

Хмельницький національний університет
Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА

Розробка широкоформатного 3D-принтера
FDM друку

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітня програма «Електропобутова техніка»

Шифр БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Виконав студент
4 курсу група ET-21


Підпис


Корольчук М.П.
Ініціали, прізвище

Керівник


Підпис, дата


д.ф. ст. викл. Поліщук А.О.
Ініціали, прізвище

Нормоконтролер


Підпис, дата

к.т.н. ст. викл. Фурдак С.І.
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:
Зав. кафедри МАЕЕС


Підпис, дата

к.т.н., доц. Неймак В.С.
Ініціали, прізвище

2 06 2025 р.

Хмельницький 2025

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури

Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

Освітній рівень бакалавр


Галузь знань 14 Електрична інженерія

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітня програма Електропобутова техніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МАЕЕС



2 . 06 . 2025

ЗАВДАННЯ
НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Корольчук Мирослав Петрович

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи Розробка широкоформатного 3-Dпринтера FDM друку
Керівник роботи Поліщук А.О., д.ф., ст. викл.

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом ректора університету від 7 02 2025 р. № 23

2. Строк подання студентом роботи на кафедру 2.06.25

3. Вихідні дані до роботи: технічні характеристики FDM 3D-принтерів

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ

1 Огляд та аналіз технічних джерел щодо адитивних технологій 3D-друку

2 Розробка широкоформатного FDM 3D-принтера

3 Розрахунки, що підтверджують ефективність роботи 3d-принтера

Висновки

Перелік джерел посилань

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)

Аркуш 1. Види кінематичних систем 3D-принтерів. Документ оглядовий (A1).

Аркуш 2. Принцип роботи 3D-принтера. Схема структурна комбінована (A1).

Аркуш 3. Система керування 3D-принтера. Схема електрична принципова

(A1). Аркуш 4. Принцип руху елементів 3D-принтера. Схема кінематична

принципова (A1). Аркуш 5. 3D-принтера FDM друку. Вид загальний (A1).

Аркуш 6. Прототип 3D-принтера. Документ ілюстраційний (A1).

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1 Огляд та аналіз технічних джерел щодо адитивних технологій 3D-друку	20.05.25р.	
2 Розробка широкоформатного FDM 3D-принтера	27.05.25р.	
3 Розрахунки, що підтверджують ефективність роботи 3d-принтера	03.06.25р.	


Студент


Підпис


Ініціали, прізвище

Керівник роботи


Підпис


Ініціали, прізвище

АНОТАЦІЯ

до бакалаврської роботи студента спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

1. Прізвище, ім'я та по батькові Корольчук Мирослав Петрович
2. Тема бакалаврської роботи Розробка широкоформатного 3D-принтера FDM друк
3. Прізвище, ініціали, вчена ступінь та звання рецензента _____

4. Об'єм бакалаврської роботи: креслень 6 арк., сторінок записки 62

5. Дана робота присвячена розробці широкоформатного FDM 3D-принтера
У роботі наведено розробку та реалізацію конструкції широкоформатного FDM 3D-принтера.

У розрахунково-пояснювальній записці представлено всі необхідні технічні рішення, а також розділи, що відповідають встановленим вимогам.

У першому розділі проведено огляд та аналіз існуючих технологічних та технічних рішень щодо технологій 3D-друку.

У другому розділі представлено структурну схему роботи принтера. Також електричну та кінематичну схему 3D-принтера та проведено розробку прототипу

У третьому розділі проведено розрахунки, які підтверджують працездатність 3D-принтера та доводять коректність підбору основних компонентів.

Підпис студента 

« 2 » 06 2025 р.

РІШЕННЯ ЕК

Протокол 1 від «12» 06 2025 р.

Оцінка проєкту ЕК 5,0/А

Рекомендації ЕК впровадження у виробництво



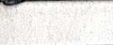
Особливі відмітки _____

Технічний секретар 

« 12 » 06 2025 р.

ЗМІСТ

	ст.
Вступ.....	5
1× Огляд та аналіз технічних джерел щодо адитивних технологій 3d-друку....	6
1.1 Види технологій 3D-друку.....	6
1.2 Будова та принцип роботи FDM 3D-принтера	9
1.3 Види конструкцій FDM 3D-принтерів.....	15
1.4 Матеріали, які використовують для друку за допомогою FDM 3D-принтерів.....	18
Висновок до першого розділу.....	20
2× Розробка широкоформатного FDM 3D-принтера.....	21
2.1 Розробка структурної схеми роботи 3D-принтера	21
2.2 Вибір кінематики принтера та розробка кінематичної схеми.....	24
2.3 Розробка електричної принципової схеми принтера	28
2.4 Розробка моделі 3D-принтера.....	34
2.5 Виготовлення та тестування прототипу принтера.....	35
Висновок до другого розділу	47
3× Розрахунки, що підтверджують ефективність роботи 3d-принтера.....	48
3.1 Розрахунок основних характеристик.....	48
3.2 Підбір елементів для реалізації керування нагрівом робочої поверхні .	54
Висновки до третього розділу.....	58
Висновки	59
Перелік джерел посилань	60
Додатки.....	59

БРМА 25.00.00.000 ПЗ				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
		Корольчук М. П.		
		Поліщук А. О.		
		Гундик С. І.		
		Неймак В. С.		
Розробка широкоформатного 3D-принтера FDM друку			Пояснювальна записка	Лит. Арк. Акрушів 4 62
ХНУ зр. ЕТ-21-1				

ВСТУП

Сучасні тенденції розвитку промисловості, архітектури, дизайну та медицини створюють дедалі вищі вимоги до технологій тривимірного друку. 3-D друк займає провідну позицію серед методів адитивного виробництва завдяки своїй доступності, економічній ефективності та можливості створювати вироби з різноманітних матеріалів. Проте, більшість 3D-принтерів мають обмежені розміри робочої області, що суттєво ускладнює виготовлення крупногабаритних елементів. Це створює потребу у розробці широкоформатних 3D-принтерів, які здатні вирішувати ці завдання, залишаючись доступними за вартістю та простими в експлуатації.

Актуальність розробки широкоформатного 3D-принтера полягає в необхідності адаптації технологій FDM-друку до умов виробництва великих конструктивних елементів. Відсутність готових рішень, які поєднували б великі розміри друку, точність, швидкість роботи та оптимальну вартість, підштовхує до створення інноваційних конструкцій.

Метою даної роботи є розробка широкоформатного 3D-принтера з технологією FDM-друку, який би відповідав сучасним вимогам промислових і побутових користувачів. Основна увага приділяється створенню ефективної конструкції принтера з кінематикою Core XY, забезпеченню стабільності процесу друку на великій площі та оптимізації використання ресурсів.

У ході роботи передбачається виконати аналіз існуючих технічних рішень у галузі 3D-друку, розробити конструкцію принтера та обґрунтувати вибір ключових компонентів і параметрів. Практичне значення проекту полягає в можливості застосування отриманих результатів для створення прототипів широкоформатних 3D-принтерів. Таким чином, виконання цієї роботи сприятиме вдосконаленню технологій FDM-друку та створенню доступних рішень для виготовлення великогабаритних виробів.

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ТЕХНІЧНИХ ДЖЕРЕЛ ЩОДО АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ 3D-ДРУКУ

1.1 Види технологій 3D-друку

Сьогодні у галузі адитивних технологій 3D-друк реалізується різними методами, але основою кожного з них є принцип пошарового створення об'єкта. Найпоширенішими технологіями 3D-друку є:

- моделювання методом пошарового наплавлення (FDM друк);
- селективне лазерне спікання (SLS друк);
- стерелітографія (SLA друк).

В основі FDM (Fused Deposition Modeling) друку лежить наступний принцип: На головку принтера, так званий екструдер, розігрітий до температури плавлення матеріалу, подається спеціальна нитка пластика, і, дотримуючись даних 3D-моделі, шари послідовно наносяться на рухому платформу. Так, шар за шаром, друкується прототип. При необхідності, перед початком друку на віртуальній 3D моделі розміщуються допоміжні конструкції (підтримки), які після закінчення друку можуть бути видалені спецрозчином або вручну [5]. На рисунку 1.1 показано приклад роботи FDM 3D-принтера.

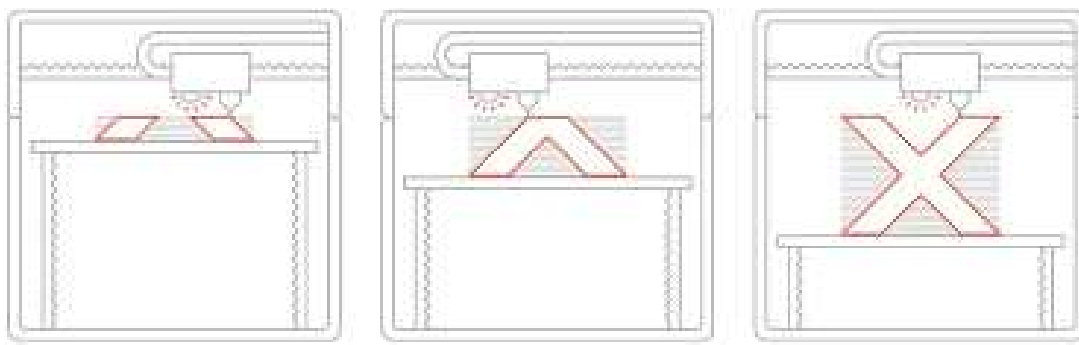


Рисунок 1.1 – Принцип роботи FDM технології

Принцип роботи SLS (Selective Laser Sintering, SLS) друку полягає у тому, що за допомогою лазерної установки і скануючого дзеркала промінь лазера направляє на необхідні ділянки порошку, спікаючи їх разом шар за шаром. Після спікання першого шару механізм додає тонкий шар порошку поверх нього, і процес відбувається заново до повної побудови об'єкта. Тобто, відтворення об'єкта відбувається знизу-вгору, а за рахунок заповнення камери порошком не потрібні додаткові підтримки [6]. Слід зазначити, що технологія SLS друку є менш розповсюдженою у порівнянні з FDM технологією, оскільки дана технологія використовується лише в промисловості через свою дороговартість та складність процесу виготовлення деталей. До переваг SLS технології можна віднести можливість друку шаром висота якого складає від 0.012 до 0.1 мм, що робить дану технологію однією з найбільш точних та дозволяє друкувати деталі малих розмірів з високою точністю. Окрім точності розмірів деталі виготовлені за допомогою даної технології мають високу міцність та надійність, проте як було сказано вище технологія SLS друку є досить дороговартісною саме тому найбільшій популярності використання в побуті набули FDM 3D-принтери. На рисунку 1.2 показано основний принцип роботи SLS 3D-принтера.

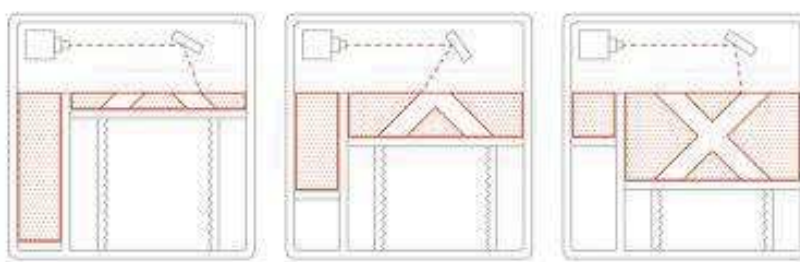


Рисунок 1.2 – Принцип роботи SLS 3D-принтера

SLA (Laser Stereolithography) друк працює з використанням потужного лазера для затвердіння рідкої смоли, яка міститься в резервуарі, щоб створити бажану тривимірну форму Лазер направляє до відповідних координат

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

керованим комп'ютером дзеркалом. Процес повторюється до тих пір, поки вся частина не буде завершена. Смола, що не реагувала з лазером, залишається у ванні й може бути використана повторно. Чим більше або складніше об'єкт для друку, тим більше часу буде потрібно лазеру для заповнення одного шару. Це дозволяє об'єктам досягти максимально можливої міцності й стати більш стабільними. Після завершення полімеризації матеріалу платформа підіймається з резервуара, і надлишок смоли зливається. В кінці процесу модель промивається і поміщається в УФ-піч для остаточного затвердіння [7]. SLA друк також часто використовується в побуті для виготовлення елементів декору або деталей, які не несуть великих навантажень, оскільки кінцеві вироби є досить ламкими у порівнянні з деталями виготовленими за допомогою FDM технології. Однією з особливостей SLA технологіє є те, що принтер необхідно тримати в затемненому приміщенні, оскільки смола може затверднути від попадання на неї сонячних променів. На рисунку 1.3 показано принцип роботи SLA 3D-принтера.

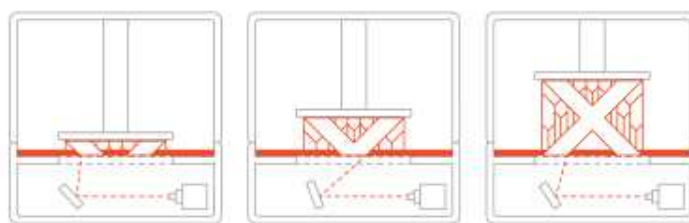


Рисунок 1.3 – Принцип роботи SLA 3D-принтера

Також одним з недоліків друку з використанням фотополімерної смоли є велика витрата матеріалу, оскільки платформа на якій розміщується майбутня деталь розміщується зверху та рухається зверху в низ, то необхідним є використання великої кількості підтримуючих конструкцій, які стають відходами. Проте до переваг даної технології можна віднести досить високу деталізацію виробів та можливість друку деталей з дуже малими габаритними розмірами.

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

1.2 Будова та принцип роботи FDM 3D-принтера

Як було сказано раніше технологія FDM друку ґуртується на пошаровому наплавленні полімерних матеріалів. Основними компонентами 3D-принтера, який працює за FDM технологією є:

- екструдер;
- хотенд;
- робоча поверхня (поле друку);
- плата керування.

