

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА
МР.ПМКм-46.00.00.000.ПЗ

Група ПМКм-23-1

Яворський Віталій

Богданович

2024

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Інститут інженерної механіки та робототехніки

Кафедра: комп'ютеризованого машинобудування

Яворський Віталій Богданович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 62-96

(індекс)

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Розроблення 3D-принтера на платформі фрезерно-гравірувального верстата

(назва роботи)

Комп'ютеризовані та роботизовані технології машинобудування

(назва освітньої програми)

131 – Прикладна механіка

(шифр і назва спеціальності)

Я.В. Яворський

(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

Науковий керівник Копей В.Б., професор кафедри КМВ

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

професор

(посада)

(підпис)

(дата)

Панчук В. Г.

(ініціали та прізвище)

Рецензент

(посада)

(підпис)

(дата)

(ініціали та прізвище)

Робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
(повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут інженерної механіки та робототехніки

Кафедра комп'ютеризованого машинобудування

Освітній рівень магістр

Спеціальність 131 – Прикладна механіка

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри _____

« ____ » _____ 20__ року

ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ

Студенту Яворському Віталію Богдановичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) Розроблення 3D-принтера на платформі фрезерно-гравірувального верстата

2. Термін здачі студентом закінченого проєкту (роботи) _____

3. Вихідні дані до проєкту (роботи) Технічні вимоги до 3D-принтера, характеристики верстата, компоненти модернізації.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити)

Вступ. 1. Огляд існуючих 3D-принтерів та фрезерно-гравірувальних верстатів. 2. Проєктування 3D-принтера на базі фрезерно-гравірувального верстата. 3. Розробка системи керування.

Висновки

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

Креслення зборки 3D-принтера на платформі фрезерно-гравірувального верстата.

6. Дата видачі завдання - 24.09.2024

Реферат

Магістерська кваліфікаційна робота на тему: Розроблення 3D-принтера на платформі фрезерно-гравірувального верстата.

Дана робота складається зі 81 аркушів пояснювальної записки. До неї входять 23 рисунки, 4 таблиці, 5 додатків. Список використаної літератури містить 13 найменувань.

Об'єкт дослідження – процес перетворення фрезерно-гравірувального верстата у багатофункціональний 3D-принтер.

Предмет дослідження – технології модифікації верстатів для адитивного виробництва.

Мета роботи – розроблення 3D-принтера на основі фрезерно-гравірувального верстата для забезпечення адитивного виробництва.

Основним завданням роботи є: Аналіз існуючих технологій 3D-друку та обладнання. Вибір платформи для проєкту. Розроблення технології модифікації верстата для адитивного виробництва. Інтеграція електронних систем керування та програмного забезпечення. Тестування розробленої системи та оцінка її ефективності.

У роботі було розроблено конструкцію, апаратні та програмні засоби задля модифікації фрезерно-гравірувального верстата CNC 6040Z на 3D-принтер, який здатен здійснювати як адитивне (друк пластиком), так і субтрактивне (фрезерування) виробництво. Цей підхід дозволяє значно знизити витрати, використовуючи одне обладнання для виконання різних виробничих завдань. Вибір цього верстата був обумовлений його точністю, можливістю модифікації для різних потреб та підтримкою числового програмного керування, що є необхідним для реалізації 3D-друку.

В рамках проєкту було розроблено та встановлено екструдер, що дозволяє здійснювати пошарове нанесення матеріалу, характерне для 3D-друку. Екструдер виконує роль головного елемента, який розплавляє пластиковий матеріал та подає його на робочу поверхню, де він застигає, утворюючи бажану форму. Проєктування цього елемента вимагало ретельного підходу до вибору

конструкційних матеріалів, забезпечення належної температури для плавлення філаменту та точного керування його подачею.

Для забезпечення ефективного і точного керування 3D-принтером було вибрано програмне забезпечення Mach3, яке дозволяє здійснювати керування верстатом з числовим програмним керуванням (ЧПК). Це ПЗ підтримує G-коди, що є стандартом для керування рухами інструментів на верстатах, і забезпечує високу точність виконання обробки. Інтеграція Mach3 дозволила оптимізувати процес друку, автоматизувати управління екструдером та робочими поверхнями верстата, а також налаштувати параметри друку, такі як швидкість руху та температура екструдера.

Розроблений 3D-принтер дозволяє поєднувати функції адитивного та субтрактивного виробництва, розширюючи можливості використання обладнання у малому бізнесі та приватних майстернях. Наприклад, застосування методології та технологічних рішень, що були використані при розробці 3D-принтера на базі фрезерно-гравірувального верстата, стане базою для створення гібридної системи для електродугового наплавлення покриттів. Завдяки інтеграції ЧПК, системи керування температурою та налаштування параметрів подачі матеріалу можна забезпечити точність і ефективність процесу наплавлення, що є необхідним для відновлення та зміцнення деталей.

Ці результати показали, що розроблений 3D-принтер на основі фрезерно-гравірувального верстата є універсальним і ефективним інструментом, який може бути використаний для широкого спектра завдань у малому бізнесі та індивідуальному виробництві.

Ключові слова: 3D-принтер, CNC, адитивне виробництво, Mach3, модифікація верстата, тривимірне моделювання, екструдер.

Студент Яворський В. Б.

Summary

Master's thesis on the topic: Development of a 3D printer on the platform of a milling and engraving machine.

This work consists of 81 pages of explanatory notes. It includes 23 figures, 4 tables, and 5 appendices. The list of references includes 13 titles.

The object of research is the process of converting a milling and engraving machine into a multifunctional 3D printer.

Subject of research - technologies for modifying machines for additive manufacturing.

The purpose of the work is to develop a 3D printer based on a milling and engraving machine to ensure additive manufacturing.

The main tasks of the work are: Analysis of existing 3D printing technologies and equipment. Selection of a platform for the project. Development of a technology for modifying the machine for additive manufacturing. Integration of electronic control systems and software. Testing the developed system and evaluating its effectiveness.

In this work, we developed a design, hardware, and software to modify the CNC 6040Z milling and engraving machine into a 3D printer capable of performing both additive (plastic printing) and subtractive (milling) production. This approach allows us to significantly reduce costs by using one piece of equipment to perform different production tasks. The choice of this machine was made due to its accuracy, the possibility of modification for different needs, and support for numerical control, which is necessary for the implementation of 3D printing.

As part of the project, an extruder was developed and installed that allows for the layer-by-layer application of material typical of 3D printing. The extruder acts as the main element that melts the plastic material and feeds it to the work surface, where it solidifies to form the desired shape. The design of this element required a careful approach to the selection of construction materials, ensuring the proper temperature for melting the filament, and precise control of its feed.

To ensure efficient and accurate control of the 3D printer, Mach3 software was chosen, which allows you to control the machine with numerical control (CNC). This software supports G-codes, which is a standard for controlling tool movements on machine tools, and ensures high machining accuracy. The integration of Mach3 made it possible to optimize the printing process, automate the control of the extruder and machine working surfaces, and adjust printing parameters such as extruder speed and temperature.

The developed 3D printer allows combining the functions of additive and subtractive manufacturing, expanding the possibilities of using the equipment in small businesses and private workshops. For example, the methodology and technological solutions used in the development of a 3D printer based on a milling and engraving machine will be the basis for creating a hybrid system for electric arc surfacing. The integration of the CNC, temperature control and material feeding parameters can ensure the accuracy and efficiency of the surfacing process, which is essential for the restoration and strengthening of parts.

These results have shown that the developed 3D printer based on a milling and engraving machine is a versatile and effective tool that can be used for a wide range of tasks in small businesses and individual production.

Keywords: 3D printer, CNC, additive manufacturing, Mach3, machine modification, three-dimensional modeling, extruder.

Student Yavorskyi V. B.

ЗМІСТ

Вступ	
1. Огляд існуючих 3D-принтерів та фрезерно-гравірувальних верстатів.	11
1.1 Огляд технологій виготовлення деталей 3D-друку.	11
1.1.1 Огляд технологій виготовлення деталей.	11
1.1.2 Класифікація технологій 3D-друку.	14
1.1.3 Технологія друку FDM.	15
1.1.4 Технологія SLA.	17
1.1.5 Інші технології друку.	18
1.2 Огляд фрезерно-гравірувальних верстатів.	21
1.2.1 Порівняння 3D-принтерів та фрезерно-гравірувальних верстатів.	23
1.2.2 Особливості фрезерно-гравірувальних верстатів.	23
1.3 Сучасні системи керування: аналіз Mach3.	25
1.4 Порівняння Mach3 з іншими системами керування.	35
2. Проєктування 3D-принтера на базі фрезерно-гравірувального верстата.	39
2.1 Вибір платформи для проєкту.	41
2.2 Модифікація фрезерно-гравірувального верстата для роботи в режимі 3D-принтера.	44
2.3 Вибір і встановлення екструдера та необхідних елементів для 3D-друку.	46
2.4 Електрична інтеграція та розробка програмного забезпечення для управління температурою системи 3D-принтера.	58
3. Розробка системи керування на основі Mach3.	69
3.1 Архітектура системи керування.	69

					<i>МР.ПМКМ-46.00.00.000 ПЗ</i>		
Зм.	Арк.	№ Докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		<i>Яворський В. Б.</i>			Літ.	Арк.	Аркуші
Перевір.		<i>Копей В. Б.</i>			8		
Затверд.					<i>Пояснювальна записка</i>		
					<i>ІФНТУНГ ПМКМ-23-1</i>		

3.2 Налаштування Mach3 для 3D-друку.	69
3.3 Інтеграція Mach3 із середовищем для 3D-друку.	70
4. Аналіз ефективності розробленої системи.	70
4.1 Випробування на практичних моделях.	70
4.2 Оцінка точності та якості друку.	71
4.3 Порівняння із традиційними 3D-принтерами.	71
4.4 Перспективи подальшого вдосконалення проєкту.	72
Висновки.	74
Список використаних джерел.	76
Додатки.	77

ВСТУП

В даний час тривимірний друк є однією з технологію яка найбільш динамічно розвивається та активно використовується в промисловості, медицині, освіті та багатьох інших галузях. Більшість доступного обладнання для 3D-друку є досить дорогим і часто обмежується певними додатками. Ця обставина ставить питання про удосконалення існуючих технологій адитивного виробництва для отримання більш доступних і універсальних засобів.

Розробка 3D-принтера на базі фрезерно-гравірувального верстата з системою керування Mach3 є дуже оптимістичною ідеєю, яка дозволяє не тільки здешевити, але й забезпечує багатофункціональність одного пристрою. У цьому випадку цей самий фрезерно-гравірувальний верстат можна використовувати для 3D-друку, а також для гравірування. Це значно розширює можливості користувача, а також економить ресурси. Метою магістерської роботи є розробка та впровадження в практику 3D-принтера з використанням фрезерно-гравірувального верстата з системою керування Mach3. Для досягнення мети вирішуються деякі завдання, як-от вивчення роботи 3D-принтерів і фрезерних верстатів, аналіз можливостей Mach3, модифікація машини для потреб 3D-друку, розробка системи керування та тестування кінцевої моделі.

Важливість цієї роботи полягає в тому, щоб зробити 3D-друк більш доступним за допомогою комбінованого методу, який покращує функції сучасних машин. Результати цього дослідження можуть бути використані як основа для створення універсальних відповідей у 3D-друку та можуть допомогти інженерам, дизайнерам і дослідникам.

Цей проект має практичну спрямованість і може бути використаний як у малому бізнесі, так і вдома, де потрібен 3D-друк з недорогим обладнанням.

					<i>МР.ПМКМ-46.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

1. Огляд існуючих 3D-принтерів та фрезерно-гравірувальних верстатів

1.1 Огляд технологій виготовлення деталей 3D-друку.

З розвитком технологій швидкого прототипування та обробки матеріалів значну популярність отримали 3D-принтери та фрезерно-гравірувальні верстати. Ці машини дозволяють створювати складні форми та вироби з різних матеріалів, відкриваючи нові можливості для виробництва та прототипування в інженерії, медицині, архітектурі та інших галузях. У цьому розділі розглянемо основні види 3D-принтерів та фрезерно-гравірувальних верстатів, їх особливості та порівняємо їх переваги і недоліки.

1.1.1 Огляд технологій виготовлення деталей

3D-принтери є невід'ємною частиною сучасного виробництва. Сьогодні на ринку доступні різні технології 3D-друку, кожна з яких має свої переваги та недоліки.

Більшість технологій виготовлення деталей можна поділити на три групи (рис. 1.1):

– формативна – найкраще підходить для великих обсягів виробництва однієї і тієї ж деталі, проте потребує значних початкових затрат на обладнання (форми), однак надалі деталі можна виготовляти швидко та за низькою ціною;

– субтрактивна – більше підходить для деталей з порівняно простою геометрією, деталі (із металу) виготовляються в середніх обсягах;

– адитивна – найкраще підходить для малих обсягів виготовлення, складних проєктів, які неможливо здійснити за допомогою формативної і субтрактивної технології, або ж для швидкого виготовлення одного прототипу. [5]

					<i>МР.ПМКМ-46.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

видалення матеріалу. Це спричиняє додаткові затримки та витрати для процесу в цілому. Під час проєктування деталей для виготовлення за субтрактивними технологіями необхідно враховувати доступність інструменту, оскільки, наприклад, інструмент для різання не завжди можливо застосувати для всіх поверхонь, щоб видалити необхідний матеріал. Недоліком субтрактивних технологій виготовлення є видалення великої кількості матеріалу під час процесу виготовлення деталі.

Аддитивна технологія (3D-друк) – процес послідовної побудови деталей шляхом нарощування шарів матеріалу. Існує цілий ряд технологій 3D-друку, кожна із яких має переваги і недоліки та здатність друкувати деталі із різноманітних матеріалів.[3]

Деталі, що виготовляються, можуть бути майже будь-якої геометрії. Це є однією із основних переваг 3D-друку. Також під час 3D-друку не потрібно мати дорогі інструменти. Це означає практично відсутність значних стартових вкладень коштів. Перевагою адитивної технології виготовлення є швидке розроблення прототипів та виробів, що виготовляються у малих обсягах.

