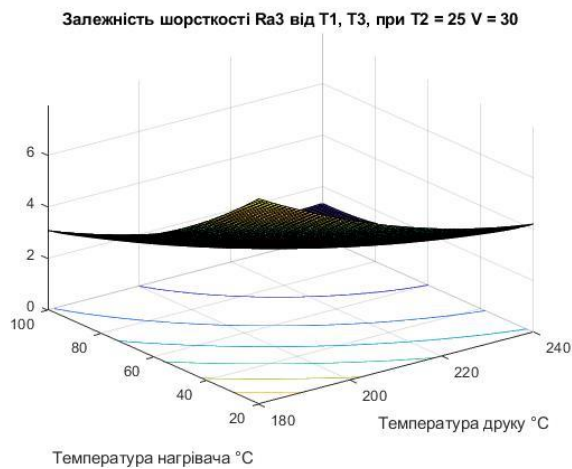


Рис. 4.47. Залежність шорсткості від температури друку (T_1), температури нагрівача (T_3) при сталих значеннях температури стола (T_2) 25 °C і швидкості (V) 30 мм/с

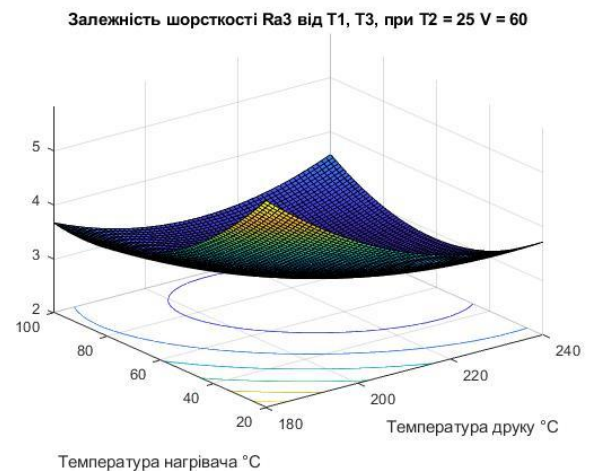


Рис. 4.48. Залежність шорсткості від температури друку (T_1), температури нагрівача (T_3) при сталих значеннях температури стола (T_2) 25 °C і швидкості (V) 60 мм/с

З рисунків 4.47, 4.48 видно, що при відключеному нагріві й мінімальній швидкості найкраще значення шорсткості отримаємо при максимальній температурі друку та нагрівача. Для високих швидкостей в свою чергу оптимальне значення можна досягти при використанні близьких до середніх значень температурних режимів

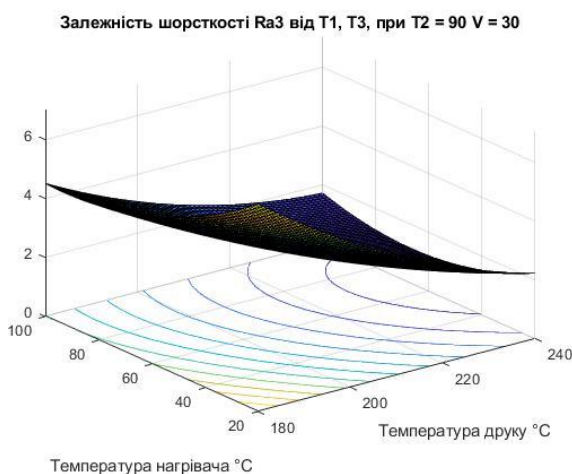


Рис. 4.49. Залежність шорсткості від температури друку (T_1), температури

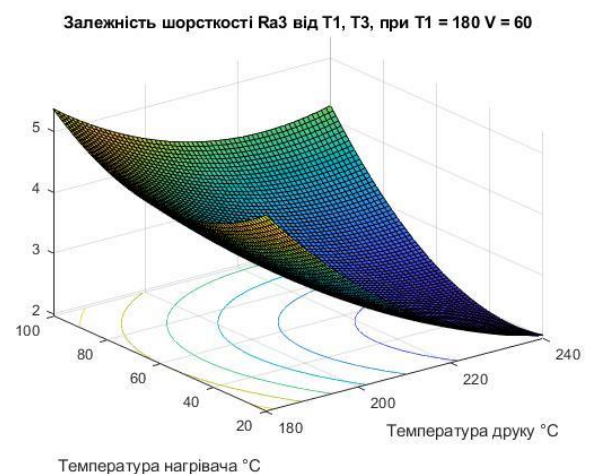


Рис. 4.50. Залежність шорсткості від температури друку (T_1), температури

нагрівача (T_3) при сталих значеннях
температури стола (T_2) 90 °C і
швидкості (V) 30 мм/с

нагрівача (T_3) при сталих значеннях
температури стола (T_2) 90 °C і
швидкості (V) 60 мм/с

Рисунки 4.49, 4.50 відображають графіки залежностей при зміні температур стола та нагрівача з постійними значеннями температури друку й його швидкості. У всьому діапазоні швидкості друку кращого результату можна досягти при використанні максимальної температури нагрівача, при цьому температура стола повинна бути мінімальною. При використанні високої швидкості кращі результати можна отримати не використовуючи нагрівач

З рисунків 4.53, 4.54 можна побачити, що при використанні мінімальної швидкості друку найменшу шорсткість можна отримати за максимальної температури нагрівача. При використанні високої швидкості друку кращі результати досягаються з використанням максимальної температури нагріву стола.

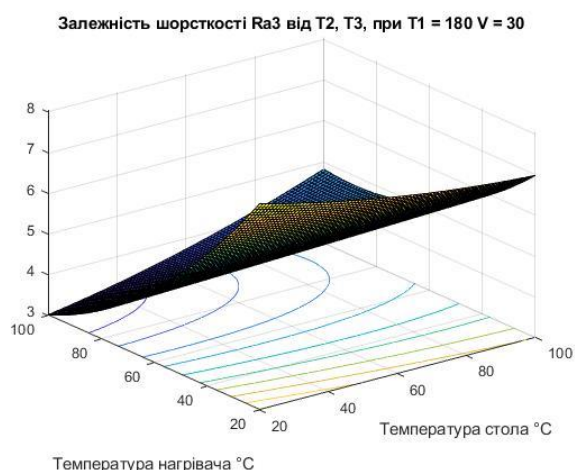


Рис. 4.51. Залежність шорсткості від температури стола (T_2), температури нагрівача (T_3) при сталих значеннях температури друку (T_1) 180 °C і швидкості (V) 30 мм/с

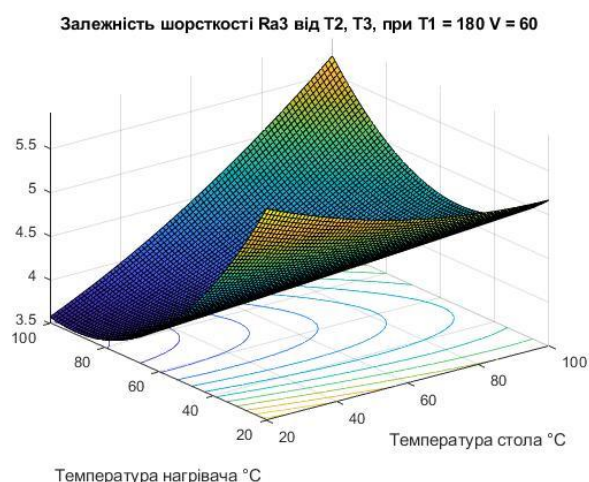


Рис. 4.52. Залежність шорсткості від температури стола (T_2), температури нагрівача (T_3) при сталих значеннях температури друку (T_1) 180 °C і швидкості (V) 60 мм/с

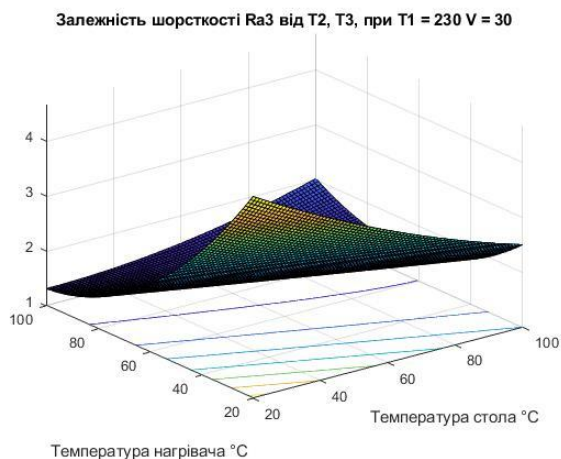


Рис. 4.53. Залежність шорсткості від температури стола (T₂), температури нагрівача (T₃) при сталих значеннях температури друку (T₁) 230 °C і швидкості (V) 30 мм/с

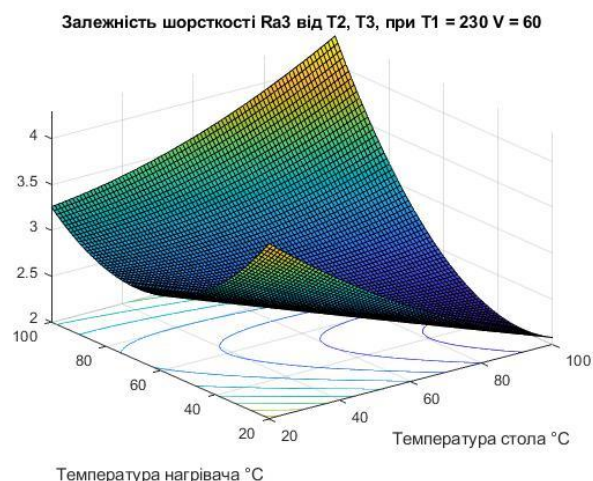


Рис. 4.54. Залежність шорсткості від температури стола (T₂), температури нагрівача (T₃) при сталих значеннях температури друку (T₁) 230 °C і швидкості (V) 60 мм/с

На рисунках 4.55 - 4.57 зображено залежності результату шорсткості від швидкості друку та температури нагрівача за сталими параметрами температури друку і стола. Можна бачити, що краща шорсткість досягається при низькій швидкості друку та максимальній температурі нагрівача. При цьому при підвищенні значення температури стола видно негативний вплив на результат в цілому.

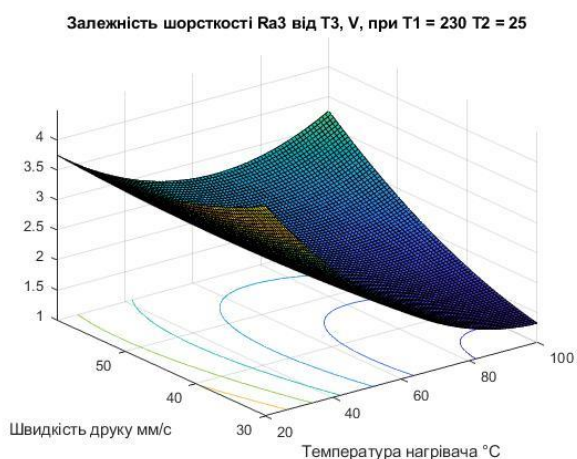


Рис. 4.55. Залежність шорсткості від швидкості (V), температури нагрівача (T₃) при сталих значеннях температури друку (T₁) 230 °C і температури стола (T₂) 25 °C

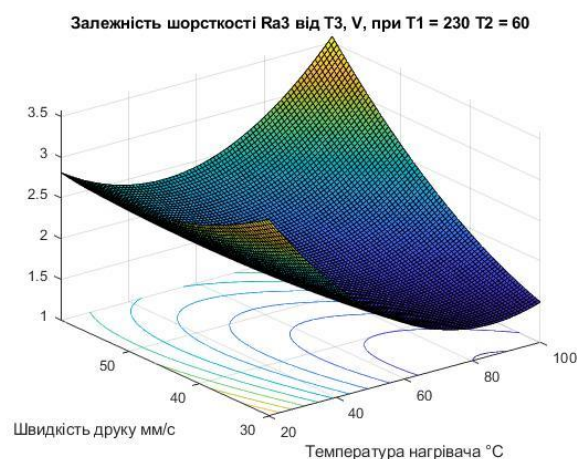


Рис. 4.56. Залежність шорсткості від швидкості (V), температури нагрівача (T₃) при сталих значеннях температури друку (T₁) 230 °C і температури стола (T₂) 60 °C

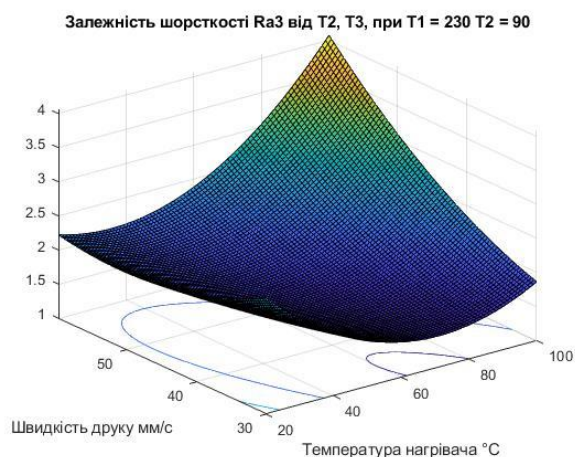


Рис. 4.57. Залежність шорсткості від швидкості (V), температури нагрівача (T₃) при сталих значеннях температури друку (T₁) 230 °C і температури стола (T₂) 90 °C

Наведені графіки показують, що профіль нитки пластику кращий при повільному високотемпературному друкуванні. В той же час висока швидкість дозволяє отримати в цілому кращий профіль поверхні.

В результаті оптимізації та аналізу наведених вище графіків визначено що для отримання мінімальної шорсткості, доцільно використовувати наступні значення режимів друку:

- Температура друку (T₁) повинна коливатись в межах 240-250 °C
- Температура стола (T₂) – в межах 60 – 100 °C
- Температура нагрівача (T₃) – в межах 40 – 95 °C
- Швидкість друку (V) – в межах 30-40 мм/с для отримання мінімальної шорсткості нитки, або 50-60мм/с для отримання рівного горизонту поверхні

На жаль через фактори, останніх днів не вийшло експериментально перевірити приведені оптимальні значення швидкості друку.

4.7. Розробка практичних рекомендацій з підвищення параметрів якості 3D друку.

В результаті проведеного дослідження можна надати наступні рекомендації з покращення якості друку поверхонь:

В першу чергу для підвищення стабільності результату й зменшення впливу зовнішнього середовища бажано використовувати закритий корпус.

Вибір режимів друку пропонується наступний: температура друку можна обирати на 10-20 °C вище від середньої температури заявленої виробником пластику.

Температуру стола рекомендується обирати в діапазоні 60-100°C (зазвичай рекомендують обирати 70 °C, але як показав експеримент є сенс обирати вищі значення температури).

Додаткові нагрівачі використовувати не обов'язково, але при їх використанні краще дотримуватись режимів близьких до температури стола, щоб підтримувати ефект нагріву.

Використання додаткових нагрівачів доцільне по суті як заміна нагрівального столу.

Швидкість друку необхідно обирати спираючись на особливості конкретного друкованого зразка. Останні версії професійних слайсерів дозволяють налаштовувати швидкість для друку певних поверхонь, наприклад заповнення, перекриття мостів. Для друку поверхонь малої площі та складної форми бажано обирати повільнішу швидкість.

Висновки до розділу

Для проведення експериментальних досліджень створено 3D модель експериментальних зразків. Побудовано плани факторних експериментів (рототабельного та ортогонального), визначено граничні межі вимірювання змінних величин. За створеним планом досліджень виконано 39 експериментів. В результаті поверхневого огляду надрукованих деталей встановлено, що об'єкти малого розміру що надруковані з меншою швидкістю мають кращі показники форми ніж аналогічні об'єкти надруковані швидко. По кожному зі зразків виконано

замір шорсткості поверхні. Отримані дані систематизовано та представлено в таблиці 4.4.

За отриманими результатами створено дев'ять математичних моделей, шість з яких отримано на основі ортогонального й рототабельного планів факторного експерименту, а інші - побудовано на основі методу групового врахування аргументів. Проведене моделювання в сукупності дозволило обрати моделі, що найкраще описують досліджувані параметри шорсткості деталі.

В результаті моделювання визначено, що найкращий опис параметрів Ra_1 Ra_2 дають моделі побудовані на основі рототабельного плану. Параметр Ra_3 найкраще описує модель побудована за ортогональним планом.

Але, навіть за таких результатів, не враховувати моделі, що отримані алгоритмами МГВА не доцільно. Дійсно, опис моделі міг би бути кращий, проте суттєва перевага такого методу дослідження його можна проводити в довільній послідовності, не впливаючи на хід реального виробничого процесу.

Проведено оптимізацію отриманих моделей що дозволило сформулювати рекомендації з покращення якості друкування деталей. В ході оптимізації наведено графіки, що дозволяють наочно оцінити вплив змінних на шорсткість поверхні. Оптимальні значення температурних параметрів за трьома математичними моделями практично однакові, наведено відповідні рекомендації з його використання. Певні відмінності в результатах свідчать про те, що додатковий нагрівач не є обов'язковим для досягнення кращого результату. По суті аналогічний за шорсткістю результат можна досягти, піднявши температуру стола до вказаного діапазону. Одночасно з цим, отримано різні результати оптимізації за параметром швидкості. Фактично отримано результати, що на перший погляд протирічать одне одному. В реальності - ж це не так. В ході дослідження використовувалось три різноманітні серії вимірювання, за якими побудовано відповідні моделі. Серії вимірювання, що відображають параметри Ra_1 та Ra_2 по суті відображають «площинність» поверхні в цілому, тоді як параметр Ra_3 характеризує шорсткість нитки пластику. Таким чином, для отримання більш плоскої, рівної поверхні доцільно застосовувати підвищені значення швидкості,

тоді як для отримання менш шершавої нитки – меншу швидкість. Так само, для друкування невеликих за площею поверхонь або складних фігуру варто обирати менші швидкості друку.

Використання закритого корпусу, як виявилось, мало впливає на якість поверхні

Продовженням дослідницької роботи в цьому напрямі може бути дослідження результатів друку на низьких швидкостях 5-30 мм/с.

РОЗДІЛ 5

РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЄКТУ «ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ МІКРОКЛІМАТУ НА ЯКІСТЬ ОТРИМАНИХ КРУПНОГАБАРИТНИХ ДЕТАЛЕЙ»

5.1. Опис та технологічний аудит ідеї стартап-проєкту

В попередніх розділах розглянуто питання покращення якості поверхонь, отриманих FDM 3D друком з використанням мікрокліматичних установок. В розділі буде проведено аналіз стартап-проєкту магістерської дисертації задля визначення конкурентоздатності даної системи на ринку та можливих напрямків її реалізації. Аналіз проведений за алгоритмом викладеним в навчально-методичних матеріалах «Розроблення стартап-проєкту» [55].

Основна ідея проєкту полягає у створенні додаткового обладнання для ентузіастів 3D друку та представників малого бізнесу, які хочуть здешевити та прискорити своє виробництво. Шляхом зміни кліматичних умов та швидкості друку обирається оптимальні умови для отримання деталей найкращої якості.

Для початку складемо морфологічну карту можливих варіантів рішень з засобами ралізації кожної функції (табл. 5.1).

Таблиця 5.1. Морфологічна карта:

Основні параметри	Проміжні рішення				
	1-ше	2-ге	3-тє	4-те	5-те
Температура повітря	Температура кімнати	Від центрального нагрівача	Кілька локальних нагрівачів	Мікроклімат	Інші
Вологість	Відповідає кімнатній	Осушувач	Мікроклімат	Інші	
Швидкість друку	Повільний друк	Швидкий друк	Зміна швидкості в залежності від виду роботи	Інші	

Товщина шару	Низька товщина – висока якість мала міцність	Висока товщина – мала якість висока міцність	Перемінна – оптимальна міцність і якість	Інші	
Температурні режими друку	Мінімально необхідна для плавлення флавементу	Висока для отримання кращої текучості	Адаптивна	Інші	
Метод заповнення	Прості шаблони з великим сталим відсотком заповнення	Складні шаблони з малим сталим відсотком заповнення	Шаблони з змінним відсотком заповнення	Поєднання кількох шаблонів заповнення з перемінним %	Інші

З морфологічної карти можна чітко визначити найбільш впливові та легкозмінювані параметри процесу FDM 3D, а саме мікроклімат та швидкість друку. На зміні саме цих параметрів і побудовано проєкт.

Опис проєкту можна розділити на: опис продукту (табл. 5.2), доказова база переваг (табл. 5.3), технологічні процеси (табл. 5.4), де описано зміст ідеї, потенційні споживачі та їх вигоди, ринки для реалізації, технології реалізації [56].

Таблиця 5.2. Опис продукту [57, 58, 59]:

Структурний елемент	Пояснення
Назва продукту або послуги	Дослідження впливу мікроклімату на якість отриманих крупногабаритних деталей
Сфера застосування та функціональне призначення	3D друк, виробництва, що застосовують деталі отримані шляхом 3D друку. Функціонал результатів дослідження на правлений на спрощення технологічного процесу отримання деталей шляхом 3D друку.
Опис унікальних властивостей продукту або послуги	Продукт дозволяє знизити вартість та складність технологічного процесу виготовлення деталей. А також дозволить розширити номенклатуру деталей які друкуються.
	На даний момент продукт знаходиться на стадії проєкту.
	Застосування результатів дослідження на виробництві
Технічні характеристики	Підтримка сталого температурного режиму в камері друку принтера
Супровід продукту	Заміна витратних матеріалів приладу досить проста не потребує використання сервісного центру.

НДДКР	Для отримання результатів будуть провадитись дослідження в лабораторних та «польових» умовах.
Інтелектуальна власність	В процесі отримання патенту на корисну модель

Таблиця 5.3. Опис ідеї стартап-проекту (доказова база переваг) [55]:

Зміст ідеї/продукту стартапу	Унікальність ідеї/продукту	Напрями застосування	Вигоди для користувача
Створити установку або комплект модернізації для 3D принтера. Що дозволить підтримувати в робочій камері певні мікрокліматичні умови.	Створення мікрокліматичних умов в процесі друку.	3D друк.	Економія на вартості друку без втрати його якості
	Обрахунок та підтримка оптимальних параметрів друку для обраної деталі та матеріалу	Виробництва, які застосовують деталі отримані шляхом 3D друку	Підвищення якості для вже існуючих технічних процесів.
Захист об'єктів інтелектуальної власності	Отримання патенту на корисну модель		

Таблиця 5.4 Технологічні процеси [55]:

Ідея проекту/продукту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
Оптимізація мікрокліматичних умов в процесі друку для отримання якісних деталей	Технологія 1 Створення камери друку з підтримкою мікрокліматичних умов та можливістю їх зміни	Наявну установку необхідно модернізувати та додати мікрокліматичний контролер.	На даний момент у наявності є всі необхідні матеріали.

Отже пропонується ідея має потенційно широку сферу застосування у сфері 3D друку, дозволить суттєво економити на вартості друку без втрати його якості за відносно швидко і легко реалізуємою процедурою. Така технологія знизить складність технологічного процесу, розширить номенклатура деталей, прискорить виробництво за рахунок простоти у обслуговуванні.

5.2 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проєкту

Для виведення проєкту на ринок визначимо як ринкові можливості, які покращать привабливість та зацікавленість для потенційного споживача, так і ринкові загрози, що створить перешкоди у реалізації проєкту як продукту. Проведення такого аналізу допоможе врахувати потребу потенційного споживача, ринкового середовища, конкурентних пропозицій та визначити напрямки розвитку проєкту

В першу чергу визначаємо наявність попиту, потенційні об'єми та тенденції розвитку ринку (табл. 5.5)

Таблиця 5.5. Попередня оцінка ринку стартап-проєкту [55]:

№ з/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	1
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	500
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Унікальна ідея
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Нема
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	103,4%

Для оцінювання потенціалу продажу необхідно визначити обсяг ринку, зрілість ринку (галузі) . Розрахунок слід здійснити за методикою РАМ, ТАМ, САМ, СОМ [61].

Визначимо концепції позиціонування для продукту стартапу (табл. 5.6). Кожний параметр оцініється за 3-х бальною шкалою. Концепції, які набрали в результаті оцінки найбільшу кількість балів будуть найефективнішими стратегіями позиціонування [61, 62]:

Таблиця 5.6. Концепції позиціонування для продукту стартапу:

Концепція позиціонування	Довіра	Однозначність	Унікальність	Запам'ятовуваність	Підкреслює властивості продукту	Відповідає потребам цільової аудиторії	Сума балів
Нова суб-категорія	1	2	3	3	3	3	15
Лідерство в вирішенні проблеми	3	2	1	2	2	3	13
Створення протилежного способу	0	1	0	1	2	1	5
Протиставлення конкуренту	0	3	3	1	1	3	11
Відмінні характеристики	1,5	2	1	2	1	2	9,5
Використання прихованого попиту	1	2	1	2	3	2	11

Підсумовуючи первинний аналіз ринку можна зробити висновок, що ринок потенційно привабливий для входження такої пропозиції.

Для визначення цільової аудиторії (потенційного споживача) визначимо базові вимоги до товару, характеристики як товару так і споживачів (табл. 5.7) та складемо портрет цільового споживача (табл. 5.8)

Таблиця 5.7. Критерії оцінки потенційних клієнтів стартапу [62]:

Цільова аудиторія	Визначте загалом цільову аудиторію відповідно до її складових	Ентузіасти 3D друку, малий бізнес
Географічні критерії	Розміщення цільового споживача	Будь-де
Соціально-демографічні критерії	Стать, вік, вид діяльності, дохід/ розмір підприємства, галузь і т. ін. (у разі B2B)	16-40, IT, малий бізнес ентузіасти
Поведінкові критерії	Що впливає на купівлю продукту	Унікальна ідея
Психологічні критерії	Цінності споживачів, залежність від соціальних норм та шаблонів	Економія коштів, умовна екологічність

За базовою оцінкою цільової аудиторії можна зробити висновок, що потенційний споживач має широкий віковий спектр та не обмежений географічно, що свідчить про значний потенціал, не зважаючи на нішевість сфери застосування.

Таблиця 5.8. Портрет цільового покупця:

Що хочуть купити	Технологічне рішення
Хто покупець	Виробник/ентузіаст
Мета купівлі	Покращити технологічний процес виготовлення.
Коли покупець купує продукт	В процесі модернізації виробництва або до його організації
Де покупець бажає придбати продукт	Ринок технологічних рішень
Мета стартапера	Провести дослідження технології

З отриманого портрету споживача можна визначити етап впровадження пропонованого продукту, а саме на етапі організації виробництва чи в процесі його модернізації. Також продукт здатний забезпечити основну мету потенційного споживача.

Важливим аспектом є конкурентне середовище на ринку. Для успішної реалізації свого проєкту важливо враховувати технологічні аспекти пропозиції конкурента, переваги та недоліки його рішень над власними та, як результат, подавати більш цікаву пропозицію на суміжному з конкурентом ринку. При цьому варто розуміти, що споживач не завжди обирає нижчий за вартістю товар, часто функціональність і результати втілення повністю виправдовують високу ціну.

Для початку проведемо ступеневий аналіз конкурентного середовища (таб.5.9), щоб зрозуміти типи конкуренції та їх вплив на діяльність розробника продукту.

Таблиця 5.9. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку [55]:

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства
1. Чисте	Конкурент отримає перевагу лише якщо створить нову технологію	Можливість реалізувати дослідження у вільному просторі

2. За рівнем конкурентної боротьби (локальне)	Технологія обмежена за сферою використання.	Можливість більшої точності досліджень, мала кількість конкурентів
3. За галузевою ознакою внутрішньогалузева	Дослідження проводиться в конкретній галузі.	Менше конкурентів.
4. Конкуренція за видами товарів: товарно-родова	Конкуренція на рівні технології задоволення потреб	Менш аналогів - менш жорстка конкуренція.
5. За характером конкурентних переваг Нецінова	Унікальність позиціонування	Орієнтація дослідження на результат а не прибуток
6. За інтенсивністю не марочна	Дослідження індивідуальні не представлені ТМ	Відсутність бренду та відомого імені.

З наведеної аналітики можемо підсумувати, що у досліджуваній розробки є як недоліки, у вигляді відсутності відомого імені та обмеженості ринку споживачів, так і суттєві переваги – незначне число конкурентів, вільність дослідження, що в подальшому забезпечить і якість.

Продовжуючи аналізувати конкуренцію, варто враховувати не тільки прямих, але й потенційних конкурентів, залежність продукту від постачальників, клієнтів та аналогів (табл. 5.10)

Таблиця 5.10. Аналіз конкуренції стартапу [55]:

	Прямі конкуренти	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Складові аналізу	На даному етапі відсутні	Обмеженість використання висока вартість дослідження	Відсутній проєкт інтелектуальний	Доступність інформації кількість цінова чутливість	Цінова політика
Висновки	Низька інтенсивність	Поки потенційних конкурентів не існує	Постачальники відсутні	Частково	Мінімальне

Оцінюючи таку аналітику, можна засвідчити вигідні стартові позиції продукту. Відсутність прямих конкурентів та залежності від поставок, а це не

тільки фінансові затрати, а й часові та логістичні, дають можливість розробнику зосередитись безпосередньо на самій розробці, якості та ефективності товару.

Не зважаючи на відсутність прямих конкурентів у процесі розробки продукту на ринку все ж є схожі рішення та відносно аналогічні пропозицію, а тому варто врахувати персоналії з уже готовими рішеннями, що мають схожий або аналогічний функціонал (табл. 5.11)

Таблиця 5.11. Типи конкурентів стартапу [63]:

Назва підприємства конкурента	Короткий опис діяльності	Короткий опис продукту	Схожість із стартапом	Ключовий	Прямий	Опосередкован
ТОВ “3D пласт”	Виготовлення 3D моделей на замовлення	Принтер з нижнім підігрівом та кожухом	Має схожість за функціональними особливостями продукту	*		
ПрАТ “3d.ua”	Виготовлення 3D моделей на замовлення	Принтер з нижнім підігрівом	Продукт виконує схожу функцію, але є значно застарілим		*	
ВАТ “3D-print”	Виготовлення 3D моделей на замовлення	Принтер з кожухом	Продукт виконує схожу функцію, але є значно застарілим			*

На ринку можна чітко виділити три основні компанії, що мають схожі технологічні рішення з суміжним функціоналом. Але, здебільшого, їх розробки застарілі і потребують суттєвого оновлення. Крім того, рішення цих компаній не є аналогами до пропонованого рішення, а лише схожі за функціональними особливостями продукту.

Даючи оцінку конкуренту, варто порівнювати не лише технологічні рішення. Важливо оцінювати і впливовість та впізнаваність безпосередньо компанії конкурента (табл. 5.12).

Таблиця 5.12. Сила конкурентів [63]:

Назва підприємства конкурента	Підтримка	Частка ринку	Висновок, щодо впливу на стартап
ТОВ “3D пласт”	Вище	Більше	Сильний
ПрАТ “3d.ua	Вище	На рівні	Сильний
ВАТ “3D-print”	Нема	Нижче	Слабкий

Тож два виробники аналогічних продуктів вже зайняли значну частку ринку та матимуть сильний вплив на стартап. Це спонукає глибше вивчати їх технологічне рішення та маркетингову стратегію його просування, для подальшої розробки стратегії подачі сі захисту свого продукту (табл. 5.13).

Таблиця 5.13. Вплив конкурентів на стартап [63]:

	Прямі конкуренти	Опосередковані конкуренти
	ТОВ “3D пласт”	ПрАТ “3d.ua”
Сильні конкуренти	Конкурент є загрозою для майбутнього бізнесу. Необхідна стратегія щодо активних дій з залучення клієнтів та захисту наявних	Конкурент є загрозою для майбутнього бізнесу. Необхідна стратегія щодо активних дій з залучення клієнтів та захисту наявних
		ВАТ “3D-print
Слабкі конкуренти		Конкурент не є загрозою для майбутнього бізнесу, однак потрібно моніторити їх діяльність

Враховуючи потенційний вплив уже існуючих розробок конкурентів варто розробити стратегія щодо активних дій з залучення нових клієнтів та захисту наявних від зміни рішення на користь конкурентного.