В якості матеріалу для здійснення друку за даною технологією використовуються полімери, які мають форму нитки діаметром 1.75 або 2 мм та зберігаються намотаними на котушку. Елементом, який здійснює подачу нитки полімеру є екструдер. За принципом роботи екструдери поділяються на 2 типи: з прямою та з непрямою подачею.

Екструдер з прямою подачею включає в себе кроковий двигун, який забезпечує обертання подаючої шестерні, яка в свою чергу входить в зачеплення з прижимною шестернею. Нитка філаменту вставляється безпосередньо в екструдер потрапляючи між згадані вище шестерні обертання яких забезпечує проштовхування нитки вниз. Даний механізм знаходиться безпосередньо на рухомий каретці. Така подача дозволяє друкувати швидко і точно, відстань подачі пластику мінімальна. Це дозволяє зменшити похибки при друку. Для прямого типу екструдера також можна використовувати гнучкі матеріали. Більшу різноманітність при виборі матеріалів забезпечує більший вибір предметів, які можна роздрукувати. До того ж, у такої системи менше проблем при заміні витратного матеріалу. Але таке пряме з'єднання обумовлює і основні недоліки – вага і габарити екструдера. Крім більш складної конструкції всього пристрою, він вимагає більш тонкого прошивки.

[8]

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Будову екструдера з прямою подачею показано на рисунку 1.4.



Рисунок 1.4 – Будова екструдера з прямою подачею

У непрямого екструдера принцип подачі нитки полімеру однаковий з механізмом прямої подачі, проте вимагає потужнішого крокового двигуна, оскільки у цьому варіанті екструдер відділений від друкуючого механізму, філамент подається по трубці до хотенду [8]. Трубка виготовляється зі спеціального PTFE матеріалу, який є стійким до високих температур. Така подача дозволяє полегшити вагу каретки за рахунок виносу двигуна на раму, проте обмежує роботу з гнучкими матеріалами. Похибка подачі прутка для друку також збільшується [8]. Принцип роботи екструдера з непрямою подачею показано на рисунку 1.5.

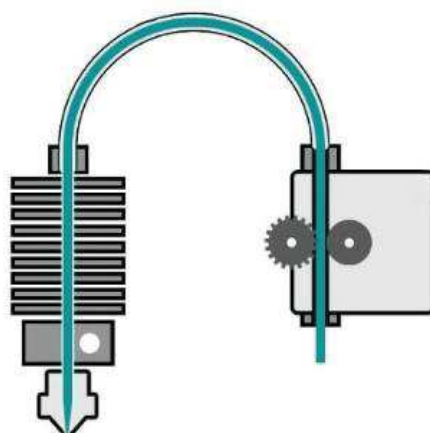


Рисунок 1.5 – Екструдер з непрямою подачею полімерної нитки

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Хотенд – частина конструкції принтера, що використовується для розплавлення пластикової нитки, з якої виготовляється деталь. Він відповідає за якість екструзії, впливає на швидкість подачі розплавленого матеріалу [9].

Хотенд являє собою групу елементів, а саме:

- термобар'єр;
- радіатор;
- сопло;
- нагрівальний блок.

Термобар'єр - це одна з найважливіших частин хотенду. На цю деталь накладається список вимог. В ідеальних умовах плавлення пластику має відбуватися тільки в зоні сопла, решта пластика повинна залишатися твердою, щоб її було простіше проштовхувати. Тому «гаряча зона» у якісних хотендах різко відсікається. Для цього використовуються вставки з алюмінію, тефлону, потужних радіаторів, матеріалів з низьким показником теплопровідності [9].

Сопло – це частина хотенду 3D-принтера безпосередньо через яку відбувається вдавнення розплавленої нитки полімеру. Сопла виготовляють з латуні або сталі, сьогодні набирають популярності закалені сопла, які дозволяють здійснювати друк металонаповненими та вугленаповненими пластиками. Ряд діаметрів сопел включає в себе: 1мм, 0.8мм, 0.6мм, 0.4мм, 0.2мм. Чим менший діаметр сопла, тим більш високу деталізацію майбутньої деталі можна отримати.

Блок нагріву містить нагрівальний елемент, термістор, який відповідає за контроль температури. Нагрівальні блоки можуть мати різну потужність, але в будь-якому випадку її повинно вистачати для якісного, рівномірного та швидкого прогрівання сопла. Найчастіше досить 40-60 Вт [9].

Радіатор 3D-принтера може мати форму круглої або прямокутної трубки, з ребрами. Він використовується для розсіювання тепла від екструдера, яке генерується нагрівальним блоком. Радіатор забезпечує відвід тепла від компонентів екструдера.

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На рисунку 1.6 показано будову хотенду 3D-принтера.

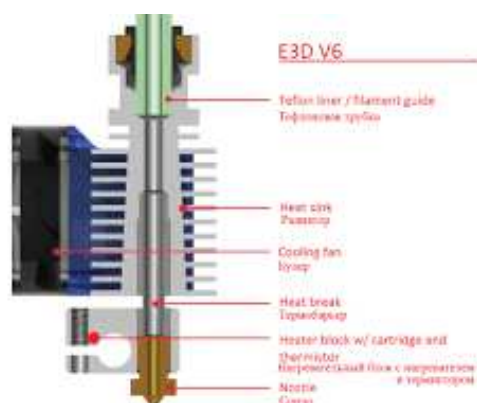


Рисунок 1.6 – Будова хотенду FDM 3D-принтера

Робоча поверхня 3D-принтера, тобто поверхня на якій виконується друк може бути різною. Раніше такі поверхні виготовляли зі скла оскільки скло має рівну поверхню да дозволяє покласти рівний перший шар майбутньої моделі.



Рисунок 1.7 – Процес установки магнітного столу принтера

Станом на сьогодні робочі поверхні оснащені нагрівачами та термодатчиками, оскільки деякі види полімерів вимагають вищої температури столу для кращої адгезії першого шару. Також робочі столи оснащуються магнітними накладками, які можна зняти для спрощення відділення деталей від столу.

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Отже послідовність роботи FDM 3D-принтера наступна: котушка з намотаною полімерною ниткою поміщається на спеціальний тримач, кінець даної нитки просовується через екструдер. Нитка філаменту проштовхується шестернями екструдера та потрапляє у хотенд, де проходячи через термобар'єр та плавиться за допомогою нагрівального елемента. Після чого розплавлений пластик проходить через сопло та наноситься тонким шаром на майбутню деталь. Рух елементів принтера вздовж осей X Y Z на задану відстань здійснюється за допомогою крокових двигунів. На рисунку 1.8 показано загальну конструкцію FDM 3D-принтера.

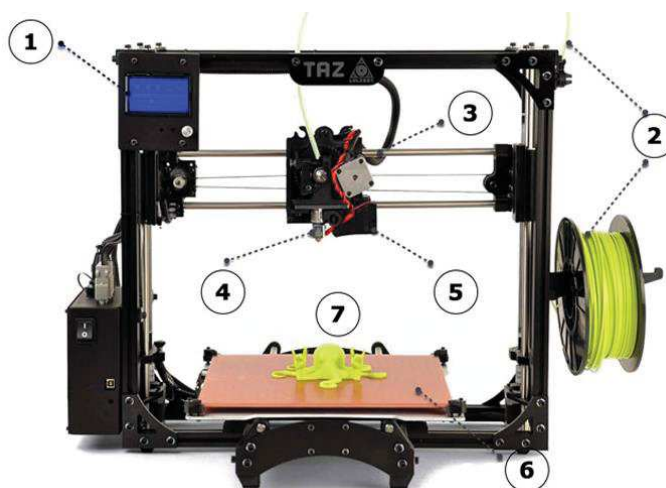


Рисунок 1.8 – Конструкція FDM 3D-принтера

1 – плата керування; 2 – філамент; 3 – екструдер; 4 – хотенд; 5 – індукційний датчик приближення; 6 – робоча поверхня; 7 – деталь

Програмування роботи принтера відбувається за допомогою спеціального програмного забезпечення – Slicer. За допомогою даної програми генерується g-code в якому прописується необхідна кількість кроків для руху кожного з крокових двигунів для кожного шару моделі відповідно до форми моделі та наявності чи відсутності підтримуючого матеріалу. Також за допомогою даного програмного забезпечення регулюється температура нагрівального елемента хотенду та температура робочої поверхні принтера.

Згадане вище програмне забезпечення може мати різні конфігурації та можливості. Основними елементами інтерфейсу такої програми є:

- рядок меню програми: на цій панелі ви знайдете інструменти, що стосуються основних функцій програми, таких як створення, відкриття або збереження файлів, а також зміна налаштувань чи переваг [11];
- панель вибору принтера: тут можна побачити існуючі профілі машини і легко перемикається між ними [11];
- панель опцій друку: тут фактично відбувається нарізка. У цьому меню ви вибираєте такі параметри, як висота шару, кількість ліній оболонки, відсоток заповнення, опори та багато іншого [11];
- етапи: тут можна перемикається між рівнями нарізки: підготовка, попередній перегляд і відстеження. На етапі "Монітор" ваш принтер повинен бути підключений до ПК під час операції друку [11]. На рисунку 1.9 показано вигляд інтерфейсу програми Slicer.

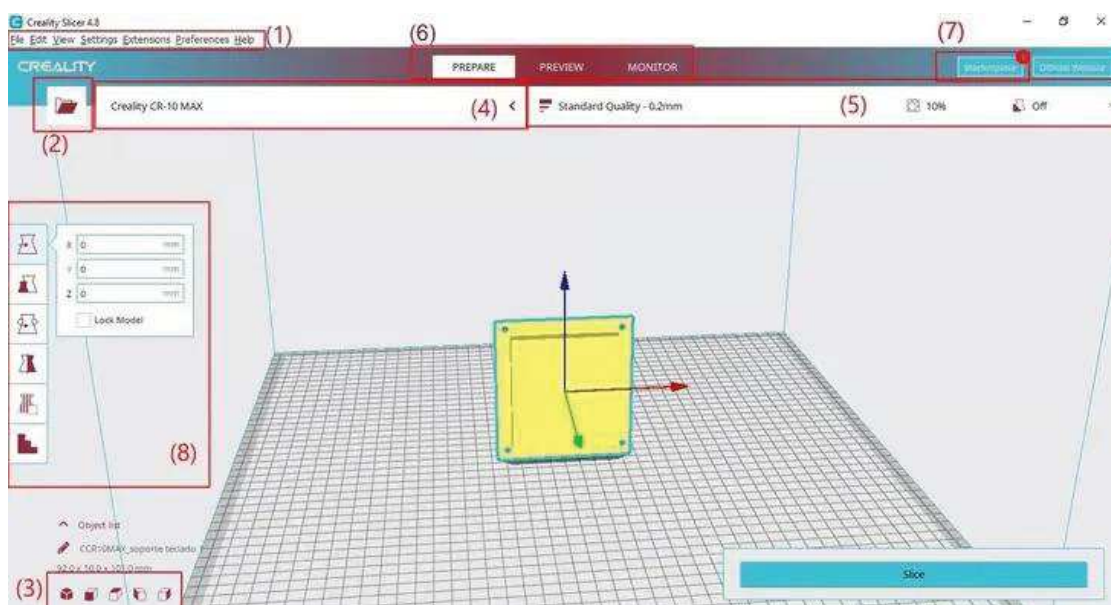


Рисунок 1.9 – Вигляд інтерфейсу програми Slicer

Програма є відкритим програмним забезпеченням, що робить її доступною для широкого кола користувачів та розробників.

1.3 Види конструкцій FDM 3D-принтерів

Принтери з рухомим столом одна з найбільш поширених схем кінематики. Екструдер переміщується вздовж осі X та Z, а стіл рухається вздовж осі Y. Також таку схему часто називають Prusa, по імені розробника одного з перших подібних принтерів [10]. Перевагами такої кінематичної системи є:

- простота конструкції;
- повний доступ до всіх вузлів;
- невисока вартість обслуговування.

Недоліки такої системи наступні:

- низька жорсткість конструкції, що призводить до вібрацій під час роботи та зниження якості друку;
- складність калібрування тому, щоб забезпечити високу якість виготовлених виробів, попри наявну недостатню жорсткість конструкції, необхідно здійснювати надзвичайно точне та ретельне калібрування всіх систем.- присутність небажаної вентиляції робочої зони, що погіршує адгезію першого шару деталі з поверхнею робочої поверхні.

На рисунку 1.10 показано принцип роботи такої кінематичної системи.

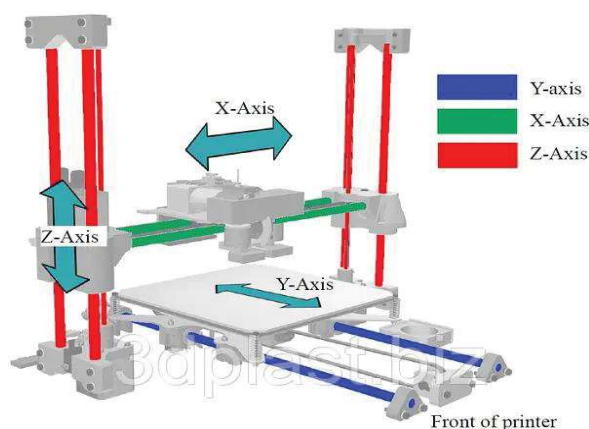


Рисунок 1.10 – Принцип роботи кінематики принтера з рухомим
СТОЛОМ

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

CoreXY друга по популярності кінематична система, що використовується в 3D-принтерах. Її особливість полягає у тому, що обидві осі X та Y переміщуються незалежно одна від одної, забезпечуючи високу точність та швидкість друку. Система Core XY використовує два крокових двигуни, які керують рухом двох осей. Ці двигуни з'єднані з екструдером за допомогою ременів або зубчастих передач. Коли один з двигунів рухається вперед, екструдер переміщується в одному напрямку по осі X. Коли другий двигун рухається, екструдер переміщується в іншому напрямку. Комбінуючи рухи обох двигунів, можна досягти будь-якого положення екструдера на площині XY. При цьому, рухи двигунів синхронізуються за допомогою електроніки принтера. Вісь Z, як правило, є рухомою і відповідає за підняття та опускання екструдера для створення об'ємної моделі. Перевагами такої конструкції є:

- висока точність роботи;
- можливість роботи на високих швидкостях;
- надійність та жорсткість конструкції.