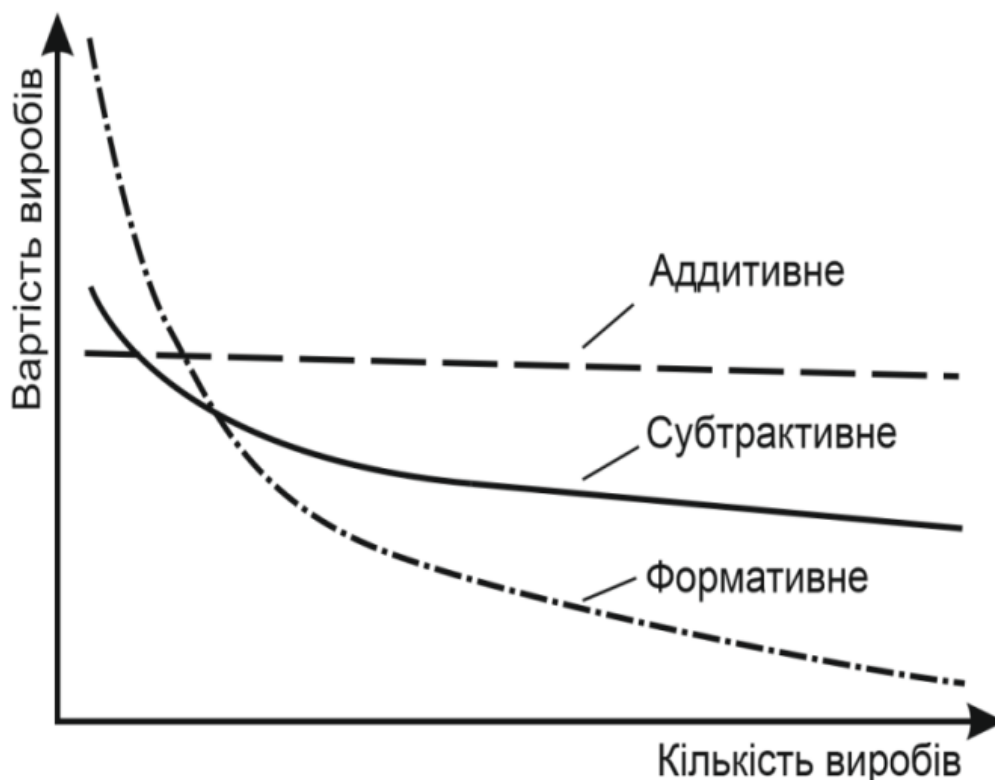


Рисунок 1.2 – Порівняння виготовлення деталей за вартістю

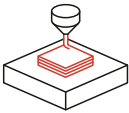
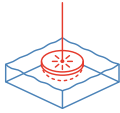
Одним із значних обмежень 3D-друку є неможливість створювати деталі із матеріалів, подібних до тих, які використовуються при субтрактивних і формативних технологіях. Більшість технологій 3D-друку дозволяють виготовити деталі, які за природою анізотропні або не порожнисті всередині. 3D-друк також обмежений у відтворюваності, тобто, надруковані деталі будуть мати незначні відмінності від 3D-моделей через нерівномірне охолодження, що зумовлює деформації під час затвердіння матеріалу.

Ціна часто є вирішальним фактором при виборі способу виготовлення деталі. Порівняти технології виготовлення деталей за вартістю дають можливість наведені на рис. 1.2 залежності.

1.1.2 Класифікація технологій 3D-друку

Для стандартизації всієї термінології, а також для класифікації кожного методу 3D-друку (7 категорій) (табл. 1.1) у 2005 році був створений стандарт ISO/ASTM 52900.[1]

Таблиця 1.1 – Класифікація технологій 3D-друку

Технологія	Опис	
 Екструзія матеріалу	Матеріал вибірково подається через сопло або жиклер	Виробництво методом плавлення нитки (англ. Fused Filament Fabrication, скор. FFF), на яке також посилаються як на моделювання пошаровим наплавленням (англ. Fused Disposition Modelling, скор. FDM)
 Полімеризація в ванні	Рідкий фотополімер у ванні вибірково твердіє під впливом світла	Стереолітографія (англ. Stereolithography, скор. SLA), цифрова світлодіодна проекція (англ. Digital Light Processing, скор. DLP)

що полегшує і прискорює роботу SLS-установки. Під час друку платформа принтера постійно опускається вниз (крок дорівнює товщині друкованого шару). Таким чином зона взаємодії матеріалу і променя лазера завжди знаходиться на одному рівні.[8]

Перевагами технології селективного лазерного спікання є: хороші механічні властивості моделі, висока міцність, точність побудови, якісні поверхні; можливість виготовлення великогабаритних виробів або цілих партій невеликих об'єктів за одну друковану сесію; не вимагає матеріалу підтримки (процес практично безвідходний, невикористаний матеріал може повторно використовуватися для друку); висока продуктивність (SLS-принтери не потребують повного розплавлення частин матеріалу).

Недоліками цієї технології є висока вартість витратних матеріалів і устаткування.

SLM або **Selective laser melting** – інноваційна технологія виробництва складних виробів за допомогою лазерного плавлення металевого порошку за CAD-моделями (3D-друк металом). Цей процес успішно замінює традиційні методи виробництва, оскільки фізико-механічні властивості виробів побудованих за технологією SLM часто є кращими ніж у виробів, виготовлених за традиційними технологіями.

Процес побудови виробів відбувається в камері SLM машини, що заповнена інертним газом – аргоном або азотом (залежно від типу порошку, з якого відбувається побудова). Практично повна відсутність кисню дозволяє уникати оксидації витратного матеріалу. [4]

Переваги технології: виробництво виробів зі складною геометрією з внутрішніми порожнинами і каналами конформного охолодження; можливість побудови складних виробів без виготовлення дорогої оснастки; економія матеріалу при виробництві.

					<i>MP.ПМКМ-46.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

1.2 Огляд фрезерно-гравірувальних верстатів

Фрезерно-гравірувальні верстати використовуються для обробки різних матеріалів, таких як дерево, пластик, метали, через видалення зайвого шару матеріалу. Такі машини зазвичай використовуються для створення складних геометричних форм або точного гравірування на виробках.

CNC-фрезерні верстати

CNC (Computer Numerical Control) фрезерні верстати широко використовуються для механічної обробки матеріалів. Вони забезпечують високу точність, автоматизацію процесів та можливість роботи з різними матеріалами.

Переваги:

- Висока точність і повторюваність операцій.
- Можливість роботи з широким спектром матеріалів (метал, дерево, пластик).

Недоліки:

- Висока вартість обладнання.
- Складність програмного забезпечення та управління верстатом.



Рисунок 1.7 – CNC-фрезерний верстат.[12]

									Арк.
									21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	MP.ПМКМ-46.00.00.000 ПЗ				

Гравірувальні верстати

Гравірувальні верстати використовуються для нанесення малюнків або тексту на поверхні деталей. Такі машини популярні в рекламній індустрії для виготовлення вивісок, а також у промисловості для маркування продукції.

Переваги:

- Висока точність гравірування.
- Можливість роботи з різними матеріалами (метали, пластики, скло).

Недоліки:

- Обмежена можливість виготовлення об'ємних деталей.
- Потребує точного налаштування для складних малюнків.



Рисунок 1.8 – Гравірувальний верстат під час роботи. [13]

					MP.ПМКМ-46.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

1.2.1 Порівняння 3D-принтерів та фрезерно-гравірувальних верстатів

Для кращого розуміння можливостей і обмежень кожного з розглянутих пристроїв, порівнюємо їх за ключовими параметрами.

Таблиця 1.2 - Порівняння 3D-принтерів та фрезерно-гравірувальних верстатів

Параметр	3D-принтери	Фрезерно-гравірувальні верстати
Матеріали	Полімери, фотополімери, металеві порошки	Метали, пластики, дерево
Точність	Висока (SLA, SLS)	Дуже висока
Швидкість виготовлення	Середня	Висока
Можливості створення геометрії	Складні внутрішні форми	Прості геометричні форми
Постобробка	Потрібна для SLA, SLS	Може потребувати полірування після обробки

Таким чином, вибір між 3D-принтером та фрезерно-гравірувальним верстатом залежить від специфіки завдань, необхідної точності, матеріалу та бюджету.

1.2.2 Особливості фрезерно-гравірувальних верстатів

Фрезерно-гравірувальні верстати є багатофункціональними пристроями, які використовуються для обробки різноманітних матеріалів, таких як метал, дерево, пластик, композити та інші. Вони виконують функції фрезерування, гравіювання, свердління, а іноді й різання. Завдяки високій точності та універсальності ці верстати знайшли широке застосування в промисловості, рекламі, ювелірній справі, виробництві меблів та сувенірів.

Основні типи фрезерно-гравірувальних верстатів:

За кількістю координат:

					<i>MP.ПМКМ-46.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

- 2D-верстати – працюють лише у двох площинах (X і Y), переважно для простого гравіювання.
- 3D-верстати – додається рух у третьому напрямку (Z), що дозволяє створювати тривимірні об'єкти.
- 4- і 5-осьові верстати – мають додаткові осі обертання, що дозволяє виконувати складну обробку з різних сторін без переналагодження.

За типом керування:

- Механічні – ручне керування. Застосовуються переважно для простих операцій.
- Із ЧПК (числове програмне керування) – автоматизовані, працюють за попередньо створеними програмами. Забезпечують високу точність і повторюваність.

За матеріалом обробки:

- Металообробні.
- Деревообробні.
- Універсальні (працюють з різними матеріалами).

Характеристики фрезерно-гравірувальних верстатів:

Завдяки високій стабільності механічної конструкції та прецизійним інструментам, верстати забезпечують точність обробки до 0,01 мм. Це дозволяє виготовляти деталі зі складною геометрією.

Швидкість роботи залежить від типу матеріалу та завдань. Для гравіювання легких матеріалів (дерева, пластику) швидкість обробки може досягати 10 000 мм/хв, тоді як метали обробляються повільніше.

Розміри робочої області різняться залежно від моделі. Наприклад, портативні верстати мають робочу зону близько 300×300 мм, тоді як промислові — до кількох метрів.

Система приводу: шариково-гвинтові пари (ШГП) – забезпечують високу точність; зубчасто-ремінна передача – менш точна, але швидка.

					<i>МР.ПМКМ-46.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

Для обробки застосовуються різні фрези, різачки та свердла, які відрізняються матеріалом, формою та діаметром.

Основні області застосування:

- Реклама: виготовлення вивісок, логотипів, 3D-елементів.
- Меблеве виробництво: різьблення по дереву, створення декоративних елементів.
- Ювелірна справа: виробництво прикрас і матриць для лиття.
- Машинобудування: створення прототипів і деталей.

Таблиця 1.3 - Переваги та недоліки:

Переваги	Недоліки
Висока точність та швидкість обробки	Висока вартість обладнання
Універсальність	Потребує налаштування та обслуговування
Можливість роботи з широким спектром матеріалів	Необхідність навчання операторів
Автоматизація процесів	

1.3 Сучасні системи керування: аналіз Mach3

Сучасні фрезерно-гравірувальні верстати широко використовують системи числового програмного керування (ЧПК), які забезпечують автоматизацію, точність та гнучкість обробки матеріалів. Однією з найбільш популярних систем керування для невеликих виробничих підприємств і домашніх майстерень є **Mach3**. [2]

Mach3 - програмне забезпечення для управління верстатом з ЧПК. Здійснює управління фрезерними, гравірувальними, токарними і іншими верстатами з ЧПК.

Червоно / Зелений індикатор (імітує світловипромінювальних діод) зверху і пару жовтих збоку. Якщо ви натиснете на цю кнопку, жовті індикатори згаснуть, а миготливий загориться постійним зеленим кольором. Mach3 готовий до роботи.

Якщо скидання не відбувається, проблема ймовірно в тому, що щось підключено до вашого паралельного порту (портів) або на ПК раніше вже був встановлений Mach3 з нетиповою розпаюванням пінів порту для Аварійного стопа (EStop сигнал). В цьому випадку ви можете тимчасово попрацювати з програмою з натиснутою кнопкою Offline, тобто в Автономному режимі.

Більшість тестів і демонстрацій з цього розділу не працюватимуть, якщо в Mach3 не здійснив скидання аварійного режиму.

Екран Виконання (Program Run) містить наступні типи об'єктів:

Кнопки (наприклад, Скидання (Reset), Стоп (Stop) Alt-S і т.д.)

Ці або Цифрову індикацію. Те, що повинно відображатися в числах, поміщено в віконця Ці.

Крім того, їх призначення дещо ширше, ніж просто - цифрова індикація. Головні з них, звичайно, вікна положення по осях X, Y, Z, A, B і C, але є Ці для відображення швидкості подачі, частоти обертання шпинделя і інших значень.

Світлові індикатори (різних розмірів і форм) «LED»

Вікно відображення керуючої програми (КП) G-кодів (зі своєю смугою прокрутки)

Вікно візуалізації маршрутів КП (зараз це порожній квадрат на вашому екрані програми) Є ще один важливий елемент управління, не представлений на екрані Виконання (Program Run).

Рядок РВД (MDI) (Ручного Введення Даних)

Кнопки, Вікна Ці і Рядок РВД призначені для введення ваших команд в Mach3.

Вікна Ці відображають стан Mach3 або можуть використовуватися для введення ваших даних. Коли ви вводите дані, їх фоновий колір змінюється.

Вікна КП G-кодів і вікна візуалізації маршрутів призначені для передачі

інформації від Mach3 вам. Ви, однак, можете маніпулювати ними (наприклад, прокручувати текст програми G- кодів, масштабувати, обертати і зрушувати зображення в вікні відображення маршрутів).

Використання кнопок і клавіш швидкого виклику

На стандартному екрані Mach3 більшість кнопок мають свої так звані "гарячі клавіші". Їх клавіатурні скорочення підписані на кнопці знизу або вказані поруч. Наприклад, щоб перейти на екран РВД, потрібно натиснути клавіші клавіатури Alt. Натиснути на клавішу або на клавіатурне поєднання - це те ж, що і клікнути мишею по кнопці на екрані. Так, гарячими клавішами або клацанням мишею, ви можете включати і вимикати шпиндель, коригувати темп подачі або скидати його до 100% -му значенням і перемикатися на режим РВД. Зауважте, що літери іноді поєднуються з клавішами Ctrl або Alt. Хоча літери показані з верхнього регістру, тобто заголовні (для зручності читання), ви не повинні натискати клавішу Shift, коли користуєтеся «гарячими клавішами» (у цій клавіші є своя функція в Mach3).[2]

В процесі роботи зручніше мінімізувати час роботи з мишею. Фізичні перемикачі на пульті управління можуть використовуватися для управління Mach3 за допомогою клавіатурного емулятора (наприклад, Ultimarc IPAC). Він підключається послідовно з вашою клавіатурою і посиляє Mach3 імітацію натискання клавіш, які відповідають кнопкам з «гарячими клавішами».

Якщо кнопки немає на поточному екрані, клавіші швидкого виклику для цієї кнопки будуть неактивні.

Є деякі спеціальні «гарячі клавіші» - Системні, які активні на всіх екранах. Глава 5 розповість, як їх налаштувати.