Для розробки такої стратегії необхідно провести більш широкий аналіз конкурентів (табл. 5.14) з урахуванням бренду, ринку збуту, технологічного рівню та цінової пропозиції.

Таблиця 5.14. Загальний аналіз ключових конкурентів [64, 65]:

Критерій оцінювання	ТОВ “3D пласт”	ПрАТ “3d.ua	Стартап
Ключові/унікальні властивості продукту	Широкорозповсюджений	Немає унікальних	Продукт має унікальні властивості

	Продукт	властивостей	
Рівень технології	Має вищий рівень технології	Нижчий рівень технологій	Високий рівень технологій
Наявність патентів	Немає	Немає	Захищений патентами
Наявність бренду	Відсутній	Відсутній	Відсутній
Доступ до обмежених ресурсів	Є	Немає	Немає
Точки співпраці з аудиторією	Інтернет, реклама	Інтернет	Інтернет, конференції, тематичні заходи
Канали продажу	Має налагожену систему замовлень	Має налагоджену систему збуту	Поки не налагоджені
Мережа взаємодії з клієнтом	Інтернет маркетинг, виробничі конференції	Інтернет маркетинг	Інтернет маркетинг, виробничі конференції
Обсяг ринку	Більше	На рівні	На рівні
Ціна продукту	Висока ціна	Середня по ринку	Ціна продукту є значно нижчою завдяки новому технологічному рішенню

Отже, пропоноване рішення матиме ряд переваг над конкурентами. В першу чергу - це значно нижча ціна завдяки сучасним новим технологічним рішенням, патент, унікальність продукту та високий рівень технології. Для подальшого успіху необхідно налагоджувати канали продажу та розвивати співпрацю з аудиторією потенційних споживачів.

Загрози, що можуть з'явитись під час реалізації стартап-проекту наведено таблицею 5.15. Для попередження виникнення таких і подібних їм ситуацій необхідно залучати підтримку висококваліфікованих інженерів.

Таблиця 5.15. Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1.	Вартісне обслуговування обладнання	Деталі до потрібного обладнання мають велику ціну і тенденцію зростання ціни	У разі поломки висока вартість ремонту або заміни
2.	Низька кваліфікованість кадрів	Низькокваліфіковані співробітники неякісно і тривало виконують роботу	Здебільшого персонал виробництв низько навчений
3.	Обмеженість варіативності	Враховуючи технічні особливості обладнання можлива зміна обмеженого числа деталей що доступні на ринку	Через низьку комерційність проєкту та відсутність фінансування дослідженню підлягають не всі бажані параметри
4.	Індивідуальність дослідження	Розробником є одна особа, що обмежує розвиток ідеї та збільшує час її реалізації	Дослідження базується на знаннях і думці однієї людини

Фактори загроз, показані в таблиці вище, необхідно контролювати, щоб зменшити негативний вплив на якість послуг для кінцевого споживача. Для наведених факторів написано ряд рекомендації задля їх усунення.

В таблиці 5.16 наведено фактори можливостей стартап-проєкту.

Таблиця 5.16. Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1.	Сучасність обладнання та технології	Сучасні технології (технічні новинки) значно функціональніші та мають меншу вартість з більшою продуктивністю	Зменшення вартості досліджень, значне зменшення похибок вимірювань
2.	Розвиток та скорочення затрат виробництва	Розвиток технології виготовлення і	Зменшення витрат, поліпшення ТПВ

		дослідження цільової технології	
3.	Варіативність дослідження	Велика номенклатура матеріалів дозволяє на одному і тому ж обладнанні проводити по суті різні дослідження	Можливість задання різних параметрів й використання різних матеріалів
4.	Унікальність ідеї	Ідея, що має суміжні реалізації, але аналогічного продукту на ринку не має	Можливість отримати унікальні навички

Наведено фактори можливостей, що допомагають вивести й реалізувати цільовий продукт на ринку, а також можливі реакції компанії.

В таблиці 5.17 наведено SWOT-аналіз продукту.

Таблиця 5.17. SWOT-аналіз стартап-проекту

Сильні сторони 1. Унікальність ідеї 2. Сучасна та актуальна технологія	Слабкі сторони 1. Доступність обладнання для досліджень 2. Дослідження в умовах пандемії
Можливості 1. Відносна сучасність обладнання 2. Розвиток та скорочення затрат виробництва 3. Варіативність дослідження 4. Унікальність ідеї	Загрози 1. Вартісне обслуговування обладнання 2. Низька кваліфікованість кадрів 3. Обмеженість варіативності 4. Індивідуальність досліджень

Проведено SWOT – аналіз продукту. Охарактеризовано сильні та слабкі сторони продукту, можливості й загрози від конкурентів. SWOT-аналіз допомагає в визначенні загроз що можуть стати на заваді при виході на великий ринок.

5.3. Розроблення ринкової стратегії та маркетингової програми проєкту

Визначення базової стратегії розвитку, стратегії конкурентної поведінки та стратегії позиціонування стартапу.

Існують три базові стратегії розвитку (лідерства по витратах, диференціації, спеціалізації). Різниця між ними полягає у ступені охоплення цільового ринку та виді конкурентної переваги [55]. Для роботи в обраних сегментах ринку необхідно сформулювати базову стратегію розвитку (табл. 5.18).

Таблиця 5.18. Визначення базової стратегії розвитку [55]:

Обрана альтернатива в розвитку проєкту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної Альтернативи	Базова стратегія розвитку*
Стратегія лідерства по витратах	Сегментна спеціалізація	Використання досліджуваної технології дозволить значно зменшити вартість виробництва та суттєво підвищити якість що забезпечить збільшення маржі	Стратегія диференціації

Пропонований продукт буде йти шляхом стратегії диференціації, що означає надання товару важливих з точки зору споживача відмінних властивостей, які роблять товар відмінним від товарів конкурентів[55].

Важливо зрозуміти, що в сучасних умовах стратегія конкуренції (табл. 5.19) обов'язково повинна ґрунтуватись на існуючих ресурсах і бути спрямована на досягнення цілі (цілей), враховуючи при цьому умови середовища, в якому діє конкретний суб'єкт конкуренції [66]:

Таблиця 5.19. Визначення базової стратегії конкурентної поведінки [55]:

Чи є проєкт «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки*
--	--	---	-----------------------------------

ТАК	ТАК	НІ	Експлерентна (піонерна)
-----	-----	----	----------------------------

Пропонований проєкт матиме експлерентну стратегію, що має на увазі отримання довготривалої конкурентної переваги завдяки нововведенням і ускладнена великим рівнем ризику [66].

Таблиця 5.20. Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Установка що забезпечує суттєве зменшення шорсткості поверхні деталі.		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1.Довговічність (немає строку давності)	М	Тх
	2. Актуальність (необхідний продукт на ринку)	Нм	Ор
	3. Нішевість (підійде для малого бізнесу та ентузіастів)	Нм	Е
	4. Простота конструкції та обслуговування	Нм	Тх
	5. Низька собівартість комплектуючих, як результат висока ремонтпригодність.	М	Вр
	Якість: відповідає нормам ДСТУ та ISO9001		
	Пакування: ПЗ встановлене на пристрій завчасно.		
III. Товар із підкріпленням	Розповсюдження промо матеріалів та реклами		
	Створення гнучкої лінійки сервісних пропозицій та акцій		

На основі вимог споживачів з обраних сегментів до продукту , а також в залежності від обраної базової стратегії розвитку (табл. 5.18) та стратегії конкурентної поведінки (табл. 5.19) розробляється стратегія позиціонування (табл. 5.21). що полягає у формуванні ринкової позиції (комплексу асоціацій), за яким споживачі мають ідентифікувати торгівельну марку/проєкт [55].

Таблиця 5.21. Визначення стратегії позиціонування [55]:

Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проєкту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проєкту (три ключових)
Унікальність товару Якість продукту Виправдана ціна	Стратегія диференціації	Використання досліджуваної технології дозволить значно зменшити вартість виробництва та суттєво підвищити якість що забезпечить збільшення маржі	Унікальний Надійний Економічно вигідний

Використання такої технології дозволить значно зменшити вартість виробництва та суттєво підвищити якість що забезпечить збільшення маржі.

Останньою складовою маркетингової програми є розроблення концепції маркетингових комунікацій, що спирається на попередньо обрану основу для позиціонування, визначену специфіку поведінки клієнтів (табл. Таблиця 5.22)

Таблиця 5.22. Концепція маркетингових комунікацій [55]:

Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
Вимогливість Прискіпливість Високі стандарти	Інтернет, конференції, блоги, виставки, «сарафанне» радіо	Використання досліджуваної технології дозволить значно зменшити вартість виробництва та суттєво підвищити якість що забезпечить збільшення маржі	Донести споживачу унікальність технології та вигоду від її використання	Модернізуй і здешевлюй вартість поліпшуючи якість!

Отже, основною ідеєю та ціллю рекламної компанії проєкту буде донесення до споживача унікальності пропонованої технології та вигоду від її використання.

Визначимо маркетинговий бюджет обраного стартапу, охарактеризувавши витрати та оцінивши їх приблизну вартість (табл. 5.23).

Таблиця 5.23. Маркетинговий бюджет [67]:

Складова бюджету	Загальна характеристика (що включає дана складова маркетингового бюджету)	Приблизний обсяг витрат, грн
Витрати на маркетингові дослідження	Інтернет-сайт, Брендинг	10000
Канали просування (уточніть які саме: соціальні мережі і т. ін.)	Розсилка e-mail, таргет реклама у соціальних мережах, профільні події	20000
Канали продажу	Традиційні канали.	6000

Основними складовими бюджету стануть розробка Інтернет-сайту, брендинг та просування у соціальних мережах, на профільних подіях, e-mail розсилки, таргет та інше.

Складемо план маркетингу проєкту (табл. 5.24) де визначимо цілі, завдання, місію, цільову аудиторію, план просування та фінансові прогнози на найближчий рік

Таблиця 5.24. План маркетингу проєкту [68]:

№ з/п	Назва розділу	Елементи наповнення розділу
1.	Цілі і завдання на найближчий рік	Знайти спонсорів та споживачів, почати вихід на ринок
2.	Місія та цінності стартапу	Створення продукту, що дозволить зменшити об'єм і вартість технологічних процесів з виготовлення деталей на 3D принтері. Нішевий ринок з ентузіастами 3D друку та малим бізнесом. Пропонується готове рішення для модернізації вже існуючого обладнання.
3.	Цільова аудиторія	Люди старші 16 років, із середньою купівельною спроможністю. Хобі 3D друк, або швидке макетування. Малий бізнес.

4.	Аналіз ситуації	Результат дослідження оптимальних параметрів для отримання найбільшою якості 3D друку. Розробка унікального продукту для завоювання вільної ніші ринку Даний продукт забезпечить значну економію затрат на дослідження та мінімізацію подальших затрат виробництва, максимальний результат у 3D моделювання та друці деталей цим методом Продукт просувається через мережу інтернет, на спеціалізованих конференціях та технологічних виставках. Так як продукт унікальний - конкурентне середовище мінімізоване а подекуди загалом відсутнє
5.	Ціни і стратегія позиціонування	Продуктом являє собою результати дослідження, для проведення якого є окрема лабораторія, 3D принтери, матеріали для друку та можливість завдання мікрокліматичних умов у області друку, вимірювальні прилади для визначення різноманітних параметрів якості
6.	План Просування	Просувається через мережу інтернет, на спеціалізованих конференціях та технологічних виставках Також презентація продукту провадиться шляхом написання тематичних статей на різноманітні конкурси та в технічні видання
7.	Маркетингові активи	Першочергово буде створено індивідуальний сайт з презентацією продукту поточного стартапу та аналогічних продуктів індивідуальної ідеї. Також в мережі інтернет про даний продукт буде заявлено у тематичних блогах та тематичних обговореннях де потенційні покупці відбирають необхідний товар. На виставках та тематичних презентаціях буде представлена варіанти надрукованих деталей за різних умов та із різних матеріалів для наочного представлення результатів дослідження Також потенційному покупцеві надаватиметься звіт досліджень для показання затрат як матеріальних так і часових
8.	Конверсійна стратегія	Проведення рекламних акцій, участь у презентаціях та наочне представлення результатів досліджень з доказовою базою економічної вигоди проєкту та мінімальної затрати часу
9.	Спільні підприємства та партнерство	Супутніми товарами являються 3D принтери промислового масштабу та пластик необхідний для друку деталей. Так як на ринку України виробники таких товарів майже не представлені а серед представлених ціни досить високі домовленості будуть проводитись з європейськими або американськими постачальниками яких на ринку багато і їх

		цінова пропозиція значно нижча та вигідніша навіть з урахуванням доставки з країни постачальника Такі виробники як Stratasys, 3D Systems, MakerBot, Formlabs, CreatBot, Ultimaker пропонують досить вигідні варіанти як за ціною так і за призначенням. На сьогоднішній день ринок перенасичений продуктами ми цих виробників.
10.	План збільшення продажів	Так як іде унікальна та немає аналогів на ринку підхід до кожного клієнта буде індивідуальний. Проте можна виділити загальні фактори для підвищення доходів від кожного клієнта: - значна економія клієнта на подальшому виробництві; - роботизація виробництва. що дозволить зекономити фонд заробітної плати; - відносно невеликі затрати на модернізацію; - простота у навчанні персоналу; - отримання продукту що максимально відповідає заданим параметрам
11.	План щодо залучення рефералів	Для створення сайту будуть залучені друзі та знайомі з аналогічними стартапами або супутніми товарами та технологічними рішеннями. Клієнти, що купуватимуть дане технічне рішення якийсь час отримуватимуть безкоштовне навчання та допомогу у впровадженні його у виробництво. Також, колеги із суміжними розробками будуть супутньо презентувати продукти один одного на виставках та технологічних конференціях
12.	Фінансові прогнози	Так як лабораторія та все необхідне обладнання для досліджень люб'язно надано навчальним закладом, то саме дослідження додаткових витрат не потребує (або ж вони настільки мізерним що їх можна не враховувати). Основною статтею затрат буде просування продукту та пошук потенційних покупців. Для цього першочергова створюється сайт (для мінімізації затрат власними силами). Ресурс буде розміщено на особистому сервері. Також, для просування продукту в мережі інтернет необхідно постійно провадити SMM рекламу на відповідних ресурсах та копірайтинг сайту для актуалізації новин. Цей пункт також проводитиметься самостійно. Затратно частиною буде участь у виставках та конференціях (середня вартість одного відвідування близько 500 грн). Для старту проекту попередньо закладається сума в 10000 грн. Основними джерелами фінансування є власні кошти розробника. Для подальших розробок буде подана заявка на

		грант. Також активно проводиться пошук інвестора.
--	--	---

Для розвитку проєкту найближчим часом необхідно знайти спонсорів та споживачів, почати вихід на ринок. Створений продукт дозволить зменшити об'єм і вартість технологічних процесів з виготовлення деталей на 3D принтері та придатний не тільки для нового виробництва, а й модернізації вже існуючого обладнання. Цільовою аудиторією стануть покупці з середньою купівельною спроможністю. Покупцем може стати як ентузіасти 3D друку так і малий бізнес. Основною статтею затрат буде просування продукту та пошук потенційних покупців. Для цього першочергова створюється сайт власними силами та розміщено на особистому сервері. Основними джерелами фінансування є власні кошти розробника. Для подальших розробок буде подана заявка на грант. Також активно проводиться пошук інвестора.

5.4. Організація реалізації стартап-проєкту

Більшість розробників стартап-проєктів вважають наявність оригінальної ідеї своїм ключовим фактором успіху. Проте, відсутність поруч людей, які здатні не лише повністю зрозуміти сутність ідеї автора, а й максимально ефективно реалізувати її, загрожує тим, що стартап-проєкт взагалі не відбудеться [69].

Сформуємо команду стартапу, з урахуванням подальшого розвитку та продажу продукту (табл. 5.25)

Таблиця 5.25. Команда стартап-проєкту:

Стадія стартапу	Завдання учасників	Учасники команди	Освіта	Досвід роботи	Спеціалі- зовані знання	Вит- рати, тис. грн
--------------------	-----------------------	---------------------	--------	---------------	-------------------------------	------------------------------

Pre-seed	Згенерувати ідею дослідження, створити її теоретичне обґрунтування	Стартапер	Вища технічна	У стартапуванні відсутній, інженера-конструктора 1 рік, інженера-програміста 1 рік	Інженерні, програмні	10
Seed	Аналіз вже існуючих розробок	Команда стартапу				
Startup	Провести дослідження	DevOps	Вища технічна	DevOps 1 рік	Інженерні, програмні	10
MVP	Визначення залежностей, побудова математичної моделі, оптимізація моделі Створення установки	Інженер-конструктор	Вища технічна	інженера-конструктора 2 роки.	Інженерні	30
Product-market &-channel fit	Визначення стратегії розповсюдження, створення лендінгу	Web розробник, маркетолог	Вища маркетингова	Маркетолога 1 рік.	Web реклама	20
Долина смерті	Накопичення ресурсів, пошук інвесторів	Команда стартапу				50
Стадія запуску продукту	Розпочати продажі зі сталим обсягом	Команда стартапу				20
Стадія зростання та розширення	Створення бізнес команди, визначення бізнес-процесів	Бізнес аналітик, юрист, бухгалтер		Від 2х років		50
Стадія ведення бізнесу	Продовження досліджень, визначення подальшого ведення розвитку	Робітники компанії		Від 3-4 років		100

Команда стартапу на початкових етапах, зазвичай складається з друзів та однодумців, але з розвитком проєкту та зростанням масштабів його реалізації постає потреба у залученні професіоналів у різних сферах (маркетинг, фінанси, продажі, операційна діяльність, залучення інвестицій тощо) і формування злагодженої команди є чи не найголовнішим питанням для успішного розвитку стартап-проєкту [69].

Важливою частиною успішної реалізації проєкту є складання план-графіку (табл. 5.26) та його дотримання. Відхилення від графіку повинно мати вагомі причини та по можливості компенсуватися.

Таблиця 5.26. Календарний план-графік підготовки стартапу [70]:

Стадія стартапу	Період запуску									Вартість стадії,
	(за місяцями з початку підготовки проєкту)									Тис. грн
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Pre-seed	...									10
Seed		...								12
Startup			...							10
MVP				...						30
Product-market &-channel fit					...					20
Долина смерті						...				50
Стадія запуску продукту							...			20
Стадія зростання та розширення								...		50
Стадія ведення бізнесу									...	100
Разом										302

На реалізацію усіх запланованих стадій проєкту від ідеї до повноцінного масового продажу продукту знадобиться дев'ять місяців та триста дві тисячі гривень.

Для реалізації проєкту необхідні базові матеріали та комплектуючі (табл. 5.27) та обладнання і технічні засоби (табл. 5.28).

Таблиця 5.27. Сировина, матеріали, та комплектуючі [70]:

Найменування видів сировини, матеріалів та комплектуючих виробів	Поста-чальники	Ціна за одиницю	Умови постачання
Орг скло	Епіцентр	150 грн/шт	Разова покупка
PLA пластик	Онлайн магазин 3D Plast	450 грн/кг	Разова покупка
Arduino Leonardo	Онлайн магазин AliExpress	200 грн/шт	Разова покупка
Електронні комплектуючі	Онлайн магазин Arduino.UA	500 грн/комп	Разова покупка
Разом		1300	130

Таблиця 5.28. Потреба в обладнанні та технічних засобах[71]:

Найменування обладнання	Кількість	Постачальники	Умови постачання	Вартість, тис. грн
3D принтер Head 3D	1	Онлайн магазин AliExpress	Разова покупка	12000
Паяльна станція	1	ТОВ “Rozzetka.ua”	Разова покупка	3000
Персональний комп’ютер	1	ТОВ “Rozzetka.ua”	Разова покупка	20000
Разом	3			25000

Все обладнання базові компоненти та розхідні матеріали закуплено розробником за власні кошти.

Для базової реалізації проєкту знадобляться, власне, реалізатори (табл. 5.29). На початковій стадії потрібно зпроектувати ідею, скласти установку та провести саме дослідження.

Таблиця 5.29. Потреба в промислово-виробничому персоналі:

Посада	Чисельність	Витрати, тис. грн
Проектувальник	1	12000
Інженер	1	12000
Дослідник	1	15000
Разом	3	39000

Для виконання початкових завдань проєктувальник, інженер та дослідник. Затрати на персонал складуть 39000 грн.

Загальні витрати на запуск виробництва продукту в проєкті (табл. 5.30) мають врахувати як закупку обладнання, матеріалів, комплектуючих, так і витрати на саме виробництво.

Таблиця 5.30. Зведений план витрат на запуск виробництва продукції:

Найменування	Пояснення	Вартість тис. грн.
Витрати на придбання обладнання та устаткування	Витрати на придбання обладнання	25
Сировина, основні матеріали	Вартість сировини та матеріалів для забезпечення технологічного процесу	0,45
Комплектуючі	Витрати на комплектуючі продукту	0,5
Паливо та електроенергія на технологічні цілі	Витрати на електроенергію, а також на паливо, необхідні для запуску проєктної потужності виробництва	3
Оплата праці промислово-виробничого персоналу	Витрати на заробітну плату та соціальні відрахування	39
Освоєння та запуск виробництва	Витрати на пусконаладжувальні роботи, запуск виробництва	2
Разом:		66,95

Отже, крім самого обладнання та сировини необхідно врахувати паливо та електроенергію, затрати на персонал, освоєння та запуск виробництва. Загалом витрати становитимуть двадцять три тисячі гривень.

Щоб скласти фінансову модель стартапу та оцінити реальні затрати для початку необхідно оцінити початкові вкладення у стартап-проєкт (табл. 5.31)

Таблиця 5.31. Початкові вкладення у стартап-проєкт (мета стартапу):

Види витрат	Вартість
НДДКР	5000
Захист прав на об'єкти інтелектуальної власності	0
Закупівля сировини та матеріалів	1000
Створення прототипу, дослідни	5000
Оренда приміщення	0

Просування	10000
Витрати на команду	39000
Замовлення послуг, менторство	0
Закупівля обладнання	25000
Створення сайту стартапу	0
Орієнтована собівартість першого продукту (дослідження)	85000
РАЗОМ	85000
Витрати, що бере на себе стартапер	25000
Необхідні інвестиції для запуску стартапу та виробництва першої партії	60000

Для початкового запуску продукту знадобиться вісімдесят п'ять тисяч гривень. З цієї суми двадцять п'ять тисяч гривень стартапер оплатить самостійно. Для компенсації решти затрат буде подана заявка на грант. Також активно проводиться пошук інвестора.

Розглядатимемо фінансову модель, що відповідає нашому стартапу (табл. 5.32) — розрахунок економіки для проєктів на стадії «ідея», бо, як показує практика, на цій стадії і у разі коли проєкт готується під приватного інвестора або для венчурного фонду, можна на початковому етапі переговорів обійтися і без звичних для банківської сфери звітів, що істотно знижує вартість робіт з розрахунку та тимчасові трудовитрати [72]:

Таблиця 5.32. Планові фінансово-економічні показники проєкту:

	Показник	Періоди (по місяцях)												Всього за рік
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	Обсяг виробництва продукції в натуральних показниках	...	...	...	...	...	...	...	...	1	...	...	...	1
2	Собівартість одиниці продукції, тис. грн.	...	...	...	...	...	...	...	...	85		...	...	85
3	Собівартість виробництва продукції, тис. грн. ($3 = 1 \cdot 2$)	...	...	...	...	...	...	...	...	85	...	...	...	85

4	Обсяг реалізації продукції в натуральних показниках	...	...	...	...	...	...	...	...	1	...	...	...	1
5	Ціна реалізації продукції без ПДВ, тис. грн.	...	...	...	...	...	...	...	...	85	...	...	...	85
6	Виручка від реалізації продукції без ПДВ, тис. грн. (6 = 4 · 5)	...	...	...	...	...	...	...	...	120	...	...	...	120
7	Податок на додану вартість (ПДВ), тис. грн. (7=6/5)	...	...	...	...	...	...	...	...	1,41	...	...	...	1,41
8	Валовий прибуток (8 = 6 – 3)	...	...	...	...	...	...	...	...	35	...	...	...	35
9	Податок на прибуток (9=8*0,20 (20 %))	...	...	...	...	...	...	...	...	7	...	...	...	7
10	Чистий прибуток (10 = 8 – 9)	...	...	...	...	...	...	...	...	28	...	...	...	28

Окупність інвестицій [72]:

$$ROI = \frac{ANP}{I} \cdot 100\% = \frac{28000}{60000} = 46.6\%,$$

де ROI – окупність інвестицій;

ANP – накопичений за період чистий прибуток;

I – сума необхідних інвестицій.

Термін окупності інвестицій DPP (від англ. Discounted payback period) :

$$DPP = \frac{I - CH_p}{H_{p+1}} + T = \frac{60000 - 0}{60000} + 0 = 1,$$

де I – сума інвестицій;

H_p – сумарні дисконтовані надходження протягом років, що є попередніми до року, в якому повністю покривається сума інвестицій;

H_{p+1} – дисконтовані надходження за рік, в якому повністю покривається сума інвестицій;

T – попередній рік до року, в якому повністю покривається сума інвестицій.

Ставка дисконтування для стартапів становить 40–60 % і розраховується як:

$$R = r_f + r_p + i = 50\%,$$

де r_f – безризикова ставка,

r_p – премія за ризик;

i – відсоток інфляції.

Оцінювання ризиків стартап-проєкту (табл. 5.33) має враховувати ризиків інноваційної розробки, ймовірність їх настання, вплив на очікуваний результат, методи страхування [55].

Таблиця 5.33. Комплексна оцінка ризиків:

№ з/п	Найменування ризику	Джерело ризику	Наслідки ризику	Ступінь загрозовості (КТ, КР, ПР)	Дії щодо зменшення ризику	Характер дій (ймовірність настання – ВІ або наслідки)	Ступінь контрольованості
Продуктові ризики							
1.1	Перебої у постав-ках	Поста-чальник	Зміщення термінів реалізації	ПР	Покупка у перевіреного постачальника	ВІ	ЧКР
1.2	Брак	Стартапер	Збільшенн-я витрат, зміщення термінів	ПР	Дотримання тех. стандартів і норм	ВН	НКР
Клієнтські ризики							
2.1	Не бажання купувати	Клієнт	Зменшенн-я прибутку	КТ	Покращення маркетингу	ВІ	ЧКР
2.2	Глобальни й карантин	Клієнт	Відсутніст ь покупок	КТ	Розвиток онлайн реклами й продажів	ВІ	НКР
Ринкові ризики							
3.1	Вихід на ринок конкурентн	Конкурент	Зменшенн-я кількості продажів	КР	Розвиток реклами,	ВН	НКР

	ого рішення				покращення пропозиції (рішення)		
3.2	Глобальни й карантин	Глобальни й ринок	Відсутніст ь покупок	КТ	Розвиток онлайн реклами й продажів	ВІ	НКР
Інвестиційні ризики							
4.1	Неокупніст ь	Стартап	Втрата інвестицій	КТ	Інтенсивний пошук покупців	ВІ	НКР
4.2	Не своєчасне надходжен ня інвестицій	Інвестор	Зміщення термінів реалізації	ПР	Заклучення інвестиційног о договору	ВІ	ЧКР

Пропонований продукт має широкий спектр ризиків у всіх сферах. Серед них є як прийнятні та критичні, так і катастрофічні ризики. Деякі з наведених ризиків частково контрольована, але є і не контрольовані ризики. Для них продумано дії щодо зменшення або нівелювання таких ризиків.

Визначимо найнебезпечніші ризики за поєднанням ступенів їх контрольованості та загрози для стартапу, розділимо ризики за ступенем можливого впливу на ризик таким чином, щоб зменшити його до рівня не загрозовості для проекту (табл. Таблиця 5.34).

Таблиця 5.34. Класифікація ризиків:

Загрозливість ризик	Контрольованість ризику		
	Неконтрольований ризик (НКР)	Частково контрольований ризик (ЧКР)	Повністю контрольовани й ризик (ПКР)
Катастрофічни й ризик (КТ)	Глобальний карантин; Неокупніст	Не бажання купувати	--
Критичний ризик (КР)	Вихід на ринок конкурентного рішення	--	--
Прийнятний ризик (ПР)	Брак	Перебої у поставках;	--

		Не своєчасне надходження інвестицій	
--	--	-------------------------------------	--

Нажаль, проєкт не має повністю контрольованих ризиків. Катастрофічні ризики не контрольовані, бо пов'язані здебільшого з глобальними подіями у світі. Тим не менше всі ризики будуть враховані та пропрацьовано стратегію зменшення впливу таких ризиків.

Як підсумок до всього вищевикладеного складемо резюме бізнес-плану стартапу (табл. 5.35) – стисла інформація про результати бізнес-планування, що висвітлює кожний розділ бізнес-плану [59].

Таблиця 5.35. Резюме бізнес-плану [59,73]:

Показник	Дані для відображення	
Концепція проєкту	Проведення дослідження впливу мікрокліматичних параметрів на якість поверхонь отриманих методом FDM друку	
Команда та персонал	Прагнення до досліджень, інженерні знання, відповідальність, комунікабельність, загальна ерудованість.	
Опис ринку та галузі	Унікальність технічного рішення	
Продукція	Результат дослідження впливу мікрокліматичних умов на якість поверхонь отриманих методом FDM друку, що забезпечить значну економію та зменшення браку виробництва	
Ресурси	В наявності обладнання що буде підлягати модернізації і послідовному дослідженню, обладнання для виготовлення елементів технічного рішення	
Супровідні документи	Не потрібні.	
Ризики	Глобальний карантин - розвиток онлайн реклами й продажів; Неокупність. - інтенсивний пошук покупців	
Потреба в інвестиціях	Необхідні інвестиції на матеріали, обладнання й на виконання дослідження в розмірі 31000 грн. Основне джерело інвестицій на сьогоднішній день сам стартапер.	
Графік реалізації проєкту	Термін реалізації, місяців	9

	Початок підготовки проєкту, місяць, рік	9.2021
	Початок продажів, місяць, рік	6.2022
Бюджет проєкту	Вартість проєкту, тис. грн, у тому числі	85
	Власні кошти, тис. грн	25
	Інвестиційні кошти, тис. грн	60
Прибутковість проєкту	Виручка від реалізації, тис. грн	120
	Чистий прибуток, тис. грн	28
Інвестиційна привабливість проєкту	Ставка дисконту, %	...
	Окупність інвестицій (ROI), %	46,6
	Дисконтований період окупності (DPP), місяців	12

Описано концепцію продукту та строки реалізації запропонованого продукту. Наведено опис ринку та галузі вцілому. Вказано ключові ризики котрі можуть негативно вплинути на стартап. Наведено загальну інформацію про фінансову сторону стартапу (бюджет проєкту, його прибутковість й інвестиційну привабливість).

Висновки до розділу

Узагальнюючи проведений аналіз стартап проєкту можна зробити висновок що:

Розробка є новою та унікальною, але вже потрібною ринку.

Значне поліпшення адитивного виробництва та подальше зменшення витрат абсолютно компенсують вартість розробки для масового виробника в перші місяці.

Для немасових виробників окупність продукту буде приблизно через 600-1000 виготовлених деталей (залежно від специфіки деталі), станом на початок запуску виробництва:

Вартість стартової розробки 85000 грн.

Ціна на виході 120000 грн.

Чистий прибуток: 28000 грн.

Витрати на персонал 39000 грн.

Для початкового запуску продукту знадобиться вісімдесят п'ять тисяч гривень. З цієї суми двадцять п'ять тисяч гривень стартапер оплатить самостійно.

Дана розробка не має прямих аналогів. Найбільш схожі моделі з меншим функціоналом коштують в рази дорожче розробленої моделі.

Окупність інвестицій (ROI) – 46.6%

Термін окупності інвестицій (DPP) – 1 рік.

Товар здатен зайняти свою долю ринку лише за показником "ціна", а враховуючи значні переваги над аналогом у функціоналі - ринок збуту розширюватиметься та займе вагому нішу ринку 3D принтерів.