До недоліків можна віднести високу вартість та складність калібрування конструкції. На рисунку 1.11 показано принцип роботи кінематики Core XY.

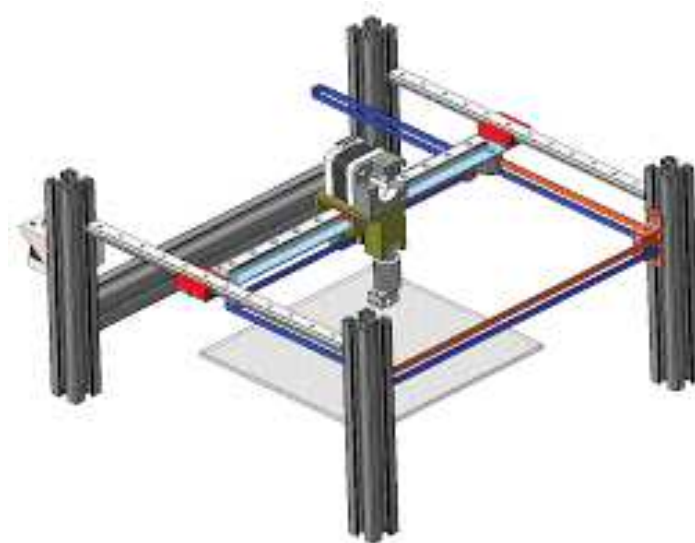


Рисунок 1.11 – Кінематична система Core XY

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Кінематична система дельта 3D-принтера вважається відносно новою в сфері адитивних технологій з використанням 3D-друку. Тут по всіх осях рухається закріплений на трьох точках екструдер, а стіл зафіксований нерухомо [10]. На рисунку 1.12 показано принцип роботи кінематичної системи дельта 3D-принтера.

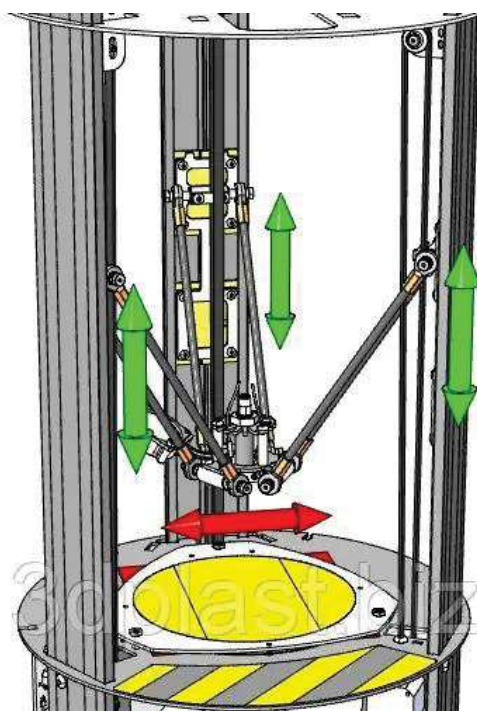


Рисунок 1.12 – Кінематична система дельта 3D-принтера

Перевагами такої конструкції є: висока швидкість друку, оскільки екструдер переміщується вздовж трьох осей; можливість друку високих деталей через запас розміру осі Z; відсутність виступаючих деталей, що дозволяє легко встановлювати закриті корпуси на дану конструкцію; низькі енерговитрати через використання меншої кількості крокових двигунів.

До недоліків можна віднести: менша точність роботи через присутність похибки в переміщенні; висока ціна та складність обслуговування в разі виходу з ладу; необхідність використання більш складної електроніки, що ускладнює процес експлуатації.

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

1.4 Матеріали, які використовують для друку за допомогою FDM 3D-принтерів

Технологія FDM-друку дозволяє використовувати різноманітні матеріали з різними властивостями відповідно до вимог поставлених перед майбутньою деталлю. У таблиці 1.1 наведено основні види полімерних ниток та температури їх плавлення.

Таблиця 1.1 – Основні види філаментів та їх робочі температури

Тип філаменту	Температура екструзії (°C)	Температура платформи (°C)
PLA (Полілактид)	180–220 °C	20–60 °C
ABS (Акрилонітрил-бутадієн-стирол)	220–250 °C	80–110 °C
PETG (Поліетилентерефталат гліколь)	220–250 °C	70–90 °C
TPU (Термопластичний поліуретан)	210–230 °C	40–60 °C
Нейлон	240–260 °C	70–100 °C
PC (Полікарбонат)	260–300 °C	90–120 °C

PLA пластик є екологічним та біорозкладним. Даний матеріал легкий до друку і часто використовується новачками у 3D-друці. Шари деталі надруковані з такого матеріалу добре спікаються, PLA матеріал є досить

міцним, проте нетерmostійким та піддається швидкому старінню під ультрафіолетовим випроміненням.

ABS пластик є досить міцним і в той же час погано піддається пластичним деформаціям. Даний вид полімеру вимагає високої температури сопла для розплавлення та високу температуру робочої поверхні, оскільки він має погані адгезивні властивості. Друк ABS пластиком можливий лише на принтерах з закритим типом корпусу.

PETG один з найпопулярніших внів полімерів на даний момент. Деталі виготовлені даного матеріалу мають хорошу міцність, гнучкість та стійкість до вологи. Даний полімерний матеріал є екологічно чистим та може використовуватись як для виготовлення технічних деталей, такі для елементів використаних у харчовій промисловості. PETG матеріал є легшим в друці за ABS.

TPU пластик має специфічні властивості, тому використовується рідше у порівнянні з іншими полімерами. Він є гнучким, еластичним, стійким до ударів та зносу, деталі виготовлені з такого матеріалу можуть повертати свою початкову форму після деформації. Проте даний вид пластику вимагає особливих умов друку та може бути використаний у роботі не на всіх типах FDM принтерів.

Нейлон має дуже високу міцність та стійкість до тертя, найчастіше використовується для виготовлення механічних частин, таких, як підшипники, шестерні тощо. З недоліків слід виділити дуже важкі умови друку з використанням лише закритого корпусу принтера та високих температур столу та сопла та можливість друку лише з використанням сушарки для філаменту, оскільки даний полімер дуже легко вбирає вологу, що ускладнює процес друку.

PC пластик застосовується для виготовлення інженерних деталей, корпусів та пар тертя через свою міцність та терmostійкість, проте вимагає друку при температурі до 300°C.

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновок до першого розділу

У першому розділі було здійснено огляд та аналіз технічних джерел щодо адитивних технологій 3D-друку, зокрема такі технології, як: FDM, SLS, SLA та наведено їх переваги та недоліки. Було визначено, що FDM-друку є одним із найбільш популярних і доступних на сьогоднішній день.

Було проведено огляд технологічних рішень щодо кінематичних систем принтерів таких, як: з рухомим толом, Core XY, дельта принтер. Виходячи з результатів аналізу наукових і технічних джерел зроблено висновок, що одним із найбільш перспективних підходів до створення широкоформатного FDM-принтера є використання кінематики Core XY. Дане конструктивне рішення дозволяє досягти високої точності та швидкості друку, зберігаючи стабільність роботи навіть на великих площах друку. Окрім цього, актуальними є розробка інноваційних систем управління тепловим середовищем і вибір оптимальних матеріалів для друку, що забезпечують міцність та якість виробів. Таким чином, виконаний аналіз підтвердив актуальність розробки широкоформатного 3D-принтера FDM-друку та сформував основи для подальшої роботи в напрямі створення його технічної концепції.

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. РОЗРОБКА ШИРОКОФОРМАТНОГО FDM 3D-ПРИНТЕРА

2.1 Розробка структурної схеми роботи 3D-принтера

Згідно аналізу існуючих технологічних рішень було розроблено структурну схему роботи 3D-принтера, дана схема зображена на рисунку 2.1 (аркуш [БРМА25.00.00.000 С1]).

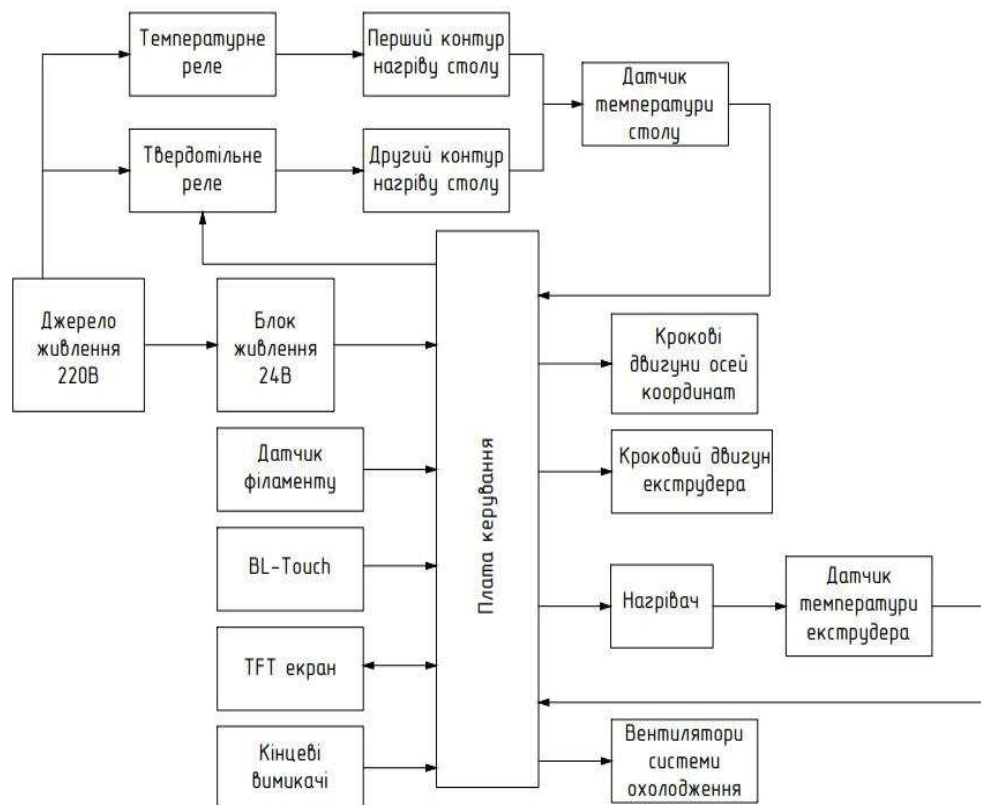


Рисунок 2.1 – Структурна схема роботи 3D-принтера

Основним елементом принтера є плата керування, яка забезпечує обробку інформації та керування відповідними компонентами 3D-принтера. Підключення плати до джерела живлення відбувається через блок живлення 220/24 В. У даному випадку використано систему з номінальною напругою роботи саме 24 В через те, що при такій напрузі робочі елементи будуть нести менше навантаження через нижчий струм.

З блока живлення напруга подається на ланцюги живлення плати, а саме ланцюг живлення двигунів та загальний ланцюг живлення. До плати керування під'єднуються такі компоненти, як:

- двигуни, що забезпечують рух друкуючої головки повздовж трьох осей координат, а також роботу екструдера;
- датчик філаменту, який подає відповідний сигнал на плату керування, який перериває процес друку при відсутності нитки філаменту;
- VL-Touch, елемент, який забезпечує побудову карти нерівностей робочої поверхні для ідеального друку першого шару моделі;
- кінцеві вимикачі, які подаючи сигнал на плату керування забезпечують правильне позиціонування початкової точки друкуючої головки;
- вентилятори, які керуються сигналами плати та відповідно до задано програми роботи забезпечують охолодження крокових двигунів та відповідного шару моделі безпосередньо під час роботи принтера;
- нагрівач екструдера, який керується платою керування та забезпечує нагрів хотенду до температури вказаної в програмі роботи відповідно до матеріалу з якого виготовляється деталь.

Безпосередньо до джерела живлення під'єднується контур нагріву робочої поверхні, оскільки через площу, яку необхідно прогріти потужності плати не вистачає. Процес нагріву робочої поверхні розділено між двома контурами для зменшення використовуваної потужності. Робота першого контуру регулюється за допомогою температурного реле, тоді, як робота другого контуру регулюється за допомогою твердотільного реле. Одразу після початку нагріву працюють обидва контури нагріву для швидкого набору необхідної температури. При досягненні встановленої температури контур, що керується реле температури вимикається, температура підтримується за допомогою другого контуру нагріву. Процес нагріву реалізовано таким чином через відсутність механічних складових у твердотільному реле та його можливість витримати велику кількість переключень.

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Робоча поверхня принтера є скляною, оскільки скло має меншу кількість нерівностей порівняно з металевою пластиною. Недоліком такої поверхні є гірша адгезія першого шару відносно металевої текстурованої пластини, проте даний недолік вирішується шляхом нанесення спеціального розчину адгезиву.

Застосовані у даному 3D-принтері крокові двигуни є гібридними. У гібридного двигуна ротор розділений на дві частини, між якими розташований циліндричний постійний магніт. Зубці однієї половини ротора є північними полюсами, а зубці іншої половини – південними [12].

Датчик філаменту є механічним. Принцип його роботи засновано на фізичному контакті з ниткою філаменту. Даний датчик складається з важеля і ролика, який задає напрямок руху нитки полімеру, при відсутності нитки філаменту важіль замикає контакти та процес друку переривається. Датчик філаменту спрацьовує як при обриві нитки, так і при друку, який потребує більше ніж 1 котушки філаменту.