Введення даних у вікна ЦІ

Ви можете ввести нові дані в будь-яке вікно цифрової індикації, клацанням по ньому мишею, натисканням його «гарячих клавіш» (коли є) або Системних «гарячих клавіш», закріплених за ЦІ, і перебирати їх за допомогою клавіш зі стрілками.

					<i>МР.ПМКМ-46.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

Спробуйте ввести подачу, на сторінці Виконання (Program Run). Клацніть по віконцю індикації подачі і введіть в нього цифри. Натисніть клавішу Esc для повернення до початкового значення. Backspace і Delete не використовуються при введенні даних в ЦІ.

Не завжди можливо вводити дані у вікна ЦІ. Наприклад, реальна швидкість шпинделя, яка відображається у віконці ЦІ, є значенням, обчисленим Mach3. Будь-які введені вами сюди значення будуть відхилятися. Ви можете ввести будь-які значення в вікна ЦІ осей, але ви не повинні цього робити, поки не прочитаєте мануал Using Mach3Mill. Інструмент так перемістити не можна!

Переїзди (ручне позиціонування)

Ви можете перемістити інструмент щодо будь-якої точки вашої заготовки вручну, використовуючи різні способи Переїздів. Звичайно, на одних верстатах переміщається безпосередньо інструмент, а на інших рухається стіл і т.д. Ми будемо використовувати словосполучення «переміщення інструменту» для спрощення. Незалежно від того, чи рухається інструмент чи ні, відбувається переміщення інструмента щодо столу верстата. Говорячи «інструмент пересувається вліво», ми припускаємо, що, можливо, переміщається вправо стіл. Управління переїзд здійснюється за допомогою спеціального спливаючого вікна. Воно викликається і забирається з екрану при натисканні клавіші Tab на клавіатурі. Рис. 1.11 показує це спливаюче вікно.[2]

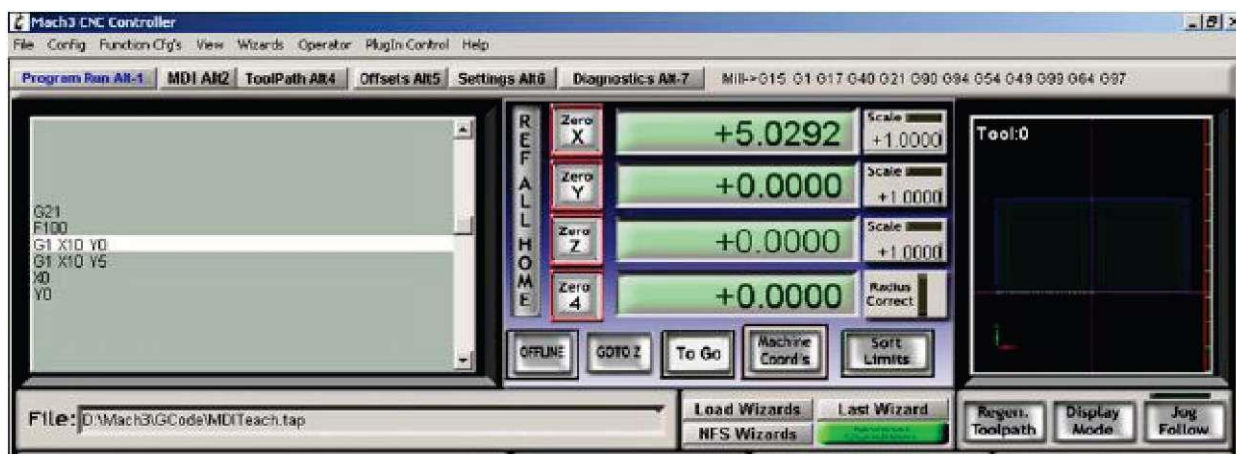


Рисунок 1.14 - Виконання КП, створеної Набором

Ви можете скористатися редактором, щоб виправити будь-які помилки і зберегти КП як файл з назвою на ваш вибір.

1.4 Порівняння Mach3 з іншими системами керування.

Системи керування числовим програмним керуванням (ЧПК) мають різні особливості, функціональні можливості та сфери застосування. Нижче наведено порівняння найпоширеніших систем: **Mach3**, **GRBL**, **TinyG** та **LinuxCNC**.

Таблиця 1.4 - Порівняння Mach3 з іншими системами керування

Параметр	Mach3	GRBL	TinyG	LinuxCNC
Тип ліцензії	Демо версія	Безкоштовна, відкрите ПЗ	Безкоштовна, відкрите ПЗ	Безкоштовна, відкрите ПЗ
Підтримуване обладнання	Комп'ютери з Windows	Мікроконтролери (Arduino)	Мікроконтролери (ARM Cortex-M3)	Комп'ютери з Linux
Максимальна кількість осей	До 6	До 3	До 4	До 9
Продуктивність	Висока, але залежить від ПК	Середня (підходить для невеликих завдань)	Середня/висока (краще, ніж GRBL)	Висока, особливо для складних завдань

системами.

- Менша спільнота користувачів, ніж у GRBL чи Mach3.
- **Сфери використання:** невеликі виробництва, складніші хобі-проекти.

LinuxCNC [6]

- **Переваги:**
 - Максимальна гнучкість і налаштування.
 - Підтримка багатьох осей (до 9) і розширеного функціоналу.
 - Реальний час обробки даних.
 - Повністю безкоштовна з відкритим кодом.
- **Недоліки:**
 - Вимагає знань Linux для налаштування і використання.
 - Більш складний інтерфейс у порівнянні з іншими системами.
 - Високі вимоги до підготовки користувача.
- **Сфери використання:** складні промислові проекти, великі підприємства.

Висновок:

- **Mach3** підходить для тих, хто шукає просту у використанні систему з широким функціоналом, особливо для малих і середніх виробництв.
- **GRBL** чудовий вибір для початківців або проектів з обмеженим бюджетом.
- **TinyG** виграє для завдань, де потрібна краща оптимізація траєкторій і додаткова вісь.
- **LinuxCNC** ідеальна для промислових завдань, де потрібна висока точність, гнучкість і підтримка багатьох осей.

					<i>МР.ПМКм-46.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

• КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

2. Проектування 3D-принтера на базі фрезерно-гравірувального верстата

Проектування 3D-принтера на основі фрезерно-гравірувального верстата передбачає адаптацію існуючої конструкції для виконання адитивного виробництва. Основна ідея полягає у модифікації механічної, електронної та програмної частин верстата для нанесення матеріалу (зазвичай пластика) пошарово.

Переваги адаптації верстата у 3D-принтер:

Модифікація фрезерно-гравірувального верстата дозволяє використовувати вже наявне обладнання, мінімізуючи витрати.

Фрезерні верстати зазвичай мають жорстку раму, яка забезпечує стабільність і точність рухів, що важливо для 3D-друку.

Верстат можна зробити багатофункціональним, оскільки його можна використовувати як для фрезерування, так і для 3D-друку, замінюючи інструменти.

Завдяки розмірам робочої платформи верстата можна друкувати об'єкти більших розмірів, ніж на звичайних 3D-принтерах.

Основні етапи проектування:

1. Механічна адаптація:

Встановлення екструдера:

1. Екструдер кріпиться на місце фрези або шпинделя.
2. Використовуються стандартні моделі екструдерів для 3D-принтерів (наприклад, Bowden або Direct Drive).

Нагрівальний стіл:

3. Для забезпечення адгезії та рівномірного нагріву пластикових виробів необхідно встановити нагрівальний стіл.
4. Враховується розмір стола, що відповідає робочій зоні верстата.

					<i>МР.ПМКМ-46.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

Модернізація осей:

5. Перевіряється точність і плавність руху осей.
6. У разі необхідності оновлюються приводи та направляючі для більшої відповідності вимогам 3D-друку.

2. Електроніка

Контролер ЧПК:

1. Система керування верстатом замінюється або адаптується для роботи з екструдером і нагрівальним столом.
2. Популярні контролери: Arduino

Додаткові компоненти:

3. Встановлюються драйвери крокових двигунів, якщо вони не підтримуються старим контролером.
4. Підключаються терморезистори для контролю температури екструдера та столу.

3. Програмне забезпечення:

ПЗ для 3D-друку:

1. Система керування ЧПК замінюється або інтегрується з програмами для 3D-друку.
2. ПЗ для нарізки моделей: Cura, PrusaSlicer, Simplify3D.

Переналаштування параметрів:

3. Вносяться зміни в G-коди, щоб адаптувати їх для друку пластиком (швидкість руху, температури).

4. Матеріали для друку

Вибір матеріалів:

ABS, PLA, PETG, TPU — стандартні матеріали для 3D-друку.

Зберігання та підготовка матеріалу:

Забезпечується зберігання філаменту у сухих умовах для запобігання його пошкодженню.

5. Труднощі та виклики

					<i>МР.ПМКМ-46.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

Зниження швидкості:

Фрезерні верстати зазвичай мають більш повільні приводи, що може вплинути на швидкість друку.

Інерція масивних компонентів:

Маса конструкції верстата може призводити до коливань, що впливають на якість друку.

Складність у налаштуванні:

Модернізація вимагає певного рівня знань у галузі механіки, електроніки та програмування.

Очікувані результати:

Модифікований 3D-принтер на основі фрезерно-гравірувального верстата дозволяє:

1. Друкувати великі об'єкти;
2. Комбінувати адитивне (3d-друк) та субтрактивне (фрезерування) виробництво;
3. Використовувати єдиний пристрій для багатофункціонального виробництва.

Проектування 3D-принтера на базі фрезерно-гравірувального верстата є перспективним рішенням для розширення можливостей виробничого обладнання. Така адаптація дозволяє зменшити витрати та підвищити універсальність пристрою, зберігаючи точність та якість.

2.1 Вибір платформи для проєкту

Розроблення 3D-принтера, заснованого на фрезерно-гравірувальному верстаті, потребує вибору надійної та функціональної апаратної бази. Для виконання завдання обрана платформа **CNC 6040Z**, яка поєднує в собі необхідні технічні характеристики та можливість модифікації під потреби 3D-друку. У цьому розділі обґрунтовано вибір платформи та її ключові переваги.

					<i>MP.ПМКМ-46.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

Основні критерії вибору:

Вибір апаратної платформи здійснювався на основі наступних критеріїв:

Точність та стабільність роботи. Для створення якісних 3D-об'єктів необхідно забезпечити високу точність руху інструменту та стабільність його позиціонування. Платформа CNC 6040Z має прецизійні кулькогвинтові пари та жорстку конструкцію, які гарантують стабільну роботу.

Розмір робочої області. Розмір робочої зони платформи (400 × 600 × 120 мм) дозволяє працювати з деталями середніх розмірів, що є достатнім для багатьох задач 3D-друку.

Модульність та можливість адаптації. CNC 6040Z розроблений для виконання фрезерувальних та гравірувальних операцій, але його конструкція дозволяє адаптувати платформу для 3D-друку за допомогою встановлення екструдера та додаткових систем нагріву.

Сумісність із системою керування Mach3. Платформа повністю сумісна із програмним забезпеченням Mach3, яке забезпечує гнучке налаштування параметрів роботи та інтеграцію нових функцій.

Основні характеристики CNC 6040Z

CNC 6040Z є популярною платформою в сегменті малогабаритних верстатів завдяки своїй доступності та функціональності. Основні технічні характеристики платформи:

Матеріал корпусу: алюмінієвий сплав, який забезпечує міцність конструкції при відносно невеликій вазі.

Привод осей: кульковинтові передачі з високою точністю та мінімальним люфтом.

Кількість осей: 3 основні осі (X, Y, Z), з можливістю модернізації до 4-х осей.

Діапазон швидкостей: регульована швидкість руху каретки від 0 до 4000 мм/хв.

Тип двигунів: крокові двигуни з високою роздільною здатністю.

					<i>MP.ПМКМ-46.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

Програмне забезпечення: підтримка G-коду та сумісність із системою Mach3.

Обґрунтування вибору

Платформа CNC 6040Z була обрана через її технічну універсальність, високі експлуатаційні характеристики та доступність для модифікації. Її конструкція дозволяє встановлювати додаткові компоненти, необхідні для реалізації функції 3D-друку, такі як екструдери, нагрівальні платформи та датчики. Крім того, інтеграція із системою Mach3 спрощує налаштування роботи пристрою, забезпечуючи високу точність та контроль процесу.

Таким чином, CNC 6040Z є оптимальною базою для створення багатофункціонального 3D-принтера.



Рисунок 2.1 - Фрезерно-гравіювальний верстат CNC 6040Z

					<i>МР.ПМКМ-46.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

2.2 Модифікація фрезерно-гравірувального верстата для роботи в режимі 3D-принтера

Для перетворення фрезерно-гравірувального верстата CNC 6040Z у 3D-принтер необхідно здійснити низку модифікацій, спрямованих на інтеграцію функціональності 3D-друку. Основні зміни стосуються встановлення екструдера, модернізації системи управління, адаптації робочої платформи та інтеграції додаткових датчиків для забезпечення стабільного друку.

Основні етапи модифікації:

Інтеграція екструдера: Основна функція 3D-принтера — нанесення розплавленого пластику пошарово для створення моделі. Для цього потрібно встановити екструдер, який є ключовим елементом системи.

Тип екструдера: обрано модель з прямим подаванням філаменту для забезпечення точного контролю подачі матеріалу.

Кріплення: для встановлення екструдера розроблено спеціальний адаптер, який інтегрується з існуючим шпиндельним кріпленням.

Електроживлення та управління: екструдер підключено до окремого драйвера з підтримкою температурного контролю.



Рисунок 2.2 – Екструдер 3Д-принтера

					<i>МР.ПМКм-46.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

Модернізація робочої платформи

Нагрівальна платформа: для запобігання відшаровуванню моделі під час друку встановлено платформу з підігрівом, яка підтримує температури до 100–120°C. Це забезпечує адгезію пластику до платформи.

Матеріал платформи: обрано алюмінієву поверхню з покриттям, що сприяє рівномірному нагріванню.

Кріплення: конструкцію платформи модифіковано для надійного монтажу на осі Z.



Рисунок 2.3 - Нагрівальна платформа

Оновлення системи керування:

Драйвери для екструдера та нагрівальної платформи: додано окремі драйвери для управління температурою нагрівальних елементів та подачею пластику.

Модифікація прошивки Mach3: внесено зміни до налаштувань програмного забезпечення, щоб підтримувати команди G-коду для 3D-друку.

					<i>MP.ПМКМ-46.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

Додаткові функції: інтеграція датчиків кінцевих положень, датчиків рівня платформи та термодатчиків для моніторингу температури.

Заміна інструментальної системи:

Фрезерний шпиндель замінено або доповнено механізмом екструдера. Це дозволяє швидко перемикатися між режимами роботи верстата (фрезерування та 3D-друк).