Пропонований продукт має широкий спектр ризиків у всіх сферах. Серед них є як прийнятні та критичні, так і катастрофічні ризики. Деякі з наведених ризиків частково контрольована, але є і не контрольовані ризики. Для них продумано дії щодо зменшення або нівелювання таких ризиків.

На реалізацію усіх запланованих стадій проєкту від ідеї до повноцінного масового продажу продукту знадобиться дев'ять місяців та триста дві тисячі гривень.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ДО МАГІСТЕРСЬКОЇ ДИСЕРТАЦІЇ

В магістерській дисертації розглянуто питання пов'язані із якістю поверхонь деталей отриманих за допомогою FDM 3D друку.

Проведено літературний пошук за темою магістерської дисертації. Розглянуто стан питання якості поверхонь виготовлених FDM 3D друкуванням.

На основі аналізу стану питання сформовано задачі дисертаційних досліджень.

Розглянуто шляхи підвищення якості друкування поверхонь деталей шляхом створення експериментальних установок і технології друкування.

Встановлено вимоги, котрим повинна відповідати створена експериментальна установка. Визначено критерії вибору 3D принтера як базу що є основою нової конструкції.

З врахуванням встановлених вимог до друкування деталей придбано 3D принтер та необхідні для модифікації комплектуючі деталі.

Виконано складання модифікованої конструкції 3D принтера, проведено пусконаладжувальні роботи, в результаті чого виявлено недоліки конструкції та визначено шляхи їх усунення.

За розробленою принциповою схемою організації температурного режиму процесу друкування створено систему керування мікрокліматом на основі контролера Arduino Leonardo.

Розглянуто методи створення математичних моделей шляхом ортогонального та рототабельного планування другого порядку й методів евристичної самоорганізації моделей. Розглянуто методологію оброблення експериментальних даних. Для спрощення процесу оброблення результатів експериментальних досліджень розглянута можливість використання готових пакетів програмного забезпечення. Для оброблення результатів факторних експериментів створено програмний додаток OrtRotCalc, написаний мовою програмування MATLAB. Він реалізує обробку результатів дослідження та створення на їх основі математичних моделей, а також виконує оптимізацію

параметрів процесу друкування за критерієм мінімальної шорсткості й реалізує графічний супровід за результатами моделювання. Для отримання математичних моделей модами евристичної самоорганізації на основі алгоритмів МГВА обрано програмний додаток GMDH Shell DS.

Наведено алгоритм проведення експериментальних досліджень. Для виконання експериментальних досліджень створено 3D модель експериментального зразка. З метою оптимізації кількості дослідів проведено порівняння планів ортогонального та рототабельного планування й на їх основі створено єдиний план проведення дослідження.

В результаті проведення дослідів отримано профілограми та цифрові результати шорсткості за 39 зразками, отримані результати систематизовано.

За результатами експериментальних досліджень побудовано 9 математичних моделей. В ході аналізу отриманих моделей визначено, що кращий опис параметрів Ra_1 і Ra_2 дають моделі, що побудовані на основі рототабельного плану. Параметр Ra_3 найкраще описує модель, що побудована за ортогональним планом.

Визначено математичні моделі, що найкраще описують процес друкування деталей. Виконано оптимізацію параметрів якості. На основі цих же моделей побудовано тривимірні графіки, що відображають характер отриманих моделей. За результатами оптимізації надано рекомендації з вибору режимів друку для отримання мінімальної шорсткості поверхні. Також визначено, що для підвищення якості поверхонь малих розмірів, доцільно використовувати малі швидкості друкування та великі температури друку.

Визначено, що з одного боку, запропонований метод не має значної переваги при використанні одночасного підігріву стола з нагрівачем. З іншого боку, при використанні підігріву стола та нагрівача отримано помітно кращі результати шорсткості поверхонь. Використання додаткових нагрівачів більше доцільне для випадків, коли неможливо встановити столик з підігрівом.

Проведено розробку стартап проекту, в результаті чого сформовано повноцінний стартап проект з наступними параметрами:

– вартість стартової розробки – 85000 грн;

- ціна на виході для споживача – 120000 грн;
- чистий прибуток – 28000 грн;
- витрати на персонал – 39000 грн.

Для початкового запуску продукту знадобиться вісімдесят п'ять тисяч гривень. З цієї суми двадцять п'ять тисяч гривень стартапер оплатить самостійно.

Дана розробка не має прямих аналогів. Найбільш схожі моделі з меншим функціоналом коштують в рази дорожче розробленої моделі.

Окупність інвестицій (ROI) – 46.6%

Термін окупності інвестицій (DPP) – 1 рік.

ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ

1. Слюсар, В.И. (2008). [Фабрика в каждый дом.](#) *Вокруг света.* – № 1 (2808). - *Январь, 2008.* с. С. 96 – 102.
2. Nasa tests 3D-printed rocket engine fuel injector// Електронний ресурс <https://www.bbc.com/news/technology-23313921>
3. Обзор 3D-принтера Wanhao Duplicator i3 Plus // [Електронний ресурс] – режим доступу: <https://3dtoday.ru/blogs/sergey/browse-3d-printer-wanhao-duplicator-i3-plus/>
4. CreatBot DX Plus 3D принтер // [Електронний ресурс] –режим доступу: <https://3dreams.com.ua/товар/creatbot-dx-plus-3d-принтер/>
5. Типы 3D-принтеров: технологии, материалы, применение // [Електронний ресурс] –режим доступу: <https://blog.iqb.ru/3d-printers-types/>
6. 3D принтер Galaxy // [Електронний ресурс] –режим доступу: <https://effectenergy.com.ua/produksiya/3d-printery/galaxy.html>
7. 3D-принтеры по металлу, технологии и стоимость // [Електронний ресурс] – режим доступу:<https://top3dshop.ru/blog/metal-3d-printing-techs-and-cost.html>
8. Яригін В. А. Вислоух С.П. Про якість поверхонь, що отримані fdm друком / В.А Яригін., С.П Вислоух // XVII Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність інженерних рішень у приладобудуванні» 7-8 грудня 2021 року – К.: ПБФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського. Центр учбової літератури. – 2021. – С. 122-125.
9. Яригін В. А. Вислоух С.П. Перспективи використання мікрокліматичних установок для fdm 3d друку / В.А Яригін., С.П Вислоух // Збірник наукових праць XIV Науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування», 18-19 травня 2021 р. м. Київ, – К: К.: ПБФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського. Центр учбової літератури. – 2021. – С. 184 – 187.
10. Дослідження якості деталей, виготовлених 3D друком/ Яригін В. А.// Дипломна робота – К: ПБФ КПІ ім. Ігоря Сікорського. - 2020

11. A. R. Avdeev, Investigation of Kinematics of 3D Printer Print Head Moving Systems // A. R. Avdeev, A. A. Shvets & I. S. Torubarov – ICIE 2019: [Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering \(ICIE 2019\)](#) pp 461–471
12. Hermes Giberti Kinematic synthesis of a new 3D printing solution / Hermes Gibe Enric Fiore and Luca Sbagllia
13. Kinematic error modeling and error compensation of desktop 3D printer / Shane Keaveney, Pat Connolly Eoin, D.O'Cearbhaill. Nanotechnology and Precision Engineering Volume 1, Issue 3, September 2018, Pages 180-186
14. Kinematic modeling and verification for a SCARA robot https://www.researchgate.net/publication/301735568_Kinematic_modeling_and_verification_for_a_SCARA_robot
15. The types of FDM printers are much more diverse than just CoreXY and Cartesian 3D printers. Read on to get to know them all. URL: <https://all3dp.com/2/cartesian-3d-printer-delta-scara-belt-corexy-polar/>
16. Types of FDM 3D Printers URL: <https://njkhanh.com/types-of-fdm-3dprinters-p5f3134353533>
17. Sustainability metrics for real case applications of the supply chain network design problem: A systematic literature review / Carlos A. Moreno-Camacho, Jairo R. Montoya-Torres, Anicia Jaegler, and Natacha Gondran Journal of Cleaner Production Volume 231, 10 September 2019, Pages 600-618
18. Вологість повітря / електронний ресурс // режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D1%96%D1%81%D1%82%D1%8C_%D0%BF%D0%BE%D0%B2%D1%96%D1%82%D1%80%D1%8F
19. Сайт програмного комплексу GMDH Shell DS/ Електронний ресурс// Режим доступу: <https://gmdhsoftware.com/demand-planning-software>
20. Планирование и организация измерительного эксперимента / Володарський Е. Т. Малиновський Б. Н. Туз Ю. М. // навчальний посібник, – К: К.: головне видавництво «Вища школа» – 1987, – С. 280.

21. Планирование эксперимента в технологических исследованиях / Винарський М. С. Лурье М. В. // – К.: «Техніка», 1975, – С. 168
22. Якушев Я. И. и др. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения. Учебник для втузов / А. И. Якушев, Л. Н. Воронцов, Н. М. Федотов. — 6-е изд., перераб. и дополн. — М.: Машиностроение, 1987. — 352с.
23. Гаврилюк В. Г., Кукляк М. Л. Взаємозамінність, стандартизація і технічні вимірювання. Навчальний посібник для студентів механічних та машинобудівних спеціальностей. — К: УМКВО, 1990. — 210с.
24. Вислоух С.П. Інформаційні технології в задачах технологічної підготовки приладо- та машинобудівного виробництва: моногр. / С.П. Вислоух. – К.: НТУУ “КПІ”, 2011. – 488 с.
25. Яригін В.А. Використання штучних нейронних мереж при 3D проектуванні деталей. / В.А. Яригін., С.П. Вислоух // Збірник праць XII Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених» ПОГЛЯД У МАЙБУТНЄ ПРИЛАДОБУДУВАННЯ», 15-16 травня 2019 р. – К.: ПБФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського. Центр учбової літератури. – 2019. – С. 211-213.
26. Вислоух С.П., Яригін В.А., Глоба О.В., Іваненко Р.О. Підвищення якості великогабаритних деталей, виготовлених методом FDM 3D друку. / Вислоух С.П., Яригін В.А., Глоба О.В., Іваненко Р.О. // Науковий журнал «комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво», м. Луцьк, Видавництво Луцького національного технічного університету, – 2021, – С. 5 – 11.
27. Antonyk V., D.E., prof., Vysloukh S., PhD, assoc. prof., Filippova M., PhD, assoc. prof., Voloshko O. The increasing of initial data informativeness in solving technological tasks. Przemysl, Nauka i Studia, NR 3(48), 2012. – P. 114-120.
28. Antonyuk V.S. ,Vysloukh S.P. Information technology in deciding of technological problems in instrument making and machine engineering. /Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні : [збірник наукових праць] / відповідальний редактор. З. А.

Стоцько. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2013– (Вісник / Національний університет "Львівська політехніка" ; № 760). – С. 101-105.

29. Voloshko O.V., Vysloukh S.H. Modelling machinability parameters of structural materials. / Збірник наукових праць VI-ої Міжнародної науково-технічної конференції « Прогресивні технології в машинобудуванні» 6-10 лютого 2017р. – Львів, 2017. – С. 21-22.

30. Яригін В.А., Вислоух С.П. Методологія покращення характеристик міцності деталі, що виготовлена методом 3D друку. // Збірник наукових праць X Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю «Процеси механічної обробки, верстати та інструмент». – Житомир: Державний університет «Житомирська політехніка», 6–9 листопада 2019 р. – С. 209-213.

31. Яригін В.А., Вислоух С.П. Про сучасні методи та засоби моделювання // Збірник праць XV Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених “ЕФЕКТИВНІСТЬ ІНЖЕНЕРНИХ РІШЕНЬ У ПРИЛАДОБУДУВАННІ”, 10-11 грудня 2019 р. – К.: ПБФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Центр учбової літератури. – 2019. – С. 201 – 204.

32. Яригін В.А. Аналіз параметрів, що впливають на якість 3d друку / В.А Яригін., С.П. Вислоух // Materials of the 20th International Scientific and Technical Seminar “Modern questions of production and repair in industry and in transport”, March 23-29, 2020, Kosice, Tbilisi, Georgia. –С. 209 -213

33. Яригін В.А. Особливості отримання прототипів за допомогою 3d друку / В.А Яригін., С.П Вислоух. // Збірник наукових праць XIII Науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування», 13-14 травня 2020 р. м. Київ, – К: ПБФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського. Центр учбової літератури. – 2020. – С. 139 – 142.

34. Яригін В.А. Дослідження параметрів якості деталей, отриманих шляхом 3d друку / В.А Яригін., С.П Вислоух // Збірник тез всеукраїнської науково-практичної on-line конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених, присвяченої Дню науки, 11-15 травня 2020 року м.Житомир , – К.:Державний університет «Житомирська політехніка» – С. 125 – 126.

35. Яригін В.А. Реверс-інженерія при прототипуванні в приладобудуванні / В.А. Яригін, С.П. Вислоух // Збірник праць Інтеграція освіти, науки та бізнесу в сучасному середовищі: зимові диспути: тези доп. І Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції, 6-7 лютого 2020 р. – Дніпро, 2020. – Т.3. – С. 515-519.

36. Вислоух С.П., Яригін В.А., Глоба О.В., Іваненко Р.О. Підвищення якості крупногабаритних деталей, виготовлених методом FDM 3D друку. Науковий журнал "Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво". – Луцьк: 2021. Випуск № 43. – С. 5 – 11.

37. Комп'ютерне моделювання процесів та систем. Чисельні методи: підручник / С.П. Вислоух, О.В. Волошко, Г.С. Тимчик, М.В. Філіппова. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2021. – 228 с. ISBN 978-966-990-028-9.

38. Antonyuk, V.S. & Vyslourh, S.P.: Chapter 4: Parametric optimization of the process for material by rising processing. In: *Modern Manufacturing Processes and Systems*, Vol. 1: *Fundamentals*. Vrnjačka Banja (Serbia): SaTCIP Publisher Ltd. & Belgrade (Serbia): Faculty of Information Technology and Engineering (FITI), 2020, pp. 73–100. ISBN 978-86-6075-069-5. <https://plus.sr.cobiss.net/opac7/bib/30145801#full>

39. Vysloukh S.P., Antonyuk V.S., Barandych K.S., Voloshko O.V. Mathematical modeling of automated production systems (*Математичне моделювання виробничих систем*) // International Scientific Journals [Mathematical Modeling Vol. 4 \(2020\), Issue 4](https://stumejournals.com/journals/mm/2020/4/114.full.pdf), pg(s) 114-120 <https://stumejournals.com/journals/mm/2020/4/114.full.pdf>

40. Вислоух С. П., Терещенко М. Ф., Тимчик Г. С. Дипломний проєкт бакалавра: виконання, оформлення та захист : навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за спеціальністю 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 64 с.URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/47341>

41. Чонка, Е. Я. Аналіз точності формування поверхонь деталей виготовлених на 3D-принтері / Е. Я. Чонка, В. С. Антонюк // XV Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених

«Ефективність інженерних рішень у приладобудуванні», 10-11 грудня 2019 року, м. Київ, Україна : збірник праць конференції / КПІ ім. Ігоря Сікорського, ПБФ, ФММ. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського; Центр учбової літератури, 2019. – С. 197–200. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/31651>

42. Новаковский А.Г., Антонюк В.С. Анализ современных технологических подходов к аддитивному производству // Республиканский межотраслевой производственно практический журнал. -Минск –No 3(72) –2016.–С. 11 –12

43. P. Gupta, C.A. Duarte and A. Dhankhar Accuracy and Robustness of Stress Intensity Factor Extraction Methods for the Generalized/eXtended Finite Element Method // *Engineering Fracture Mechanics*, march 2017. DOI: [10.1016/j.engfracmech.2017.03.035](https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.03.035)

44. Daniel Ahlers, Florens Wasserfall, Norman Hendrich and [Jianwei Zhang](#) Daniel Ahlers 3D Printing of Nonplanar Layers for Smooth Surface Generation // University of Hamburg. 2018. DOI: [10.13140/RG.2.2.34888.26881](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.34888.26881)

45. P. M. Bhatt, R. K. Malhan, A. V. Shembekar, Y. J. Yoon, and S.K. Gupta. Expanding capabilities of additive manufacturing through use of robotics: A survey. // *Additive Manufacturing*. 31:100933, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100933>

46. Ben Ezair, Thesis Seminar Advanced Geometric Methods in Machining and Additive Manufacturing, // Technion. Tel-Aviv 2019. <http://www.cs.technion.ac.il/events/2019/3238/>

47. [Moritz Walter](#) 3D Printering: Non-Planar Layer FDM // [July 27, 2016](#)<https://www.facebook.com/sharer/sharer.php?u=https%3A%2F%2Fhackaday.com%2F2016%2F07%2F27%2F3d-printering-non-planar-layer-fdm%2F><https://twitter.com/intent/tweet?text=3D+Printering%3A+Non-Planar+Layer+FDM%20via%20@hackaday&url=https%3A%2F%2Fhackaday.com%2F2016%2F07%2F27%2F3d-printering-non-planar-layer-fdm%2F><https://hackaday.com/2016/07/27/3d-printering-non-planar-layer-fdm/>

48. [Aniruddha V. Shembekar, Yeo Jung Yoon, Alec Kanyuck, Satyandra K. Gupta.](#) Trajectory Planning for Conformal 3D Printing Using Non-Planar Layers. DETC2018-85975, V01AT02A026. November 2018.

49. Стеценко, І.В. Моделювання систем: навч. посіб. [Електронний ресурс, текст] / І.В. Стеценко ; М-во освіти і науки України, Черкас. держ. технол. ун-т. – Черкаси : ЧДТУ, 2010. – 399 с. ISBN 978-966-402-073-9

50. Вислоух С.П. Проектування технологічних процесів на основі розпізнавання образів. //Вісник НТУУ "КПІ". Приладобудування. Вип. 26, – Київ, 2003. С. 65-73.

51. Вислоух С.П., Катрук О.В. Моделювання технологічних параметрів нечітким методом групового врахування аргументів. / Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – Хмельницький, 2007, No1 (89). – С. 169 – 172.

52. THE DEVELOPMENT OF SELF-ORGANIZATION TECHNIQUES IN MODELLING: A REVIEW OF THE GROUP METHOD OF DATA HANDLING (GMDH)/ L. Anastasakis & N. Mort// Research Report No. 813 – Department of Automatic Control & Systems Engineering The University of Sheffield Mappin St, Sheffield, S1 3JD, United Kingdom – 2001, – С. 38.

53. Ockham сайт розробника / Електронний ресурс // Режим доступу: <https://www.knowledgeminer.eu/ockham/download.html>

54. Шорсткість поверхні // [Електронний ресурс] – режим доступу: https://uk.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%A8%D0%BE%D1%80%D1%81%D1%82%D0%BA%D1%96%D1%81%D1%82%D1%8C_%D0%BF%D0%BE%D0%B2%D0%B5%D1%80%D1%85%D0%BD%D1%96&oldid=27033958

55. Розроблення стартап-проекту: Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей/ За заг. ред. О.А. Гавриша. Київ : НТУУ «КПІ», 2016. 28 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/35763>

56. Как составить бизнес-план – образец с расчетами, структура и содержание бизнес-плана + готовые примеры. *Richpro.ru. Финансовый журнал.* URL: Richpro.ru.

57. Шаблон для заполнения бизнес-плана. *Novsu*. URL: www.novsu.ru/file/1004536.
58. Шаг пятый: описание продукции и услуг. *Openbusiness.ru*. URL: <https://www.openbusiness.ru/biz/business/shag-pyatyy-opisanie-produktsii-i-uslug..>
59. Минко И. С. Бизнес-планирование инновационных проектов: учебное пособие. Санкт-Петербург: НИУ ИТМО; ИХиБТ, 2014. 171 с.
60. Как оценить рынок стартапа. Венчурный Акселератор. URL: <https://1va.vc/news/kak-otsenit-rynok-startapa.html>.
61. Записки маркетолога. URL: http://www.marketch.ru/marketing_dictionary/marketing_terms_u/conversion_rate
62. Создаем позиционирование «с нуля». Онлайн-энциклопедия по маркетингу и рекламе. URL: <http://powerbranding.ru/pozicionirovanie/razrabotka-strategii>.
63. Правильно выбираем конкурентов. Онлайн – энциклопедия по маркетингу и рекламе. URL: <http://powerbranding.ru/competition/kak-opredelit-konkurentov>.
64. Анализ конкурентов на практике: 10 шагов. Онлайн — энциклопедия по маркетингу и рекламе: веб. сайт. URL: <http://powerbranding.ru/competition/kak-opredelit-konkurentov/>
65. Как провести анализ конкурентов стартапа. Венчурный Акселератор. URL: <https://1va.vc/webinars/kak-provesti-analiz-konkurentov-startapa.html>
66. КОНКУРЕНТНА СТРАТЕГІЯ НА МІЖНАРОДНОМУ РИНКУ: СУТНІСТЬ, ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА ВИДИ. Економічні науки Вісник Хмельницького національного університету 2010, № 2, Т. 1 URL: http://journals.khnu.km.ua/vestnik/pdf/ekon/2010_2_1/pdf/156-160.pdf
67. Шепетюк И. Стоимость маркетинга и рекламы для стартап-бизнеса. *Merehead.com*. URL: <https://merehead.com/ru/blog/marketing-and-advertising-costs-for-a-startup-business>.
68. Как сделать маркетинг-план для стартапа. *Yagla*. URL: <http://yagla.ru/blog/marketing/kak-sdelat-marketingplan-dlya-startapa>.

69. КЛЮЧОВІ ЗАСАДИ ФОРМУВАННЯ КОМАНДИ СТАРТАП-ПРОЕКТУ

Автор: Копішинська Катерина Олександрівна, кандидат економічних наук, КПП ім. Ігоря Сікорського URL: <http://www.spilnota.net.ua/ru/article/id-1875/>

70. Покропивний С. Ф., Соболев С. М., Швиданенко Г. О., Дерев'янка О. Г. Бізнес-план: технологія розробки та обґрунтування: навчальний посібник. Київ: КНЕУ, 2002. 379 с.

71. Основы бизнес-планирования для индивидуальных предпринимателей: учебное пособие. Сост.: А. Ю. Манохин. Тамбов, 2011. 71 с.

72. Москаленко С. Финансовая модель. Центр инвестиций и рейтинга проектов. URL: <https://www.innoport.online/2-13-finansovaya-model>.

73. Шаблон для заполнения бизнес-плана. Novsu. URL: www.novsu.ru/file/1004536.

ДОДАТОК А
Ортогональний план експерименту

Дослід	x0	x1	x2	x3	x4	x1^2-4/5	x2^2-4/5	x3^2-4/5	x4^2-4/5	x12	x13	x14	x23	x24	x34	y
Класичний ПФЕ	1	-1	-1	-1	-1	0,2	0,2	0,2	0,2	1	1	1	1	1	1	y1
	1	1	-1	-1	-1	0,2	0,2	0,2	0,2	-1	-1	-1	1	1	1	y2
	1	-1	1	-1	-1	0,2	0,2	0,2	0,2	-1	1	1	-1	-1	1	y3
	1	1	1	-1	-1	0,2	0,2	0,2	0,2	1	-1	-1	-1	-1	1	y4
	1	-1	-1	1	-1	0,2	0,2	0,2	0,2	1	-1	1	-1	1	-1	y5
	1	1	-1	1	-1	0,2	0,2	0,2	0,2	-1	1	-1	-1	1	-1	y6
	1	-1	1	1	-1	0,2	0,2	0,2	0,2	-1	-1	1	1	-1	-1	y7
	1	1	1	1	-1	0,2	0,2	0,2	0,2	1	1	-1	1	-1	-1	y8
	1	-1	-1	-1	1	0,2	0,2	0,2	0,2	1	1	-1	1	-1	-1	y9
	1	1	-1	-1	1	0,2	0,2	0,2	0,2	-1	-1	1	1	-1	-1	y10
	1	-1	1	-1	1	0,2	0,2	0,2	0,2	-1	1	-1	-1	1	-1	y11
	1	1	1	-1	1	0,2	0,2	0,2	0,2	1	-1	1	-1	1	-1	y12
	1	-1	-1	1	1	0,2	0,2	0,2	0,2	1	-1	-1	-1	-1	1	y13
	1	1	-1	1	1	0,2	0,2	0,2	0,2	-1	1	1	-1	-1	1	y14
	1	-1	1	1	1	0,2	0,2	0,2	0,2	-1	-1	-1	1	1	1	y15
	1	1	1	1	1	0,2	0,2	0,2	0,2	1	1	1	1	1	1	y16
Зіркові точки	1	-1,4142	0	0	0	1,19996	-0,8	-0,8	-0,8	0	0	0	0	0	0	y17
	1	1,4142	0	0	0	1,19996	-0,8	-0,8	-0,8	0	0	0	0	0	0	y18
	1	0	-1,4142	0	0	-0,8	1,19996	-0,8	-0,8	0	0	0	0	0	0	y19
	1	0	1,4142	0	0	-0,8	1,19996	-0,8	-0,8	0	0	0	0	0	0	y20
	1	0	0	-1,4142	0	-0,8	-0,8	1,19996	-0,8	0	0	0	0	0	0	y21
	1	0	0	1,4142	0	-0,8	-0,8	1,19996	-0,8	0	0	0	0	0	0	y22
	1	0	0	0	-1,4142	-0,8	-0,8	-0,8	1,2	0	0	0	0	0	0	y23
	1	0	0	0	1,4142	-0,8	-0,8	-0,8	1,2	0	0	0	0	0	0	y24
Нульова точка	1	0	0	0	0	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	0	0	0	0	0	0	y25

ДОДАТОК Б

Рототабельне планування другого порядку

[illegible]

ДОДАТОК В

Для побудови математичної моделі за допомогою МГУА необхідно виконати наступні кроки:

Зібрати початкові дані та систематизувати їх. В даному випадку отримати завдання та перенести його в систему MS Excel, де стовпчики відображають певну змінну, а рядки номер вимірювання. А також необхідно вписати стовпчик результатів. Приклад таблиці наведено на рис. В-1.

	A	B	C	D	E	F	G
1	X1	X2	X3	X4	X5	X6	Y
2	0.5	65	6	32.5	130	450	5.6407
3	0.5	80	9	40	160	560	2.2144
4	0.5	110	8	55	220	470	2.7156
5	0.5	43	10	21.5	86	215	2.6993
6	0.5	65	10	32.5	130	325	3.5609
7	0.5	80	10	40	160	400	3.5078
8	0.5	110	10	55	220	550	2.3869
9	1	45	8	45	45	670	3.0344
10	1	60	9	60	60	460	3.3872
11	1	45	10	45	45	450	2.7456
12	1	60	10	60	60	600	2.6645
13	1	90	10	90	90	900	3.4212
14	3	40	7	120	120	860	2.423
15	3	60	9	180	180	450	2.8864
16	3	60	10	180	180	800	2.6645

Рис. В-1. Приклад таблиці початкових даних.

Запустити програму GMDH Shell DS

На рисунку В-2 зображений порядок вибору новго файлу початкових даних. Натиснути кнопку «Новий» (рис. В-2,1) та обрати у випадаючому списку «Доступ к CSV/XLS/XLSX» (рис. В-2, 2). Відобразиться вікно в якому необхідно обрати файл з початковими даними (рис. В-2, 3). Обравши відповідний файл, натискаємо «відкрити» (рис. В-2, 4).

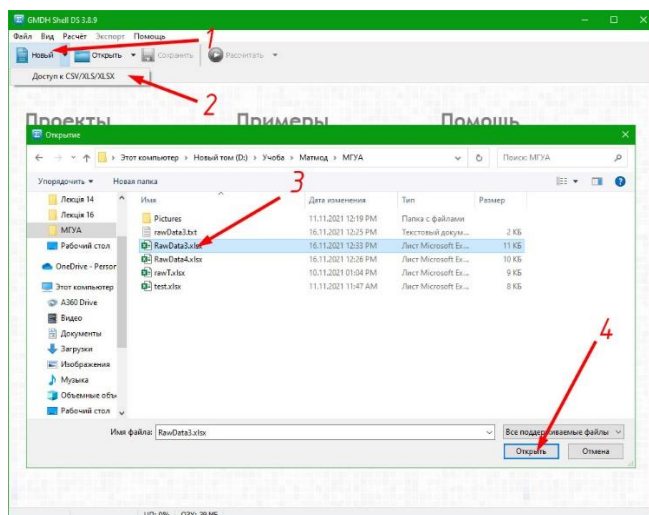


Рис. В-2. Вибір файлу

У вікні що з'явилося (рисунок 3) в результаті, можемо попередньо переглянути обрані дані, встановити додаткові параметри імпорту.

Для встановлення додаткових параметрів імпорту даних необхідно натиснути «Больше настроек» (рис. В-3, 1). Далі в цьому ж місці з'являться додаткові параметри імпорту. Відповідно до виду представлених даних необхідно обрати ці параметри (рис. В-3, 2). Після вибору всіх необхідних налаштувань натискаємо кнопку «ОК» (рис. В-3, 3).

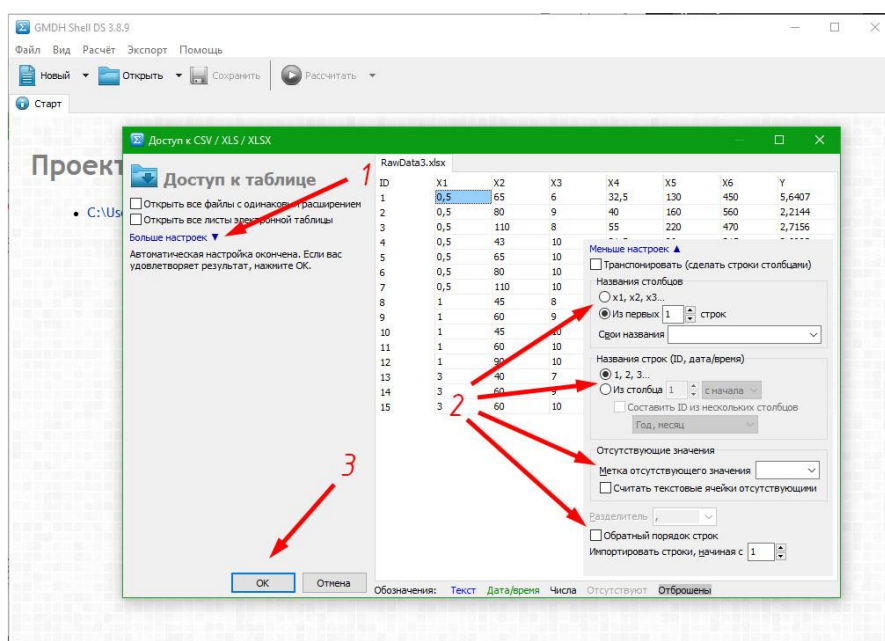


Рис. В-3. Налаштування параметрів імпорту даних.

На даному етапі необхідно обрати шаблон (модель) аналізу даних згідно із завданням. В даному прикладі використаємо регресію.

На рисунку В-4 зображено приклад вибору моделі аналізу даних. Для цього оберемо варіант «Regression» (рис. В-4, 1), також можна почитати опис шаблону у сусідньому полі (рис. В-4, 2). Після вибору необхідної моделі натискаємо кнопку «ОК» (рис. В-4, 3).

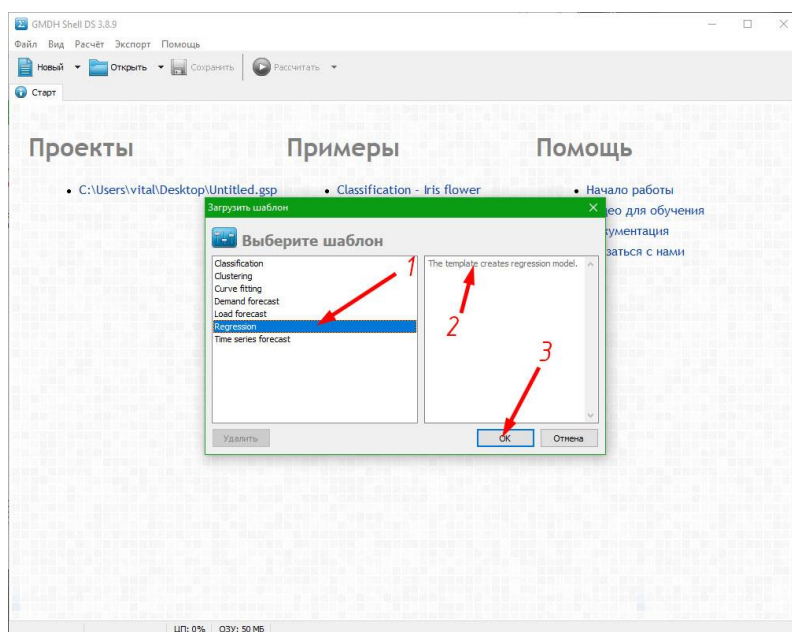


Рис. В-4. Вибір моделі аналізу даних.