В даному принтері використано датчик BL-Touch для створення карти нерівностей робочої поверхні оскільки використання індукційного датчика приближення є неможливим. Індукційний датчик приближення може бути використаний лише в парі з текстурованою металевою поверхнею, тоді як поверхня даного принтера є скляною використання датчика BL-Touch є оптимальним рішенням.

Кінцевий вимикач включає в себе корпус, рухомий важіль або штовхач, і контакти, коли рухома частина механізму досягає кінцевої точки свого руху, вона натискає на важіль або штовхач кінцевого вимикача, Цей натиск призводить до замикання або розмикання електричних контактів всередині вимикача. Кінцеві вимикачі використовуються для правильного позиціонування друкуючої головки на нульовій точці координат, що забезпечує подальшу точність роботи та відповідність координатам заданим в програмному забезпеченні.

2.2 Вибір кінематичної системи принтера та розробка кінематичної схеми

Відповідно до інформації наведеної у першому розділі існують такі кінематичні системи 3D-принтерів, як:

- система з рухомим столом;
- core XY;
- дельта принтер.

Провівши аналіз технологічних рішень було прийнято рішення застосувати кінематичну систему Core XY для розроблюваного 3D-принтера. Система з рухомим столом не може бути застосована через велику площу друку, відповідно і велику вагу столу, що при друці визиватиме велику його інерційність під час руху. Даний недолік матиме великий вплив на максимальну швидкість друку та на якість кінцевого виробу.

Кінематика дельта принтера є досить складною як при роботі, так і при виготовленні. Така кінематична система призначена для друку високих деталей при цьому проща робочої поверхні не може бути великою, що не вирішує проблему друку та прототипування великогабаритних деталей.

Вибрана кінематика Core XY є найкращим рішенням у даному випадку через свою простоту конструкції, легкість в експлуатації та можливість підлаштування такої системи під різні габаритні розміри робочої поверхні. Саме така кінематика дозволить забезпечити точність та високу швидкість друку при великих габаритах робочої області принтера. Модульність такої кінематичної системи дозволить легко внести зміни відповідно до потреб користувача. Також кінематика Core XY зможе забезпечити максимальну жорсткість конструкції, що зменшить інерційність під час руху до мінімальних значень та виключить можливість перекосу під час діагональних рухів, що є важливими чинниками при розробці принтера з великою площею робочої поверхні.

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Особливістю кінематики розроблюваного принтера є використання 8 крокових двигунів. Для реалізації переміщення осі X та осі Y використовується по 2 крокових двигуна. Переміщення по осі Z відбувається за допомогою гвинтової передачі при цьому робоча поверхня залишається нерухомою, а рух здійснює сама друкуюча головка. Такий спосіб застосування кінематики Core XY обумовлюється великими габаритами та вагою столу. Кінематична схема принтера наведена на рисунку 2.2 (аркуш [БРМА25.00.00.000 К3])

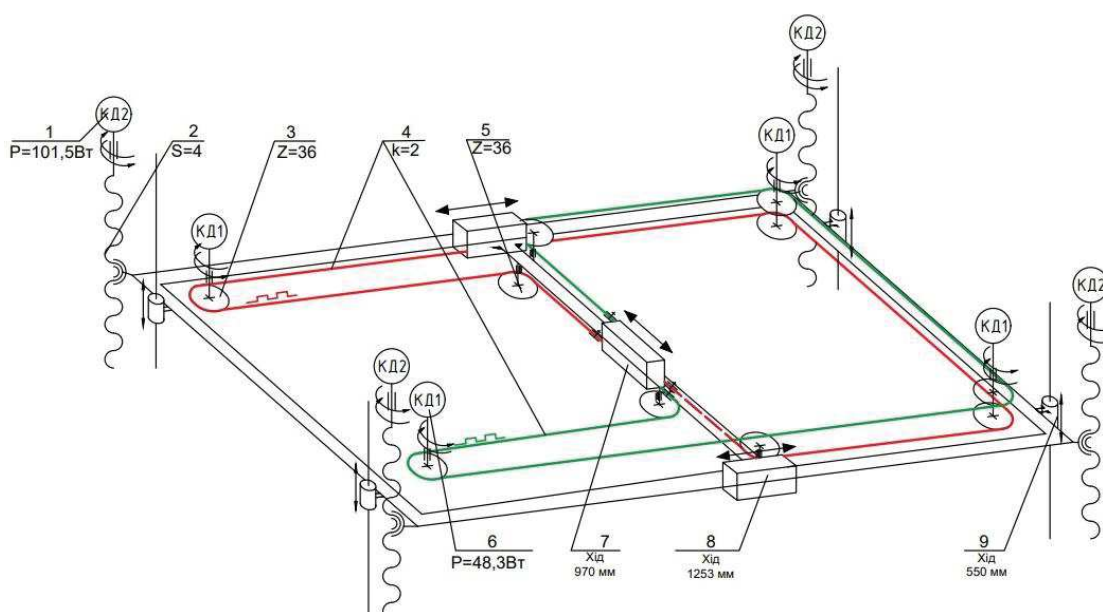


Рисунок 2.2 – Кінематична схема руху 3D-принтера 1 – крокові двигуни осі Z; 2 – гвинт ; 3 – шків крокового двигуна; 4 – пас; 5 – натяжні ролики; 6 – Крокові двигуни осей X Y; 7 – Повзун осі Y; 8 – повзун осі X; 9 – направляючий вал

На даній кінематичній схемі зображено принцип руху друкуючої головки. Переміщення вздовж осі X відбувається за допомогою двох повзунів, які рухаються вздовж направляючих планок. Рух вздовж осі Y реалізується за допомогою одного повзуна, який також здійснює прямолінійний рух вздовж направляючої планки.

Повзуни приводяться в рух за допомогою пласкозубої ремінної передачі. Двигуни з'єднані з повзунами за допомогою ременів. Коли один двигун обертається, він тягне ремінь, що рухає платформу в одному напрямку. Одночасно інший двигун на тій же осі обертається в протилежному напрямку, натягуючи ремінь і стабілізуючи рух. Завдяки синхронній роботі всіх чотирьох двигунів друкуюча головка може рухатися по діагоналі з високою швидкістю та точністю. Оскільки площа друку є великою було прийнято рішення застосувати 2 приводних ремені, що спрощує процес натяжки ременів та збільшує загальну точність позиціонування друкуючої головки.

Принцип руху осі Z запозичено з технічних рішень прийнятих у 3D-принтері Voron V2.4 принцип приводу осі в рух наведено на рисунку 2.3

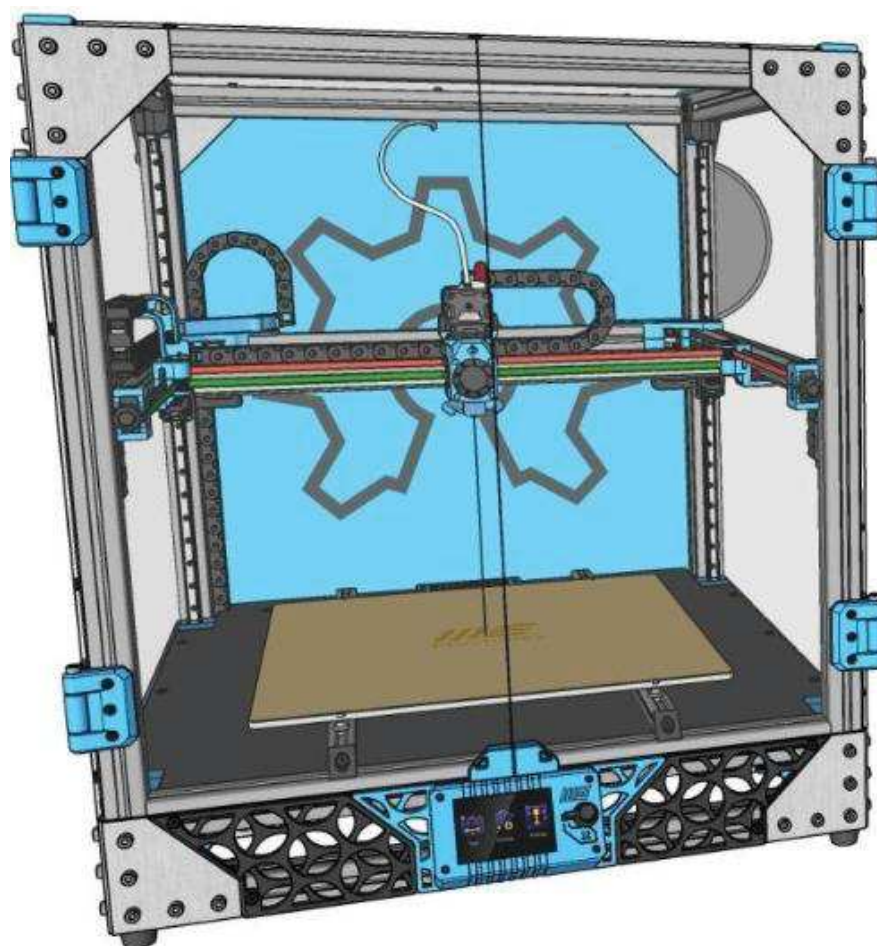


Рисунок 2.3 – Кінематична система принтера Voron V2.4

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Арк.

26

Як видно на рисунку робоча поверхня є нерухомою, а переміщення по осі Z здійснюється за допомогою роликів та повзунів. Дане рішення адаптовано до великогабаритного 3D-принтера з великою площею друку шляхом заміни згаданої вище передачі на гвинтову передачу. Конструкція, що забезпечує рух друкуючої головки вздовж осі Z наведена на рисунку 2.4



Рисунок 2.4 – Конструкція, що забезпечує рух друкуючої головки вздовж осі Z

Як показано на рисунку основним елементом є гвинтова передача, що з'єднується з профілем порталу. Для забезпечення більш плавного і точного руху використано направляючий профіль по якому рухається підшипник ковзання. Для спрощення та здешевлення конструкції пропонується використати направляючий вал замість профілю, оскільки використання профілю не зможе суттєво покращити роботу принтера. Таке рішення дозволить переміщувати друкуючу головку по осі Z з більшою швидкістю, що значно зекономить час на виготовлення великогабаритних деталей.

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.3 Розробка електричної принципової схеми принтера

На основі проведеного аналізу технічних джерел щодо технологій 3D-друку та розробленої кінематичної схеми принтера було розроблено електричну принципову схему наведену на рисунку 2.5 (аркуш [БРМА25.00.00.000 К3])

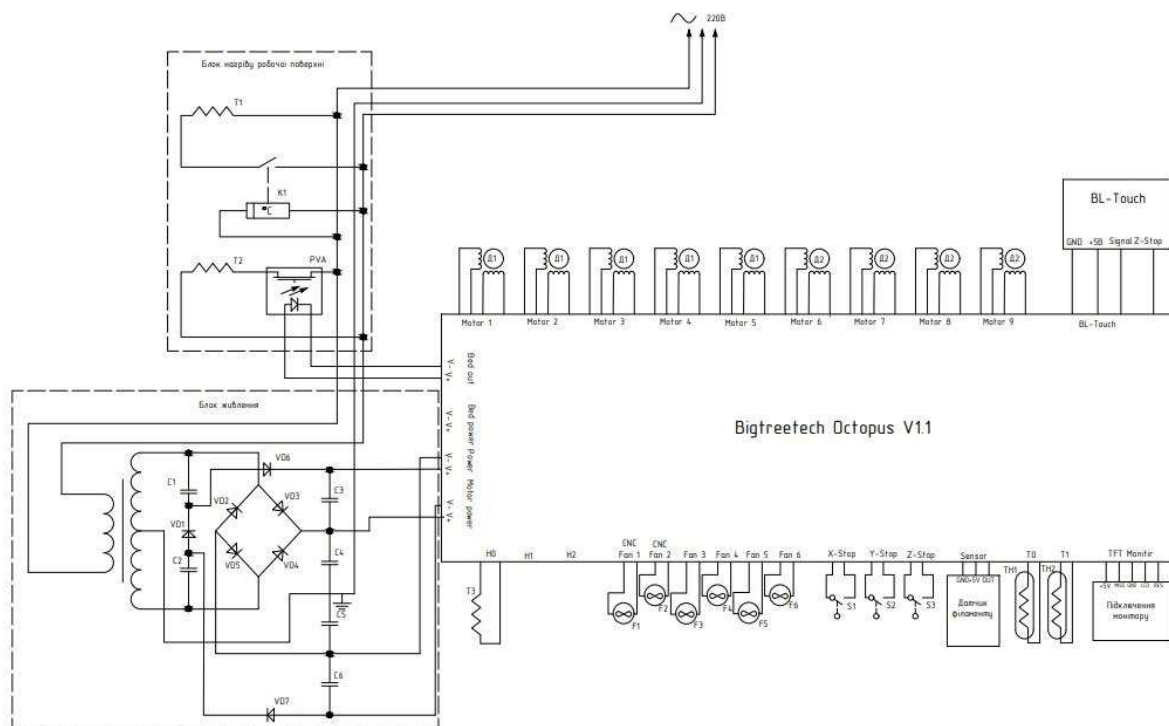


Рисунок 2.5 – Електрична принципова схема 3D-принтера

Напруга мережі подається на блок живлення LRS-600N2-24 з наступними технічними характеристиками:

- вхідна напруга: 220В;
- вихідна напруга: 24В;
- потужність: 600 Вт;
- вихідний струм: 25 А;
- споживана потужність без навантаження: 0,75 Вт;
- ступінь вологозахисту: IP20.

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

З блоку живлення напруга подається на два незалежні контури живлення плати керування, а саме на основний контур живлення та на незалежний контур живлення двигунів.