Калібрування системи

Після встановлення нових компонентів проведено ретельне калібрування осей, щоб забезпечити точність руху. Здійснено налаштування таких параметрів:

- Точність подачі екструдера.
- Рівність та позиціонування нагрівальної платформи.
- Точність температурного контролю нагрівальних елементів.

2.3 Вибір і встановлення екструдера та необхідних елементів для 3D-друку

У цьому розділі розглядаються особливості вибору екструдера, його встановлення та інтеграція з системою керування Mach3 для перетворення фрезерно-гравірувального верстата на 3D-принтер. Основна увага приділяється екструдеру E3D V6, який обрано за його технічні характеристики, надійність та сумісність із розробленою системою.

Екструдер на 3D-принтері — це механізм, який відповідає за подачу матеріалу (зазвичай філамента) до гарячого екструдера, де він розплавляється і наноситься на платформу для створення тривимірного об'єкта, шар за шаром. Екструдер є однією з ключових частин 3D-принтера, яка забезпечує точність і якість друку.

Основні функції екструдера на 3D-принтері:

					<i>МР.ПМКМ-46.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

Подача матеріалу: Екструдер подає пластиковий філамент (наприклад, PLA, ABS, PETG тощо) через довгу трубку до екструзійної головки, де він нагрівається та плавиться.

Нагрівання філамента: У екструдері є нагрівальний елемент, який розплавляє філамент, роблячи його текучим, щоб він міг рівномірно наноситися на будівельну платформу.

Рівномірна подача: Важливо, щоб екструдер точно і рівномірно подавав філамент до нагрівальної головки, оскільки це впливає на якість друку (наприклад, товщину шарів, міцність та акуратність).

Існують два основні типи екструдерів на 3D-принтерах:

- 1. Direct Drive Extruder (екструдер з прямим приводом):** У цьому випадку екструдер розташований безпосередньо на екструзійній головці. Це дозволяє забезпечити точніше керування подачею філамента і є корисним для матеріалів, які мають високу вимогливість до подачі, таких як TPU (еластомери).
- 2. Bowden Extruder (екструдер з Bowden-системою):** У цьому випадку екструдер віддалений від екструзійної головки і філамент подається через трубку (Bowden tube) до головки. Це дозволяє зменшити вагу рухомих частин, що підвищує швидкість друку, але може бути менш точним у деяких випадках.

Екструдер на 3D-принтері працює спільно з іншими компонентами принтера, такими як крокові двигуни, температурні датчики і контролери, щоб забезпечити правильну температуру розплавлення філамента, його подачу та точне формування кожного шару друкованої моделі

Вибір екструдера:

Екструдер є ключовим елементом 3D-принтера, який відповідає за плавлення і подачу матеріалу для друку. Серед доступних моделей для цього проекту було обрано **E3D V6**, що є популярним і універсальним рішенням для FDM-друку. Основні характеристики екструдера, які визначили вибір:

					<i>MP.ПМКМ-46.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

філамент, не дозволяючи йому ковзати.

- У **Bowden** системі шестерня зазвичай знаходиться в окремій частині принтера і передає рух через трубку до екструдера.

Подача через трубку (Bowden tube):

- У системі **Bowden** філамент подається через спеціальну трубку (так звану **Bowden tube**), що мінімізує вагу на рухомих частинах принтера (екструдер знаходиться позаду).
- Втім, це може вплинути на точність подачі, тому що існує певний опір на шляху філамента.

Температурний контроль:

- В процесі подачі, філамент потрапляє до **екструдерної головки**, де він нагрівається до необхідної температури для плавлення.
- Для підтримки стабільної подачі матеріалу важливо, щоб температура екструдера була точно контрольована, щоб філамент не перегрівався або не був недостатньо розплавлений.

Прямий екструдер (Direct Drive):

- У **прямому екструдері**, він розташовується безпосередньо на головці принтера, що дозволяє зменшити опір при подачі матеріалу і забезпечити точніше управління подачею філамента.
- Це корисно для матеріалів, які мають високі вимоги до точності подачі, таких як еластичні матеріали (наприклад, TPU).

Принцип роботи:

Мотор крокового двигуна захоплює філамент за допомогою шестерні. Шестерня передає філамент в гарячу екструзійну головку або екструдер. Пластик нагрівається до розплавленого стану. Розплавлений філамент подається через сопло на платформу, де він охолоджується та затверджується, формуючи потрібний шар.

					<i>MP.ПМКМ-46.00.00.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		<i>50</i>

Цей процес повторюється кілька разів, поки не буде побудована вся 3D-модель.



Рисунок 2.5 - Механізм подачі пластику

Драйвер крокового двигуна ТВ6600 — це потужний контролер для біполярних крокових двигунів, який забезпечує точне управління рухом. Основні характеристики:

- **Напруга живлення:** 9-42 В.
- **Максимальний струм на фазу:** 4,0 А.
- **Режими мікрокроків:** 1/1, 1/2, 1/4, 1/8, 1/16, 1/32 для точної і плавної роботи.
- **Захисти:** від перегріву, короткого замикання та перевантаження.
- **Робоча температура:** 0°C до 50°C.
- **Розміри:** 96 мм x 76 мм x 44 мм.

					<i>МР.ПМКМ-46.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

ТВ6600 ідеальний для використання в потужних 3D-принтерах, ЧПК верстатах і робототехніці завдяки високій потужності, мікрокроковому керуванню та стабільності.

Драйвер крокового двигуна — це електронний компонент, який контролює роботу крокового двигуна, перетворюючи сигнали з контролера (наприклад, з мікроконтролера 3D-принтера) в керуючі імпульси для двигуна. Драйвер крокового двигуна забезпечує точне керування рухом двигуна, регулюючи його кроки та швидкість обертання, а також може контролювати момент, що необхідний для виконання конкретних рухів.

Основні функції драйвера крокового двигуна:

Перетворення сигналів: Драйвер отримує сигнали від мікроконтролера або плати управління (наприклад, в 3D-принтері), які визначають кроки або напрямок обертання. Потім він генерує відповідні імпульси для крокового двигуна.

Контроль струму: Драйвер крокового двигуна відповідає за регулювання струму, який постачається до котушок крокового двигуна. Це важливо для точності та стабільності роботи, а також для захисту двигуна від перевантаження.

Захист від перегріву та перевантаження: Багато драйверів мають вбудовані механізми захисту, які запобігають перегріву або короткому замиканню, що дозволяє збільшити довговічність і надійність системи.

Як працює драйвер крокового двигуна:

Крокові двигуни мають декілька котушок (фаз), і для руху двигуна потрібно змінювати напрямок струму в кожній котушці, що призводить до крокового обертання валу двигуна. Драйвер крокового двигуна відповідає за подачу струму на правильні котушки в потрібній послідовності для виконання точних рухів. Залежно від типу драйвера, можуть бути використані такі режими:

					<i>MP.ПМКМ-46.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

Повні кроки (Full Step): Двигун робить один великий крок на кожен імпульс.

Півкроки (Half Step): Двигун робить половину кроку на кожен імпульс, що дає вищу точність і плавність.

Мікрокроки (Microstepping): Двигун може робити часткові кроки (наприклад, 1/16, 1/32), що дозволяє досягти дуже високої точності руху.

Приклади драйверів крокових двигунів:

A4988 — один з найбільш популярних драйверів для крокових двигунів, який підтримує режими повного, півкрокового і мікрокрокового руху. Він зазвичай використовується в 3D-принтерах для керування рухом осей.

DRV8825 — це покращений драйвер, який підтримує більшу потужність і більшу кількість мікрокроків, ніж A4988, забезпечуючи ще більшу точність і плавність руху.

TMC2208, TMC2130, TMC2209 — це більш дорогі драйвери, що забезпечують надзвичайно тиху та ефективну роботу крокових двигунів завдяки використанню технології сенсора струму для кращого управління струмом і забезпечення ще більш високої точності.

Важливі характеристики драйверів крокових двигунів:

Номінальна напруга та струм: Драйвер повинен відповідати характеристикам крокового двигуна, тобто підтримувати потрібний рівень напруги і струму для нормальної роботи.

Технологія мікрокроків: Драйвери з підтримкою мікрокроків дозволяють більш плавно і точно керувати рухом двигуна.

Режими захисту: Драйвери часто мають вбудовані системи захисту від перевантаження, короткого замикання та перегріву.

Шум і вібрація: Крокові двигуни без належного управління можуть видавати значний шум і створювати вібрації, що може вплинути на якість друку.

					<i>MP.PMKM-46.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

Технології, які зменшують цей ефект, дуже важливі в 3D-принтерах для отримання високоякісних результатів.

Драйвер крокового двигуна є необхідним компонентом для точного управління кроковими двигунами в 3D-принтерах, забезпечуючи правильну подачу імпульсів і контроль за струмом. Правильний вибір драйвера важливий для забезпечення високої точності, стабільності та якості друку, а також для мінімізації шуму та вібрацій при роботі 3D-принтера.



Рисунок 2.6 - Драйвер крокового двигуна ТВ6600

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

MP.ПМКМ-46.00.00.000 ПЗ

Арк.

54

Нагрівальний стіл:

Алюмінієва нагрівальна платформа розмірами 400x400 мм є пристроєм, що використовується для нагріву або підтримки температури різних матеріалів, зазвичай у 3D-друці, лабораторних роботах або інших технічних процесах. Характеристики таких платформ можуть варіюватися в залежності від виробника, але загалом вони мають такі параметри:

Розмір: 400x400 мм — це розмір нагрівальної поверхні платформи.

Матеріал: Платформа виготовлена з **алюмінію**, що має хорошу теплопровідність, високу корозійну стійкість і легкість.

Номінальна потужність: Зазвичай потужність таких платформ коливається від **300 до 1000 Вт**, залежно від товщини і конструкції елементів нагріву.

Температурний діапазон: Платформи можуть працювати в діапазоні температур від **0 до 120-150°C**, залежно від типу використаної системи нагріву.

Напруга: 24 В.

Теплопровідність: Алюміній має високу теплопровідність (до 205 Вт/м·К), що дозволяє рівномірно прогрівати всю платформу.

Тип підключення: Зазвичай мають кабелі для підключення до джерела живлення і систему управління температурою (термодатчики, регулятори).

Ці платформи можуть бути використовувані в різних сферах, в тому числі як 3D-друк (для забезпечення адгезії до робочої поверхні), нагрів матеріалів або в промислових застосуваннях для рівномірного прогріву.

Датчик температури (термістор):

Термістор з опором **100 кОм** є одним із поширених типів температурних сенсорів, які використовуються у 3D-друку для моніторингу температури нагрівальних платформ або екструдерів.

Ось основні характеристики термістора **100 кОм** для 3D-друку:

					<i>MP.PMKM-46.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

Опір: 100 кОм при 25°C — це стандартний опір для більшості термісторів, які використовуються в 3D-принтерах для вимірювання температури. Зі зміною температури його опір змінюється, і це дозволяє відслідковувати температуру.

Тип термістора: Це NTC (**Negative Temperature Coefficient**) термістор, що означає, що його опір зменшується при підвищенні температури. Чим вища температура, тим менший опір термістора.

Температурний діапазон: Зазвичай термістори 100 кОм мають робочий діапазон температур від -40°C до 300°C. Це дозволяє використовувати їх для вимірювання температури як екструдерів (до 250-300°C), так і нагрівальних платформ (до 100-120°C).

Тип підключення: Термістори зазвичай мають два проводи (позитивний і негативний), які підключаються до плати керування принтером (наприклад, до роз'єму для температурного датчика на платі контролера).

Чутливість: Термінатор 100 кОм має лінійний або майже лінійний характер зміни опору в залежності від температури, що дозволяє точно вимірювати температуру на платформі чи екструдері.

Калібрування: Щоб правильно працювати з таким термістором, у принтері або контролері необхідно встановити відповідну таблицю для термістора. Багато 3D-принтерів мають вбудовані профілі для найпоширеніших типів термісторів, таких як 100к.

Призначення: Використовується для точного контролю температури в 3D-принтерах, особливо для нагрівальних платформ і екструдерів. Завдяки цьому забезпечується стабільний процес друку без перегріву або недогріву.

Важливі моменти:

Точність вимірювань: Термістори 100 кОм зазвичай мають високу точність і стабільність, але правильне калібрування є необхідним для отримання точних результатів.

					<i>MP.PMKM-46.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

Вибір термістора: Існують різні моделі термісторів, і важливо вибрати саме ту, яка підходить для вашої моделі 3D-принтера, оскільки різні принтери можуть вимагати різних датчиків.

Термістори 100 кОм є важливим елементом, що забезпечує стабільний та ефективний процес 3D-друку, допомагаючи підтримувати потрібну температуру на всіх етапах.

Система охолодження:

Вентилятори для охолодження друкованого матеріалу та радіатора екструдера. Це необхідно для уникнення перегріву зони плавлення і забезпечення якісного формування моделі.

Кріплення для екструдера:

Спеціальний адаптер для монтажу E3D V6 на рухомий портал верстата. Конструкція адаптера враховує необхідність жорсткої фіксації екструдера та збереження його вирівнювання по осі.

Установка екструдера:

Процес встановлення екструдера включав такі етапи:

Розробка і друк кріплень: адаптер для кріплення екструдера було створено за допомогою CAD-програм, а потім виготовлено на 3D-принтері.

Монтаж екструдера: E3D V6 встановлено на адаптер і закріплено до порталу верстата. Під час монтажу враховано точне позиціонування відносно осей X, Y і Z.

Підключення електрики: до плати контролера під'єднано проводи для живлення нагрівального елемента, термістора та вентилятора.

Калібрування системи: виконано калібрування температури нагріву екструдера, швидкості подачі філаменту та координатного позиціонування.

					<i>MP.ПМКМ-46.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

2.4 Електрична інтеграція та розробка програмного забезпечення для управління температурою системи 3D-принтера

Виконано підключення екструдера до контролера Mach3 через плату Arduino для керування нагріванням та виведення значень на дисплей LCD2004. Підключення реле для контролю температури нагрівальної платформи.

Arduino Micro:

Arduino Micro — це компактна плата на базі ATmega32U4, що входить до сімейства Arduino. Вона схожа на Arduino Leonardo, але має менші розміри.

Arduino Micro підходить для проєктів, де потрібен малий розмір плати та можливість підключення до комп'ютера чи інших пристроїв як USB-периферія.

Основні характеристики Arduino Micro:

Мікроконтролер: ATmega32U4.

Частота процесора: 16 МГц.

Пам'ять:

- Flash пам'ять: 32 КВ (з яких 4 КВ використовуються для завантажувача).
- SRAM: 2.5 КВ.
- EEPROM: 1 КВ.

Цифрові входи/виходи: 20 пінів, з яких 7 можуть використовуватися як ШІМ (PWM) виходи, і 12 можуть використовуватися як аналогові входи.