Після вибору моделі, необхідно обрати вхідні та вихідні дані.

На рисунку В-5 зображений приклад вікна для вибору вихідних даних. В прикладі вибираємо лише один вихідний параметр Y (рис. В-5, 1) інші параметри є вхідними. Натискаємо кнопку «Далее» (рис. В-5, 2).

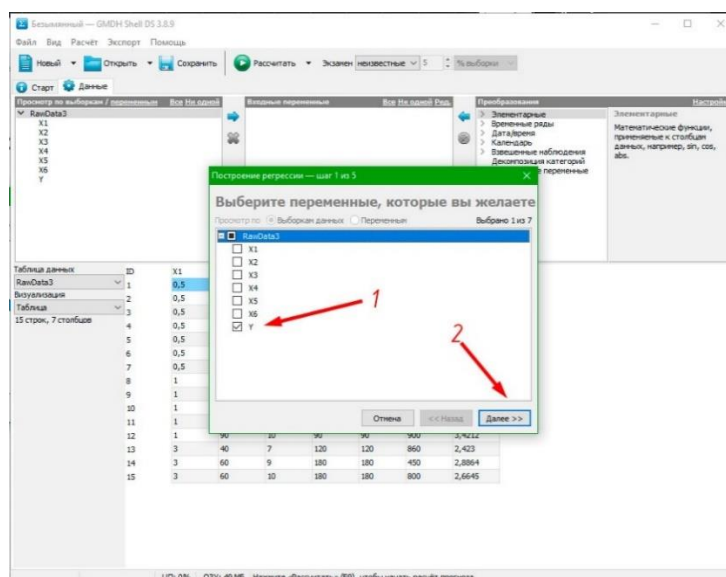


Рис. В-5 Вибір вихідних факторів.

Дана система автоматично, після вибору вихідних факторів, помічає всі інші фактори як вхідні. Але в деяких випадках виникає необхідність прибрати деякі вхідні фактори. На рисунку В-6 показаний приклад вибору вхідних факторів. За необхідності можна прибрати деякі з них (рис. В-6, 1), в іншому випадку можна зразу перейти до наступного пункту натиснувши «Далее» (рис. В-6, 2)

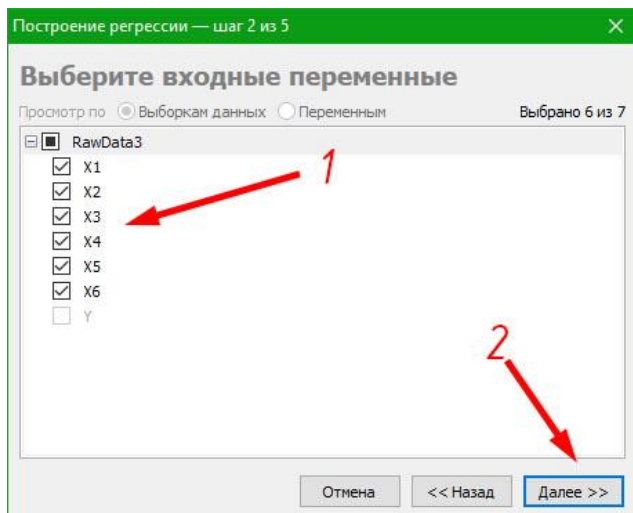


Рис. В-6. Вибір вхідних змінних

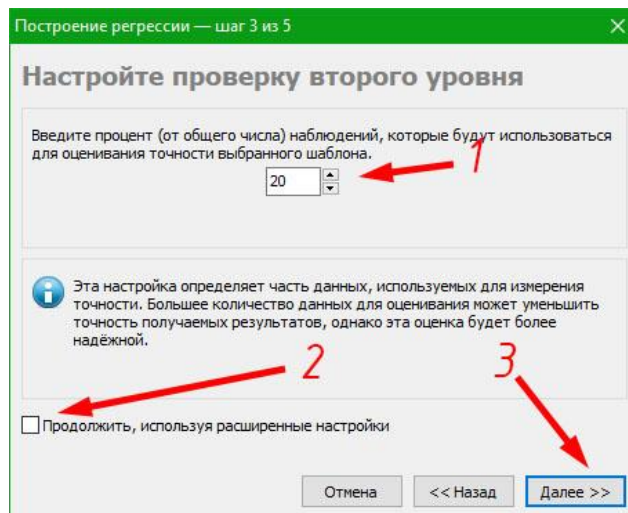


Рис.7 Вибір параметрів оцінювання

Наступний крок дозволяє обрати параметри оцінювання моделі, та вказати деякі налаштування навчання. Обираємо відсоток даних із вибірки, котрі будуть використовуватись для оцінки її точності (рис. В-7, 1). Для прикладу використаємо значення 20. Якщо необхідно використати розширені налаштування, помічаємо

«галочкою» відповідну опцію (рис. В-7, 2). Після виконання всіх налаштувань натискаємо кнопку «Далі» (рис. В-7, 3).

Далі система самостійно виконає навчання ШНМ та побудує модель, процес навчання відображається окремим динамічним вікном, й несе довідкову інформацію про перебіг процесу. По завершенню навчання виводиться відповідне вікно з попередніми результатами, зображене на рисунку В-8. Результати за різними методами моделювання представлені на (рис. В-8, 1 та рис. В-8, 2), час що був затрачений на моделювання показаний на (рис. В-8, 3). Для переходу безпосередньо до результатів необхідно натиснути «Готово» (рис. В-8, 4).

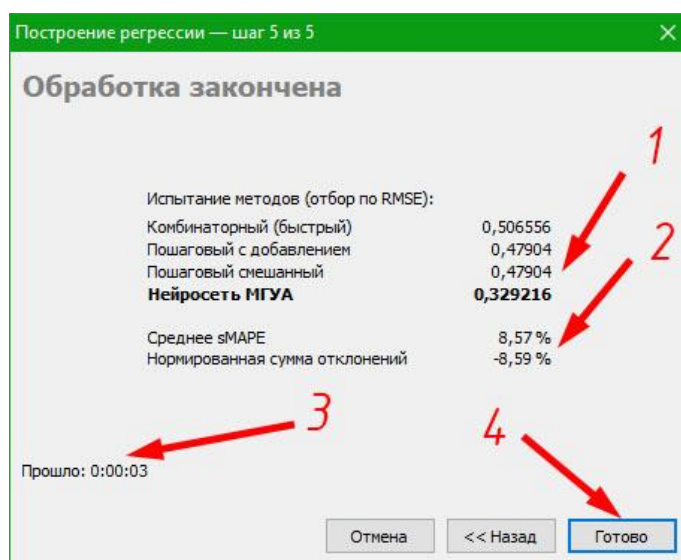


Рис. В-8. Результаты навчання мережі.

Результати моделювання зображені на рисунку В-9. У вікні відображено наступні розділи, що з різних сторін дозволяють проаналізувати модель: «График» (рис. В-9, 1); «Анализ отклонений» (рис. В-9, 2); «Точность» (рис. В-9, 3); «Модель» (рис. В-9, 4). Розглянемо більш детально вікно графік.

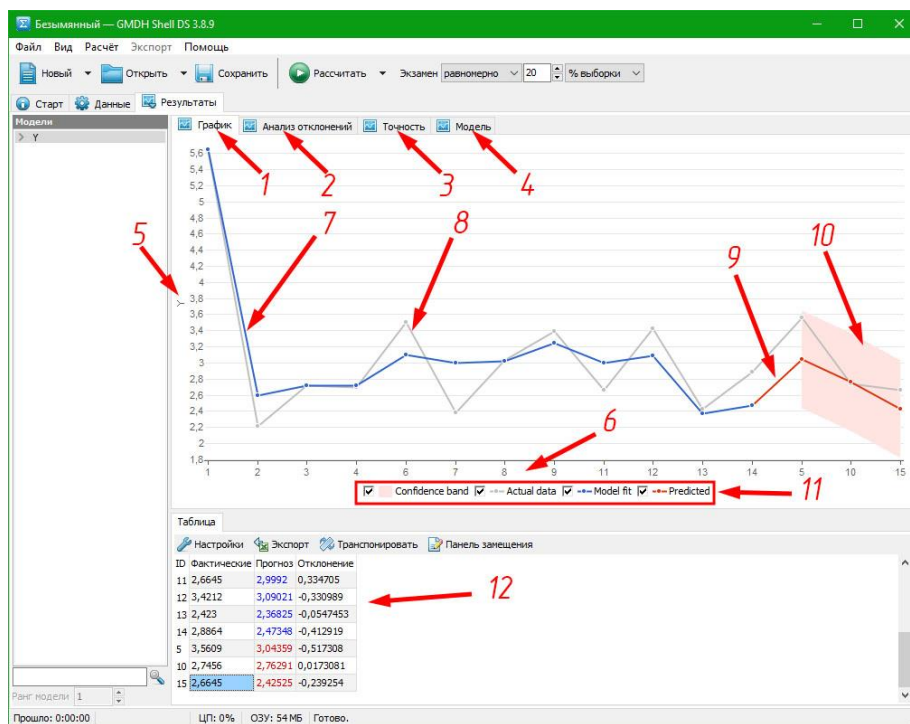


Рис. В-9. Результаты моделирования.

На (рис. В-9, 5–11) модель у вигляді графіка де 5 – відображає значення вихідної величини, 6 – номер дослідів. 7 та 9 – розрахована модель, при цьому 7 – частина моделі яка використовувалась для навчання, 9 – перевіірочні дані; 8 – початкові дані; 10 – область перевіірочних даних. 11 – параметри графіка, за необхідністю можна відобразити/сховати дані. Поля 12 – відображають відхилення моделі в числах, що дозволяє краще оцінити відхилення моделі.

Результати аналізу відхилень зображені на рисунку В-10

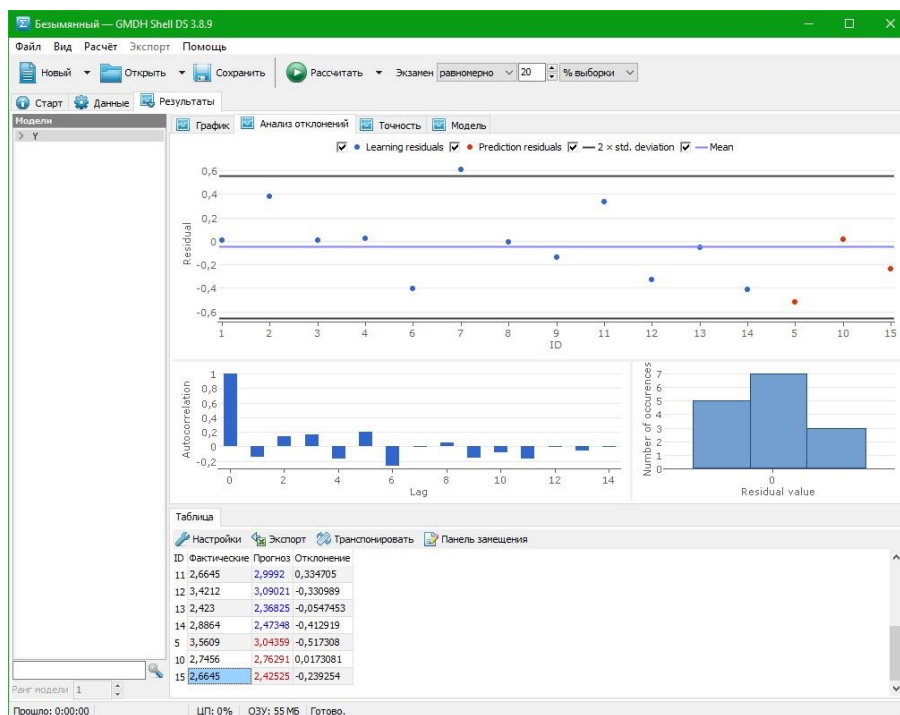


Рис. В-10 Анализ відхилень.

Аналіз точності моделі наведений на рисунку В-11.

Для вибору міри похибки необхідно натиснути на відповідний випадаючий список (рис. В-11, 1 та 2) й вибрати бажаний формат відображення. За замовчуванням використовується абсолютна міра похибки. Результати аналізу точності зведені по параметрах в дві колонки «Обучение» та «Экзамен» (рис. В-11, 3) котрі відповідно відображають точність навчання та точність отриманої моделі.

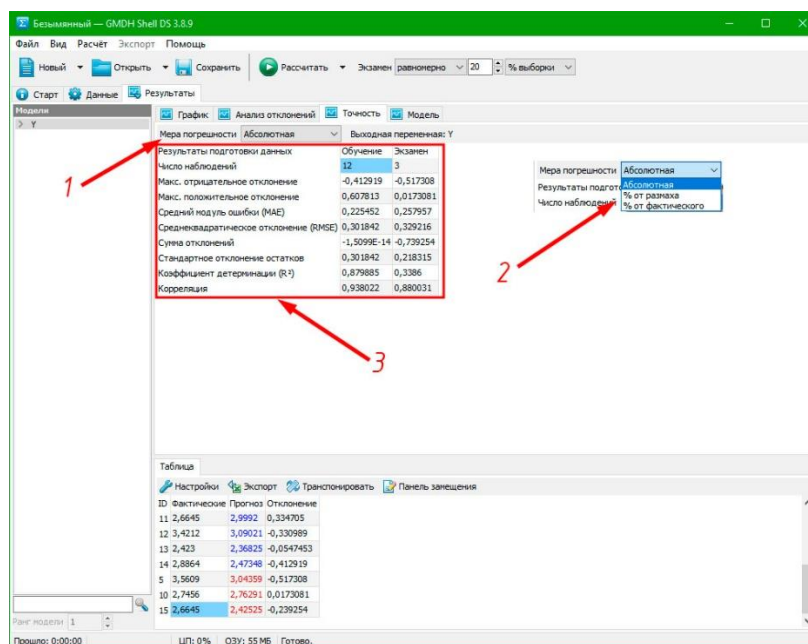


Рис. В-11. Аналіз точності

Коефіцієнти розрахованої моделі можна відобразити натиснувши кнопку «Модель» (рис. В-9, 4). На рисунку В-12 наведено отриману за прикладом модель.

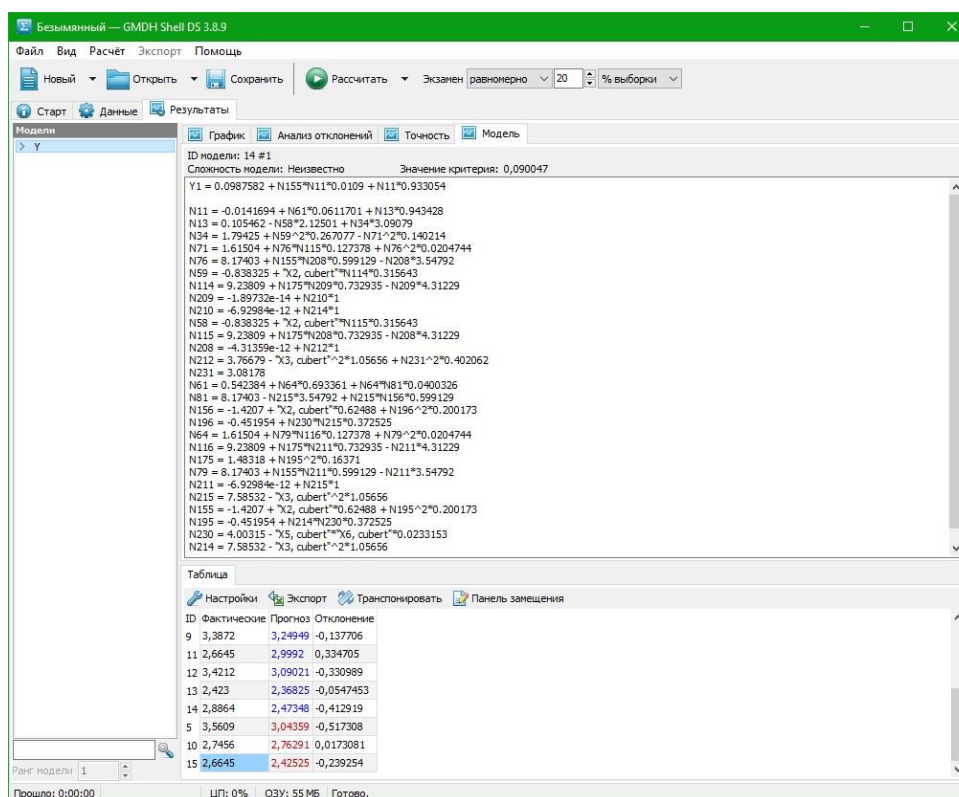


Рис. В-12. Коефіцієнти моделі.

Можна бачити що модель наведена в досить простому вигляді. Але для більш повного аналізу модель необхідно «розгорнути» фактично підставити коефіцієнти нижче в перший вираз. З отриманою моделлю можна проводити подальші дослідження та перевірки.

Також система дозволяє подальше використання моделі для проведення розрахунків в шуканих точках. Для цього необхідно підготувати нові вхідні дані в форматі що відповідає формату на якому модель навчалась. Приклад нових даних зображено на рисунку В-13.

	A	B	C	D	E	F
1	X1	X2	X3	X4	X5	X6
2	0.5	65	10	32.5	130	325

Рис. В-13. Приклад нових даних.

Для внесення їх до програми необхідно натиснути кнопку «Расчёт» (рис. В-14, 1) далі натиснути «Применить модель» (рис. В-14, 2) у вікні що з'явилося обрати файл із новими даними (рис. В-14, 3) та натиснути кнопку «Открыть» (рис. В-14, 4).

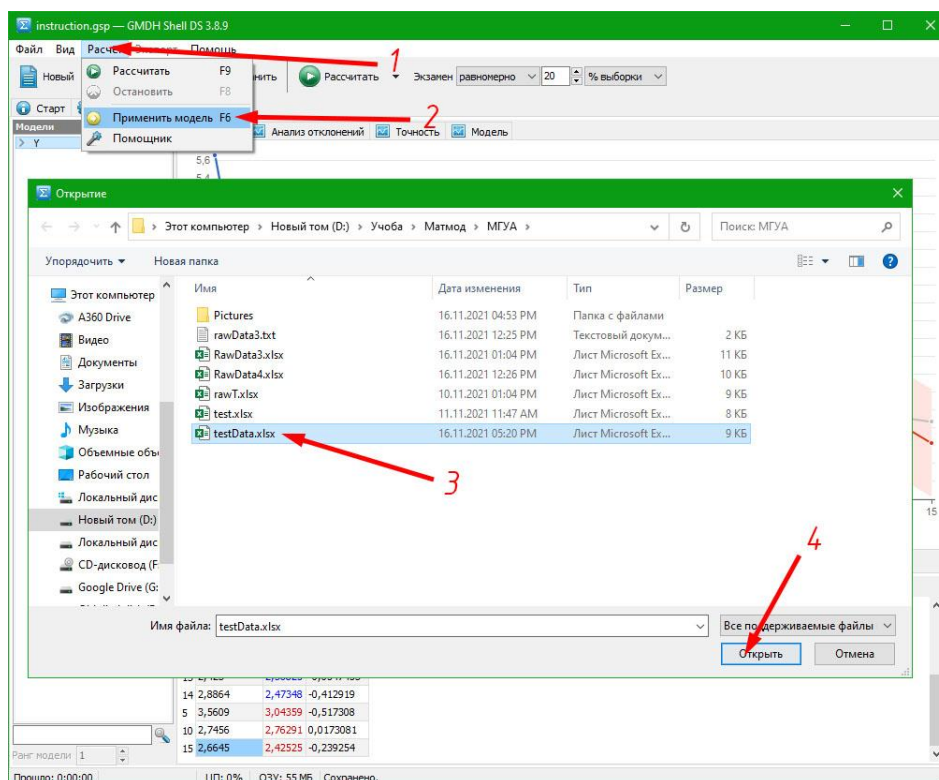


Рис. В-14. Вибір нових даних

З'явиться вже зайоме нам за попередніми пунктами вікно імпорту даних зображене на рисунку В-15. Детально зупинятись на налаштуваннях тут не будемо. Їх необхідно провести аналогічно з пунктом 4 (рис. В-3).

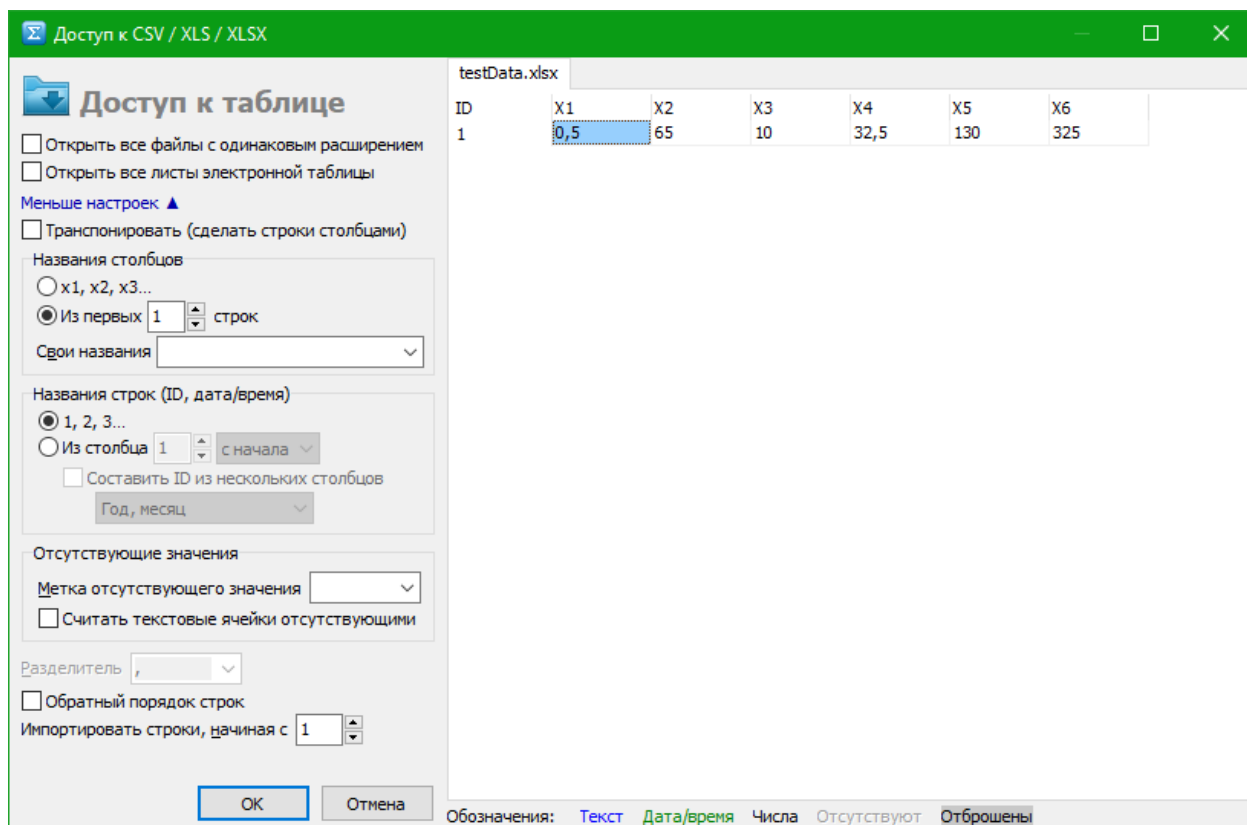


Рис. В-15. Налаштування імпорту нових даних.

В результаті отримаємо прогноз зображений на рисунку В-16. Результат розрахунку зображений на (рис. В-16, 1)

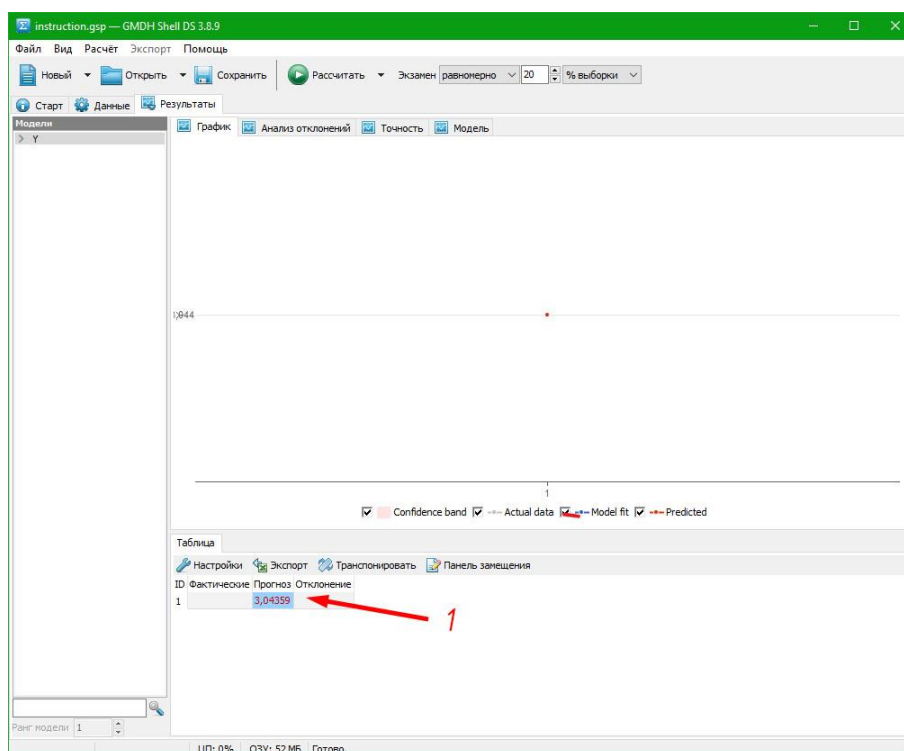


Рис. В-16. Результат розрахунку

ДОДАТОК Г

Текст програми OrtRotCalc

```

load('ModelData.mat');

%Кількість дослідів

exp_cnt_ort = 25
exp_cnt_rot = 31
exp_plan_ort = OrtPlan;
exp_plan_rot = RotPlan;
DataSet = input('Введіть номер набору даних\n(1-3 - Шорткість, 4-7 - 
розміри)\n');
if isempty(DataSet)
    return;
end
Yort = PlanRes(1:25,1:2);
Yrot = PlanRes(:,1:2);

sz_ort = size(Yort);
sz_rot = size(Yrot);

%Ортогональне планування
%yt=y~
for i=1:exp_cnt_ort
    yt_ort(i)=Yort(i,2);
end

for i=1:exp_cnt_ort
    for j=1:sz_ort(1,2)
        diffYort(j)=Yort(i,j)-yt_ort(i);
    end
    sumYort(i)=sum(diffYort);
    Su_ort(i)=sumYort(i)/(exp_cnt_ort-1);
end
SYort = sqrt(sum(sumYort)/(sz_ort(1,2)/(sz_ort(1,1)-1)));

%Рототабельне планування
%yt=y~
for i=1:exp_cnt_rot
    yt_rot(i)=Yrot(i,2)/(length(Yrot(i,:))-1);
end

for i=1:exp_cnt_rot
    for j=1:sz_rot(1,2)
        diffYrot(j)=Yrot(i,j)-yt_rot(i);
    end
    sumYrot(i)=sum(abs(diffYrot));
    Su_rot(i)=sumYrot(i)/(exp_cnt_rot-1);
end

SYrot = sqrt(sum(sumYrot)/(sz_rot(1,2)));

%т розрахункове ортогональне планування;;;
tp_ort = (max(yt_ort)-min(yt_ort))/(SYort*sqrt(2/sz_ort(1,1)));
fprintf("Перевірка однорідності вимірів (на результативність) ортогональне 
планування\n")
%т табличне
tt_ort = input('Введіть табличне значення для критерію Стюдента\n');
if isempty(tt_ort)

```

```

        tt_ort=3.1693;
    end
    fprintf("Трозрах. = %f, Ттабл. = %f\n",tp_ort,tt_ort);
    if tp_ort>tt_ort
        fprintf("Трозрах.>Ттабл. => Результати експерименту результативні\n");
    else
        fprintf("Трозрах.<Ттабл. => Результати експерименту не результативні\n")
    end

    %Т розрахункове рототабельне планування;;;
    tp_rot = (max(yt_rot)-min(yt_rot))/(SYrot*sqrt(2/sz_rot(1,1)));
    fprintf("Перевірка однорідності вимірів (на результативність) рототабельне
планування\n")
    %Т табличне
    tt_rot = input('Введіть табличне значення для критерію Стюдента\n');
    if isempty(tt_rot)
        tt_rot=2.78;
    end
    fprintf("Трозрах. = %f, Ттабл. = %f\n",tp_rot,tt_rot);
    if tp_rot>tt_rot
        fprintf("Трозрах.>Ттабл. => Результати експерименту результативні\n");
    else
        fprintf("Трозрах.<Ттабл. => Результати експерименту не результативні\n")
    end

    %Визначення однорідності дисперсій ортогональне
    fprintf("Визначення однорідності дисперсій\n")
    %G розрахункове
    Gp_ort= max(Su_ort)/sum(Su_ort);
    %G табличне
    Gt_ort = input('Введіть табличне значення для критерію Кохрена\n');
    if isempty(Gt_ort)
        Gt_ort=0.492;
    end
    fprintf("Gрозрах. = %f, Gтабл. = %f\n",Gp_ort,Gt_ort);
    if Gp_ort<=Gt_ort
        fprintf("Gp<=Gt => Гіпотеза про однорідність дисперсій приймається\n");
    else
        fprintf("Gp>Gt => Гіпотеза про однорідність дисперсій не приймається\n")
    end

    %Визначення однорідності дисперсій рототабельне
    fprintf("Визначення однорідності дисперсій\n")
    %G розрахункове
    Gp_rot= max(Su_rot)/sum(Su_rot);
    %G табличне
    Gt_rot = input('Введіть табличне значення для критерію Кохрена\n');
    if isempty(Gt_rot)
        Gt_rot=0.492;
    end
    fprintf("Gрозрах. = %f, Gтабл. = %f\n",Gp_rot,Gt_rot);
    if Gp_rot<=Gt_rot
        fprintf("Gp<=Gt => Гіпотеза про однорідність дисперсій приймається\n");
    else
        fprintf("Gp>Gt => Гіпотеза про однорідність дисперсій не приймається\n")
    end

    %Визначення коефіцієнтів ортогональне планування
    szep_ort=size(exp_plan_ort);
    for i=1:szep_ort(1,2)
        b_ort(i)=sum(exp_plan_ort(:,i).*mean(Yort(i,:)))/sum(exp_plan_ort(:,i).^2);
        tr_ort(i)=abs(b_ort(i))/(SYort/sqrt(exp_cnt_ort*sz_ort(1,2)));
    end