Основним елементом принтера є плата керування. В якості плати керування було обрано плату Bigtreetech Octopus V1.1. Основними особливостями даної плати є :

- 32-бітний мікроконтролер на 180 МГц;
- підтримка прошивок Klipper та Marlin;
- підтримка до 4 хотендів;
- вбудований DCDC для подачі живлення 12 В (4 А), 5 В (8 А);
- подвійний вихід двигуна для осі Z;
- підтримка BLTouch;
- підтримка датчика філаменту.

ВТТ Octopus, як високопродуктивна плата, має три незалежні входи живлення: джерело живлення для електроніки, незалежне джерело живлення для двигунів та джерело живлення для підігріву робочої поверхні. Також плата оснащена драйверами крокових двигунів та має змогу керувати дев'ятьма двигунами одночасно, що дозволяє оснащити вісь X та Y двома кроковими двигунами та вісь Z чотирма двигунами, таке рішення дозволяє зменшити довжину робочої ланки пасової передачі та швидше переміщати друкуючу головку вздовж осей координат.

Для забезпечення охолодження принтер оснащений осьовими та відцентровими вентиляторами з номінальною напругою роботи 24В. Частота обертання відцентрових вентиляторів F1 та F2 може регулюватись платою керування, дані вентилятори використовуються для охолодження шару друкованої моделі. Частота обертання таких вентиляторів вибирається відповідно до матеріалу яким виконується друк. Осьові вентилятори F1 – F6 використовуються для охолодження крокових двигунів під час роботи, їхня частота обертання є сталою. Дані вентилятори розпочинають свою роботу

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

одразу після подачі живлення на плату керування. На рисунку 2.6 показано використані вентилятори.



Рисунок 2.5 – Осьовий та відцентровий вентилятор використані у 3D-принтері

Для нагріву хотенду та забезпечення розплавлення нитки філаменту використано нагрівальний елемент ТЗ. Нагрівальний елемент призначений для встановлення в хотенд екструдера 3D принтера. Для FDM 3д принтерів зазвичай використовують патронний тип електронагрівачів [13]. Робоча напруга даного нагрівача становить 24 В. Така напруга дозволяє знизити навантаження на даний елемент через зменшення робочого значення струму, без зміни значення робочої напруги елемента. Даний нагрівач трубчатого типу складається з зовнішньої оболонки, термопровідного прошарку, шару оксиду магнію, ядра, яке містить резистивні компоненти за допомогою яких здійснюється нагрів, дані нагрівачі кріпляться до корпусу за допомогою графітових трубок для високого значення тепловіддачі. Задня частина корпусу герметизується за допомогою керамічної заглушки для запобігання розширення матеріалів під час нагріву, оскільки нагрівач не повинен деформувати хотенд під час роботи та з метою збільшення ефективності роботи нагрівача. Будову нагрівача показано на рисунку 2.6.

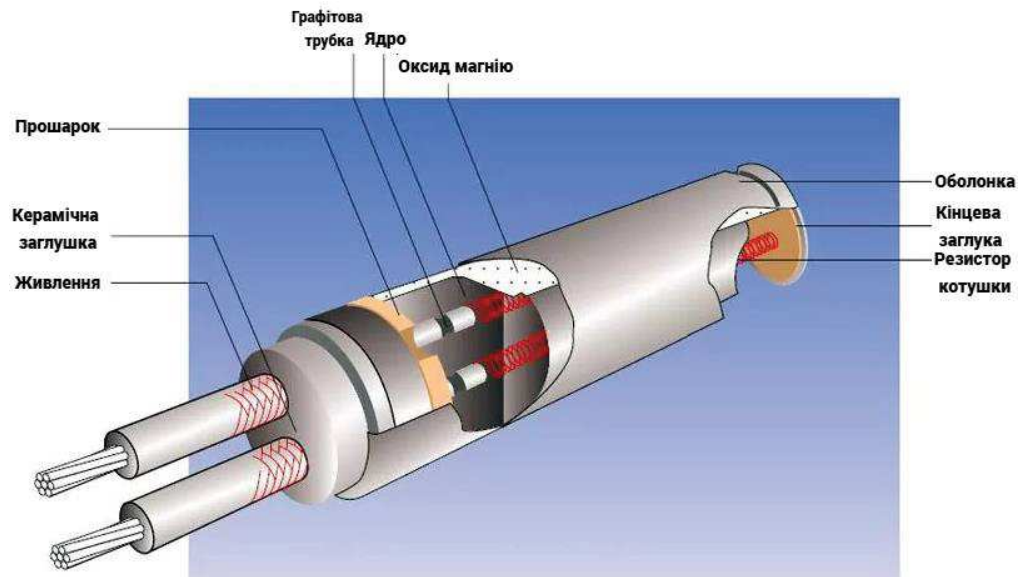


Рисунок 2.6 – Будова нагрівального елемента

З плати керування напруга також подається на датчик філаменту. Без даних наданих цим датчиком не можливий початок процесу друку. Даний датчик ж механічним та призначений для зупинки друку при відсутності нитки філаменту, або при її обриві. Будову датчика філаменту показано на рисунку 2.7.

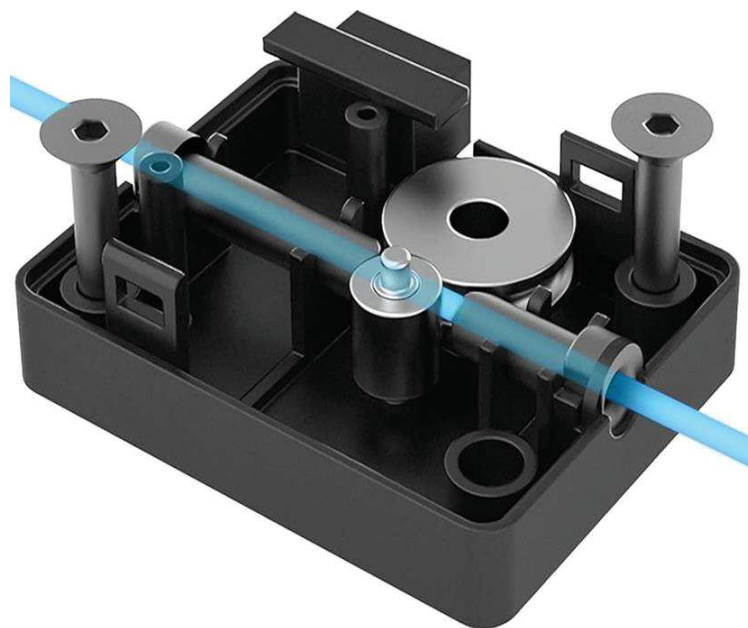


Рисунок 2.7 – Будова датчика філаменту

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Арк.

31

Оскільки площа деталей, які друкуватимуться на розроблюваному принтері буде досить великою необхідним є забезпечення хорошої адгезії першого шару моделі. Для цього до плати керування під'єднується датчик BL-Touch. Він являє собою автоматичний датчик вирівнювання поверхні для 3D-принтерів, який використовується для точного визначення положення поверхні друку. Датчик складається з корпусу, зонда, соленоїда та датчика холла. Під час калібрування принтер опускає зонд до поверхні друку, коли зонд торкається стола, датчик холла реєструє зміни магнітного поля, викликані контактом, датчик передає сигнал до плати керування, що вказує на досягнення поверхні. Датчик BL-Touch показано на рисунку 2.8.



Рисунок 2.8 – Датчик BL-Touch

Нагрів робочої поверхні розроблюваного 3D-принтера реалізовано за допомогою двох незалежних контурів нагріву T1 та T2. Оскільки потужність даних нагрівальних контурів є досить великою через площу, яку необхідно прогріти до встановленої температури відповідно до матеріалу яким виконується друк, то живлення на нагрівачу поверхню подається безпосередньо з мережі 220 В. Обидва контури виготовлені з ніхромової нитки, яка кріпиться до корпусу столу за допомогою пружин, які компенсують розширення матеріалу під час нагріву, що забезпечує рівномірний нагрів по всій поверхні.

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

Одразу після під'єднання столу до мережі вмикаються обидва контури нагріву для забезпечення максимально швидкого набору необхідної температури. Після досягнення необхідної температури контур нагріву Т1 відмикається від мережі за допомогою за допомогою реле температури. Встановлена температура підтримується за допомогою контура Т2, який керується за допомогою твердотільного реле.



Рисунок 2.9 – Твердотільне реле

Твердотільне реле – це електронний пристрій, який здійснює перемикання електричних ланцюгів без використання механічних контактів, на відміну від електромеханічних реле. Воно використовує напівпровідникові компоненти, такі як тиристори, симістори або транзистори, щоб контролювати струм. Це забезпечує довший термін служби, швидкість перемикання і високу надійність, особливо при використанні в середовищах з високою частотою перемикань. Принцип його роботи в наступному: При подачі керуючої напруги на вхід реле, світлодіод в оптопарі починає випромінювати світло, світло від світлодіода потрапляє на фотодетектор, який активує силовий напівпровідниковий елемент, напівпровідниковий елемент починає пропускати струм через вихідний ланцюг, замикаючи ланцюг і дозволяючи струму протікати до навантаження. Недоліком такого реле є нагрів під час роботи та необхідність використання додаткового радіатора охолодження.

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

2.4 Розробка моделі 3D-принтера

На основі розроблених кінематичної та електричної схем було розроблено 3D-модель принтера, що дозволило провести цифрове прототипування, розробити модель корпусу та проаналізувати основні переваги та недоліки розроблюваного принтера. 3D-модель створена у CAD програмі SolidWorks показано на рисунку 2.10



Рисунок 2.10 – Модель принтера розроблена у CAD програмі

При розробці даної моделі було враховано усі перераховані вище особливості розроблюваного принтера. Розміри робочої поверхні склали 1250×970 мм. Максимальна висота друку склала 550 мм.

Враховуючи обрану площу робочої області було розроблено корпус принтера, який складається з станочного профілю з параметрами 30×60 мм. Відрізки профілю скріпляються між собою зо допомогою накладок трикутної форми. Верхня частина рами оснащена спеціальною платформою для установки крокових двигунів, направляючих валів та гвинтів, які забезпечують рух друкуючої головки по осі Z.

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

На рисунку 2.11 показано корпус принтера

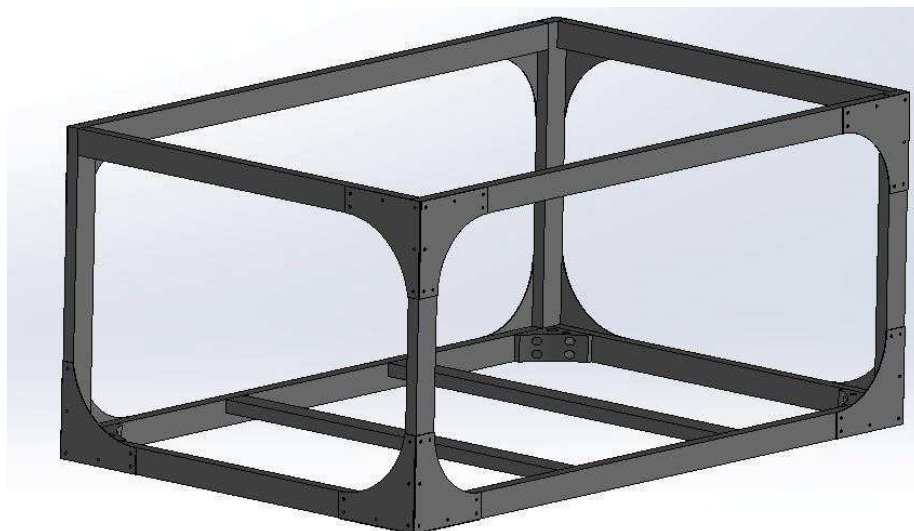


Рисунок 2.11 – Рама розроблюваного 3D-принтера

Друкуюча головка була обрана з принтера німецького виробництва RatRig. Даний екструдер є високопродуктивним через використання планетарних шестерень, що дозволяє проштовхувати більшу кількість нитки через сопло принтера. На рисунку 2.12 показано будову планетарного екструдера.



Рисунок 2.12 – Планетарний екструдер

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Арк.

35

Рух друкуючої головки вздовж осей X та Y відбувається на направляючих рейках до яких приєднано повзуни. Направляючі рейки кріпляться до профілю з параметрами 30×30 мм, який за допомогою гвинтового з'єднання забезпечує переміщення друкуючої головки вздовж осі Z. На рисунку 2.13 показано модель порталу розроблюваного 3D-принтера.



Рисунок 2.13 – Портал 3D-принтера

Кріплення двигунів, які приводять в рух ремінну передачу виконані за допомогою технології 3D-друку для здешевлення конструкції для підсилення даного вузла використано металеву проставку між кроковим двигуном та пластмасовою частиною. Вузол кріплення поперечного профілю також виконано за допомогою 3D-друку. Кріплення друкуючої головки виконана за допомогою повзуна та направляючої рейки, проте оскільки друкуюча головка має невеликі габарити та вагу було прийнято рішення використати профіль з параметрами 20×20 мм для можливості більш швидкого руху екструдера вздовж осі Y. Ремінь що забезпечує рух повзунів по направляючих рейках розміщено у пазах профілю порталу. Таке рішення захищає ремінь від забруднення та забезпечує більш чітку та стабільну роботу принтера. Для забезпечення більш точної роботи принтера приводний пас розбито на дві частини для зменшення довжини робочої ланки пасу.

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

2.5 Виготовлення та тестування прототипу принтера

На основі розробленої моделі та описаних вище етапів було створено прототип широкоформатного 3D-принтера FDM друку. Загальний вигляд прототипу показано на рисунку 2.15.