USB-інтерфейс: Плата має вбудований USB-інтерфейс через чіп ATmega32U4, що дозволяє їй виступати як USB-периферія (наприклад, клавіатура, миша, MIDI пристрій).

Тактова частота: 16 МГц.

Напруга живлення:

- USB: 5V.
- Зовнішнє джерело живлення: 7-12V (через роз'єм "Vin" або пін "RAW").

Програмування: Використовує Arduino IDE для програмування.

					<i>МР.ПМКМ-46.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

Особливості Arduino Micro:

Вбудований USB: Arduino Micro може працювати безпосередньо через USB без необхідності в додаткових перетворювачах рівнів, як у багатьох інших платах Arduino.

Компактні розміри: Плата має розмір всього 48 мм x 18 мм, що робить її ідеальною для проєктів, де важливий мінімальний простір.

Інтерфейс USB: Плата має вбудований інтерфейс USB, що дозволяє підключати її до комп'ютера для програмування та комунікації.

Швидкість обробки даних: Завдяки використанню мікроконтролера ATmega32U4 з вбудованим USB-контролером, Arduino Micro може реалізувати швидке з'єднання через USB для різних задач.

Як підключити Arduino Micro до комп'ютера:

1. Підключіть плату через **USB-кабель** (тип А до типу Mini-B) до комп'ютера.
2. Відкрийте **Arduino IDE**, виберіть плату **Arduino Micro** у меню **Tools** → **Board** → **Arduino Micro**.
3. Виберіть порт, на якому підключена плата, в меню **Tools** → **Port**.
4. Завантажуйте скетч на плату, натиснувши на кнопку **Upload**.

Схема підключення:

Живлення: Плата може живитися безпосередньо через USB або зовнішнє джерело через пін Vin або RAW.

Піни: Ви можете використовувати піни для підключення сенсорів або актуаторів, таких як сервомотори, реле, світлодіоди, кнопки тощо.

Огляд використання Arduino Micro:

Arduino Micro ідеально підходить для проєктів, де необхідний маленький розмір плати з можливістю взаємодії з комп'ютером через USB. Завдяки своїм

					<i>MP.ПМКМ-46.00.00.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		<i>59</i>

Інтерфейс: Підключається до Arduino через інтерфейс I2C або паралельний інтерфейс.

Тип дисплею: Зазвичай має зелений або синій фон з білими або блакитними символами.

Підключення LCD2004 до Arduino:

Через паралельний інтерфейс (без I2C):

У цьому випадку дисплей підключається безпосередньо до пінів Arduino, і вам потрібно підключити 6 пінів для керування дисплеєм:

- **RS** (Register Select) — вибір регістру для команд або даних.
- **E** (Enable) — вмикає команду.
- **D4, D5, D6, D7** — дані, які передаються в дисплей.
- **VSS** — земля.
- **VDD** — живлення.
- **V0** — регулювання контрастності (підключається до потенціометра для регулювання контрасту дисплею).

Через інтерфейс I2C:

За допомогою модуля I2C дисплей можна підключити лише за допомогою 4 пінів:

- **VCC** — живлення (зазвичай 5V).
- **GND** — земля.
- **SDA** — дані (Serial Data).
- **SCL** — тактова лінія (Serial Clock).

Це дозволяє заощадити пін Arduino, оскільки лише два пінів використовуються для передачі даних.

Підключення дисплея через I2C:

Підключіть дисплей до Arduino:

- **VCC** до **5V** на Arduino.

					<i>МР.ПМКМ-46.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

- **GND** до **GND** на Arduino.
- **SDA** до **A4** на Arduino (для Arduino Uno).
- **SCL** до **A5** на Arduino (для Arduino Uno).

Застосування:

Показ даних сенсорів (температура, вологість, тиск тощо). Виведення текстових повідомлень або налаштувань. Створення інтерфейсів для користувача для проектів на основі Arduino.

LCD2004 є чудовим вибором для відображення текстових даних у проектах, де потрібно мати доступ до 4 рядків тексту.



Рисунок 2.8 – Дисплей LCD2004

Кроки для інтеграції екструдера з контролером Mach3 через Arduino:

Інтеграція з Mach3

Контролер Mach3 забезпечує гнучке управління процесом друку. Для інтеграції екструдера з Mach3 були реалізовані наступні дії:

- Налаштовано керування кроковим двигуном подачі філамента через доступні виходи контролера.

Завдяки правильно обраному екструдеру, належній інтеграції з механікою і системою управління вдалося досягти стабільної роботи системи та якісного 3D-друку.

Механізм керування екструдером через Arduino:

Arduino використовується для управління термістором екструдера та нагрівальним елементом

Керування нагріванням:

В Arduino програмі може бути реалізовано керування температурою екструдера, що здійснюється через термістор (для визначення поточної температури) і силовий транзистор (MOSFET), який вмикає або вимикає живлення для нагрівального елемента.

Програмне забезпечення на Arduino може коригувати температуру екструдера за допомогою ПІД-регулятора (Пропорційно-Інтегрально-Диференційного), щоб підтримувати стабільну температуру.

Програмне забезпечення для Arduino:

Для налаштування та програмування Arduino можна використовувати **Arduino IDE**. Код Arduino включатиме:

- Зчитування температури з термістора.
- Керування температурою за допомогою ПІД-регулятора.
- Взаємодія з Mach3 для отримання налаштувань температури.

Опис Реле Tongling JQC-3FF-S-Z

					<i>MP.ПМКМ-46.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

Реле Tongling JQC-3FF-S-Z — це реле, яке зазвичай використовується для керування електричними навантаженнями, такими як нагрівальні елементи або інші пристрої, що потребують комутації високих струмів. Це реле з комутацією на постійний струм (DC) та з потенціалом для використання на змінному струмі (AC). Ось основні характеристики і застосування цього реле для керування нагрівом нагрівальної платформи в 3D-принтері.

Основні характеристики реле JQC-3FF-S-Z:

Тип реле: Мініатюрне реле, яке працює за принципом електромагнітного перемикання.

Навантаження (контактні параметри):

- **Максимальна робоча напруга:** 250V AC або 30V DC.
- **Максимальний струм:** 10A при 250V AC або 30V DC (залежить від типу струму).

Напруга управління: 5V DC , залежно від моделі. Це означає, що реле спрацьовує при подачі напруги на котушку керування.

Тип контактів: Зазвичай має **NO (Normally Open)**, що означає, що контакти замкнуться тільки при подачі живлення на котушку.

Час спрацьовування: Швидке спрацьовування (менше 10 мс).

Використовувані матеріали: Корпус з пластика, контакти можуть бути з золотої фольги або срібла, що забезпечує надійну провідність.

Застосування реле для керування нагріванням нагрівальної платформи:

Реле може бути використано для включення або вимикання нагрівальної платформи в 3D-принтері.

Кроки для використання реле JQC-3FF-S-Z:

Підключення реле до Arduino:

					<i>MP.PMKM-46.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

Розробка програмного забезпечення для управління температурою системи 3D-принтера

Детальний текст програмного коду наведено в Додатку А. У ньому структуровано подано всі функції, змінні та алгоритми, необхідні для роботи системи.

Основною метою розробки програмного забезпечення є створення системи управління температурою екструдера, нагрівального стола та вентилятора 3D-принтера. Це забезпечує стабільну роботу системи, підтримання заданих температур

Основні функціональні можливості:

Вимірювання температури:

Температура екструдера та нагрівального стола вимірюється за допомогою термісторів, підключених до аналогових входів мікроконтролера.

Розрахунок температури проводиться за формулою, яка базується на характеристиках термістора та використанні логарифмічної залежності опору від температури.

Управління нагрівальними елементами:

MOSFET транзистори використовуються для включення та відключення нагрівальних елементів залежно від температури, зчитаної з термісторів, і заданого користувачем значення.

Управління вентилятором:

Вентилятор активується автоматично при перевищенні температури 30 °С, що дозволяє запобігти перегріванню компонентів системи.

Взаємодія з користувачем через LCD-дисплей:

Інтерфейс користувача реалізований на базі LCD-дисплея з I2C-з'єднанням. Він дозволяє:

Відображати поточну температуру екструдера і нагрівального стола.

Встановлювати бажані температури за допомогою енкодера.

					<i>МР.ПМКМ-46.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

Апаратна частина:

Для реалізації системи управління температурою 3D-принтера було розроблено електричну схему, яка забезпечує коректне підключення термісторів, MOSFET транзисторів, вентилятора, нагрівальних елементів, LCD-дисплея та енкодера до мікроконтролера.

Детальна електрична схема системи наведена в **Додатку Б**. Вона показує взаємозв'язки між компонентами, напруги живлення, а також особливості підключення датчиків і виконавчих елементів.

Мікроконтролер: Arduino (або інший сумісний контролер).

Датчики температури: Термістори з характеристичним значенням $\beta=3950$.

Нагрівальні елементи: Підключені через MOSFET транзистори для контролю потужності.

LCD-дисплей: LiquidCrystal I2C для відображення інформації та взаємодії з користувачем.

Енкодер: Використовується для навігації та встановлення параметрів.

Програмна реалізація:

Програмне забезпечення написано мовою C++ із використанням бібліотек Arduino IDE. Логіка системи базується на таких модулях:

Функції розрахунку температури:

Розрахунок температури реалізовано у функціях Thermister і ThermisterTable. Обчислення виконується за формулою:

$$T = \frac{\beta}{\ln\left(\frac{R_{\text{терм}} \cdot (1025.0/D - 1)}{R_{\text{опор}}}\right) + \frac{\beta}{298}} - 273,$$

де D — дані з АЦП.

Контроль нагрівання:

Температура порівнюється з бажаною, і на основі результату нагрівальний елемент увімкнено або вимкнено.

Цикл основної програми:

					<i>МР.ПМКМ-46.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

Головний цикл виконує:

Зчитування поточної температури.

Відображення значень на дисплеї.

Оновлення станів нагрівальних елементів і вентилятора.

Перевірку вводу користувача через енкадер.

Таймери та затримки:

Замість блокуючих функцій (delay) використовується контроль часу через функцію millis(), що дозволяє забезпечити безперервну роботу системи.

Інтерфейс користувача:

На LCD-дисплеї відображається поточна температура екструдера та стола, а також значення, встановлені користувачем. Зміна температурних параметрів здійснюється за допомогою енкадера. Після підтвердження введених даних система оновлює значення цільової температури.

Переваги реалізації

Простота у використанні завдяки інтуїтивному інтерфейсу.

Надійність завдяки використанню апаратних таймерів.

Адаптивність: система може бути легко налаштована для роботи з іншими датчиками та елементами.

Розроблене програмне забезпечення забезпечує надійний контроль температури 3D-принтера, враховуючи технічні вимоги до системи. Його можна інтегрувати у складніші проекти або адаптувати для інших задач, пов'язаних із температурним контролем.

					<i>МР.ПМКМ-46.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68

3. Розробка системи керування на основі Mach3

Система керування є ключовим компонентом для забезпечення синхронної роботи механічної частини фрезерно-гравірувального верстата, модифікованого для функціонування як 3D-принтер. У цьому розділі розглянуто принципи побудови системи керування на основі програмного забезпечення **Mach3**, її конфігурацію, налаштування та інтеграцію з новими елементами, необхідними для 3D-друку.

3.1 Архітектура системи керування

Модифікована система керування включає такі основні компоненти:

1. **Контролер ЧПК:** використовується LPT-контролер, сумісний із Mach3, для керування кроковими двигунами та периферійними пристроями.
2. **Екструдер:** підключено як окремий пристрій, керування яким здійснюється через додатковий вихід контролера.
3. **Нагрівальний елемент і термістор:** інтегровані через модуль керування температурою, який синхронізується з Mach3 через макроси.
4. **Система охолодження:** вентилятори підключено до живлення через реле з можливістю увімкнення/вимкнення через програму.
5. **Графічний інтерфейс користувача:** модифіковано для відображення параметрів 3D-друку, таких як температура екструдера та стола, швидкість подачі філамента тощо.

3.2 Налаштування Mach3 для 3D-друку.

Конфігурація осей

Для роботи системи 3D-друку необхідно було налаштувати параметри руху осей X, Y, Z і екструдера (A):

- **Крокові двигуни:** задано параметри мікрокроку, швидкості та прискорення для кожної осі.
- **Калібрування координат:** визначено точність переміщення осей шляхом

					<i>МР.ПМКМ-46.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		69

тестового друку.

- **Синхронізація з подачею матеріалу:** забезпечено узгодження швидкості руху порталу із подачею філамента для уникнення надлишкової чи недостатньої екструзії.

Налаштування екструдера

Екструдер додано як четверту вісь (E), для якої було задано:

- Частоту імпульсів для крокового двигуна.
- Макроси для управління температурою екструдера та подачею матеріалу.
- Калібрування довжини подачі філамента, що забезпечує точність подачі матеріалу в процесі друку.

3.3 Інтеграція Mach3 із середовищем для 3D-друку

Для забезпечення коректної роботи з популярними слайсерами (наприклад, Cura або PrusaSlicer) було виконано налаштування параметрів експорту G-кодів:

- Створено профіль для верстата з урахуванням його робочих обмежень.
- Оптимізовано параметри стартових і фінальних команд для синхронізації роботи верстата.

Розділ 4. Аналіз ефективності розробленої системи

4.1 Випробування на практичних моделях

Для оцінки ефективності розробленої системи проведено серію випробувань на практичних моделях, що включають друк об'єктів різної складності та геометрії. Зокрема, були використані тестові моделі з гострими кутами, складними поверхнями, а також з порожнинами, які зазвичай є викликом для 3D-друку.

Система продемонструвала стабільну роботу екструдера та нагрівальної платформи. Під час друку великогабаритних моделей система забезпечує рівномірність нанесення матеріалу навіть у крайніх зонах робочої платформи,

					<i>MP.ПМКМ-46.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		70

що свідчить про точне налаштування механізмів. Датчики температури і система охолодження забезпечують контроль параметрів, необхідних для якісного друку без викривлень і дефектів.

4.2 Оцінка точності та якості друку

Точність та якість друку аналізувалися за кількома критеріями, такими як геометричні відхилення, шорсткість поверхні та структурна міцність виготовлених деталей. Після проведення аналізу були виявлені наступні особливості:

Геометрична точність. Результати вимірювань показують, що друкowana система забезпечує точність у межах $\pm 0,2$ мм, що є прийнятним показником для пристроїв класу FDM. Це стало можливим завдяки надійній конструкції платформи CNC 6040Z, а також стабільній роботі екструдера E3D V6.