```

```

        Sb_rot(i)=SYrot/sum(exp_plan_rot(:,i));
    end
    b_rot(1)=b_rot(1)-sum(b_rot(5:9).*(4/5));
    %Визначення коефіцієнтів рототабельне планування

    szep_rot=size(exp_plan_rot);
    % b[0]-b[3]
    %sum_rot = 0;
    %for i=1:size(exp_plan_rot(:,1))
    %    for j = 2:5
    %        sum_rot=sum_rot+exp_plan_rot(i,j).*Yrot(i);
    %    end
    %end
    %b_rot(1)=0.142857*sum(Y)-0.035714*sum_rot

    for i=2:5
        %b(i)=(c(exp_plan(:,i),exp_cnt)/exp_cnt)*sum(exp_plan(:,i).*Y(i));
        b_rot(i)=0.041667*sum(exp_plan_rot(:,i).*mean(Yrot(i,:)));
        Sb_rot(i)=0.0732*SYrot;
        tr(i)=abs(b_rot(i))/(Sb_rot(i)/sqrt(exp_cnt_rot*sz_rot(1,2)));
    end
    x2Yrot=0;
    for i=1:31
        x2Yrot=x2Yrot+sum(exp_plan_rot(i,2:5).^2*Yrot(i,1));
    end

    b_rot(1)=0.142857*sum(Yrot(:,1))-0.035714*x2Yrot
    Sb_rot(1)=0.142857*SYrot;
    %b11-b33
    XYrot=0;
    for i=2:5
        XYrot=XYrot+sum(exp_plan_rot(:,i).^2.*Yrot);
    end
    x2Yrot=0;
    for i=6:9
        x2Yrot=x2Yrot+sum(exp_plan_rot(:,i).*Yrot(:,1));
    end
    for i=6:9
        L1_rot=lamda(exp_plan_rot(:,i),exp_cnt_rot,3);
        C1_rot=c(exp_plan_rot(:,i),exp_cnt_rot);
        %b(i)=A(L1,3)/exp_cnt*(C1^2*((3+2)*L1-
3)*sum(exp_plan(:,i).^2*Ym(i))+C1^2*(1-L1)*XY-2*L1*C1*sum(Ym));
        b_rot(i)=0.03125*sum(exp_plan_rot(:,i).*Yrot(:,1))+0.003720*x2Yrot-
0.035714*sum(Yrot(:,1));
        Sb_rot(i)=0.03125*SYrot;
        tr_rot(i)=abs(b_rot(i))/(Sb_rot(i)/sqrt(exp_cnt_rot));
    end
    %b[1,2]-b[3,2]
    for i=10:15

        %b(i)=c(exp_plan(:,i),exp_cnt)^2/(exp_cnt*lamda(exp_plan(:,i),exp_cnt,3))*sum(exp_
plan(:,i).*Y(i));
        b_rot(i)=0.0625*sum(exp_plan_rot(:,i).*Yrot(:,1));
        Sb_rot(i)=0.0625*SYrot;
        tr_rot(i)=abs(b_rot(i))/(Sb_rot(i)/sqrt(exp_cnt_rot));
    end
    XYrot=0;

    %%%

    koef=["0","1","2","3","4","12","13","14","23","24","34","11","22","33","44"]

```

```

fprintf("Дисперсії                                     коефіцієнтів
регресії:\n\tОртогональне\tРототабельне\n\t\tpланування\t\tpланування")
for i=1:size(koef)
    fprintf("Sb%s\t%f\t%f\n",koef(i),Sb_ort(i),Sb_rot(i));
end
fprintf("Визначення статистичної значимості коефіцієнтів рівняння регресії для
ортогонального планування\n")
tt_ort = input('Введіть табличне значення для критерію Стьюдента\n');
if isempty(tt_ort)
    tt_ort=0.14;
end

for i=1:length(tr_ort)
    fprintf("Трозрах. = %f, Ттабл. = %f\n",tr_ort(i),tt_ort);
    if tr_ort(i)>tt_ort
        fprintf("Коефіцієнт %i значимий\n",i);
    else
        fprintf("Коефіцієнт %i не значимий\n",i);
    end
end

fprintf("Визначення статистичної значимості коефіцієнтів рівняння регресії для
рототабельного планування\n")
tt_rot = input('Введіть табличне значення для критерію Стьюдента\n');
if isempty(tt_rot)
    tt_rot=0.14;
end

for i=1:length(tr_rot)
    fprintf("Трозрах. = %f, Ттабл. = %f\n",tr_rot(i),tt_rot);
    if tr_rot(i)>tt_rot
        fprintf("Коефіцієнт %i значимий\n",i);
    else
        fprintf("Коефіцієнт %i не значимий\n",i);
    end
end

fprintf("Перевірка адекватності отриманої математичної моделі\n")

S0_ort=sum(Yort(11:20)-mean(Yort(11:20)));
Sad_ort=sum((mean(Yort,2)-transp(yt_ort)).^2)-S0_ort;
fad_ort=20-20/2; %#TODO
S2ad_ort=Sad_ort/fad_ort;
Fr_ort=S2ad_ort/S0_ort;
Ft_ort = input('Введіть табличне значення для F критерію Фішера\n');
if isempty(Ft_ort)
    Ft_ort=4.72;
end
fprintf("Фрозрах. = %f, Фтабл. = %f\n",Fr_ort,Ft_ort);
fprintf("Опис моделі за ортогональним плануванням");
if Fr_ort<Ft_ort
    fprintf("адекватний\n");
else
    fprintf("не адекватний\n");
end

S0_rot=sum(Yrot(11:20)-mean(Yrot(11:20)));
Sad_rot=sum((mean(Yrot,2)-transp(yt_rot)).^2)-S0_rot;
fad_rot=20-20/2;
S2ad_rot=Sad_rot/fad_rot;
Fr_rot=S2ad_rot/S0_rot;
Ft_rot = input('Введіть табличне значення для F критерію Фішера\n');

```

```

if isempty(Ft_rot)
    Ft_rot=4.72;
end
fprintf("Грозрах. = %f, Фтабл. = %f\n",Fr_rot,Ft_rot);
fprintf("Опис моделі за рототабельним плануванням");
if Fr_rot<Ft_rot
    fprintf("адекватний\n");
else
    fprintf("не адекватний\n");
end

fprintf("Модель отримана за ортогональним плануванням:\nYort=%.3f",b_ort(1));
s_ort=["";"*x1";"*x2";"*x3";"*x4";"* (x1^2-4/5)";"* (x2^2-4/5)";"* (x3^2-4/5)";"* (x4^2-4/5)";"*x1*x2";"*x1*x3";"*x1*x4";"*x2*x3";"*x2*x4";"*x3*x4"];
for i=2:length(b_ort)
    if b_ort(i)>0
        fprintf("+%.3f%s",b_ort(i),s_ort(i))
    else
        fprintf("%.3f%s",b_ort(i),s_ort(i))
    end
end
fprintf("\n");
s_rot=["";"*x1";"*x2";"*x3";"*x4";"* (x1^2)";"* (x2^2)";"* (x3^2)";"* (x4^2)";"*x1*x2";"*x1*x3";"*x1*x4";"*x2*x3";"*x2*x4";"*x3*x4"];
fprintf("Модель отримана за рототабельним плануванням:\nYrot=%.3f",b_rot(1));
for i=2:length(b_rot)
    if b_rot(i)>0
        fprintf("+%.3f%s",b_rot(i),s_rot(i))
    else
        fprintf("%.3f%s",b_rot(i),s_rot(i))
    end
end
fprintf("\n");

function C = c(Xi,n)
%C is c
    C = n/sum(Xi.^2);
end

function L = lamda(Xi,n,k)
    L = (n*2^k)/(sum(Xi)^2);
end

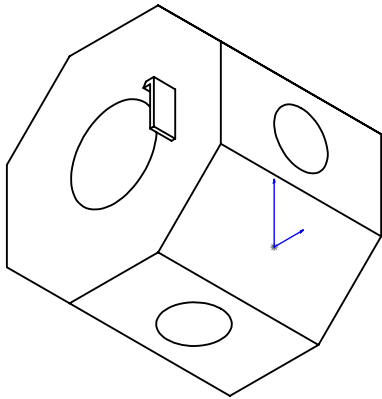
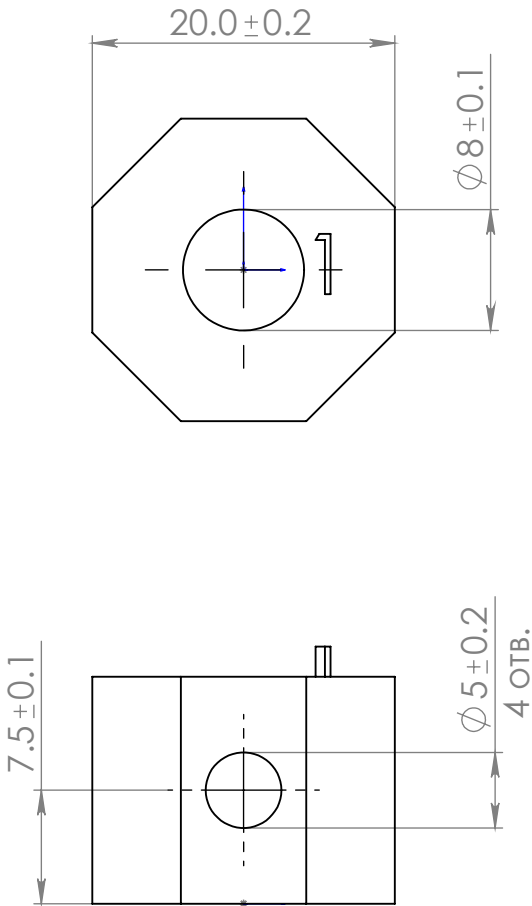
function a = A(l,k)
    a = 1/(2*1*((k+2)*1-k));
end

```

Справ. №	Перв. примен.
----------	---------------

Инв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата
--------------	--------------	--------------	--------------	--------------

МД.ПБ.01мн.2.1702.001



Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.		Яригин В. А.		
Пров.		Вислоух С. П.		
Т. контр.				
Н. контр.				
Утв.				

МД.ПБ.01мн.2.1702.001							
Досліджуваний зразок				Лит.		Масса	Масштаб
							2:1
				Лист 1		Листов 1	
				НТУУ КПІ, ПБФ			

Список наукових праць

Яригіна Віталія Андрійовича

(прізвище, ім'я, по батькові студента)

№ з/п	Назва праці	Назва видання та його вихідні відомості, що дозволяють ідентифікувати та відрізнити це видання від усіх інших	Кількість друкованих аркушів	Прізвища співавторів
1	2	3	4	5
1	Використання штучних нейронних мереж при 3d проектуванні деталей	XII Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «ПОГЛЯД У МАЙБУТНЄ ПРИЛАДОБУДУВАННЯ»	3	Вислоух С. П.
2	Про сучасні методи та засоби моделювання	XV Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність інженерних рішень у приладобудуванні»	4	Вислоух С. П.
3	Реверс інженерія у приладобудуванні	I Міжнародна науково-практична інтернет-конференція «Інтеграція освіти, науки та бізнесу в сучасному середовищі: зимові диспути»	5	Вислоух С. П.
4	Методологія покращення характеристик міцності деталі, що виготовлена методом 3D друку.	X Всеукраїнська науково-технічна конференція з міжнародною участю «Процеси механічної обробки, верстати та інструмент»	3	Вислоух С. П.
5	Аналіз параметрів, що впливають на якість 3D друку.	The 20th International Scientific and Technical Seminar MODERN QUESTIONS OF PRODUCTION AND REPAIR IN INDUSTRY AND IN TRANSPORT	3	Вислоух С. П.

1	2	3	4	5
6	Исследование процесса 3D печати	13-я Международная научно-техническая конференция молодых ученых и студентов «Новые направления развития приборостроения»	1	Вислоух С. П.
7	Дослідження параметрів якості деталей, отриманих шляхом 3D друку	Всеукраїнська науково-практична on-line конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених «Перспективи розвитку машинобудівної інженерії та транспортних технологій» (присвячена Дню науки)	2	Вислоух С. П.
8	Особенности получения прототипов за помощью 3D друку	XIII Научно-практичная конференция студентов, аспирантов та молодых ученых “Погляд у майбутнє приладобудування	4	Вислоух С. П.
9	Дослідження параметрів якості деталей, отриманих шляхом 3D друку	Конкурс кращих студентських робіт	19	
10	ФАКТОРИ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ЯКІСТЬ ПОВЕРХОНЬ ОТРИМАНИХ FDM ДРУКОМ	XVII Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспирантів та молодих вчених «Ефективність інженерних рішень у приладобудуванні»	4	
11	Підготовка до проведення дослідження якості поверхонь отриманих FDM друком з врахуванням мікрокліматичних умов в процесі друку	XX Міжнародна науково-технічна конференція “Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об’єктів”	2	
12	Перспективи використання мікрокліматичних установок	XIV Научно-практичная конференция студентів, аспирантов та молодих вчених “Погляд у майбутнє	4	

	для FDM 3D друку	приладобудування		
13	ДО ПИТАННЯ МОДЕРНІЗАЦІЇ УСТАНОВОК ТИПУ 3D ПРИНТЕР	Організаційний комітет запрошує взяти участь в роботі VIII Міжнародної науково- технічної конференції "Інформатика, управління та штучний інтелект (ІУШІ- 2021)",	1	Вислоух С. П.
14	МЕТОДИКА ВИБОРУ ТЕМПЕРАТУРНИ Х РЕЖИМІВ ДЛЯ FDM 3D ДРУКУ	I Міжнародна науково- практична інтернет-конференція SCIENTIFIC RESEARCH AND INNOVATION	2	
15	ШЛЯХИ СТВОРЕННЯ ДОСЛІДНИХ УСТАНОВОК	Всеукраїнська науково- практична on-line конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених «Перспективи розвитку машинобудівної інженерії та транспортних технологій» (присвячена Дню науки)	1	
16	Моделювання параметрів шорсткості поверхонь отриманих 3D друком за дпопомогою засобів МГВА	22 Міжнародна науково- технічна конференція Київ АТМ України	4	Антонюк В.С. Вислоух С.П.

Студент



Яригін Віталій

Завідувач кафедри

Віктор АНТОНЮК

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор ТОВ «ПАВУТИНА.НЕТ»
Арутюнян О. В.
«___» _____ 2022 р.

АКТ

про впровадження результатів магістерської дисертації студента гр.. ПБ-01мн Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Сікорського» Яригіна Віталія Андрійовича

Комісія в складі голови – Арутюняна Олександра В'ячеславовича, і членів: Грінченко Олександра Ігоровича та Ніколаєвої Олеси Олександрівни, склали дійсний акт про те, що результати магістерської дисертації «Підвищення параметрів якості виготовлення деталей 3D друком», зокрема:

- вдосконалена конструкція класичного FDM 3D принтера ;
- методика підвищення параметрів якості виготовлення деталей 3D друком шляхом поліпшення існуючої технології;
- математичне моделювання та оптимізація параметрів виготовлення деталей 3D друком;
- практичні рекомендації з використання вдосконаленої конструкції FDM 3D принтера та оптимальних режимів роботи

використані в при обробці відповідальних деталей органайзерів в технологічному процесі модернізації волоконно-оптичних муфт

Впровадження в технологічний процес результатів магістерської роботи дозволить підвищити точність відповідальних деталей-органайзерів в 1,5-х рази за рахунок визначення раціональних режимів виготовлення деталей, обчислення можливої деформації оброблюваної деталі та введення відповідної корекції в методику процесу виготовлення. В результаті значно підвищено якість оброблюваної деталі та продуктивність процесу друкування.

ГОЛОВА КОМІСІЇ:
Арутюнян О. В.

ЧЛЕНИ КОМІСІЇ:
Грінченко О. І.
Ніколаєва О. О.





АКТ
про впровадження результатів магістерської дисертації
студента гр.. ПБ-01мн Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Сікорського»
Яригіна Віталія Андрійовича

Комісія в складі голови – Савченко Альони Анатоліївни і членів: Мазур Андрія Петровича та Малишенка Ярослава Івановича, - склали дійсний акт про те, що результати магістерської дисертації Яригіна Віталія Андрійовича, зокрема:

- вдосконалена конструкція класичного FDM 3D принтера ;
- методика підвищення параметрів якості виготовлення деталей 3D друком шляхом поліпшення існуючої технології;
- математичне моделювання та оптимізація параметрів виготовлення деталей 3D друком;
- практичні рекомендації з використання вдосконаленої конструкції FDM 3D принтера та оптимальних режимів роботи

використані в при обробці відповідальних деталей оптичних муфт у ТОВ «БАНКОМ»

Впровадження у ТОВ «БАНКОМ» результатів магістерської роботи дозволить підвищити точність деталей оптичних муфт в 1,5-х рази за рахунок визначення раціональних режимів виготовлення деталей, обчислення можливої деформації оброблюваної деталі та введення відповідної корекції в методику процесу виготовлення. В результаті значно підвищено якість оброблюваної деталі та продуктивність процесу друкування.

ГОЛОВА КОМІСІЇ:
Керівник відділу ЛКМ

/А.А. Савченко/

ЧЛЕНИ КОМІСІЇ:

Інженер

/А.П. Мазур/

Інженер

/Я.І.Малишенко/

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Декан приладобудівного факультету

 Тимчик Г.С.
« 5 » 06 2022 р.

АКТ

про впровадження результатів дисертаційного дослідження

магістранта Яригіна Віталія Андрійовича:

«Підвищення параметрів якості виготовлення деталей 3D друком»

Комісія у складі:

Голова – голова Методичної комісії приладобудівного факультету, к.т.н.,
доцент Філіппова М.В.;

Члени комісії – Антонюк В.С.;

– Вислоух С.П.

цим актом засвідчує те, що результати дисертаційного дослідження Яригіна Віталія Андрійовича на тему: «Підвищення параметрів якості виготовлення деталей 3D друком», а передусім: шляхи створення 3D принтерів, переваги й недоліки конструкції принтера, критерії вибору 3D принтера, параметри якості деталей, що виготовлені 3D друком, математичне моделювання процесу друкування деталей, визначення оптимальних параметрів процесу та практичні рекомендації з вибору конструкції принтера, призначення режимів і умов їх реалізації, відповідні кресленики та методи, що реалізують виготовлення деталей 3D друком, використані викладачами кафедри виробництва приладів приладобудівного факультету КПІ ім. Ігоря Сікорського при проведенні лекцій, виконанні практичних та лабораторних робіт з навчальної дисципліни «Технології приладобудування».






М.В. Філіппова

В.С. Антонюк

С.П. Вислоух

« 5 » 06 2022 р.

ПІДВИЩЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ 3D ДРУКОМ

Спеціальність 151
Автоматизація та комп'ютерно інтегровані технології

Яригін Віталій Андрійович

Науковий керівник:
к.т.н. доц. Вислоух С. П.

АКТУАЛЬНІСТЬ ДОСЛІДЖЕННЯ

2

- ▶ Адитивне виробництво (AB) набуло широкого розповсюдження в промисловості та бізнесі. Однією з технологій AB є FDM 3D друк. Він має дві основні переваги: дешевизна обладнання та матеріалів. Використовується в сферах приладобудування та швидкого прототипування. Основними недоліками технології є низька точність форми отриманих поверхонь наслідком чого є необхідність пост обробки поверхонь отриманої деталі.
- ▶ Основною причиною виникнення цих недоліків є метод отримання об'єктів. Неточності форми для всіх поверхонь та висока шорсткість торцевих поверхонь виникає через пошарове нанесення матеріалу.
- ▶ В попередніх дослідженнях показано як температурні параметри друку впливають на якість поверхонь отриманих деталей. В сучасних установках підтримуються лише температурні режими, безпосередньо, друку деталі. В деяких установках використовуються нагрівачі що встановлюються на стіл принтера. Це дозволяє поліпшити результат, але навіть при їх використанні температура середовища, а отже і якість друку зменшується із зростанням висоти виробу.
- ▶ Для виправлення недоліку планується використати додатковий нагрівач що триматиме весь об'єм друку деталі в певному температурному режимі, це дозволить отримати кращі вироби за критерієм зменшення шорсткості поверхонь деталі. Такі вдосконалення процесу друку призведуть до зменшення часу повного циклу виготовлення виробу, зменшивши час необхідний на його пост обробку. Що в свою чергу дозволить знизити кінцеву вартість виготовлення і обробки виробу.

ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

3

- модифікувати конструкцію класичного FDM 3D принтера для реалізації вдосконаленої технології друкування;
- провести експерименти з виготовлення деталей з визначенням якості отриманих поверхонь;
- розробити математичні моделі параметрів якості оброблених поверхонь FDM 3D друкуванням;
- виконати аналіз отриманих математичних моделей, параметрів що впливають на точність поверхні;
- визначити оптимальні температурні режими друкування деталей за критерієм мінімізації шорсткості поверхні;
- визначити доцільність використання даного методу в реальних установках з використанням множини конструкційних матеріалів;
- розробити практичні рекомендації з використання нової конструкції принтера і температурних режимів 3D друку;
- розробити стартап-проєкт реалізації запропонованого методу 3D друку;
- виконати впровадження модифікованої установки FDM 3D друку та режимів друкування

ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

- ▶ **Об'єкт дослідження** – процес FDM 3D друку.
 - ▶ **Предмет дослідження** – температурні режими друку (в зоні друку та навколо неї) та як вони впливають на кінцеву якість отриманих поверхонь.
 - ▶ **Мета роботи** – підвищення параметрів якості деталей отриманих 3D друком.
- 

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ. НАУКОВА НОВИЗНА ТА ПРАКТИЧНА КОРИСНІСТЬ

5

Методи дослідження – поставлені завдання у дисертаційній роботі вирішувалися з використанням методів технології приладобудування, математичного моделювання оптимізації з використанням планів факторних експериментів другого порядку, методу евристичної самоорганізації моделей, методів програмування складних систем.

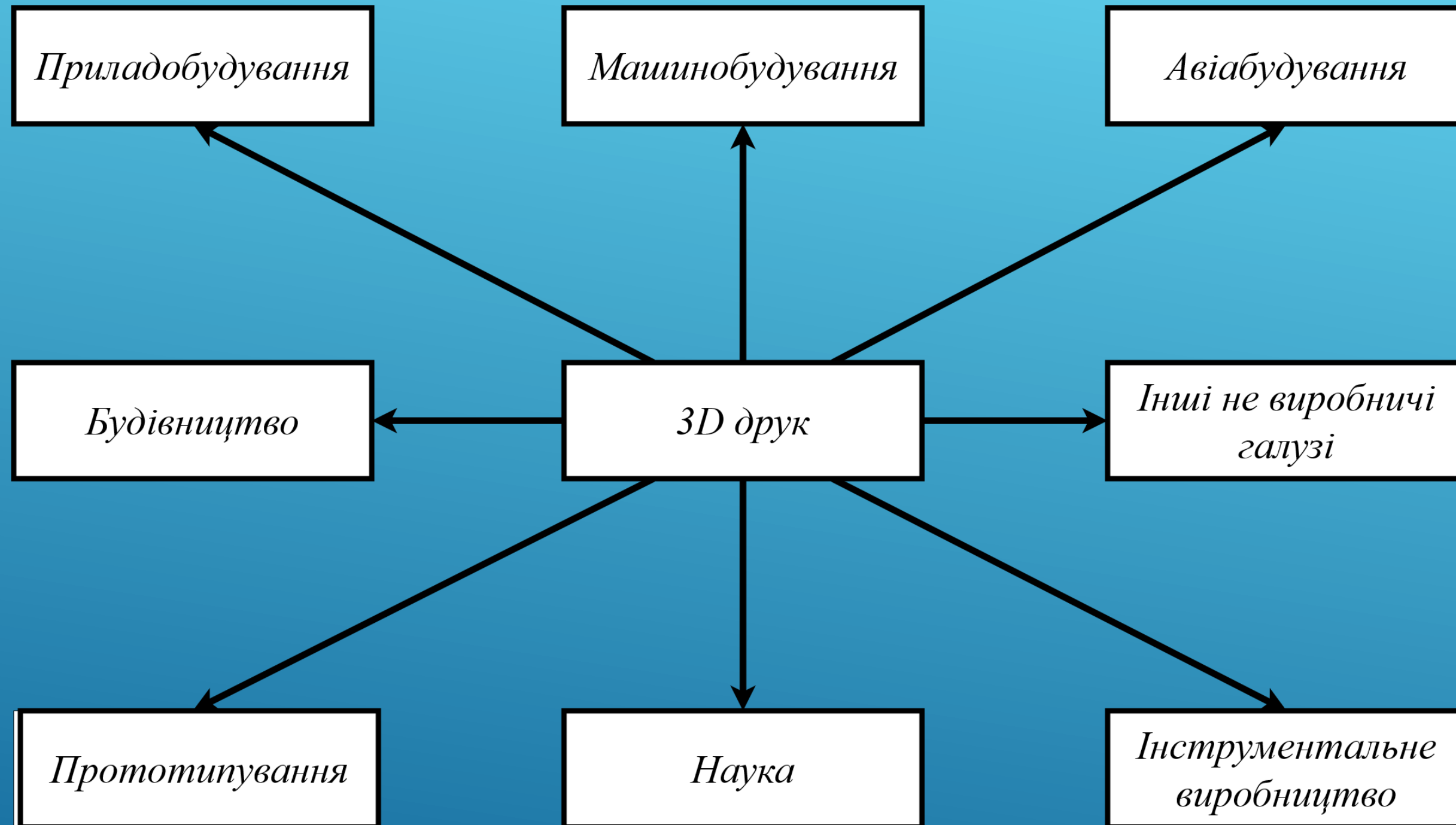
Наукова новизна роботи полягає в наступному:

- нова методика друкування деталей FDM друком з врахуванням температурних режимів;
- математична модель параметрів процесу FDM 3D друкування.

Практична корисність дисертаційної роботи є такою:

- нова конструкція 3D принтера, що враховує температурні режими FDM 3D друкування;
- оптимальні параметри друкування з врахуванням вдосконаленої конструкції принтера;
- практичні рекомендації по вибору режимів FDM 3D друку

3D ДРУК. ОБЛАСТЬ ВИКОРИСТАННЯ

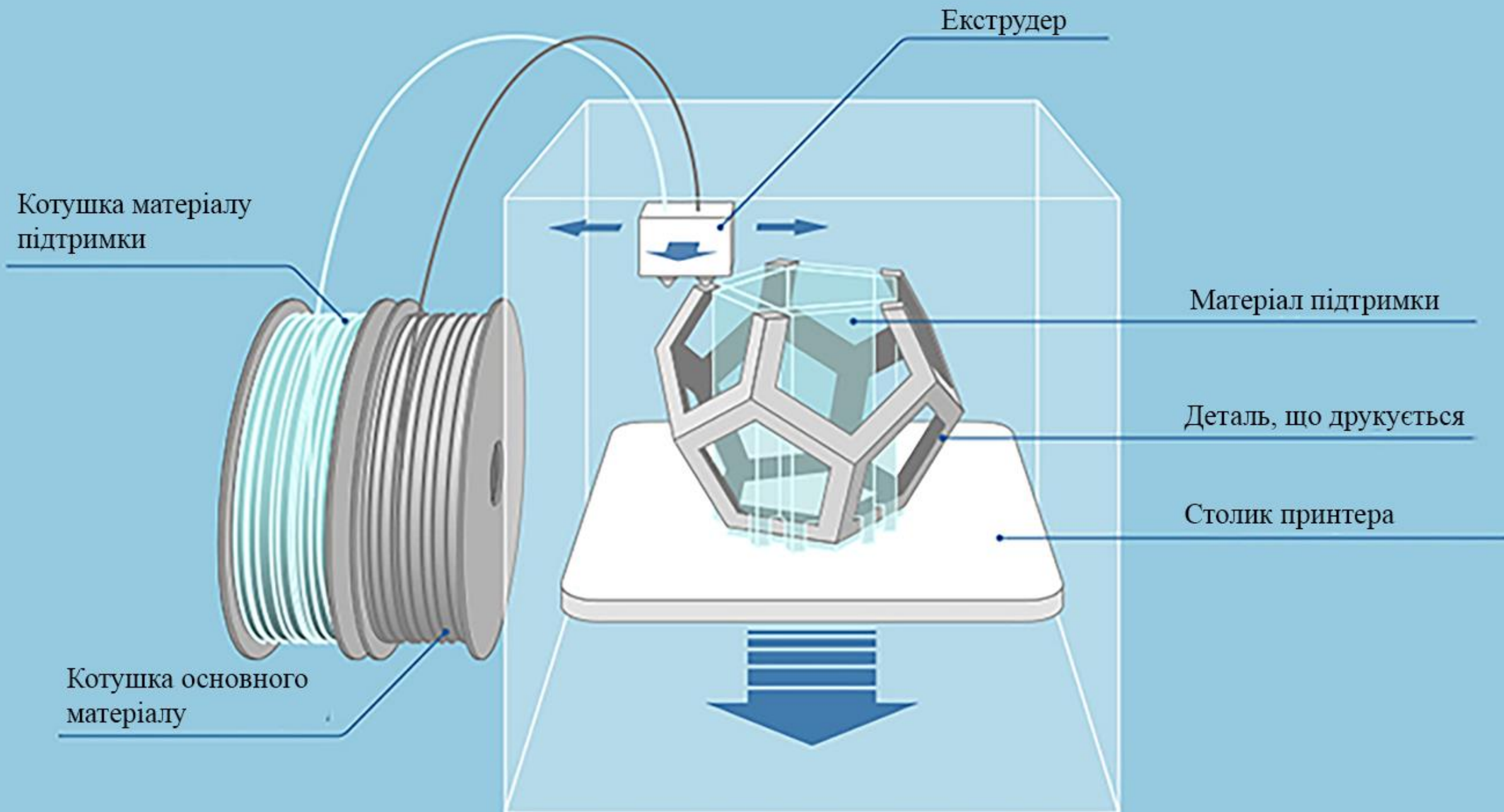


МЕТОДИ 3D ДРУКУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ

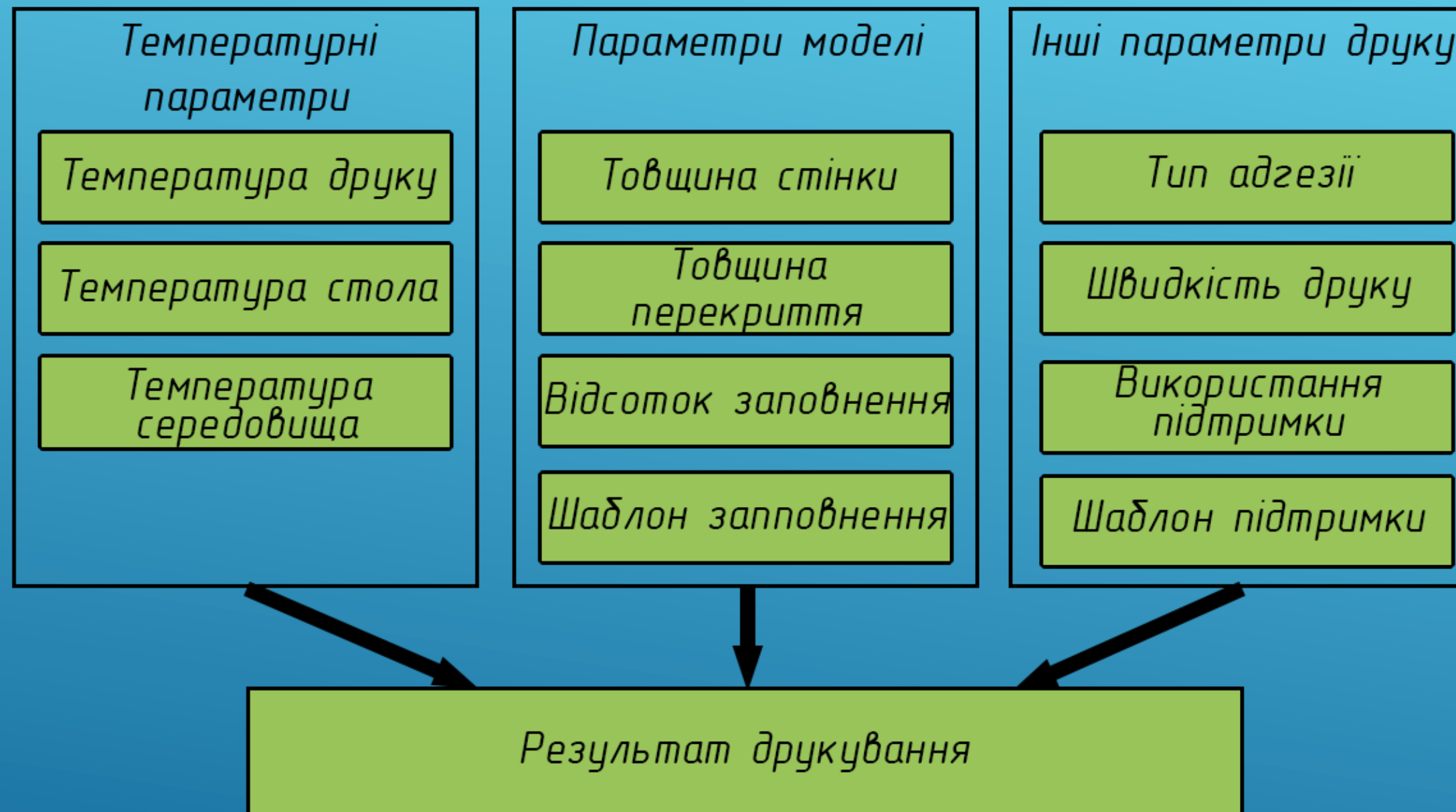
7

Метод	Технології	Використовувані матеріали
Екструзійний	Методом пошарового наплавлення (FDM або FFF)	Термопластмаси (PLA, ABS, Nylone, PVA, тощо.)
Проволочний	Виготовлення довільних форм електронно-дуговою плавкою (EBF3)	Практично будь-які сплави металів
Порошковий	Пряме лазерне спікання металів (DMLS)	
	Електронно-променева плавка (EBM)	Титанові сплави, кобальт-хромові сплави, нержавіюча сталь, алюміній
	Електронно лазерна плавка (SLM)	Порошкові термопластики, металеві ка керамічні порошки
	Вибіркове теплове спікання (SHS)	
	Вибіркове лазерне спікання (SLS)	Гіпс, пластики, металеві порошки, пісочні суміші
Струменевий	Струменевий 3D друк (3DP)	Папір, металева фольга, пластикова плівка
Ламінування	Виготовлення об'єктів методом ламінування (LOM)	Фотополімери
Полімеризація	Стереолітографія (SLA)	
	Цифрова світлодіодна проекція (DLP)	