Рисунок 2.15 – Загальний вигляд прототипу принтера

Для виготовлення прототипу принтера було реалізовано такі етапи роботи як:

1) конструювання рами принтера. Під час роботи над даним етапом було заготовлено необхідну кількість станочного профілю з відповідними параметрами та проведено збірку корпусу з монтажем 3д надрукованих деталей, які забезпечують кріплення механізму руху осі Z;

2) попередня збірка елементів кінематичної системи. Даний етап включає в себе збірку в єдиний механізм таких елементів кінематичної

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

системи, як станочний та направляючий профілі, екструдер, крокові двигуни осей координат та повзунів;

3) монтаж кінематичної системи до основної рами принтера. На даному етапі було встановлено 3д надруковані елементи кріплення осі z її направляючі вали та гвинти, встановлено попередньо зібрані елементи кінематичної системи, протягнуто пас, що забезпечує рух вздовж осей x y та проведено його натяжку;

4) встановлення плати керування та підключення електричної частини. Під час роботи над даним етапом було вмонтовано плату керування в спеціально відведене місце, підключено крокові двигуни та налаштовано їх роботу, підключено електронагрівачі та проведено наладку температурного та твердотільного реле для забезпечення коректної роботи нагріву робочого столу.

Проведено підключення екрану та внесення основних параметрів принтера в постійну пам'ять плати керування. Встановлена плата керування показана на рисунку 2.16.

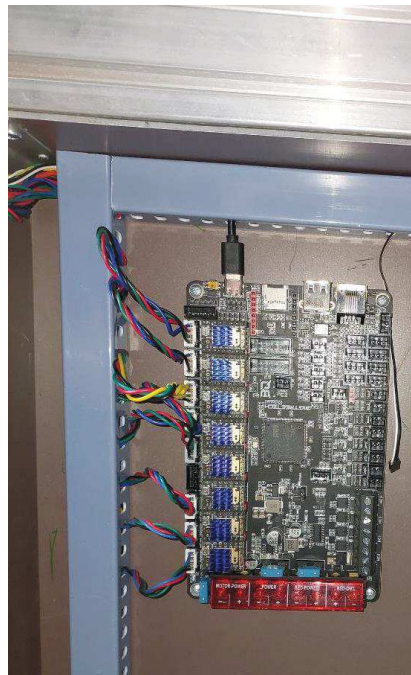


Рисунок 2.16 – Плата керування принтера

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Під час роботи даного прототипу було протестовано такі аспекти, як: міцність та жорсткість конструкції рами принтера, точність позиціонування та гранично можлива швидкість роботи кінематичної системи, процес нагріву робочі платформи.

Як сказано вище було прийнято рішення виготовити раму принтера з станочного профілю 30×60 мм. Профіль з такими параметрами зміг забезпечити стабільне положення кінематичної системи та виключити її перекося під час руху. Відсутність перекося рами принтера є однією з основних вимог для забезпечення коректної роботи системи в цілому.

Реалізація кінематичної системи забезпечила високу точність та стабільність роботи. Дані критерії вдалось дотримати за допомогою використання направляючих профілів. Після наладки системи було проведено тест для дослідження гранично допустимого значення швидкості переміщення системи. Результат показав, що система здатна переміщуватись з швидкістю 200 мм/с при прискоренні 90 мм/с². Враховуючи можливості екструдера можна зробити припущення про те, що безпосередньо швидкість друку з високою якістю та міцністю деталей можлива при швидкості 130-150 мм/с.

Було перевірено точність та плавність руху системи вздовж осі Z. Реалізація системи з використанням плаваючої гайки та направляючого валу в парі з приводним гвинтом показала високу точність та стабільність роботи системи без надмірного навантаження на крокові двигуни. Дане рішення стабілізувало роботу системи у порівнянні з стандартною реалізацією руху кінематичної системи вздовж осі Z. Використання плаваючої гайки дозволило згладити нерівності приводного гвинта та мінімізувати небажані осьові зміщення. Направляючий вал зробив систему стійкішою до вигинів та вібрацій. Таке рішення дозволяє здійснювати переміщення навіть під навантаженням ваги усєї кінематичної системи в цілому. Реалізацію даного механізму показано на рисунку 2.17.

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 2.17 – Реалізація механізму переміщення осі Z

Було перевірено точність роботи екструдера за допомогою методу роботи без нагріву. Суть даного методу полягає в протягуванні фіксованої довжини прутка без нагріву хотенду та замірів довжини нитки на виході з екструдера. Результат такої перевірки показав, що екструдер протягує недостатню кількість нитки. Дану проблему було вирішено коригуванням кількості кроків двигуна необхідних для переміщення 1 мм нитки філаменту. Після внесення змін у базові налаштування екструдера було проведено повторну перевірку. В якості точки підрахунку було обрано кінець екструдера та задано завдання протягнути 100 мм нитки, результат показав коректну роботу екструдера. Таке налаштування дозволить забезпечити високу якість друку та уникнути недоекструзії пластику та забезпечити гарантовану міцність та надійність майбутньої деталі. Екструдер використаний у даному прототипі показано на рисунку 2.18.

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40



Рисунок 2.18 – Екструдер принтера

Як було сказано вище в якості нагрівального елемента робочої платформи було використано 2 контури ніхромової нитки. Тестування такої реалізації системи нагріву показало високу ефективність та швидкість нагріву столу. Температура задана через плату керування була стабільною під час усього тесту та підтримувалась в діапазоні $\pm 3^{\circ}\text{C}$. Така стабільна температура зможе забезпечити хорошу адгезію деталі та поверхні столу, що мінімізує брак деталі під час роботи принтера. Підтримання стабільної температури є особливо важливим при друці великогабаритних деталей. Використання твердотільного реле для підтримання встановленої температури забезпечило плавність роботи системи нагріву столу, це виключило інерційність температури, що підвищило загальну стабільність роботи системи. Початкову комутацію першого кола нагріву, яку здійснено за допомогою температурного реле було проведено успішно. В процесі нагріву столу було виявлено проблему пов'язану з розширенням матеріалу контурів при нагріві. Дану проблему було вирішено шляхом додавання системи натягу з використанням пружин. Реалізацію даної системи показано на рисунку 2.19.

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

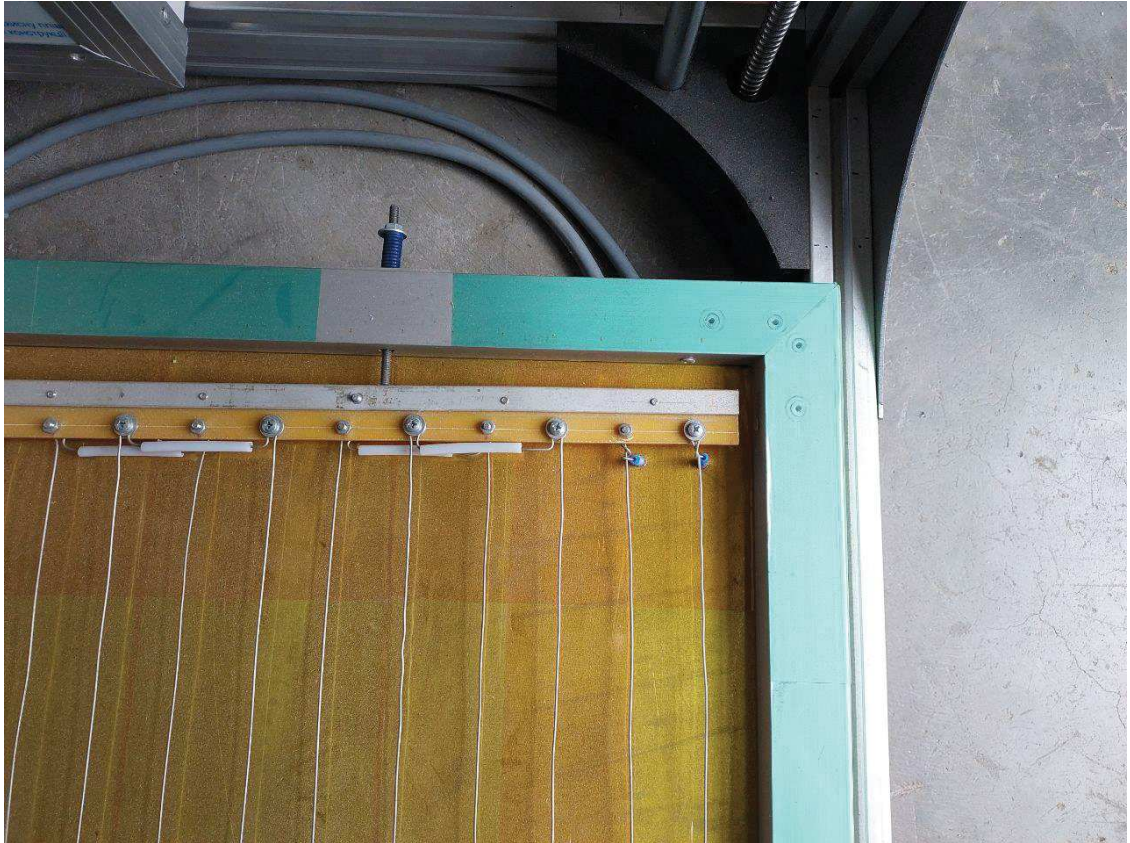


Рисунок 2.19 – Реалізація натягу ніхромової нитки

Як показано на рисунку 2.19 кожен з контурів нагріву складається з окремих відрізків ніхромової нитки. Таке виконання дозволило максимально ефективно застосувати рішення описане вище, оскільки легше реалізувати натяг одного відрізка ніж натяг загальної довжини. Кріплення контуру до основної планки дозволило регулювати деформацію натягу спричинену нагрівом матеріалу за допомогою усього двох підпружинених болтів для кожного контуру нагріву окремо.

Компенсація розширення за допомогою пружин дозволила зберегти стабільність нитки та запобігти короткому замиканню між двома контурами нагріву. Завдяки компенсації розширення корпус столу залишався герметичним під час нагріву та не мав перекосів, це забезпечило стабільну висоту першого шару та хорошу адгезію між деталлю та столом. Також таким чином було зменшено навантаження на з'єднання конструкції.

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Після завершення роботи по збірці компонентів принтера було проведено калібрування крокових двигунів. Суть калібрування полягає у введенні значення, яке встановлює кількість кроків необхідну для подолання 1мм відстані друкуючої головки. Дане калібрування проводиться для кожного з двигунів використаних у принтері для переміщення екструдера. Для проведення даної операції необхідним є застосування стороннього програмного забезпечення, яке дозволяє вручну керувати командами G-code для мови програмування Marlin, оскільки саме цей тип коду використовується для плати керування Octopus V1.1. Для виконання поставленої задачі було обрано програмне забезпечення Octoprint. Для перевірки діючих налаштувань принтера в тому числі і налаштувань крокових двигунів необхідно скористатись командою M503 ввівши її в термінал. Після обробки команди діалогове вікно покаже список діючих налаштувань. Рядок, що починається з позначення M92 містить інформацію про діючі налаштування крокових двигунів. На рисунку 2.20 показано діалогове вікно.

```
Recv: echo:Filament settings: Disabled
Recv: echo: M200 D1.75
Recv: echo: M200 D0
Recv: echo:Steps per unit:
Recv: echo: M92 X80.14 Y79.94 Z401.26 E99.41
Recv: echo:Maximum feedrates (units/s):
Recv: echo: M203 X500.00 Y500.00 Z6.00 E60.00
Recv: echo:Maximum Acceleration (units/s2):
Recv: echo:Acceleration (units/s2): P<print_accel> R<retract_accel> T<travel_accel>
Recv: echo: M204 P4000.00 R3000.00 T4000.00
Recv: echo:Advanced: Q<min_segment_time_us> S<min_feedrate> T<min_travel_feedrate> X<max_x_jerk> Y<max_y_jerk> Z<max_z_jerk> E<max_e_jerk>
Recv: echo: M205 Q20000 S0.00 T0.00 X20.00 Y20.00 Z0.40 E5.00
```

Send

Рисунок 2.20 – Діючі налаштування крокових двигунів

Даний рядок показує, що для переміщення екструдера по осі X на 1мм кроковому двигуну необхідно виконати 80.14 кроків для двигунів осі Y – 79,94 та для осі Z – 401,26 відповідно.

Для перевірки точності роботи двигунів при даних налаштуваннях було надруковано тестову модель кубика з встановленими розмірами: 20×20×20мм. Після завершення друку було знято фактичні розміри деталі, вони склали: 19,8×19,8×19,5 мм відповідно. Даний результат показав неточність роботи крокових двигунів. При друці деталей невеликих габаритів похибка не буде набувати великого значення, проте при збільшенні габаритних розмірів друкованої моделі похибка зростатиме пропорційно. На рисунку 2.21 показано результат друку з використанням початкових налаштувань.

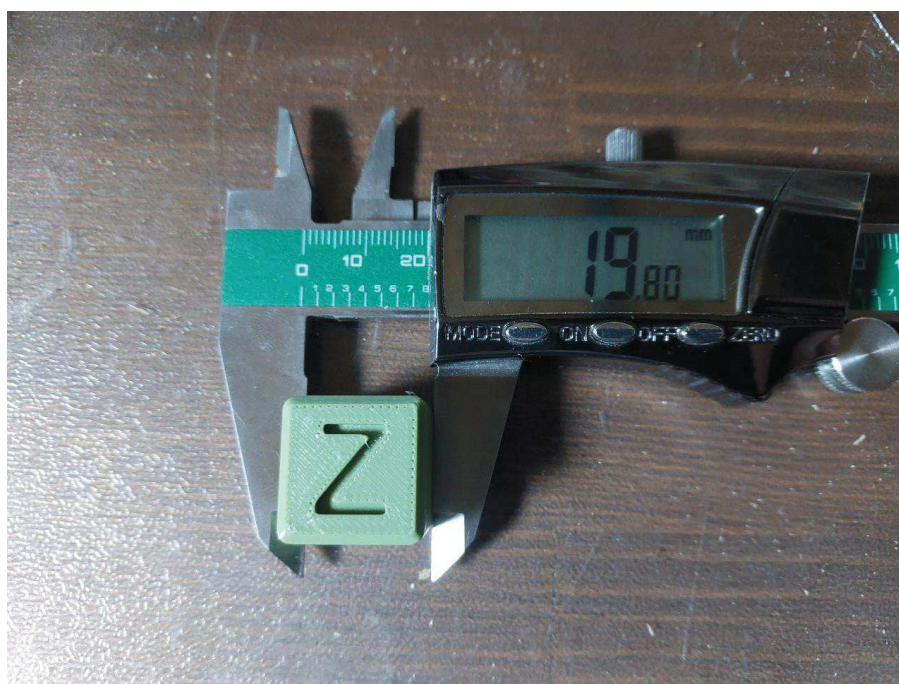


Рисунок 2.21 – Результат друку до калібрування

Для вирішення даної проблеми необхідно задати значення кроків, яке відповідатиме необхідному для дійсного переміщення на 1мм. Для цього необхідно скористатися інформацією отриману за допомогою згаданого вище програмного забезпечення Octoprint та спираючись на дійсний та бажаний результат положення екструдера під час друку і як наслідок кінцевого результату роботи провести необхідні розрахунки та внести нові значення у постійну пам'ять плати керування принтера.