Якість поверхонь. Шорсткість поверхні друкowanych деталей залежала від вибраних параметрів друку, таких як висота шару та швидкість екструзії. При використанні висоти шару 0,1 мм вдається досягти гладкої поверхні з мінімальною кількістю видимих шарів. Однак, для складних моделей із нахиленими поверхнями можливе покращення за рахунок подальшого налаштування системи.

Міцність деталей. Друковані вироби мають достатню механічну міцність для використання в практичних умовах. Особливо це стосується матеріалів PLA та PETG, які продемонстрували високу адгезію між шарами.

4.3 Порівняння із традиційними 3D-принтерами

Розроблена система була порівняна з комерційними 3D-принтерами аналогічного класу. Основними критеріями оцінки стали функціональні можливості, економічність та якість друку.

Функціональність. Завдяки універсальності платформи CNC 6040Z, пристрій дозволяє комбінувати адитивне (3D-друк) та субтрактивне (фрезерування) виробництво, чого неможливо досягти на звичайних FDM-

					<i>MP.ПМКМ-46.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		71

принтерах. Це значно розширює сферу застосування системи.

Економічність. Вартість модифікації фрезерно-гравірувального верстата є значно нижчою порівняно з покупкою нового багатофункціонального 3D-принтера. Крім того, система забезпечує низькі експлуатаційні витрати завдяки використанню стандартних комплектуючих.

Якість друку. За якістю друку система трохи поступається спеціалізованим 3D-принтерам преміум-класу через масивність платформи та меншу швидкість друку. Однак, точність і стабільність роботи залишаються на високому рівні, що робить її конкурентоспроможною для середніх і великих деталей.

У результаті проведеного аналізу було підтверджено, що розроблена система є ефективним рішенням для завдань, які потребують універсальності та економічності, забезпечуючи при цьому прийнятну якість друку для більшості практичних застосувань.

4.4 Перспективи подальшого вдосконалення проєкту

Для забезпечення подальшого розвитку системи пропонуються такі напрями:
Розширення функціональних можливостей.

Інтеграція нових інструментів, таких як лазер для різання чи свердлильний модуль, дозволить значно підвищити багатозадачність пристрою.

Підтримка нових матеріалів.

Модернізація екструдера та платформи для роботи з матеріалами високої температури розширить спектр застосувань, зокрема у промислових галузях.

Автоматизація налаштувань.

Встановлення датчиків автоматичного калібрування платформи зменшить час підготовки та підвищить зручність використання.

Покращення програмного забезпечення.

Перехід на більш сучасне ПЗ або розробка спеціалізованого інтерфейсу для роботи з комбінованими технологіями дозволить підвищити зручність та ефективність роботи.

Оптимізація конструкції.

					<i>МР.ПМКМ-46.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		72

Використання легших компонентів знизить навантаження на систему приводу, що дозволить підвищити швидкість друку.

Виконані дослідження створюють фундамент для подальшого вдосконалення пристрою, що дозволить йому зайняти нішу серед універсальних рішень у сфері 3D-друку та обробки матеріалів.

					<i>МР.ПМКМ-46.00.00.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		<i>73</i>

Висновки

У ході виконання магістерської роботи було розроблено багатофункціональну систему на базі фрезерно-гравірувального верстата CNC 6040Z, адаптовану для виконання функцій 3D-друку. У процесі дослідження було розглянуто всі аспекти, пов'язані з проектуванням, модифікацією, тестуванням та оцінкою ефективності системи.

У першій частині дослідження проведено огляд існуючих 3D-принтерів та фрезерно-гравірувальних верстатів. Визначено ключові характеристики та обмеження різних технологій, таких як FDM, SLA та SLS для 3D-друку, а також CNC-систем для субтрактивного виробництва. Це дозволило сформулювати чітке уявлення про можливості інтеграції двох різних підходів у єдиній системі.

Для реалізації проєкту обрано CNC 6040Z як базову платформу завдяки її технічним характеристикам: міцній конструкції, високій точності та наявності широкої робочої зони. Сумісність з Mach3 забезпечила зручність інтеграції компонентів для 3D-друку.

Проведено адаптацію механічних, електронних та програмних компонентів платформи. Встановлено екструдер E3D V6, нагрівальну платформу та датчики, що дозволило додати функцію 3D-друку. Система керування на основі Mach3 успішно адаптована для роботи з новими елементами, забезпечуючи точне управління процесами друку.

Використання існуючої платформи значно зменшило витрати порівняно з придбанням окремого 3D-принтера та збереження фрезерно-гравірувального верстата. Це підтверджує доцільність комбінованого підходу.

Розроблена система продемонструвала конкурентні переваги, такі як можливість комбінованого адитивного та субтрактивного виробництва. Водночас є певні обмеження, наприклад, нижча швидкість друку та складність налаштувань для користувачів без відповідного досвіду.

У процесі роботи були вирішені технічні проблеми, пов'язані з інерційністю масивної конструкції платформи, інтеграцією екструдера та стабілізацією

					<i>МР.ПМКМ-46.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		74

нагрівальної платформи. Це дозволило отримати повністю функціональну систему з можливістю подальшого вдосконалення.

Здійснена в даній магістерській роботі розробка 3D-принтера на базі фрезерно-гравірувального верстата може бути розвинута для вдосконалення технології та обладнання наплавлення електродугових покриттів. Аналогічно пошаровому нанесенню пластикового філаменту, процес електродугового наплавлення може бути реалізований шляхом пошарового формування покриття. Mach3 як система ЧПК підтримує G-коди, що дозволяють детально програмувати процес наплавлення, регулювати швидкість переміщення, висоту інструмента та параметри дугового процесу.

У процесі роботи з 3D-принтером велика увага приділяється температурі екструдера, що може бути модифіковано для налаштування температурного режиму наплавлення та контролю стабільності дуги, що є критично важливим для якісного нанесення електродугових покриттів. Системи моніторингу та регулювання розроблені у магістерській роботі можуть бути адаптовані для підтримання стабільного струму та напруги дуги.

Подібний верстат буде багатофункціональним, дозволяючи як субтрактивне фрезерування, так і адитивний друк та наплавлення: субтрактивна обробка дозволить вирівнювати шари покриття або проводити їх фінішну обробку, а адитивне наплавлення забезпечить створення міцних електродугових покриттів.

Тестування параметрів у роботі (температура, швидкість подачі матеріалу) є основою для подальших досліджень із налаштування: швидкості подачі порошкового електрода; струмових режимів дугового наплавлення; оптимізації траєкторій руху для забезпечення рівномірності покриття.

Узагальнюючи результати дослідження, можна стверджувати, що створення 3D-принтера на базі фрезерно-гравірувального верстата є перспективним напрямом для забезпечення універсальності, економічності та функціональності. Розроблений пристрій відкриває нові можливості для малого бізнесу, навчальних закладів та індивідуальних користувачів.

					<i>МР.ПМКМ-46.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		75

12. Фрезер з ЧПК Яструб 4060 для бізнесу. Верстат з ЧПК 2021 року - CNC Machines. URL: <https://cncmachines.com.ua/uk/product/yastreb-4060/>
13. X3 Pro 10W Laser Engraving Machine With Air Pump Kit. Меспов. URL: <https://mecpow.com/products/mecpow-x3-pro-10w-laser-engraver>

					<i>МР.ПМКМ-46.00.00.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		<i>77</i>

Додатки:

Додаток А

```
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C_Menu.h>

LiquidCrystal_I2C_Menu lcd(0x27, 20, 4); // Підключення LCD на адресі 0x3F

#define MY_PERIOD 7000 // період в мс
uint32_t tmr1; // змінна таймера
#define beta 3950
#define resistance 100
int mosfetPin = 6; // Пін для управління MOSFET
double targetTemperature = 0; // Задана температура екструдера
int mosfetPinTable = 5;
double targetTemperatureTable = 0; // Задана температура стола
int mosfetPinFun = 8;

double Thermister(int data)
{
    double temp;
    temp = beta / (log((1025.0 * resistance / data - resistance) / resistance) + beta /
298.0) - 273.0;
    //temp = log(10000.0 * ((1024.0 / data - 1)));
    //temp = 1 / (0.001129148 + (0.000234125 + (0.0000000876741 * temp * temp)) *
temp);
    //temp = temp - 273.15;
    Serial.println(" ");
    Serial.print(temp);
    Serial.print(" Celsius");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("Temp EXTR=");
    lcd.print(temp);
    lcd.print("C");
    delay (300);

    // Управління нагрівальним елементом екструдера на основі заданої температури
    if (temp < targetTemperature) {
        digitalWrite(mosfetPin, HIGH); // Увімкнути нагрівальний елемент
    } else {
        digitalWrite(mosfetPin, LOW); // Вимкнути нагрівальний елемент
    }

    // Включення вентилятора при температурі 30 градусів
    if (temp > 30) {
```

					<i>МР.ПМКМ-46.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		78

```

    digitalWrite(mosfetPinFun, HIGH); // Включити вентилятор
} else {
    digitalWrite(mosfetPinFun, LOW); // Вимкнути вентилятор
}

}

double ThermisterTable(int data)
{
    double tempTable;
    tempTable = beta / (log((1025.0 * resistance / data - resistance) / resistance) +
beta / 298.0) - 273.0;
    //temp = log(10000.0 * ((1024.0 / data - 1)));
    //temp = 1 / (0.001129148 + (0.000234125 + (0.0000000876741 * temp * temp)) *
temp);
    //temp = temp - 273.15;
    Serial.println(" ");
    Serial.print(tempTable);
    Serial.print(" Celsius");
    lcd.setCursor(0, 3);
    lcd.print("Temp Table=");
    lcd.print(tempTable);
    lcd.print("C");
    delay (300);

    // Управління нагрівальним елементом стола на основі заданої температури
    if (millis() - tmr1 >= MY_PERIOD) { // шукаємо різницю
        tmr1 = millis(); // скидання таймера
        if (tempTable < targetTemperatureTable) {
            digitalWrite(mosfetPinTable, LOW); // Увімкнути нагрівальний елемент стола
        } else {
            digitalWrite(mosfetPinTable, HIGH); // Вимкнути нагрівальний елемент стола
        }
    }
}

unsigned long tm = 0;
bool ledState = false;

// Функція, яка буде викликана при бездіяльності
//void myIdleFunc() {
//    if (millis() - tm >= 500) {
//        tm = millis();
//        ledState = !ledState;
//        digitalWrite(LED_BUILTIN, ledState);

```

					<i>MP.ПМКМ-46.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		79

```

// }
//}

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  lcd.begin();
  lcd.attachEncoder(A1, A2, A3);
  // lcd.attachIdleFunc(myIdleFunc);
  lcd.backlight();
  pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);
  pinMode(mosfetPin, OUTPUT); // Встановити пін для управління MOSFET як вихідний
  pinMode(mosfetPinTable, OUTPUT); // Встановити пін для управління MOSFET як
вихідний
  pinMode(mosfetPinFun, OUTPUT); // Встановити пін для управління MOSFET як вихідний
  lcd.print("Press to set Temp");
}

int x = 20;
int a = 45;
int i;
int s;

void loop() {

  // myIdleFunc();
  i = analogRead(A0);
  Thermister(i);
  s = analogRead(A4);
  ThermisterTable(s);

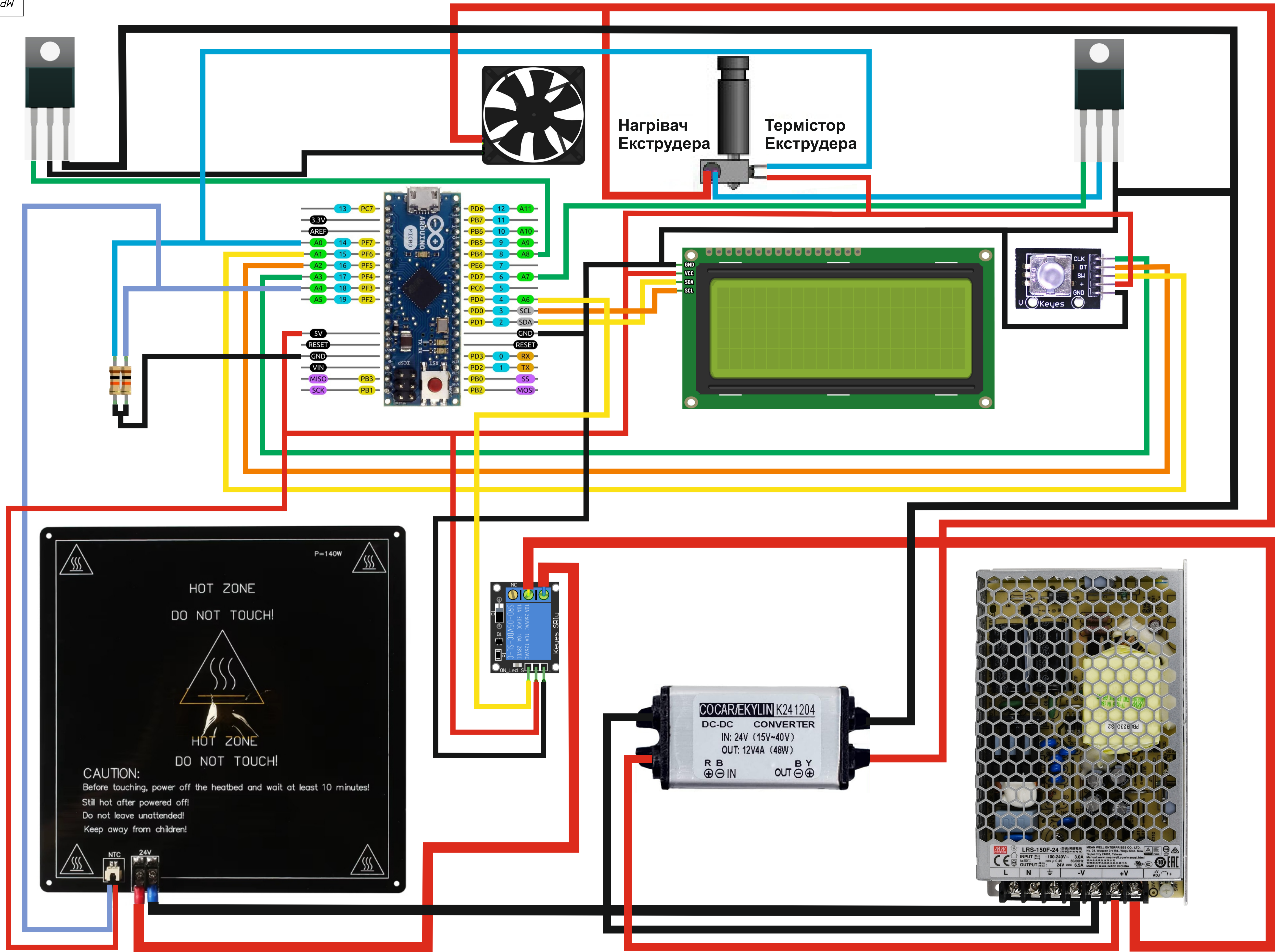
  if (lcd.getEncoderState() == eButton) {
    x = lcd.inputVal("Set Temp Extruder", 0, 240, x);
    a = lcd.inputVal("Set Temp Table", 0, 240, a);
    lcd.clear();
    Serial.println(" ");
    Serial.print(x);
    Serial.print(" Set Temp");
    Serial.println(" ");
    Serial.print(targetTemperature);
    Serial.print(" Set Temp");
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("Set EXTR=");
    lcd.print(x);
    lcd.print("C");
    lcd.setCursor(0, 2);
    lcd.print("Set Temp Table=");
  }
}