СХЕМА FDM 3D ДРУКУ ДЕТАЛЕЙ

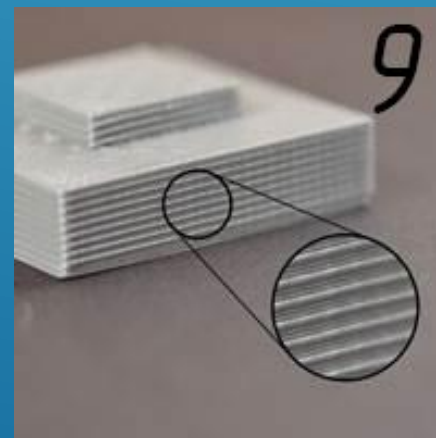
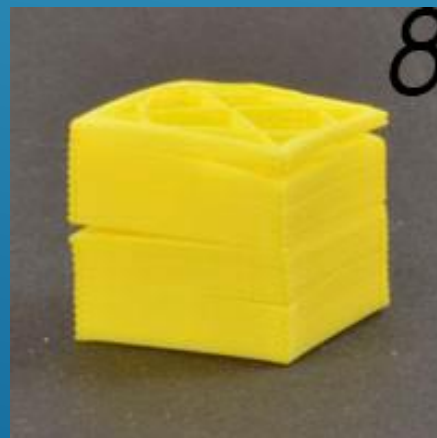
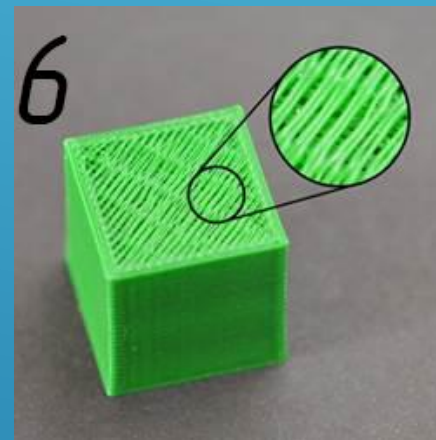
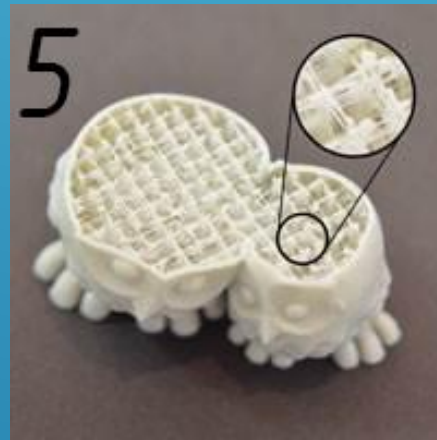
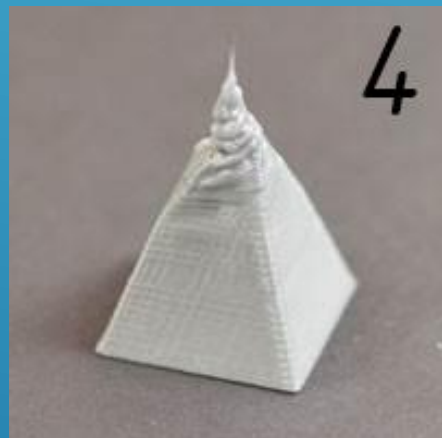
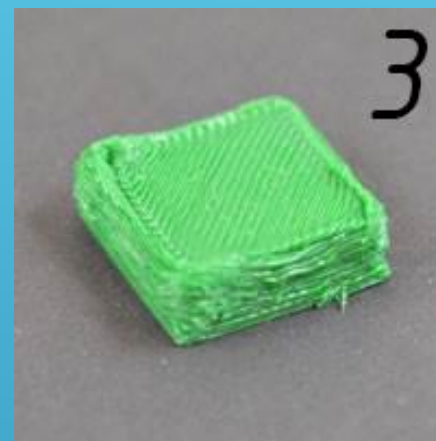
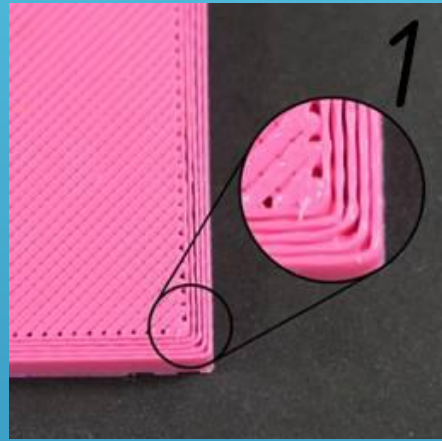


ПАРАМЕТРИ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ЯКІСТЬ ПОВЕРХОНЬ, ОТРИМАНИХ 3D ДРУКОМ



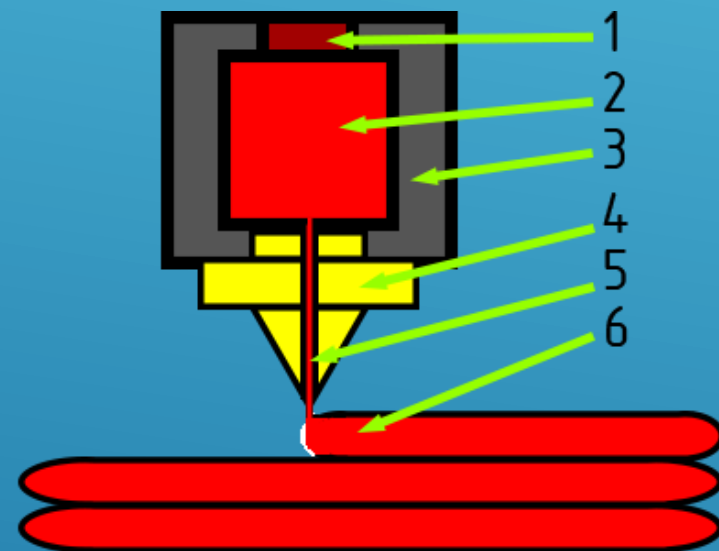
ТИПОВІ ПОХИБКИ 3D ДРУКУ

10

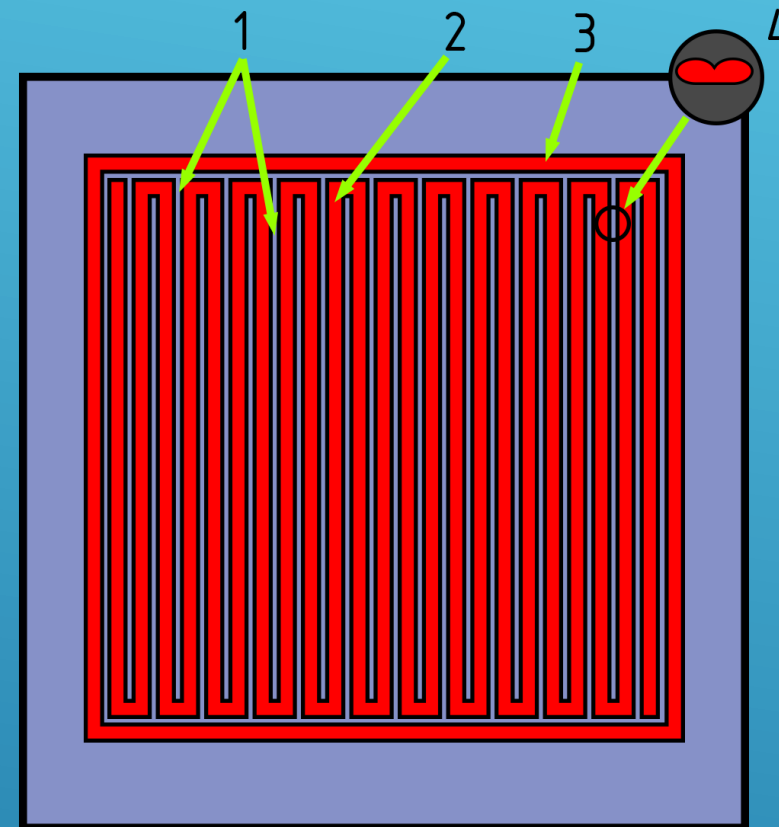


- 1 – похибка друку типу похибка контурів;
2 – похибка друку типу «ворс»;
3 – похибка друку типу надмірне екструдкування пластику;
4 – похибка друку типу перегрів пластику;
5 – похибки друку типу не якісне заповнення;
6 – похибка друку типу щілини на шарах перекриття;
7 – похибка друку типу зміщення шарів;
8 – похибка друку типу розшарування моделі;
9 – похибка друку типу лінія на бокових поверхнях;

СХЕМАТИЧНЕ ЗОБРАЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ДРУКУВАННЯ ТА ОТРИМАНОЇ ПОВЕРХНІ



- 1 – пруток пластику;
- 2 – камера нагріву;
- 3 – корпус hotend;
- 4 – сопло;
- 5 – потік філаменту що екструдуюється;
- 6 – раніше надрукований пластик.



- 1 – «пустоти» між нитками філаменту;
- 2 – нитка філаменту заповнення поверхні;
- 3 – нитка філаменту заповнення контуру поверхні;
- 4 – фактичне з'єднання сусідніх ниток філаменту

ПРИНТЕРИ FDM 3D ДРУКУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ.

ПРИКЛАДИ FDM 3D ПРИНТЕРІВ



Flsun Q5 Delta
Kossel



FLSUN QQ-S-Pro
Delta



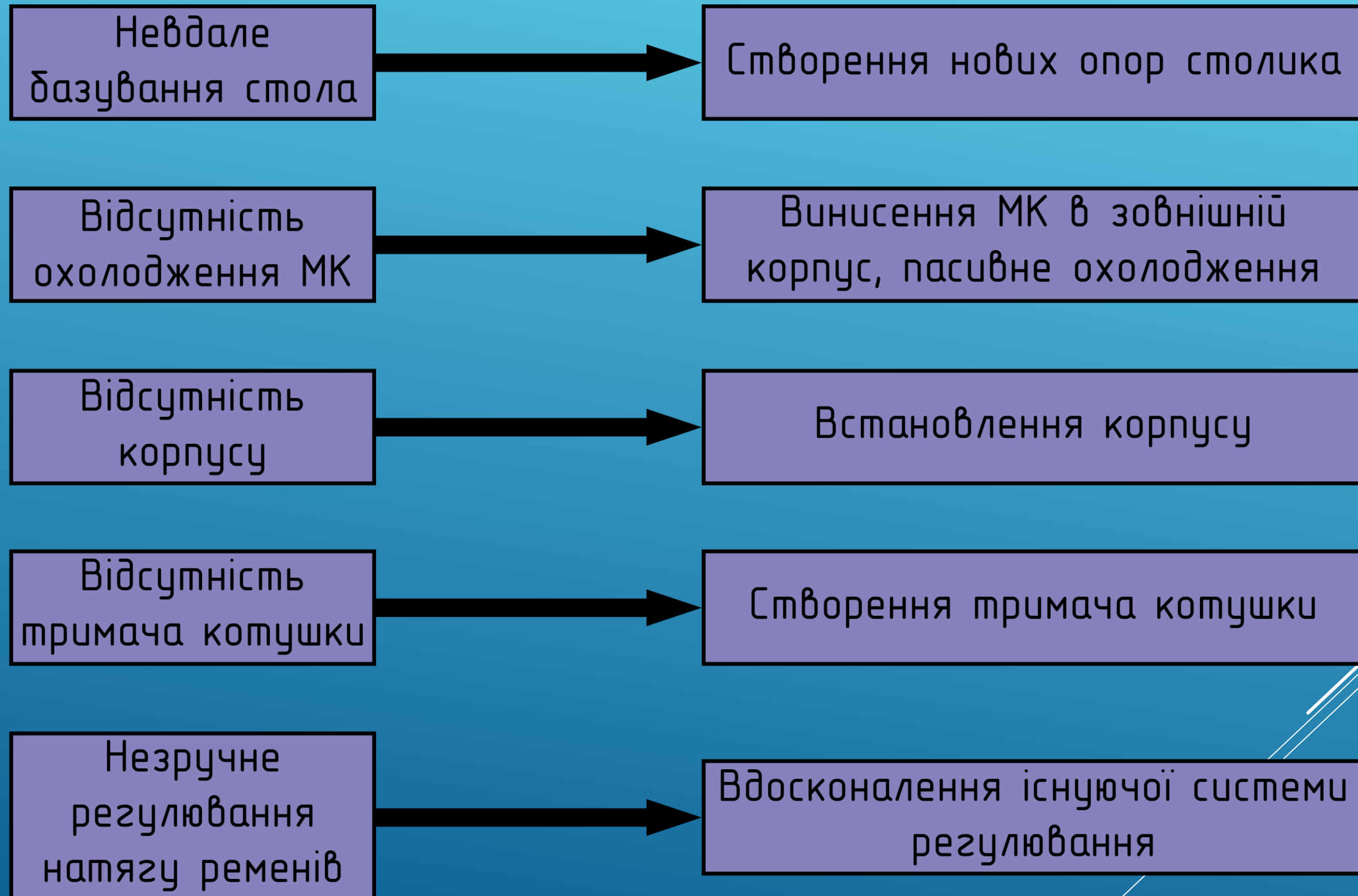
HE3D K200 delta



Kossel Mini

НЕДОЛІКИ 3D ПРИНТЕРА

НЕДОЛІКИ КОНСТРУКЦІЇ ПРИДБАНОГО 3D ПРИНТЕРА. ШЛЯХИ ЇХ ВИРІШЕННЯ

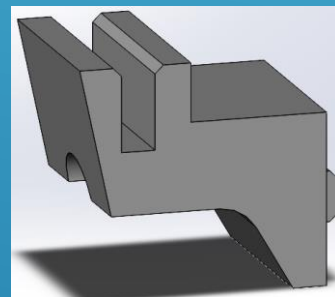


ЗМІНИ В КОНСТРУКЦІЇ 3D ПРИНТЕРА

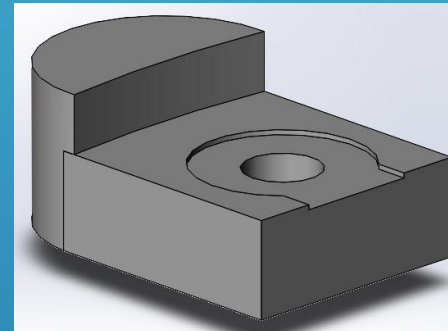
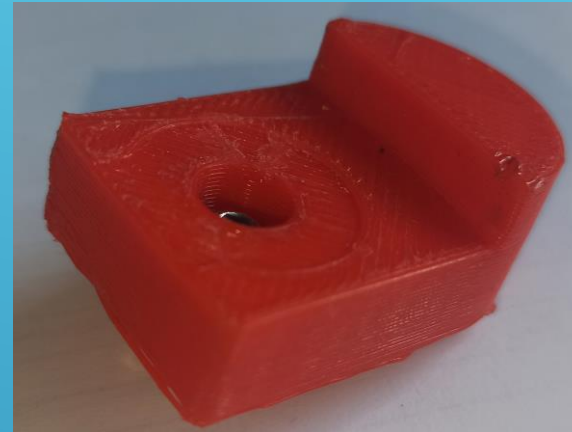
14



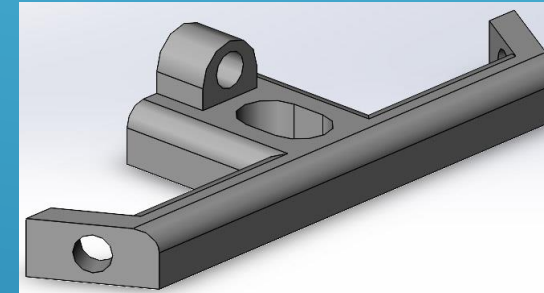
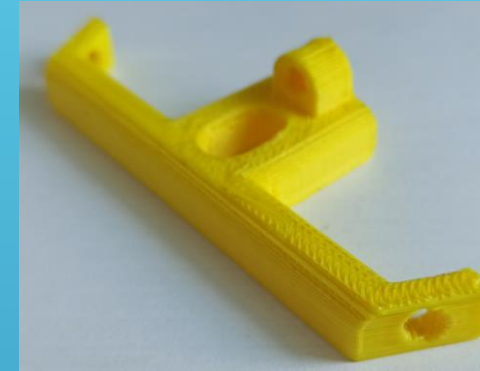
Зображення придбаного
3D принтера



Кріплення
кожуха



Опора стола

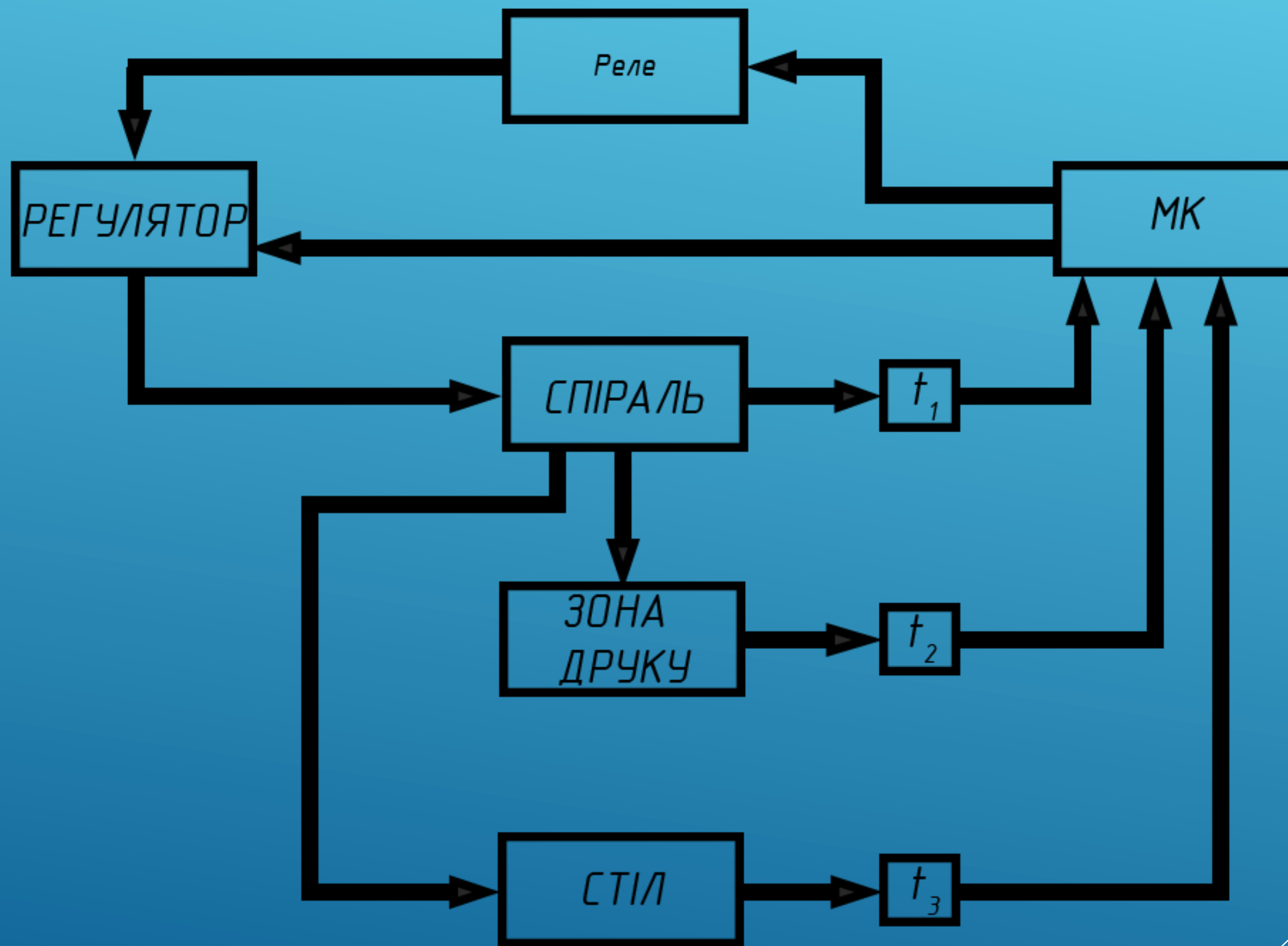


Консольний
тримач



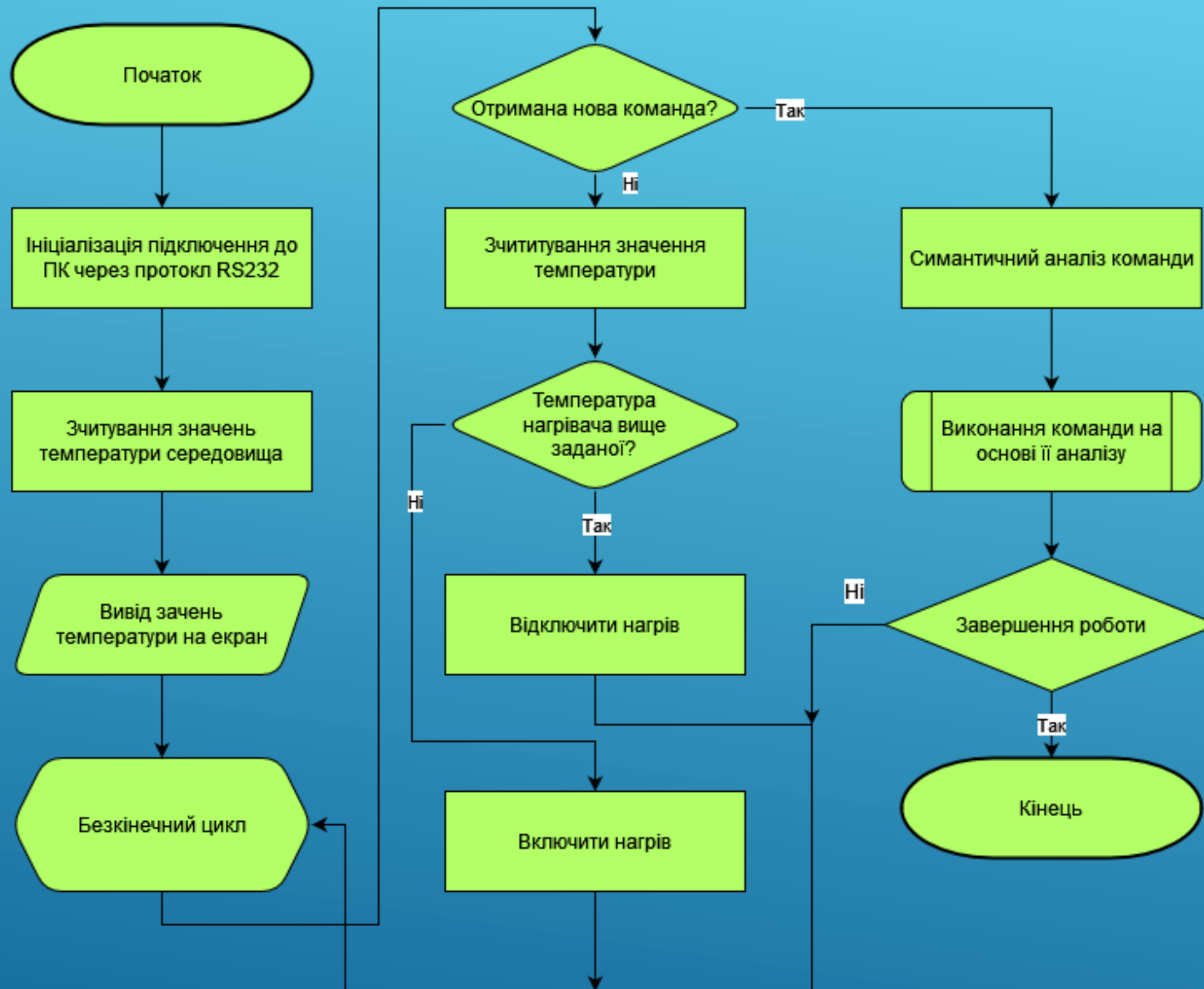
Тримачі
котушки

ФУНКЦІОНАЛЬНА СХЕМА МІКРОКЛІМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ



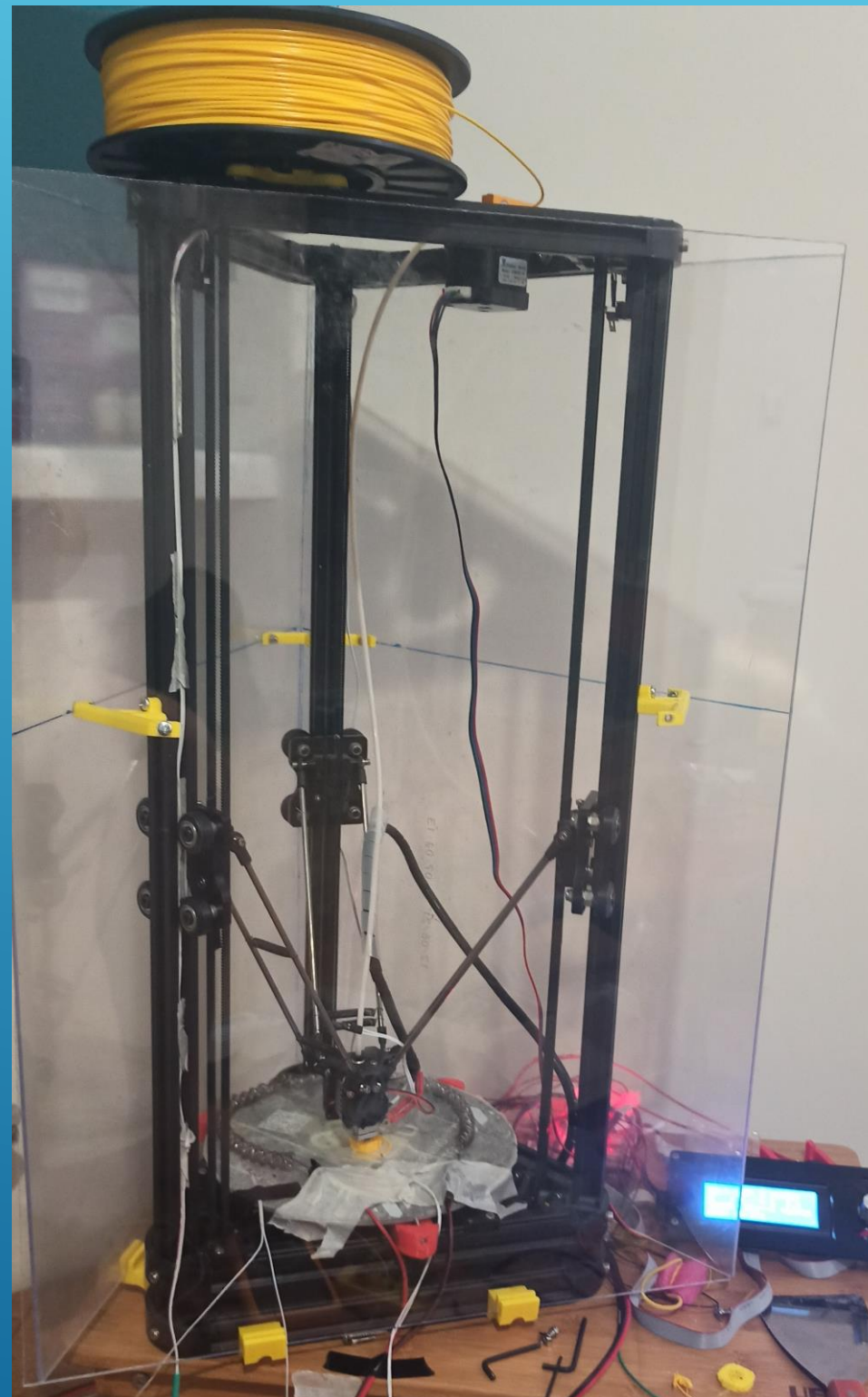
АЛГОРИТМ РОБОТИ МІКРОКОНТРОЛЕРА

16



ЗАГАЛЬНИЙ ВИГЛЯД ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

17



МЕТОДИ МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ТОЧНОСТІ ПОВЕРХНІ 3D ДРУКУ

- ▶ Плани факторного експерименту з моделями другого порядку
 - Ортогональне планування
 - Рототабельне планування
- ▶ Методи евристичної самоорганізації
 - МГВА