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

Для розрахунку необхідної кількості кроків було використано формулу 2.1.

$$M_1 = \frac{l_1}{l} \cdot M, \quad (2.1)$$

де: M_1 – необхідне значення кроків для подолання 1мм, [кроків/мм];

l_1 – дійсний розмір граней куба розташованих вздовж осей, для осей X та Y $l_1 = 19,8$ мм, для осі Z $l_1 = 19,5$ мм;

M – діюче значення кроків необхідних для подолання 1мм;

l – встановлене значення довжини граней, $l = 20$ мм.

Підставивши значення для осі координат X отримаємо:

$$M_1 = \frac{19,8}{20} \cdot 80,14 = 79,34 \text{ кроків/мм.}$$

Для осі координат Y:

$$M_1 = \frac{19,8}{20} \cdot 79,94 = 79,14 \text{ кроків/мм.}$$

Для осі координат Z:

$$M_1 = \frac{19,5}{20} \cdot 401,26 = 391,23 \text{ кроків/мм.}$$

Значення 99,4 показне на виділеному рядку на рисунку 2.20 показує діюче налаштування крокового двигуна екструдера. Як було сказано раніше його калібрування було проведено відразу після монтажу до кінематичної системи та підключення нагрівального елемента. Тому дане значення є коректним та не потребує внесення змін.

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Після розрахунку необхідно змінити значення за допомогою команди: M92 X79,34 Y79,14 Z391,23. Після задання нових значень було повторно надруковано модель кубика для перевірки достовірності розрахунків.

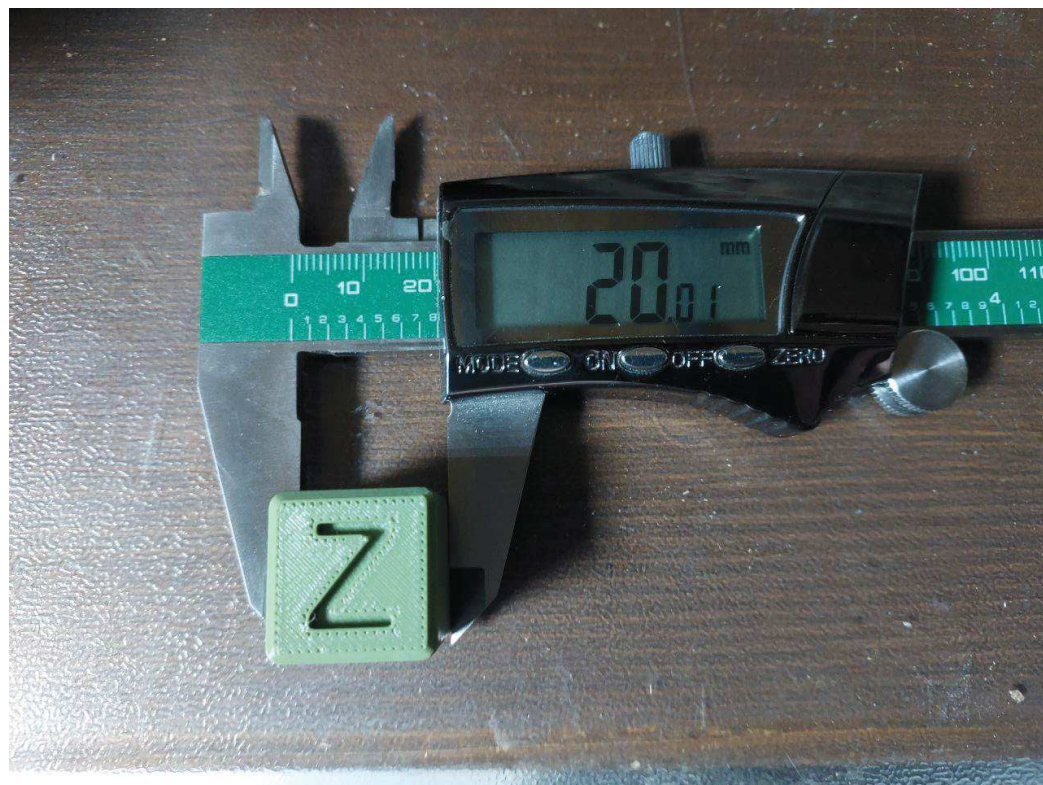


Рисунок 2.22 – Результат каліброваного друку

Як видно на рисунку 2.22 калібрування роботи крокових двигунів дозволило суттєво збільшити точність роботи системи принтера, що є важливим показником при друці великогабаритних деталей. Дане калібрування вплинуло не тільки на точність але і на якість друку, оскільки правильне позиціонування екструдера забезпечило більш гладку та рівномірну поверхню деталі. Калібрування руху осі Z дозволило виключити небажане зміщення шарів деталі вздовж осі. Також дане калібрування підвищило міцність деталі, оскільки шари краще спікаються між собою за рахунок точнішого позиціонування та правильної подачі нитки пластику через сопло принтера.

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

Висновок до другого розділу

У межах другого розділу було виконано розробку концепції широкоформатного FDM 3D-принтера, основна увага в якій приділялася створенню конструкції, що поєднує в собі високу точність друку, стабільність роботи та здатність ефективно функціонувати на великій площі.

У ході розробки концепції принтера було розроблено структурну принципову схему роботи, яка стала основою для подальшої розробки принтера. Наступним кроком було розроблено кінематичну схему роботи принтера, оскільки у першому розділі було обрано кінематику Core XY, то кінематичну схему було розроблено у відповідності до особливостей роботи такої кінематичної системи.

На основі проведеної роботи розроблено принципову електричну схему 3D-принтера з урахуванням особливостей роботи викликаних широким форматом робочої області принтера.

Окрім цього, особливу увагу було приділено питанням стабільності друку на великій площі. Для цього розроблено систему підтримки термічного середовища, що забезпечує рівномірне охолодження моделі. Передбачено використання сучасних матеріалів для базової платформи, які мінімізують ризик деформацій під час друку.

На основі проведених розробок було розроблено цифрову модель принтера у середовищі CAD програми SolidWorks. Дана модель дозволила визначити основні переваги та недоліки розробленої системи та спростити подальший процес підбору та розрахунку компонентів принтера. Після чого було розроблено дійсний прототип принтера та проведено тестування його роботи, що дало змогу зрозуміти усі недоліки безпосередньо в роботі та провести роботу наді їх усуненням.

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. РОЗРАХУНКИ, ЩО ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ЕФЕКТИВНІСТЬ РОБОТИ 3D-ПРИНТЕРА

3.1 Розрахунок основних характеристик

Для коректної роботи 3D-принтера необхідно підібрати крокові двигуни з відповідною потужністю, для цього використовують формулу 3.1

$$P_1 = M \cdot \omega, \quad (3.1)$$

де: P – потужність крокового двигуна, Вт;

M – крутний момент на валу двигуна, Н·м;

ω – кутова швидкість, 61,2 рад/с.

Крутний момент M обчислюється за формулою 3.2

$$M = F \cdot r, \quad (3.2)$$

де: F - сила, що діє на вал, Н;

r - радіус дії сили, $r=0,2$ м.

Сила, що діє на вал двигуна розраховується за формулою 3.3

$$F = m \cdot a + F_{\text{тер}}, \quad (3.3)$$

де: m – маса каретки, $m=0,8$ кг;

a – прискорення руху друкуючої головки, $a=2$ м/с²;

$F_{\text{тер}}$ – сила тертя між повзуном та направляючою рейкою, Н

Сила тертя розраховується за формулою 3.4

$$F_{\text{тер}} = \mu \cdot m \cdot g, \quad (3.4)$$

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де: μ - коефіцієнт тертя між рухомими елементами, $\mu=0,3$;

g - прискорення вільного падіння, $g=9,81 \text{ м/с}^2$.

Підставивши значення у формулу 3.4 отримаємо

$$F_{\text{тер}} = 0,3 \cdot 0,8 \cdot 9,81 = 2,35 \text{ Н.}$$

Використавши значення сили тертя знайдене за допомогою формули 3.4 знайдемо значення загальної сили, що діє на вал за формулою 3.3

$$F = (0,8 \cdot 2) + 2,35 = 3,95 \text{ Н.}$$

Підставивши значення сил, що діють на вал двигуна в формулу 3.2 отримаємо

$$M = 3,95 \cdot 0,2 = 0,79 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Знайшовши крутний момент знайдемо необхідну потужність двигунів принтера

$$P = 0,79 \cdot 61,2 = 48,3 \text{ Вт.}$$

Принцип розрахунку необхідної потужності двигунів для забезпечення руху вздовж осі Z є аналогічним змінюється лише маса елементів, оскільки дані двигуни забезпечують рух усього порталу 3D-принтера разом з профілем, друкуючою головкою та двигунами, які забезпечують рух двох інших осей. Тому сила, що діє на вал двигуна складе 8,3 Н; крутний момент становитиме 1,66 Н·м; коефіцієнт тертя між рухомими елементами є максимально наближеним тому для спрощення використано значення 0,3; тоді необхідна потужність двигуна за формулою 3.1 складе:

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$P_2 = 1,66 \cdot 61,2 = 101,5 \text{ Вт.}$$

Для забезпечення руху повзунів використано пасову передачу. Для коректної роботи системи необхідним є розрахунок довжини використовуваного паса. Для приблизного розрахунку необхідної довжини паса використано розрахункову кінематичну схему принтера, зображену на рисунку 3.1 та формулу 3.5.

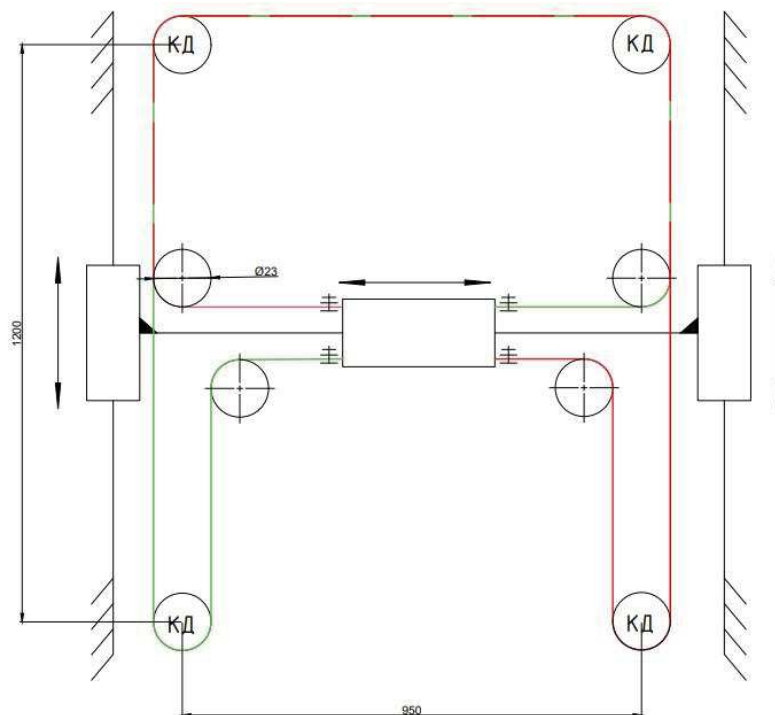


Рисунок 3.1 – Схема розрахункова

$$L = 2(W + H) + 2l + 4 \frac{\pi \cdot d}{2}, \quad (3.5)$$

де: W – ширина робочої площі, W=1250 мм;

H – довжина робочої площі, H=950 мм;

l – середнє значення між горизонтальною та вертикальною відстанню між шківками, $l = 1050$ мм;

d – діаметр шківки, d=23 мм.

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

Підставивши значення в формулу отримаємо:

$$L = 2(1250 + 950) + 2 \cdot 1050 + 4 \frac{3,14 \cdot 23}{2} = 6644 \text{ мм.}$$

Дана формула показує необхідну довжину для одного пасу, оскільки кінематична система складається з двох пасів однакової довжини, то необхідна загальна довжина складе 13288 мм.

Для нагрівання хотенду та розплавлення нитки філаменту використано ТЕН. Для коректної роботи система та уникнення перегріву нитки філаменту необхідно розрахувати потужність нагрівача. Даний розрахунок виконується за формулою 3.6

$$P = \frac{Q}{t}, \quad (3.6)$$

де: P – потужність нагрівача, Вт;

Q – кількість теплоти необхідної для нагрівання, Дж;

t – середній час нагріву хотенду до потрібної температури, $t=90$ с.

Для розрахунку необхідної кількості теплоти використано формулу 3.7

$$Q = m \cdot c \cdot (T_2 - T_1), \quad (3.7)$$

де: m – маса нагрівального елемента, $m=0,05$ кг;

c – теплоємність алюмінію, $c=900$ Дж/кг;

T_1 – початкова температура нагрівача, $T_1=20^\circ\text{C}$;

T_2 – кінцева температура нагрівача, $T_2=250^\circ\text{C}$.