```

					<i>МР.ПМКМ-46.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		80

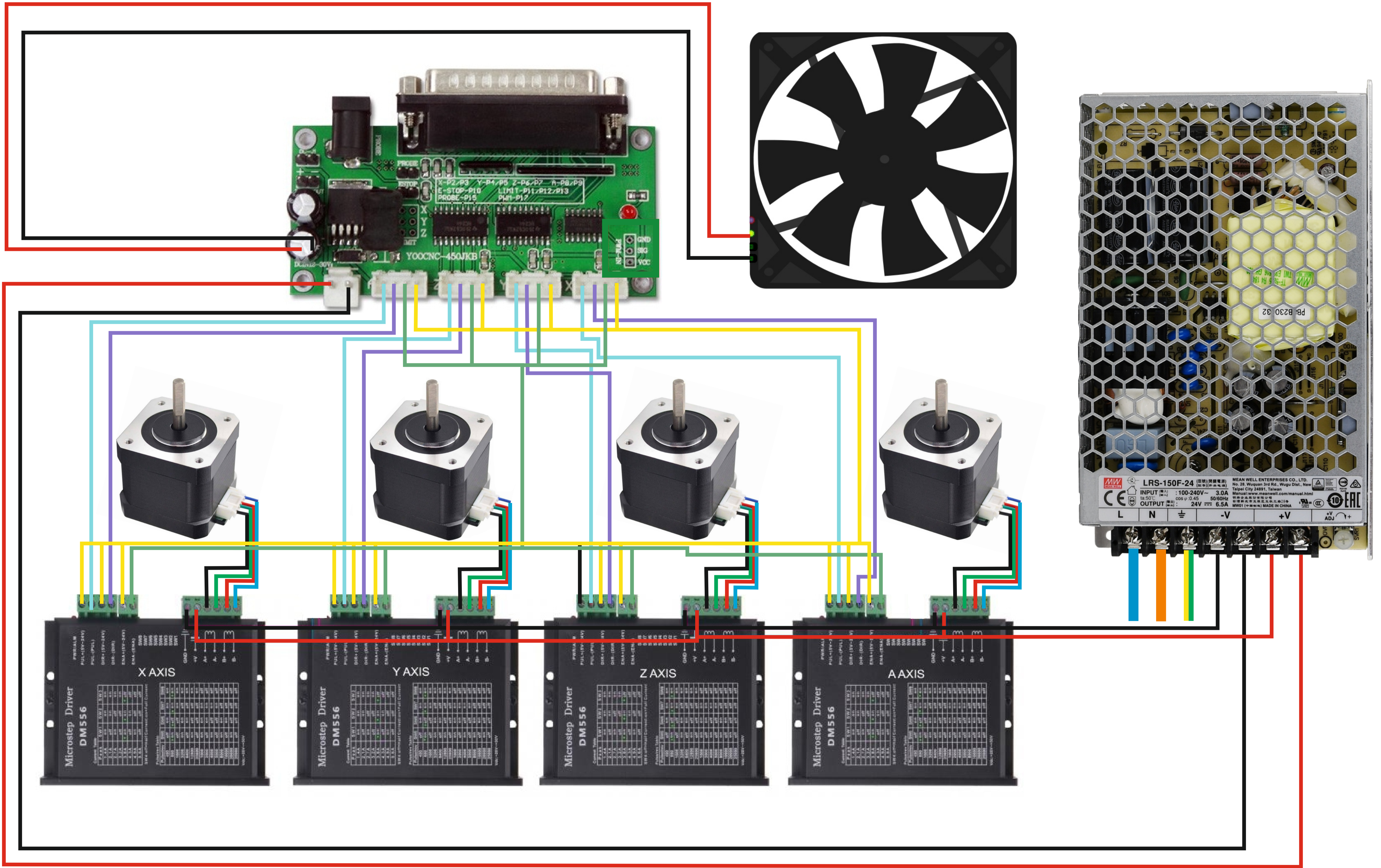
```
lcd.print(a);  
lcd.print("C");  
  
targetTemperature = x;  
targetTemperatureTable = a; // Встановити задану температуру  
}  
}
```

					<i>МР.ПМКМ-46.00.00.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		<i>81</i>



Перв. застосуєб.
 Довід. №
 Підпис та дата
 Інв. № ориє. Підпис та дата. Взам. інв. № Інв. № відбл.

				MP.PMKM-46.01.00.000		
Эмн. Арк.	№ докум.	Підп.	Дата	Електрична схема для інтеграції 3D-принтера		
Розроб	Яворський В					
Перев	Копей В					
Т.контр.						
Нач. КБ						
Н.контр.				Лит.	Маса	Масштаб
Чтв				Аркш 1	Аркшів 5	1:1

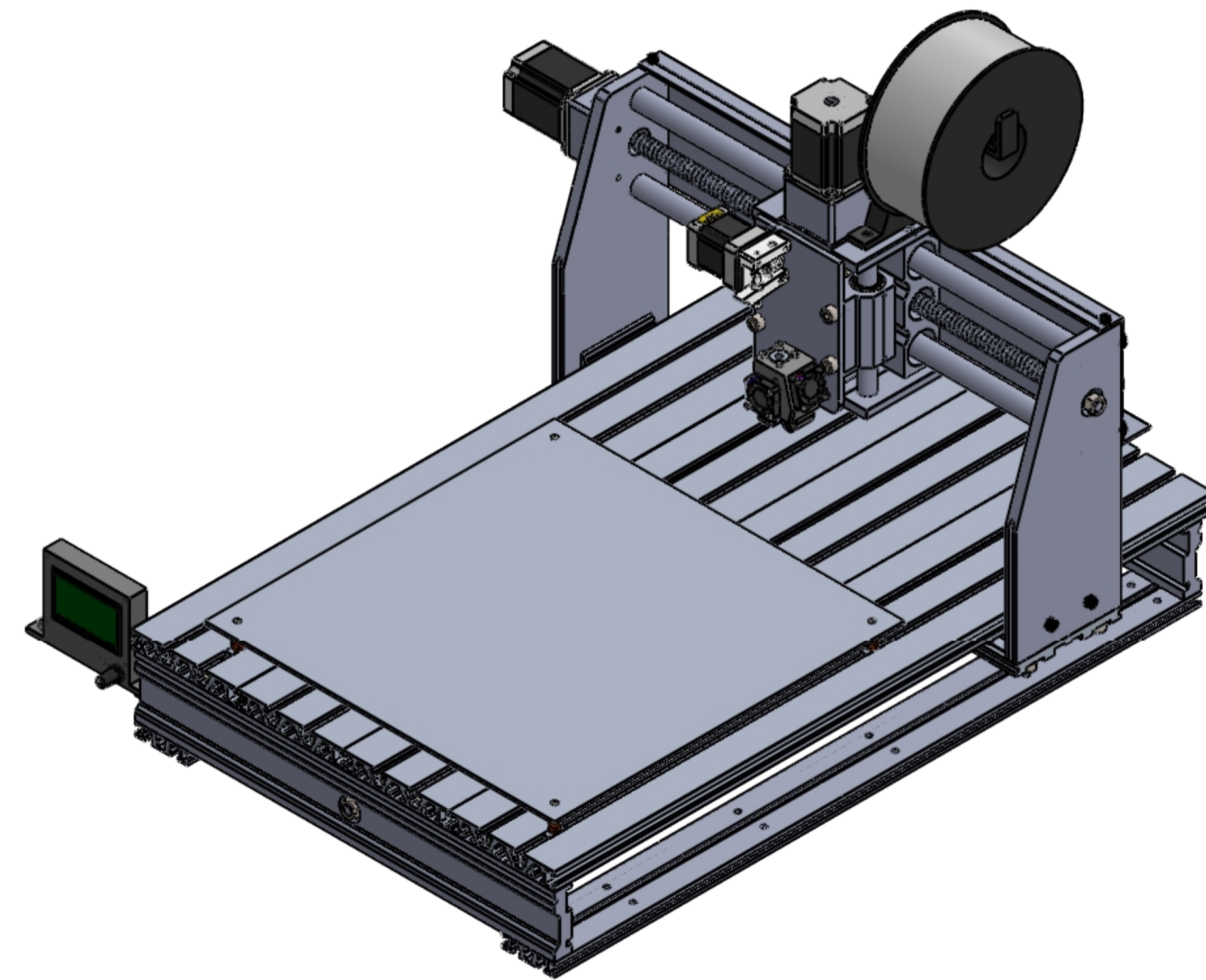
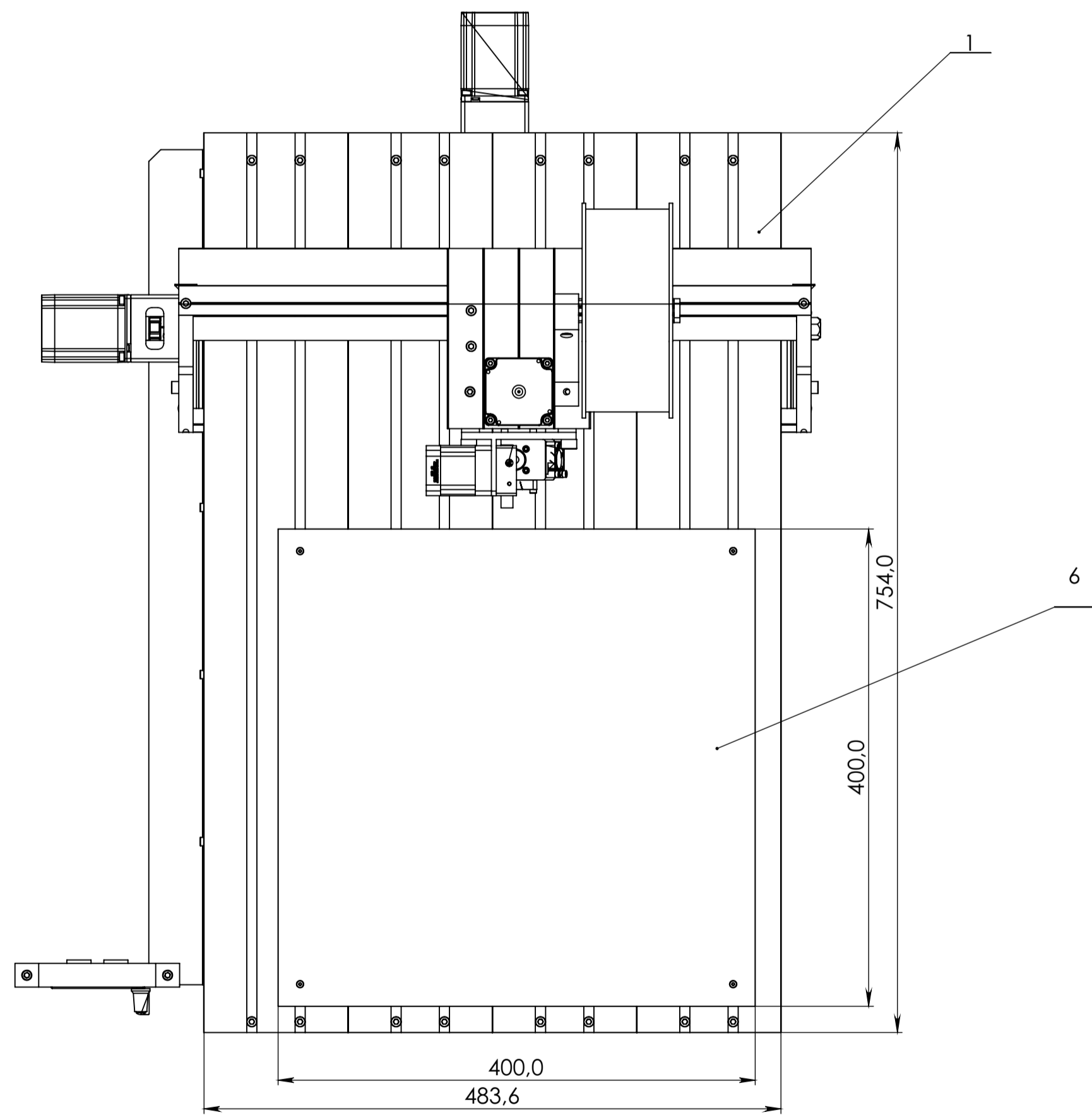
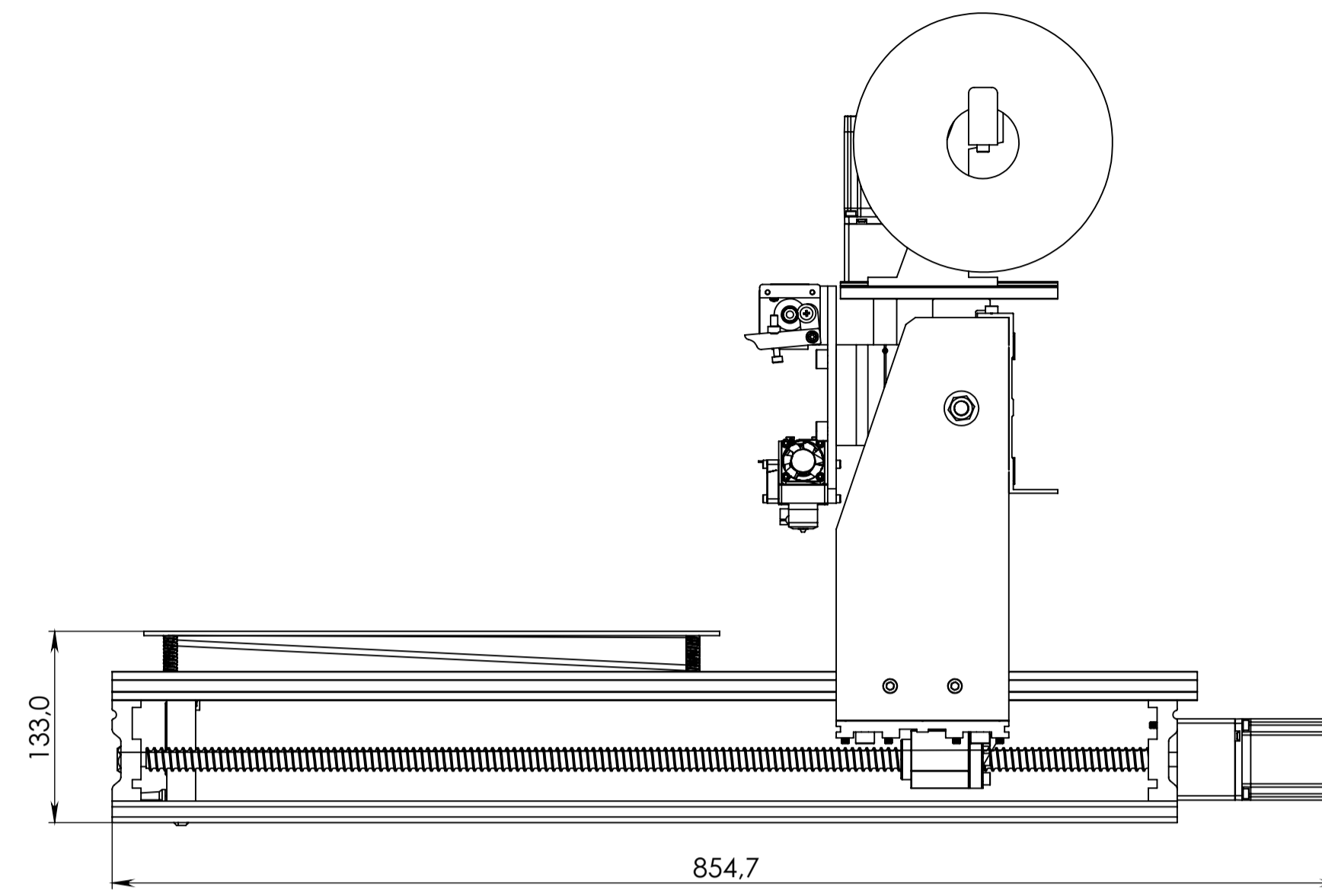
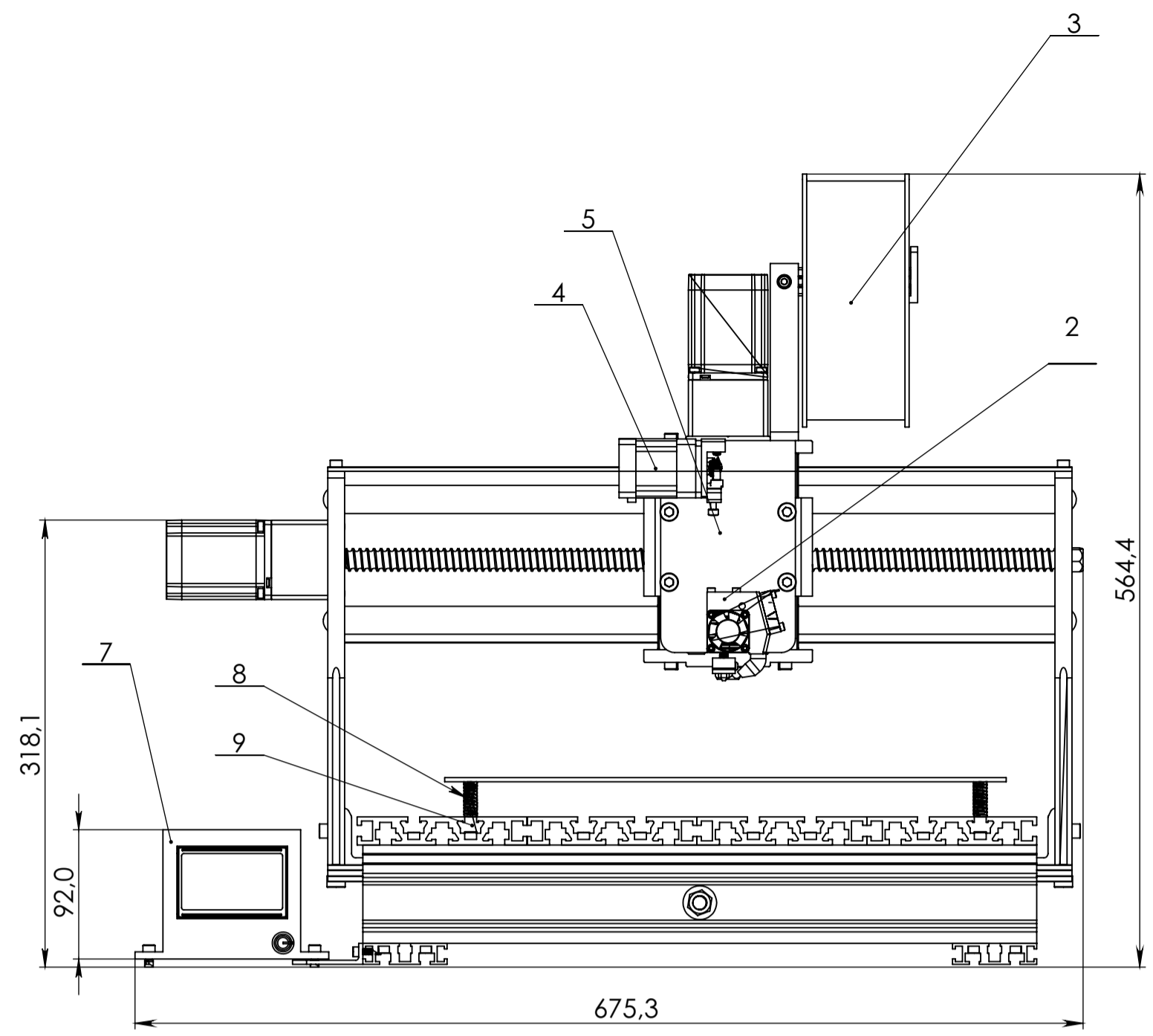