ПЛАНИ ПОВНОГО ФАКТОРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ

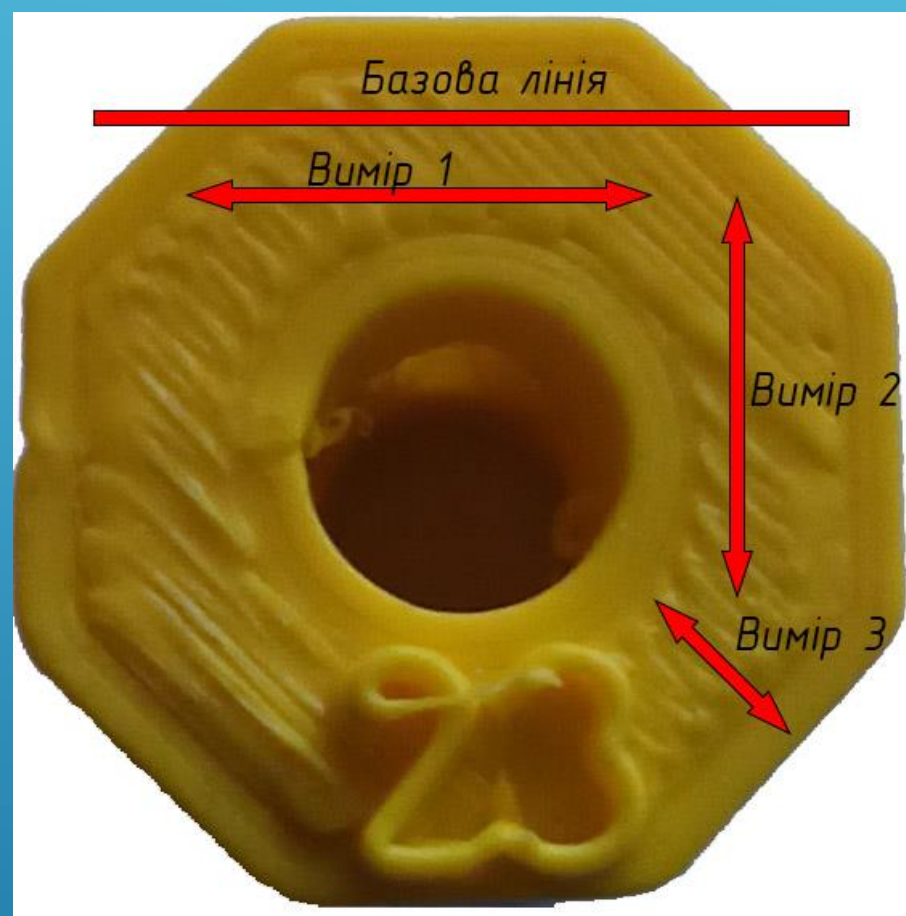
Порівняння ядра ортогонального та рототабельного планування									
Рототабельне планування					Ортогональне планування				
Дослід	x_1	x_2	x_3	x_4	Дослід	x_1	x_2	x_3	x_4
Класичний ПФЕ	-1	-1	-1	-1	Класичний ПФЕ	-1	-1	-1	-1
	1	-1	-1	-1		1	-1	-1	-1
	-1	1	-1	-1		-1	1	-1	-1
	1	1	-1	-1		1	1	-1	-1
	-1	-1	1	-1		-1	-1	1	-1
	1	-1	1	-1		1	-1	1	-1
	-1	1	1	-1		-1	1	1	-1
	1	1	1	-1		1	1	1	-1
	-1	-1	-1	1		-1	-1	-1	1
	1	-1	-1	1		1	-1	-1	1
	-1	1	-1	1		-1	1	-1	1
	1	1	-1	1		1	1	-1	1
	-1	-1	1	1		-1	-1	1	1
	1	-1	1	1		1	-1	1	1
	-1	1	1	1		-1	1	1	1
	1	1	1	1		1	1	1	1
Зіркові точки	-2	0	0	0	Зіркові точки	-1.4142	0	0	0
	2	0	0	0		1.4142	0	0	0
	0	-2	0	0		0	-1.4142	0	0
	0	2	0	0		0	1.4142	0	0
	0	0	-2	0		0	0	-1.4142	0
	0	0	2	0		0	0	1.4142	0
	0	0	0	-2		0	0	0	-1.4142
	0	0	0	2		0	0	0	1.4142
Нульова точка	0	0	0	0	Нульова точка	0	0	0	0
	0	0	0	0					
	0	0	0	0					
	0	0	0	0					
	0	0	0	0					
	0	0	0	0					

Зведений план проведення експериментальних досліджень в натуральній шкалі				
Номер досліджу	x1 (Температура друку)	x2(Температура стола)	x3(Температура нагрівача)	x4(Швидкість друку)
27	220	47.5	47.5	45
12	240	70	25	60
16	240	70	70	60
25	220	47.5	47.5	45
23	220	47.5	47.5	15
10	240	25	25	60
8	240	70	70	30
30	220	47.5	47.5	45
26	220	47.5	47.5	45
22	220	47.5	92.5	45
28	220	47.5	47.5	45
21	220	47.5	2.5	45
170	191.8	47.5	47.5	45
15	200	70	70	60
220	220	47.5	79.3	45
1	200	25	25	30
200	220	79.3	47.5	45
210	220	47.5	15.7	45
18	260	47.5	47.5	45
24	220	47.5	47.5	75
4	240	70	25	30
20	220	92.5	47.5	45
9	200	25	25	60
6	240	25	70	30
240	220	47.5	47.5	66.2
14	240	25	70	60
5	200	25	70	30
13	200	25	70	60
29	220	47.5	47.5	45
31	220	47.5	47.5	45
17	180	47.5	47.5	45
19	220	2.5	47.5	45
11	200	70	25	60
3	200	70	25	30
2	240	25	25	30
7	200	70	70	30
180	248.3	47.5	47.5	45
190	220	15.7	47.5	45
230	220	47.5	47.5	23.8

РЕЗУЛЬТАТИ ДРУКУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ ЗА НАВЕДЕНИМ ПЛАНОМ



СХЕМА ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПОВЕРХНІ. ВИМІРЮВАНЬНИЙ СТЕНД

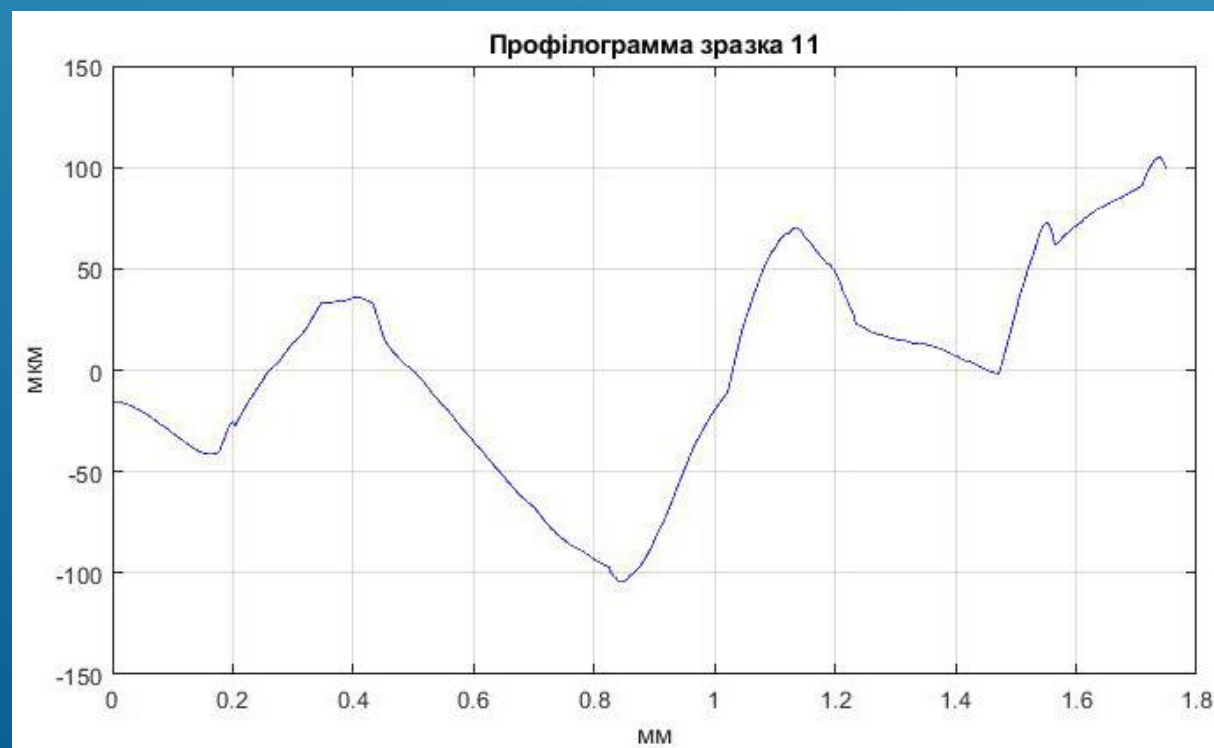
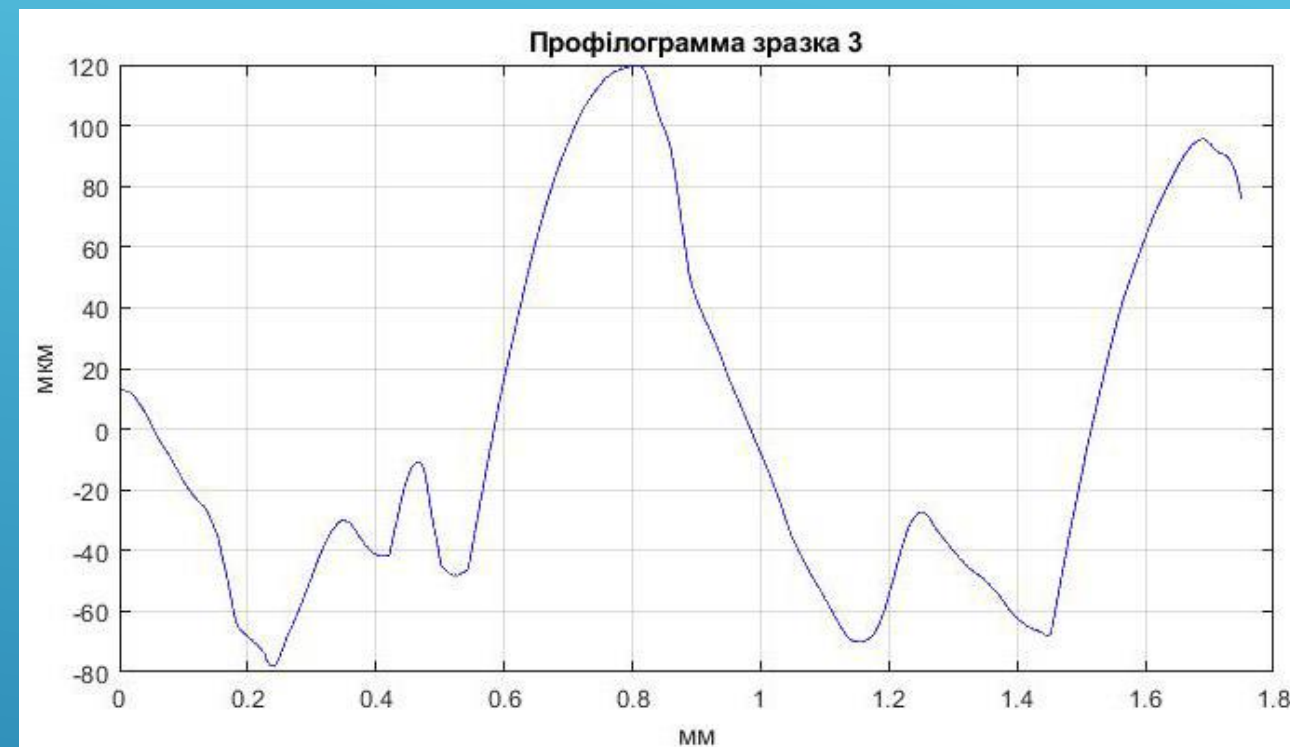


ПРОФІЛОГРАМИ ПОВЕРХОНЬ ВИГОТОВЛЕНИХ ДЕТАЛЕЙ 23

Вимір 1



Вимір 2



МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ, ЩО ОТРИМАНІ МЕТОДАМИ ОРТОГОНАЛЬНОГО ПЛАНУВАННЯ

$$Ra_1 = 56.74 - 0.333T_1 + 0.0476T_2 - 0.235T_3 - 0.3873V + 0.000575T_1^2 - 0.0003279T_2^2 + 0.000405T_3^2 + 0.00136V^2 - \\ - 0.000271T_1T_2 + 0.00042T_1T_3 + 0.000923T_1V + 0.00045T_2T_3 + 0.00014T_2V + 0.00113T_3V$$

$$Ra_2 = -18.264 + 0.079283T_1 - 0.069T_2 + 0.62195V + 0.0001T_1^2 + 0.00056T_2^2 + 0.0001T_3^2 - 0.0031V^2 - \\ - 0.00002T_1T_2 - 0.00093T_1T_3 - 0.002T_1V - 0.00014T_2T_3 + 0.00025T_2V + 0.0015T_3V + 0.13171T_3$$

$$Ra_3 = 53.555 - 0.35336T_1 + 0.1389T_2 - 0.37253T_3 - 0.2624V + 0.0007425T_1^2 + 0.0003T_2^2 + 0.0017T_3^2 + 0.00065V^2 - \\ - 0.00062T_1T_2 + 0.00036T_1T_3 + 0.00055T_1V + 0.00022T_2T_3 - 0.0008T_2V + 0.0019T_3V$$

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ, ЩО ОТРИМАНІ МЕТОДАМИ РОТОТАБЕЛЬНОГО ПЛАНУВАННЯ

$$Ra_1 = 60.24 - 0.3589T_1 + 0.0088T_2 - 0.239T_3 - 0.38V + 0.0013V^2 + 0.0006T_1^2 + 0.00011T_2^2 + 0.00048T_3^2 + 0.0013V^2 - \\ - 0.0003T_1T_2 + 0.0004T_1T_3 + 0.0009T_1V + 0.00045T_2T_3 + 0.00013T_2V + 0.0011T_3V$$

$$Ra_2 = 1.4748 - 0.066T_1 - 0.0715T_2 + 0.106T_3 + 0.42041V + 0.00044T_1^2 + 0.00059T_2^2 + 0.00036T_3^2 - 0.00085V^2 - \\ - 0.00002T_1T_2 - 0.0009T_1T_3 - 0.0019T_1V - 0.00014T_2T_3 + 0.00025T_2V + 0.0015T_3V$$

$$Ra_3 = 33.869 - 0.194T_1 + 0.152T_2 - 0.2906T_3 - 0.23V + 0.00039T_1^2 + 0.00016T_2^2 + 0.00086T_3^2 + 0.00035V^2 - \\ - 0.00062T_1T_2 + 0.00036T_1T_3 + 0.00055T_1V + 0.00022T_2T_3 - 0.00082T_2V + 0.002T_3V$$

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ, ЩО ОТРИМАНІ МЕТОДАМИ МГВА (ФРАГМЕНТИ)

$$\begin{aligned}
 Ra_1 = & -0.0942 + N385 * 0.0039 - N385 * N58 * 0.057 + \\
 & + N58 * 1.125 + N58^2 * 0.027; \\
 \text{Де, } N58 = & 0.199 + N86 * 2.131 - N86 * N213 * 0.313 - \\
 & - N213 * 1.249 + N213^2 * 0.327; N213 = -0.07 - \\
 & - N253 * 1.147 - N253 * N283 * 4.404 + N253^2 * 2.477 + \\
 & + N283 * 1.971 + N283^2 * 1.961; N283 = 1.35403 + \\
 & + N339 * N395 * 1.4633 - N339^2 * 0.666574 - \\
 & - N395^2 * 0.591251; N395 = 0.21667 + N420 * N431 * 0.30109; \\
 N431 = & 2.9147 - x3 * 0.673653 + x3 * x4 * 0.378586 + \\
 & + x4^2 * 0.205021; N339 = -0.0870702 + N418 * N428 * 0.334823; \\
 N418 = & 3.07135 - x1 * 0.587524 + x1 * x14 * 0.493213; \\
 N253 = & 1.36148 + N287 * N370 * 0.402564 - \\
 & - N287^2 * 0.0766457 - N370 * 0.0801907 - N370^2 * 0.129291;
 \end{aligned}$$

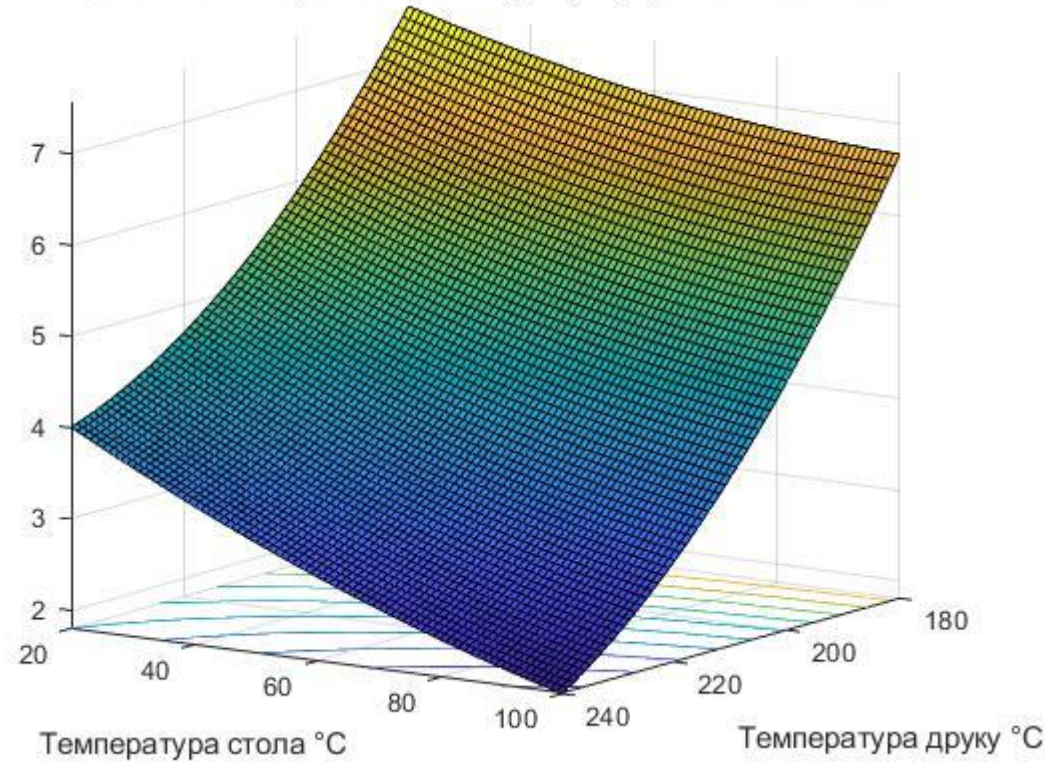
$$\begin{aligned}
 Ra_2 = & -0.444678 - N468 * N150 * 0.0305587 - N468^2 * 0.0349706 + \\
 & + N150 * 1.47612 - N150^2 * 0.0355778; \\
 \text{Де, } N150 = & -0.777945 + N307 * 1.52764 + N307 * N334 * 1.07167 - \\
 & - N307^2 * 0.651184 - N334 * 0.347084 - N334^2 * 0.367379; \\
 N334 = & 4.34322 + N419 * 0.844165 + N419^2 * 0.0172016 - \\
 & - N520 * 3.34395 + N520^2 * 0.640068; \\
 N520 = & -193.125 + N562 * 73.3095 - N562 * N563 * 16.4624 - \\
 & - N562^2 * 3.75519 + N563 * 52.7293;
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Ra_3 = & 0.00853997 - N291 * 0.164059 + N72 * 1.15816; \\
 \text{Де, } N72 = & -0.0427 + N132 * 0.467 - N132 * N138 * 0.0056 + N138 * 0.578; \\
 N138 = & -0.0435 + x13 * 0.496 - x13 * N289 * 0.105 + x13^2 * 0.199 + \\
 & + N289 * 0.938; \\
 N289 = & 0.373 + x1 * 0.419 - x1 * N370 * 0.401 + N370 * 0.547 + \\
 & + N370^2 * 0.082; \\
 N370 = & 0.852916 - N516 * 2.73217 + N516 * N561 * 1.81356 + \\
 & + N561 * 2.12785 - N561^2 * 1.20235; \\
 N561 = & 0.7071 + x1 * x14 * 0.46375 + x1^2 * 0.03685 + x14^2 * 1.4; \\
 N516 = & 0.732 - x4 * 0.244 - x4 * x24 * 0.596 + x24 * 0.614 + x24^2 * 1.26; \\
 N132 = & -0.0438 + N256 * 1.02 - N256 * N279 * 0.315 + N279^2 * 0.31; \\
 N279 = & 6.6851 - N656 * 6.90314 + N656 * N376 * 1.39936 + \\
 & + N656^2 * 1.74191 - N376 * 1.61096 + N376^2 * 0.098; \\
 N376 = & 0.659 + x4 * 0.776 - x4 * N517 * 0.702 + N517^2 * 0.269; \\
 N256 = & 0.345661 - N366 * 1.3663 + N366 * N544 * 0.795339 + \\
 & + N366^2 * 0.113355 + N544 * 1.67653 - N544^2 * 0.704256; \\
 N544 = & 0.585553 + N636 * N657 * 1.7514 - N636^2 * 0.539306 + \\
 & + N657 * 0.00241545 - N657^2 * 0.658719;
 \end{aligned}$$

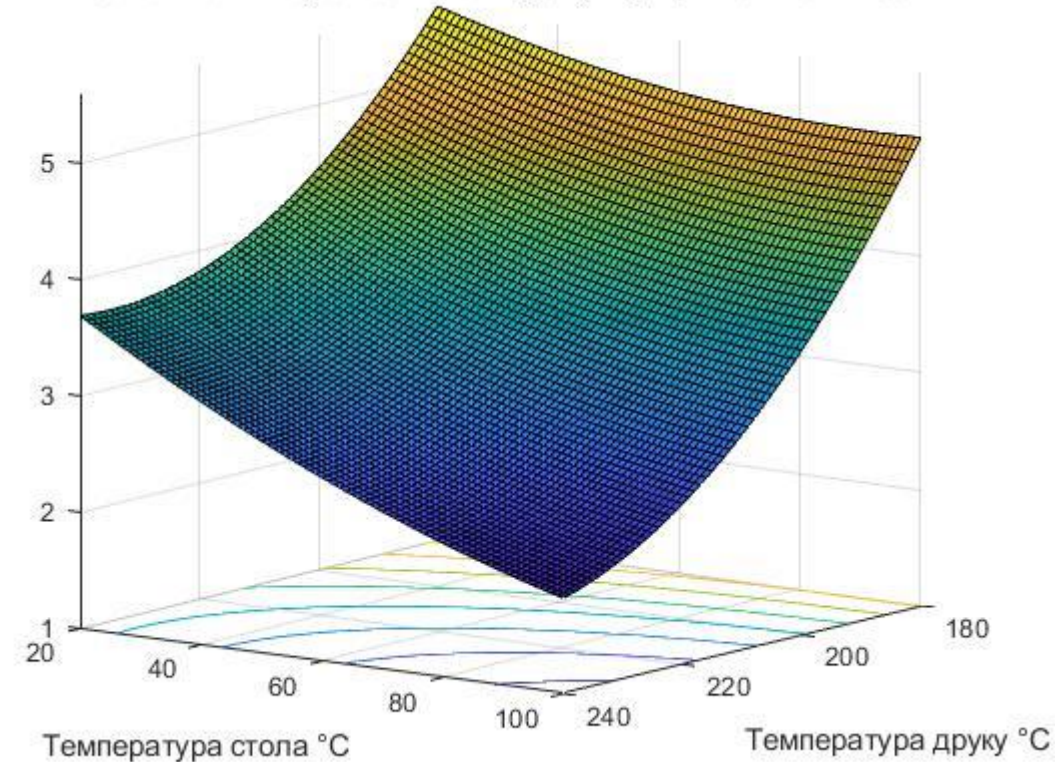
ГРАФІЧНІ ЗАЛЕЖНОСТІ ШОРСТКОСТІ ОБРОБЛЕНИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ

27

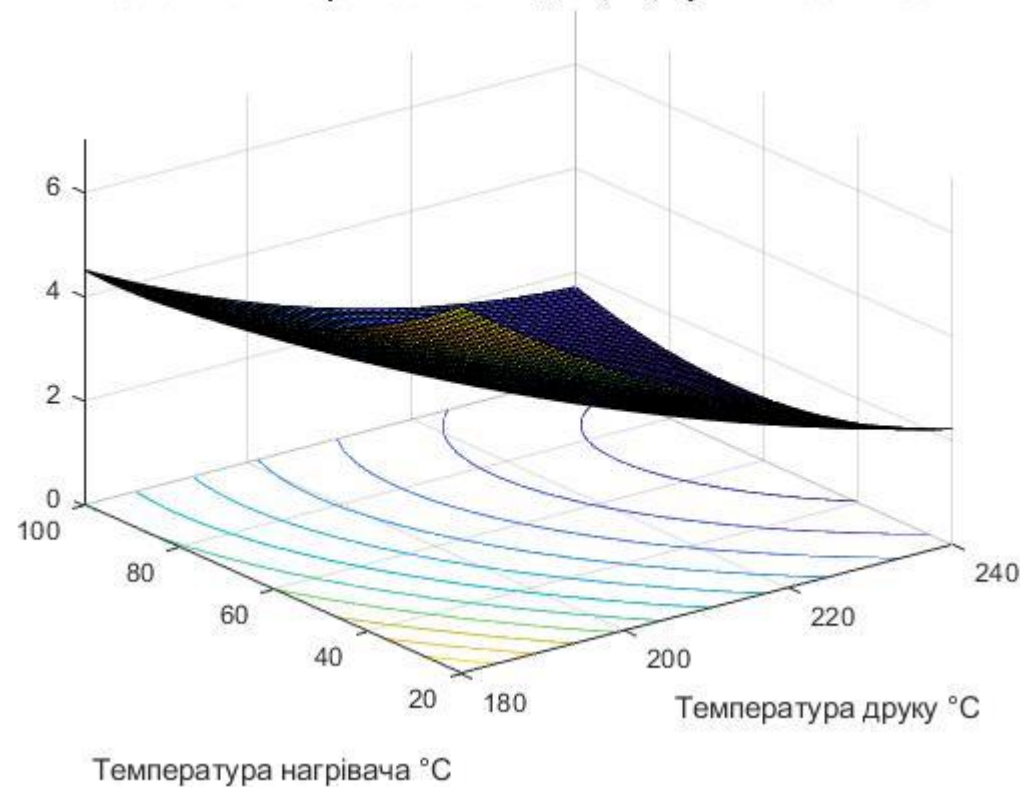
Залежність шорсткості Ra1 від T1, T2, при T3 = 25 V = 30



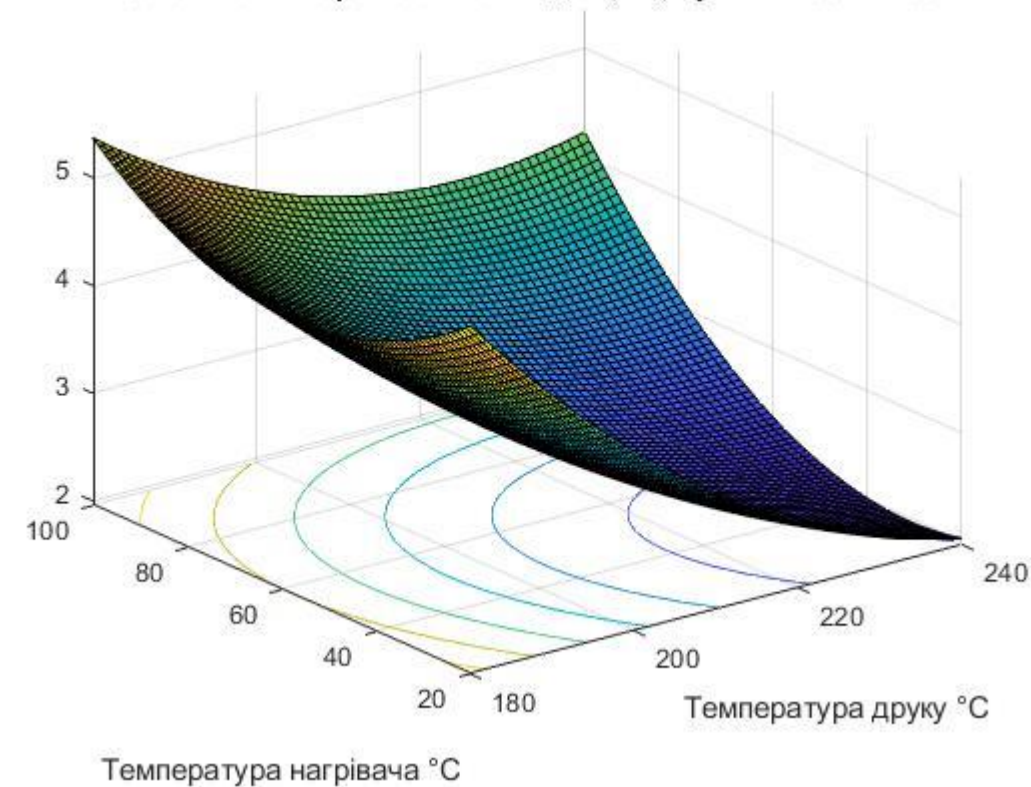
Залежність шорсткості Ra1 від T1, T2, при T3 = 25 V = 60



Залежність шорсткості Ra1 від T1, T3, при T2 = 90 V = 30

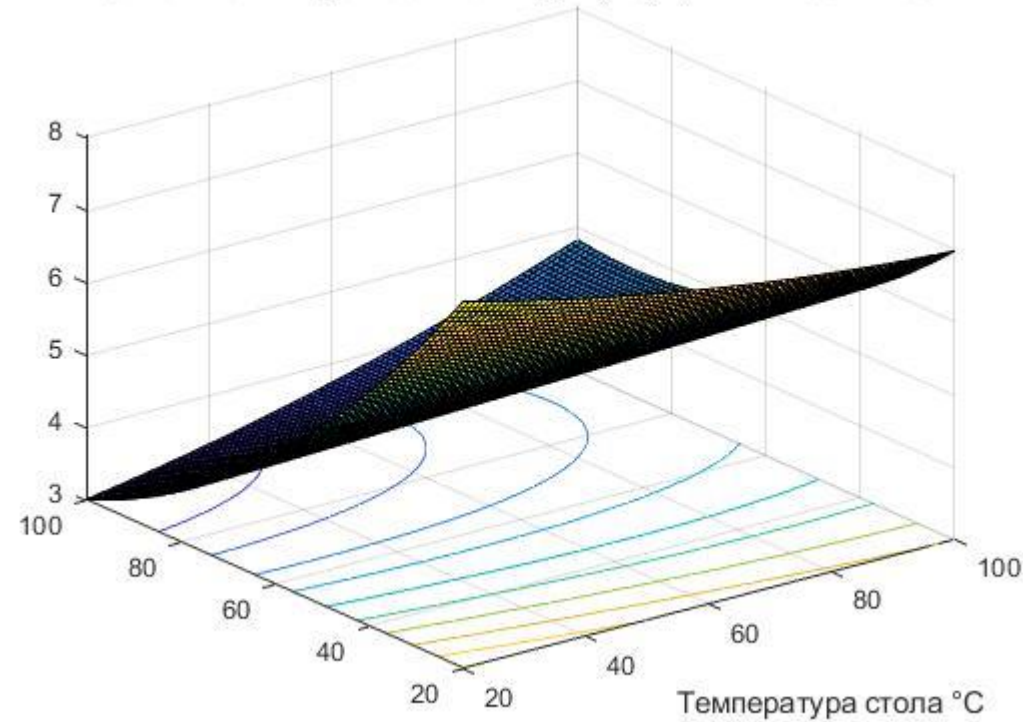


Залежність шорсткості Ra1 від T1, T3, при T2 = 90 V = 60



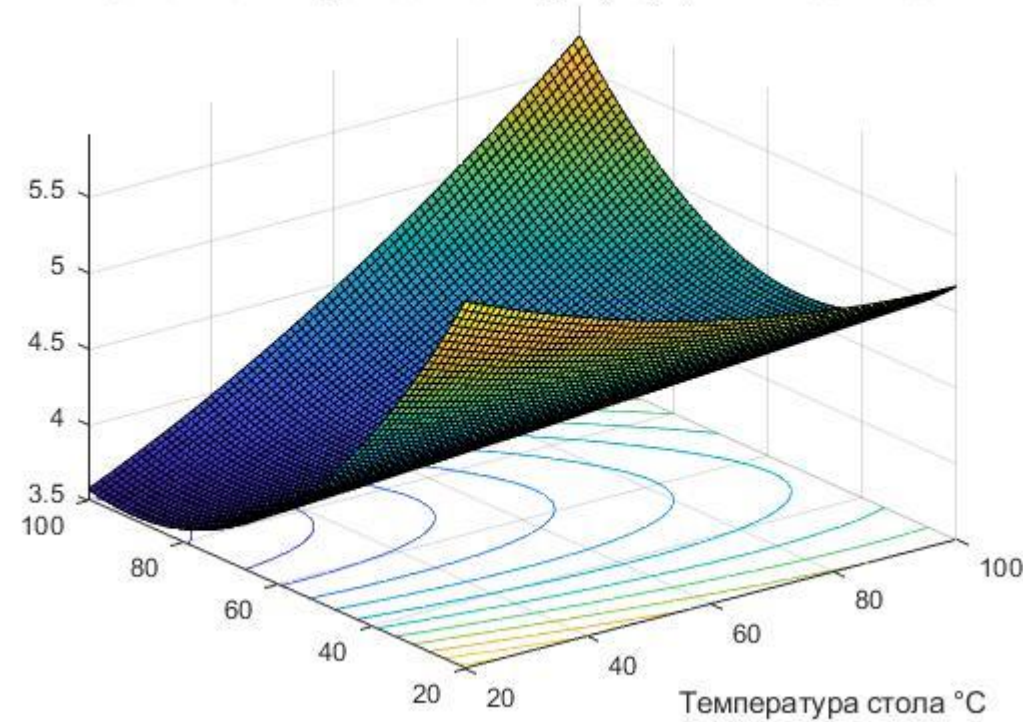
ГРАФІЧНІ ЗАЛЕЖНОСТІ ШОРСТКОСТІ ОБРОБЛЕНИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ (ПРОДОВЖЕННЯ)