Підставивши значення в формулу 3.7 отримаємо:

$$Q = 0,05 \cdot 900 \cdot (250 - 20) = 10350 \text{ Дж.}$$

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Отримавши значення необхідної кількості теплоти можемо розрахувати потужність нагрівача за формулою 3.6

$$P = \frac{10350}{90} = 115 \text{ Вт.}$$

Особливістю даного принтера є реалізація процесу нагріву робочої поверхні, для нагріву великої площі використано 2 контури ніхромової нитки включених паралельно, оскільки при проходженні через ніхромову нитку струму відбувається нагрів. Для розрахунку необхідної потужності нагрівальних елементів необхідно розрахувати опір ніхромової нитки в кожному з контурів. Для цього використано формулу 3.8

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (3.8)$$

де: ρ – питомий опір ніхрому, $\rho=1,1 \cdot 10^{-6}$ Ом·м;

l – довжина одного контуру ніхромової нитки, $l=4$ м;

S – площа поперечного перерізу нитки діаметр 0,4 мм, $S=1,3 \cdot 10^{-7}$ м².

Підставивши значення у формулу 3.8 отримаємо:

$$R = 1,1 \cdot 10^{-6} \frac{4}{1,3 \cdot 10^{-7}} = 33,8 \text{ Ом.}$$

Оскільки контури підключено паралельно та мають ідентичний опір, то загальний опір становитиме:

$$R_{\text{заг}} = \frac{R}{2}. \quad (3.9)$$

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Підставивши значення отримаємо:

$$R_{\text{заг}} = \frac{33,8}{2} = 16,9 \text{ Ом.}$$

Нагрівальна платформа підключається безпосередньо до мережі 220 В та розраховується за законом Джоуля-Ленца формула 3.10

$$P = \frac{U^2}{R_{\text{заг}}}, \quad (3.10)$$

де: P – потужність нагрівачів, Вт;

U – напруга мережі, U=220 В;

Підставивши отримані значення у формулу 3.10 отримаємо наступне значення потужності:

$$P = \frac{220^2}{16,9} = 2863 \text{ Вт.}$$

Оскільки контури нагріву є ідентичними, а загальна потужність склала 2863 Вт, то потужність одного контуру становить 1431,5 Вт.

Для підтвердження ефективності використання ніхромової нитки в якості нагрівача використаємо формулу 3.11.

$$\eta = \frac{Q}{P} 100\%, \quad (3.11)$$

де: η – Ефективність роботи нагрівального контуру;

Q – теплова потужність контуру, Вт;

P – Електрична потужність контуру, Вт.

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для розрахунку теплової потужності використаємо формулу 3.12.

$$Q = \frac{U^2 \cdot S}{\rho \cdot l}, \quad (3.12)$$

де: U – напруга мережі, $U = 220\text{В}$;

S – площа поперечного перерізу нитки, $S = 11 \cdot 10^{-8}\text{мм}^2$;

ρ – питомий опір ніхромової нитки, $\rho = 1,1 \cdot 10^{-6}\text{ Ом}\cdot\text{м}$;

l – довжина контуру нагріву, мм.

Підставивши значення отримаємо:

$$Q = \frac{220^2 \cdot 11 \cdot 10^{-8}}{1,1 \cdot 10^{-6} \cdot 4} = 1210 \text{ Вт.}$$

Підставивши значення теплової потужності в формулу 3.11 отримаємо:

$$\eta = \frac{1210}{1431,5} 100\% = 84,5\%.$$

Даний результат показує високу ефективність перетворення електричної енергії в теплову, що дозволяє нагрівачу виготовленому з ніхромової нитки рівномірно обігрівати всю площу столу принтера та забезпечувати адгезію першого шару з робочою поверхнею принтера.

3.2 Підбір елементів для реалізації керування нагрівом робочої поверхні

Керування нагрівом робочої поверхні розділено на два контури. Перший нагрівальний контур керується за допомогою реле температури та вступає в дію лише на початку нагріву. Підтримка встановленої температури реалізована за допомогою другого контуру, який керується за допомогою

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

твердотільного реле. При цьому потужність обох контурів є рівною. В загальному комутуюча апаратура повинна відповідати таким критеріям:

- Номінальна напруга: 220 В;
- Номінальний струм: мінімум 6,5 А (для забезпечення запасу та безпеки);
- Відповідність навантаженню: повинно бути призначене для керування резистивними навантаженнями.

У виготовленому прототипі принтера було використано реле температури фірми Omron, а саме модель Omron G7L-2A-TUBJ-CB, з номінальним струмом роботи 16 А, максимальною напругою 240 В, та діапазоном робочих температур 25 – 60 °С. Дане реле є надійним, а його характеристики забезпечують необхідний запас струму для реалізації комутації та зможе забезпечити стабільну роботу контуру. На рисунку 3.2 показано дане реле.

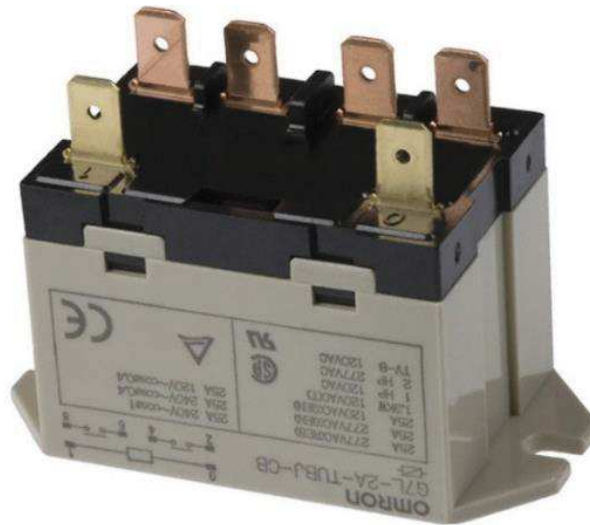


Рисунок 3.2 – Реле температури

Для підтвердження ефективності використання даного реле розрахуємо струм навантаження за формулою 3.13

$$I = \frac{P}{U \cdot \cos\phi}, \quad (3.13)$$

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

де: P – потужність одного контуру нагріву;

U – напруга мережі, $U=220\text{В}$;

$\cos \varphi$ – коефіцієнт потужності, для нагрівача $\cos \varphi=0.8$;

Підставивши значення в формулу отримаємо:

$$I = \frac{1431,5}{220 \cdot 0,8} = 8,1 \text{ А.}$$

Для перевірки відповідності основного параметру реле використаємо формулу з застосуванням коефіцієнту запасу, яка порівнює максимальний струм комутації реле та розрахований вище струм. Використаємо формулу 3.14

$$I_{\text{реле}} \geq I \cdot K_{\text{зп}}, \quad (3.14)$$

де: $I_{\text{реле}}$ – величина струму зазначена в паспорті реле;

$K_{\text{зп}}$ – коефіцієнт запасу, $K_{\text{зп}}=1,5$.

Підставивши значення отримаємо:

$$16 \geq 8,1 \cdot 1,5.$$

Оскільки нагрівальні контури є однаковими, то струм для 2 контуру також незмінний, тому характеристики твердотільного реле повинні бути наступними:

- Вхідна напруга: 24 В постійного струму;
- Вихідна напруга: 220 В змінного струму;
- Номінальний струм: 12 А;
- Тип навантаження: резистивне.

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Під дані параметри підходить реле Omron G3MB-202P. Дане реле використано у прототипі твердотільне реле наведено на рисунку 3.3.



Рисунок 3.3 – Твердотільне реле

При роботі з даним типом реле слід врахувати виділення тепла під навантаженням. Для запобігання перегріву компоненту необхідним є застосування радіатора. Для визначення термічного опору радіатора використаємо формулу 3.15.

$$R_t = \frac{T_{max} - T_n}{Q} - R_k, \quad (3.15)$$

де: R_t – термічний опір радіатора, $^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$;

T_{max} – допустима температура корпусу, $T_{max} = 70^{\circ}\text{C}$;

T_n – температура навколишнього середовища, $T_n = 20^{\circ}\text{C}$;

Q – втрати тепла, $Q = 20\text{Вт}$;

R_k – термічний опір в місті контакту з корпусом, $R_k = 1^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$;

$$R_t = \frac{70 - 20}{20} - 1 = 1,5^{\circ}\text{C}/\text{Вт}.$$

Для даного випадку доцільним є використання пасивного радіатора.

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки до третього розділу

На основі розробок було проведено розрахунки, що підтверджують працездатність принтера. Було розраховано необхідну потужність крокових двигунів для забезпечення правильної роботи системи, яка склала 48,33 Вт для осей X і Y та 101,5 Вт для осі Z, довжину паса, яка склала 13288 мм, для забезпечення його правильного натягу та потужність нагрівальних елементів принтера. Енергетичні розрахунки показали, що споживання енергії системою залишається в межах допустимих значень для обладнання такого класу. Завдяки оптимізації приводу та використанню сучасних компонентів, рівень споживання був знижений без впливу на продуктивність і якість друку.

На основі проведених розрахунків було проведено підбір компонентів, що забезпечують роботу нагрівальної платформи а саме реле температури та твердотільного реле, оскільки даний компонент нагрівається безпосередньо від мережі 220 В.

Таким чином, проведені розрахунки підтвердили, що розроблений широкоформатний FDM 3D-принтер відповідає сучасним вимогам до точності, надійності та енергоефективності. Отримані результати демонструють його спроможність ефективно працювати та виготовляти вироби великого розміру без втрати якості.

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У межах бакалаврської роботи виконано розробку широкоформатного FDM 3D-принтера. Проведена робота охопила теоретичний аналіз, розробку конструкції та виконання розрахунків, які підтверджують ефективність і надійність запропонованого обладнання.

На першому етапі було проведено аналіз технічних джерел щодо адитивних технологій 3D-друку. Дослідження дозволило визначити основні тенденції розвитку технології FDM-друку, зокрема її переваги, недоліки та можливі шляхи вдосконалення. Це дало змогу обґрунтувати актуальність розробки широкоформатного 3D-принтера та сформулювати технічне завдання.

Другий етап передбачав розробку концепції 3D-принтера, що поєднує в собі високу точність, стабільність роботи та здатність друкувати великогабаритні деталі. У результаті було розроблено конструкцію з кінематикою Core XY, робочою площею 1250×950 мм та оптимізованою системою передачі руху. Особливу увагу приділено вибору матеріалів і компонентів, що забезпечують надійність пристрою та якість друку.

На третьому етапі було виконано розрахунки, які підтвердили відповідність запропонованої конструкції основним технічним вимогам. Аналіз точності, стабільності та енергоефективності показав, що принтер здатний працювати на великих площах без втрати якості друку. Виявлено, що рівень відхилення у розмірах друкованих моделей не перевищує 0,1 мм, а енергоспоживання системи є економічно обґрунтованим для обладнання такого класу.

Загалом, результати курсового проекту підтверджують, що розроблений широкоформатний FDM 3D-принтер має високу функціональність та ефективність. Його реалізація може стати основою для виготовлення прототипів, які здатні знайти широке застосування як у промисловості, так і в інших сферах, що потребують виготовлення великогабаритних деталей.

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Гречко, О. М. Сучасні адитивні технології та 3D-друк. Огляд останніх досягнень в різних сферах людського життя. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика.* 2019. С. 63–75.
2. Koekeoek K. 3D Printing Projects. 20 design projects for your 3D printer. Lulu.com, 2014. 110 p.
3. Gjerdet N. R. 3D-printing. *Den norske tannlegeforenings Tidende.* 2021. Vol. 132, no. 12. URL: <https://doi.org/10.56373/2021-12-20> (дата звернення 10.09.2024).
4. Андрощук Г. О. Адитивні технології: перспективи і проблеми 3D-друку (II частина). *Наука, технології, інновації.* 2017. № 2 (2). С. 29–36.
5. FDM 3D-технологія друку. DIY constructor printing URL: <http://diykonstruktor.in.ua/content/8-fdm-tekhnologiya-druku> (дата звернення 10.09.2024).
6. Селективне лазерне спікання (Selective Laser Sintering, SLS). Pro3D URL: <https://pro3d.com.ua/a368590-selektivne-lazerne-spikannya.html> (дата звернення 10.09.2024).
7. Технології фотополімерного 3D-друку: опис, переваги та недоліки. MonoFilament. URL: <https://monofilament.com.ua/ua/blog-novini-3d-druku-ta-additivnih-tehnologij/sla-dlp-lcd-tehnologiji-fotopolimernogo-3d-druku-opis-perevagi-ta-nedoliki>. (дата звернення 10.09.2024).
8. Типи екструдерів: переваги та недоліки. 3D plast. URL: <https://3dplast.biz/ua/a398993-tipy-ekstruderov-dostoinstva.html> (дата звернення 10.09.2024).
9. Хотенд (hotend) – характеристики, складові елементи. Tucans. URL: <https://tucans.com.ua/3dustrojstvaua/zapchastini-dlya-3d-printera/hotend-hotend-ekstrudera-ua> (дата звернення 10.09.2024).

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

10. Кінематика 3D-принтера: переваги і недоліки всіх варіантів. 3D plast. URL: <https://3dplast.biz/ua/a398991-kinematika-printera-preimuschestva.html> (дата звернення 10.09.2024).

11. Creality Slicer: все, що вам потрібно знати. ArtLine. URL: <https://artline.ua/uk/blogs/creality-slicer-vse-cho-vam-nuzhno-znat?srsltid> (дата звернення 10.09.2024).

12. Крокові двигуни. КПІ. URL: https://em.fea.kpi.ua/images/doc_stud/dist_siplini/brem/BREM_Lekciya_10.pdf (дата звернення 10.09.2024).

13. Нагрівач (ТЕН) 40w для хотенду 3D принтера. Printer. URL: <https://www.3dprinter.ua/shop/nagrivach-ten-40w-dlya-hotendu-3d-pryntera-12v-ta-24v/> (дата звернення 10.09.2024).

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТКИ

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		