Залежність шорсткості Ra1 від T2, T3, при T1 = 180 V = 30



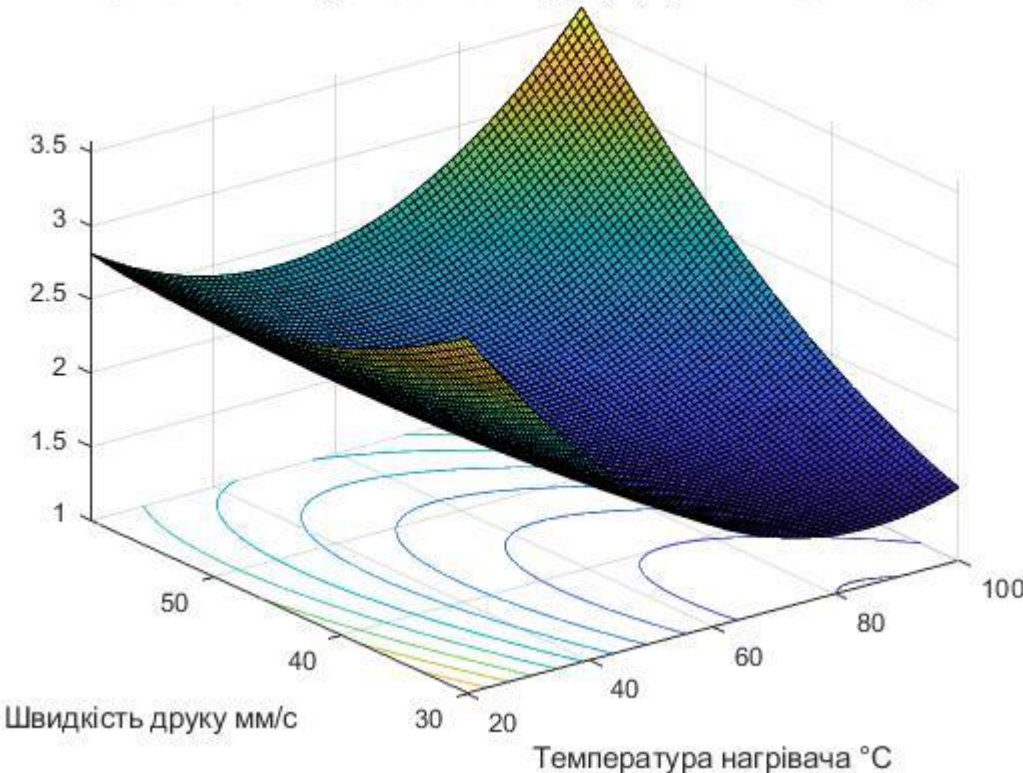
Температура нагрівача °C

Залежність шорсткості Ra1 від T2, T3, при T1 = 180 V = 60



Температура нагрівача °C

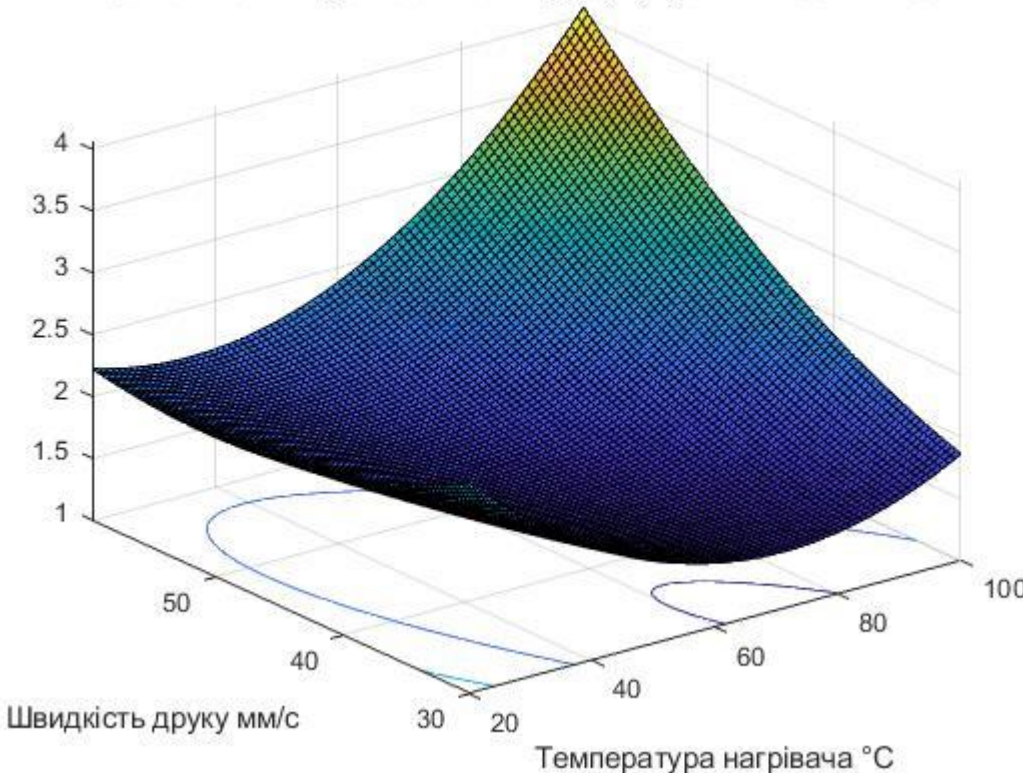
Залежність шорсткості Ra1 від T3, V, при T1 = 230 T2 = 60



Швидкість друку мм/с

Температура нагрівача °C

Залежність шорсткості Ra1 від T3, V, при T1 = 230 T2 = 90



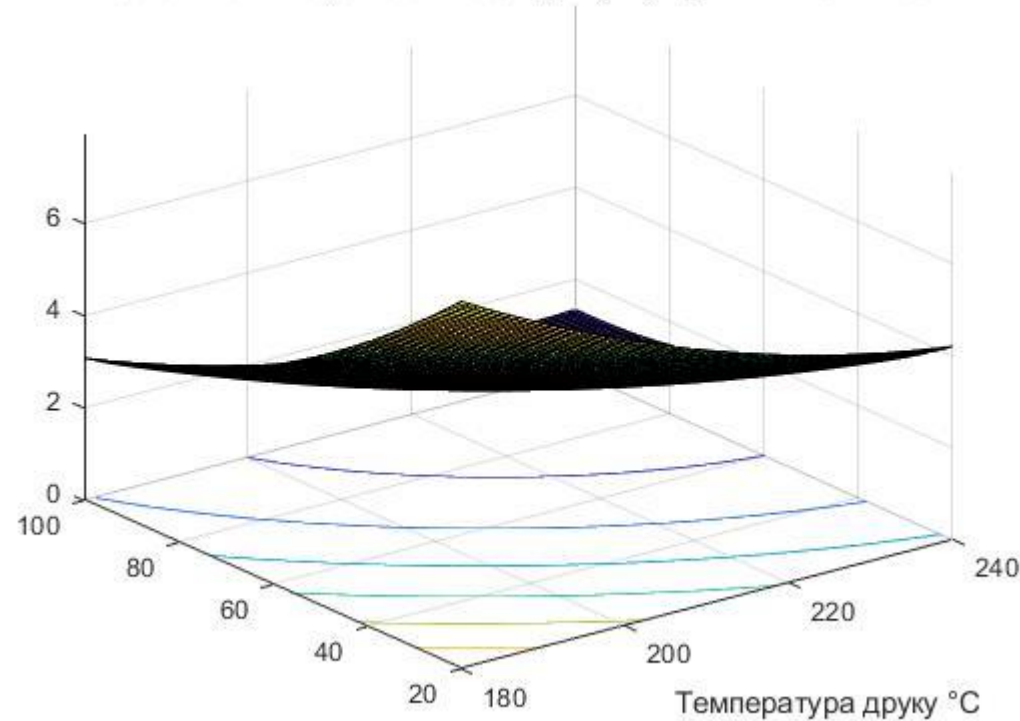
Швидкість друку мм/с

Температура нагрівача °C

ГРАФІЧНІ ЗАЛЕЖНОСТІ ШОРСТКОСТІ ОБРОБЛЕНИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ (ПРОДОВЖЕННЯ)

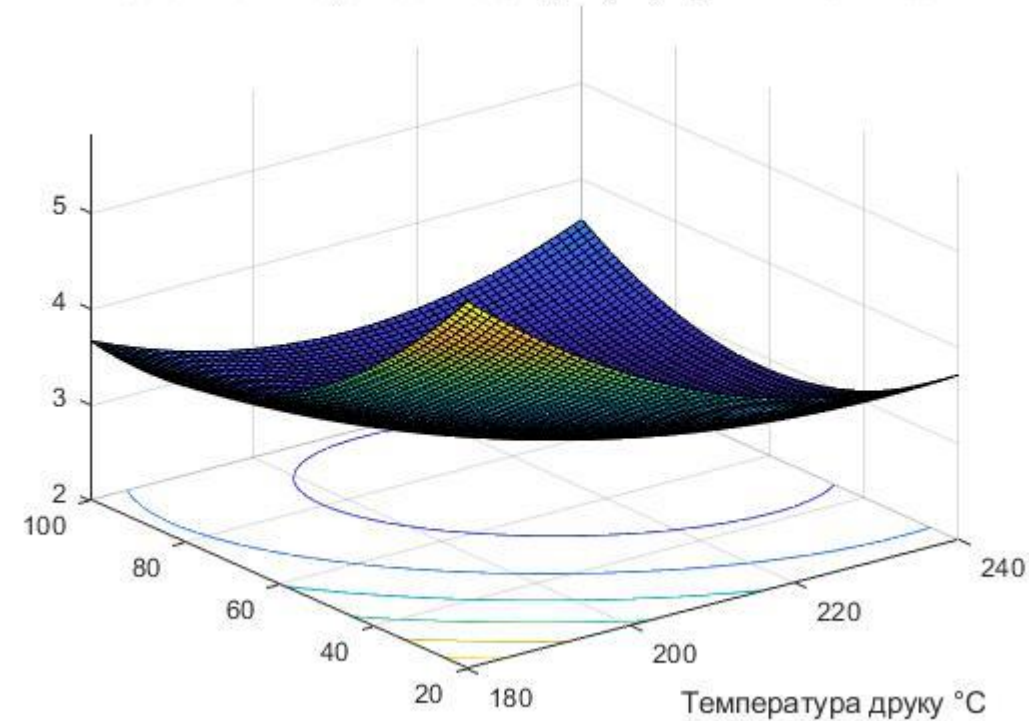
29

Залежність шорсткості Ra3 від T1, T3, при T2 = 25 V = 30



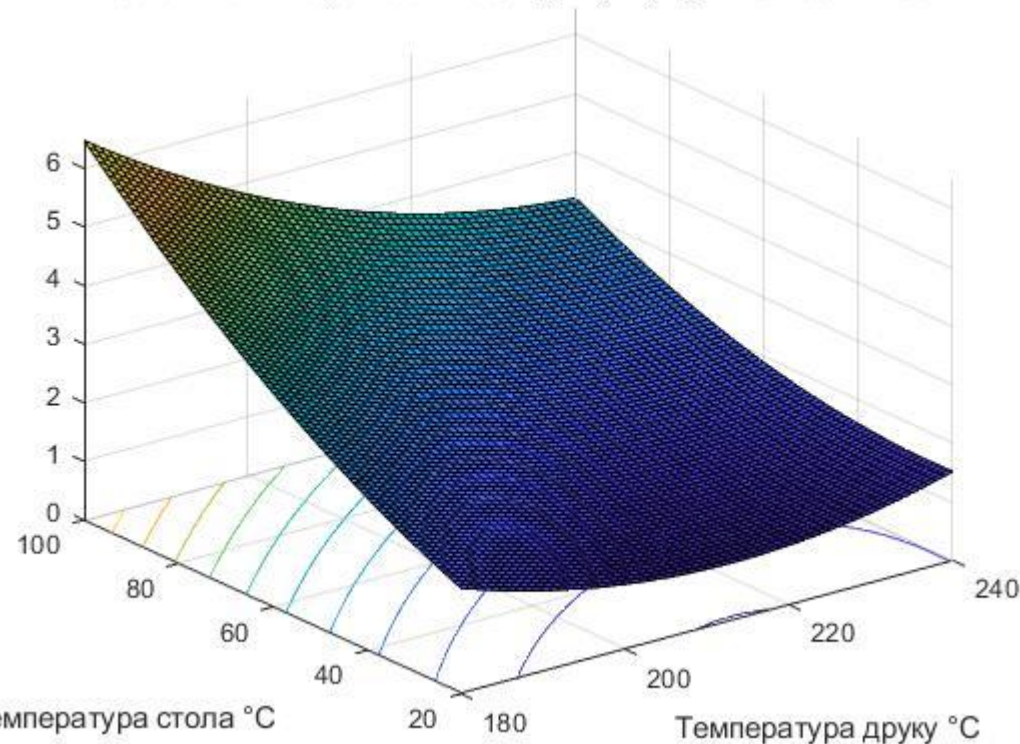
Температура нагрівача °C

Залежність шорсткості Ra3 від T1, T3, при T2 = 25 V = 60



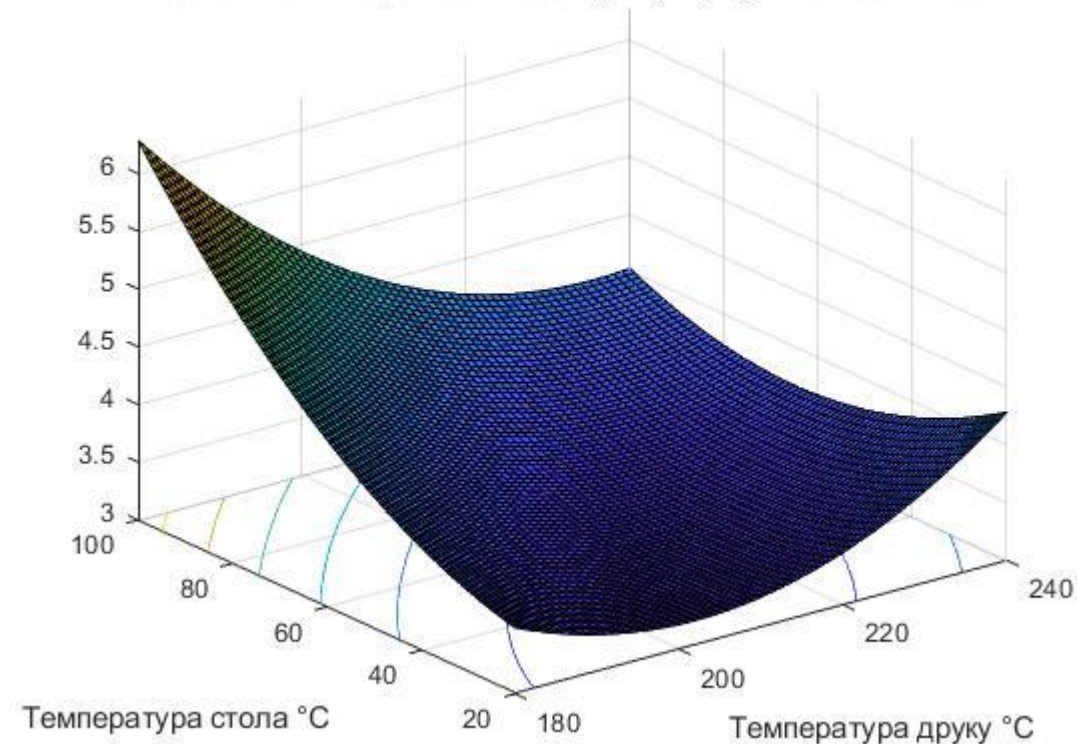
Температура нагрівача °C

Залежність шорсткості Ra3 від T1, T2, при T3 = 90 V = 30



Температура стола °C

Залежність шорсткості Ra3 від T1, T2, при T3 = 90 V = 60

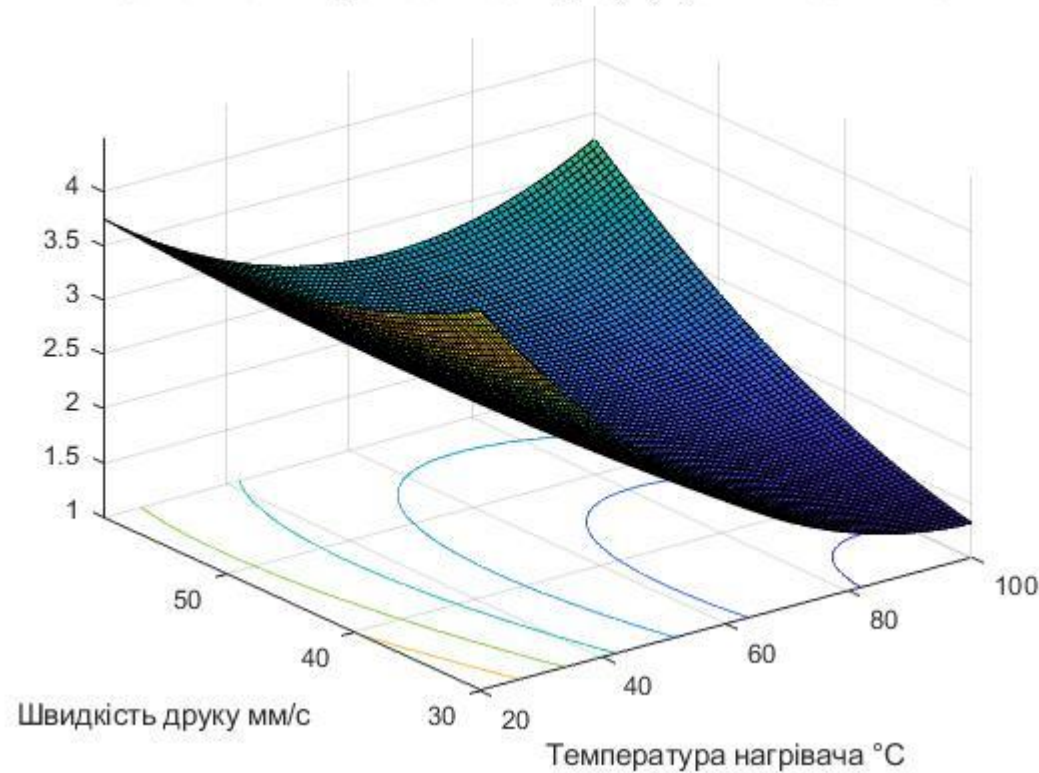


Температура стола °C

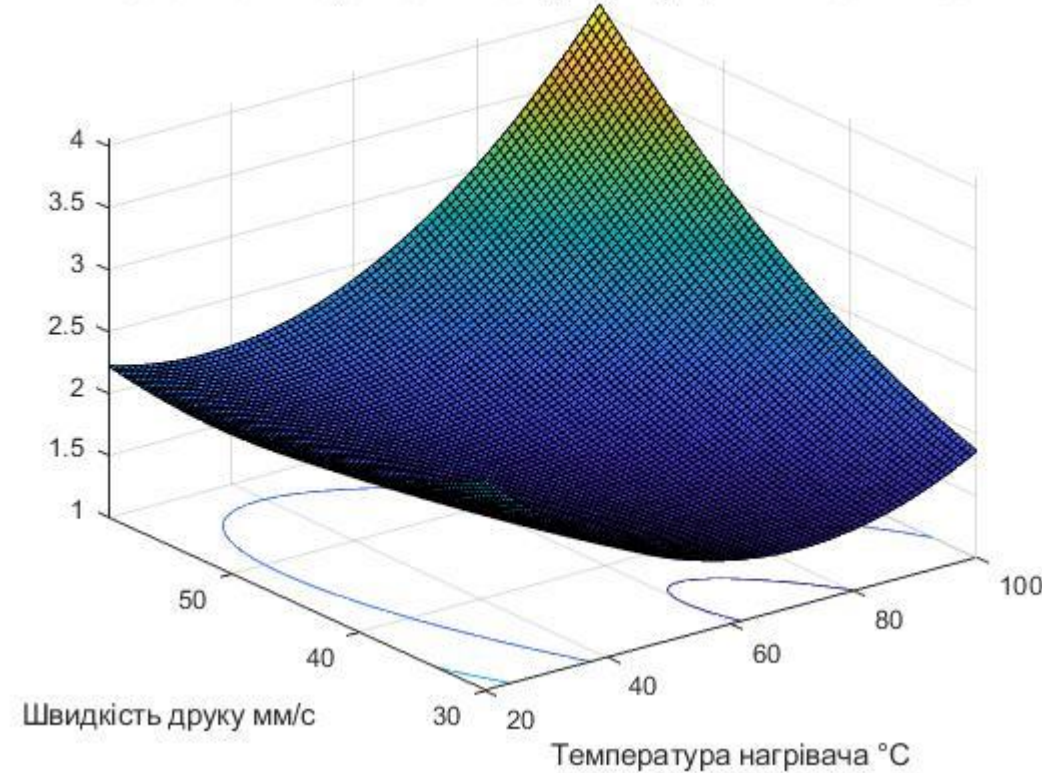
Температура друку °C

ГРАФІЧНІ ЗАЛЕЖНОСТІ ШОРСТКОСТІ ОБРОБЛЕНИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ (ПРОДОВЖЕННЯ)

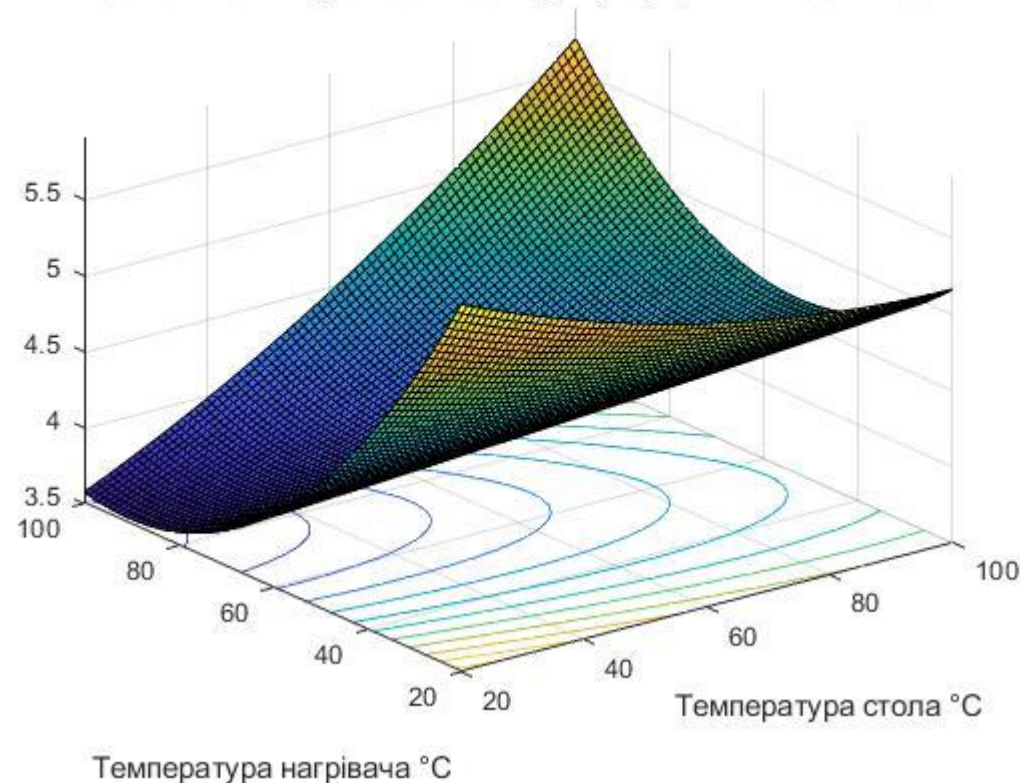
Залежність шорсткості Ra3 від T3, V, при T1 = 230 T2 = 25



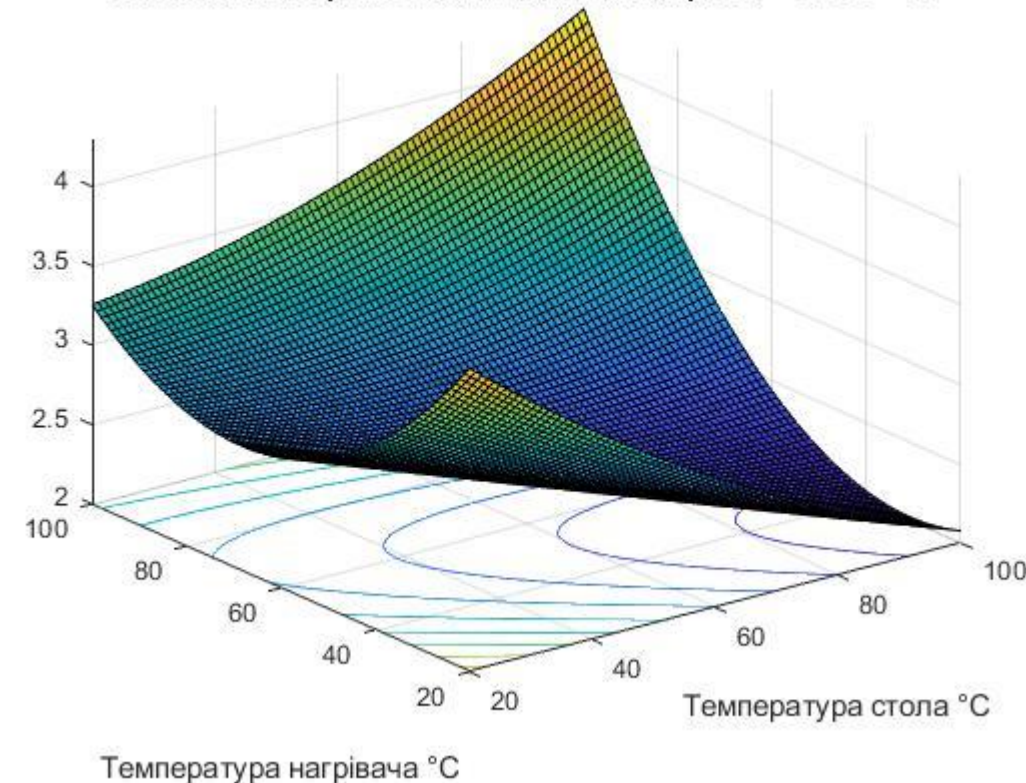
Залежність шорсткості Ra3 від T2, T3, при T1 = 230 T2 = 90



Залежність шорсткості Ra3 від T2, T3, при T1 = 180 V = 60



Залежність шорсткості Ra3 від T2, T3, при T1 = 230 V = 60



ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРУ ЯКОСТІ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ

- ▶ **Критерій оптимізації** – мінімізація значення шорсткості поверхні
- ▶ **Параметр Ra_1 :** $T1 = 244\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T2 = 99\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T3 = 41\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V = 34\text{ мм/с}$.
При виборі цих параметрів значення шорсткості отримано $Ra = 1.18$.
- ▶ **Параметр Ra_2 :** $T1 = 249\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T2 = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T3 = 95\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V = 30\text{ мм/с}$.
При виборі цих параметрів значення шорсткості отримано $Ra = 1.702$.
- ▶ **Параметр Ra_3 :** $T1 = 244\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T2 = 95\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T3 = 44\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V = 60\text{ мм/с}$.
Результат шорсткості при виборі цих значень параметрів отримано $Ra = 0.93$.

ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ДЛЯ FDM 3D ДРУКУ ДЕТАЛЕЙ

Для отримання оптимальної шорсткості, доцільно використовувати:

- Запропоновану модифікацію конструкції 3D принтера та наступні значення режимів друку:
- **Температура друку (T_1)** повинна коливатись в межах 240-250 °C
- **Температура стола (T_2)** – в межах 60 – 100 °C
- **Температура нагрівача (T_3)** – в межах 40 – 95 °C
- **Швидкість друку (V)** – в межах 30-40 мм/с для отримання мінімальної шорсткості нитки, або 50-60мм/с для отримання рівного горизонту поверхні

РЕЗУЛЬТАТИ СТАРТАП ПРОЕКТУВАННЯ

- вартість стартової розробки – 85000 грн;
- ціна на виході для споживача – 120000 грн;

- чистий прибуток – 28000 грн;
- витрати на персонал – 39000 грн.

- окупність інвестицій (ROI) – 46.6%
- термін окупності інвестицій (DPP) – 1 рік.

- вартість початкового запуску – 85000 грн.
- кошти стартапера – 25000 грн.
- інвестиції – 60000 грн.

Дана розробка не має прямих аналогів. Схожі моделі з меншим функціоналом коштують в рази дорожче запропонованої розробки.

ВИСНОВКИ

- ▶ Запропонована методика покращення параметра якості поверхонь отриманих деталей.
- ▶ Створена експериментальна установка, що реалізує запропоновану методологію.
- ▶ Виконано моделювання параметрів, що впливають на шорсткість друкування.
- ▶ Отримано математичні моделі параметру якості поверхні та вибрано найкращі, що адекватно описують процес.
- ▶ Проведено оптимізацію параметрів друкування за обраними моделями.
- ▶ Розроблено практичні рекомендації по використанню запропонованої модифікації 3D принтера та температурних режимів друкування деталі.

- ▶ XV Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність інженерних рішень у приладобудуванні» 10-11 грудня 2019 р. м. Київ, Україна;
- ▶ X Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю «ПРОЦЕСИ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ, ВЕРСТАТИ ТА ІНСТРУМЕНТ » м. Житомир, 6–9 листопада 2019 р.;
- ▶ XII Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування» 15-16 травня 2019 р. м. Київ, Україна,
- ▶ 13-я Международная научно-техническая конференция молодых ученых и студентов «НОВЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ» 15–17 апреля 2020 г. Минск;
- ▶ Всеукраїнська науково-практична on-line конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених, присвячена Дню науки, м. Житомир, 11–15 травня 2020 року;
- ▶ XIII Науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування», 13-14 травня 2020 р. м. Київ, Україна;
- ▶ I Міжнародної науково-практичної інтернет-«Інтеграція освіти, науки та бізнесу в сучасному середовищі: зимові диспути» 6-7 лютого 2020 р. – Дніпро, 2020;
- ▶ XIV Науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування», 18-19 травня 2021 р. м. Київ, Україна;
- ▶ XVII Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні» 07-08 грудня 2021 р. м. Київ, Україна;
- ▶ XVI Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні» 08-09 грудня 2020 р.;
- ▶ Дев'ята міжнародна науково-технічна конференція «ІНФОРМАТИКА, УПРАВЛІННЯ ТА ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ» Харків – Краматорськ 2022;
- ▶ Всеукраїнська науково-практична on-line конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених «Перспективи розвитку машинобудівної інженерії та транспортних технологій» (присвячена Дню науки) 11-13 травня 2022р. м. Харків

Публікації за темою магістерської дисертації:

- ▶ стаття: «Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво» м. Луцьк, випуск №43 2021,
- ▶ стаття в матеріалах 22-ї міжнародної науково-технічної конференції, м. Київ

Конкурс студентських наукових робіт:

- ▶ участь в другому турі Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт зі спеціальності «Прикладна механіка (технології машинобудування)» м. Житомир, 2020.
- ▶ участь в другому турі Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт зі спеціальності «Прикладна механіка (технології машинобудування)» м. Житомир, 2022.

Впровадження:

- ▶ виробничий процес ТОВ «Павутина.НЕТ»
- ▶ виробничий процес ТОВ «Ванком»
- ▶ навчальний процес НТУУ КПІ «ім. Ігоря Сікорського»

ДЯКУЮ ЗА УВАГУ!