				MP.ПМКМ-46.02.00.000				
Эмч. Арк.	№ док-м	Підп.	Дата	Електрична схема фрезерно-гравірувального верстата		Лит.	Маса	Масштаб
Розроб	Яворський В							1:1
Перев	Копей В					Аркш 2	Аркшів 5	
Т.контр								
Нач. КБ								
Н.контр								
Чтв								
Мрборка1				КопіяВад		Формат А1		

Перв. эстапосиф.

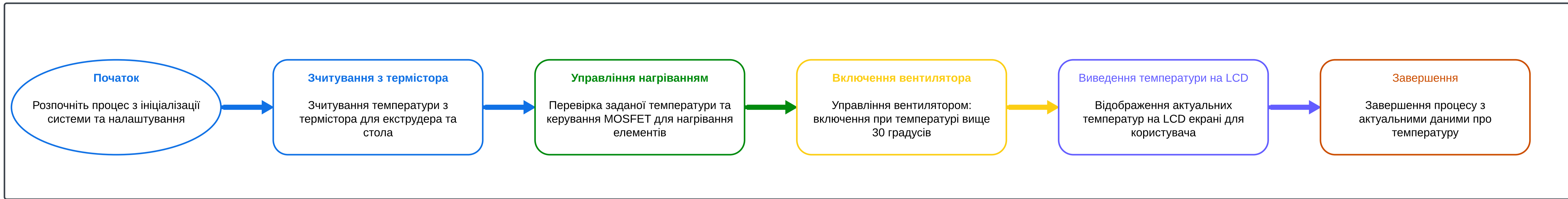
Додат. №

Інв. № ориг. Підпис та дата. Взам. інв. № інів. № дубл. Підпис та дата.

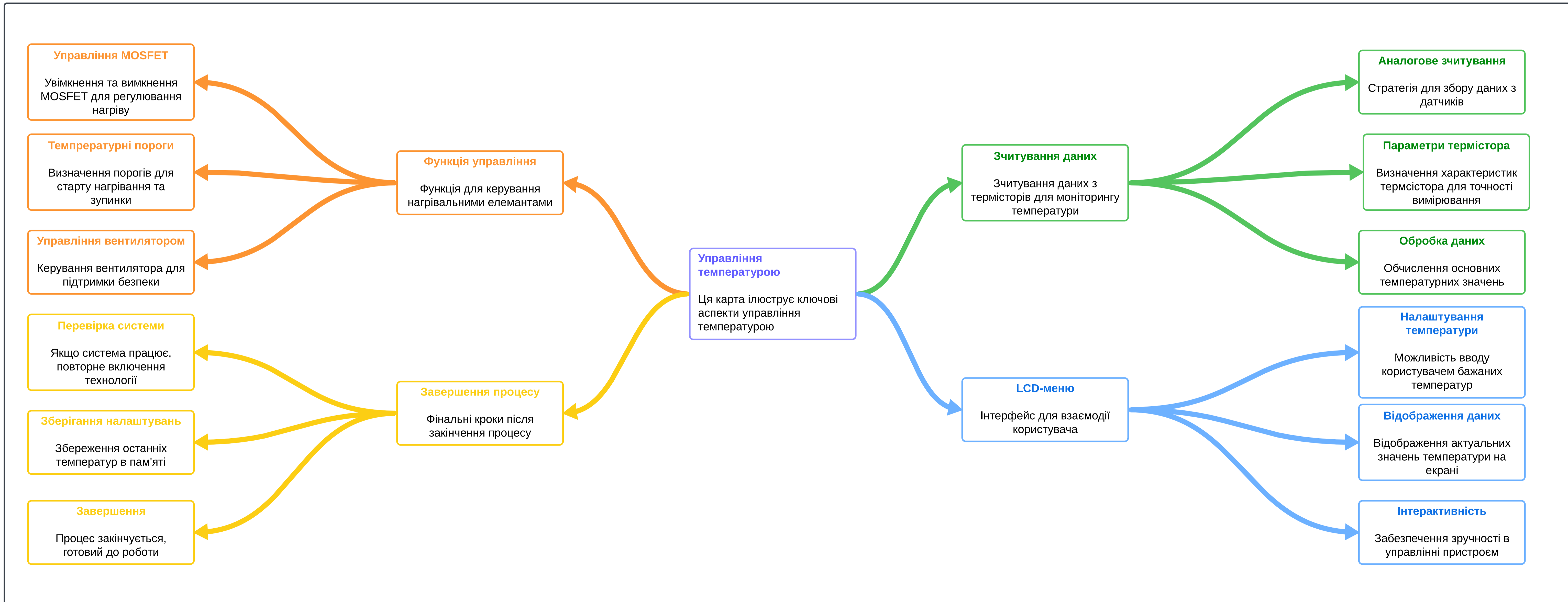


				MP.ПМКМ-46.03.00.000		
Эмч. Арк.	№ док.м.	Підп.	Дата	Лит.	Маса	Масштаб
Разроб	Яворський В					1:4
Перев	Копей В			Аркцш 3	Аркцшв 5	
Т.контр.						
Нач. КБ						
Н.контр.						
Утв.						

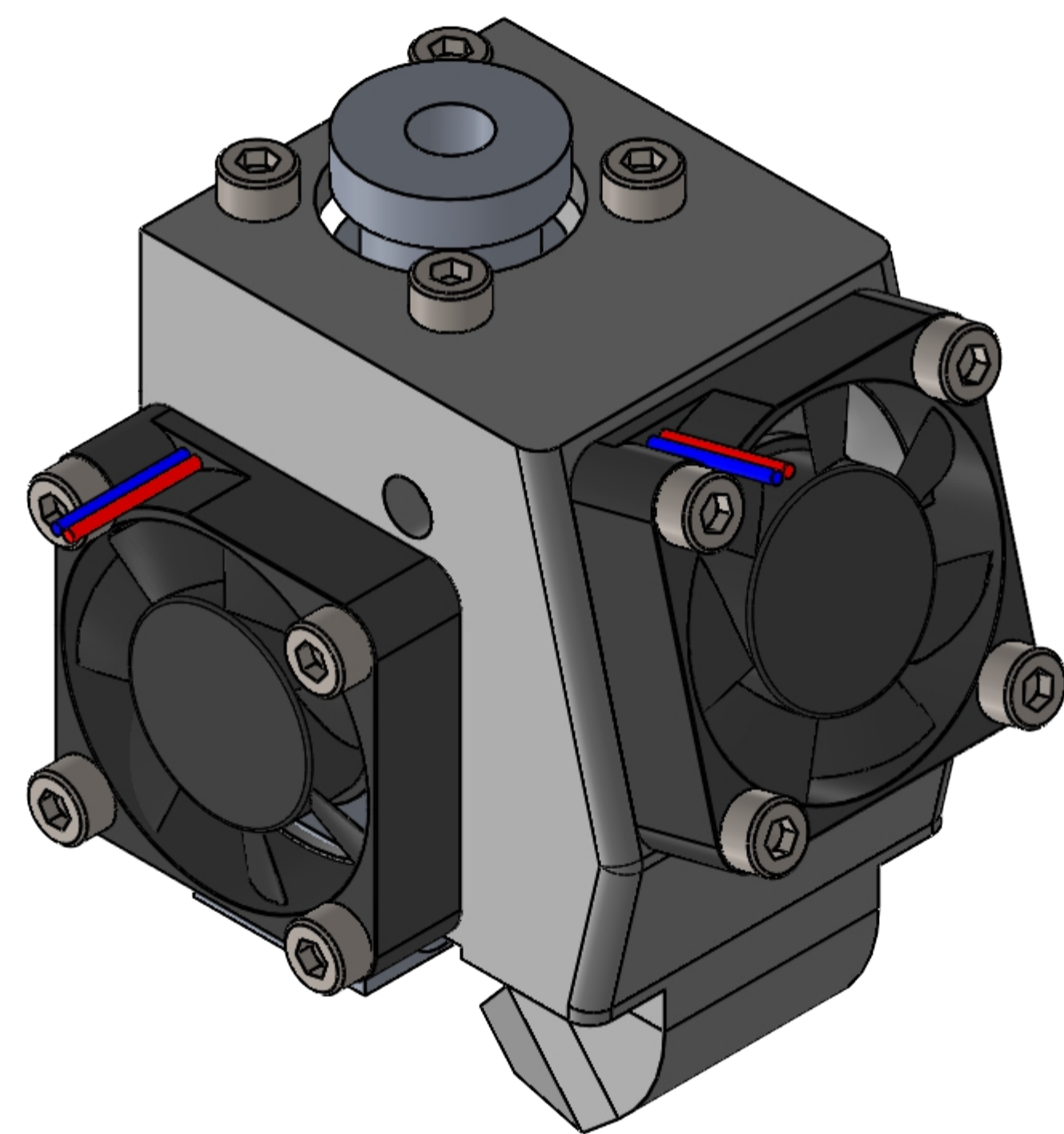
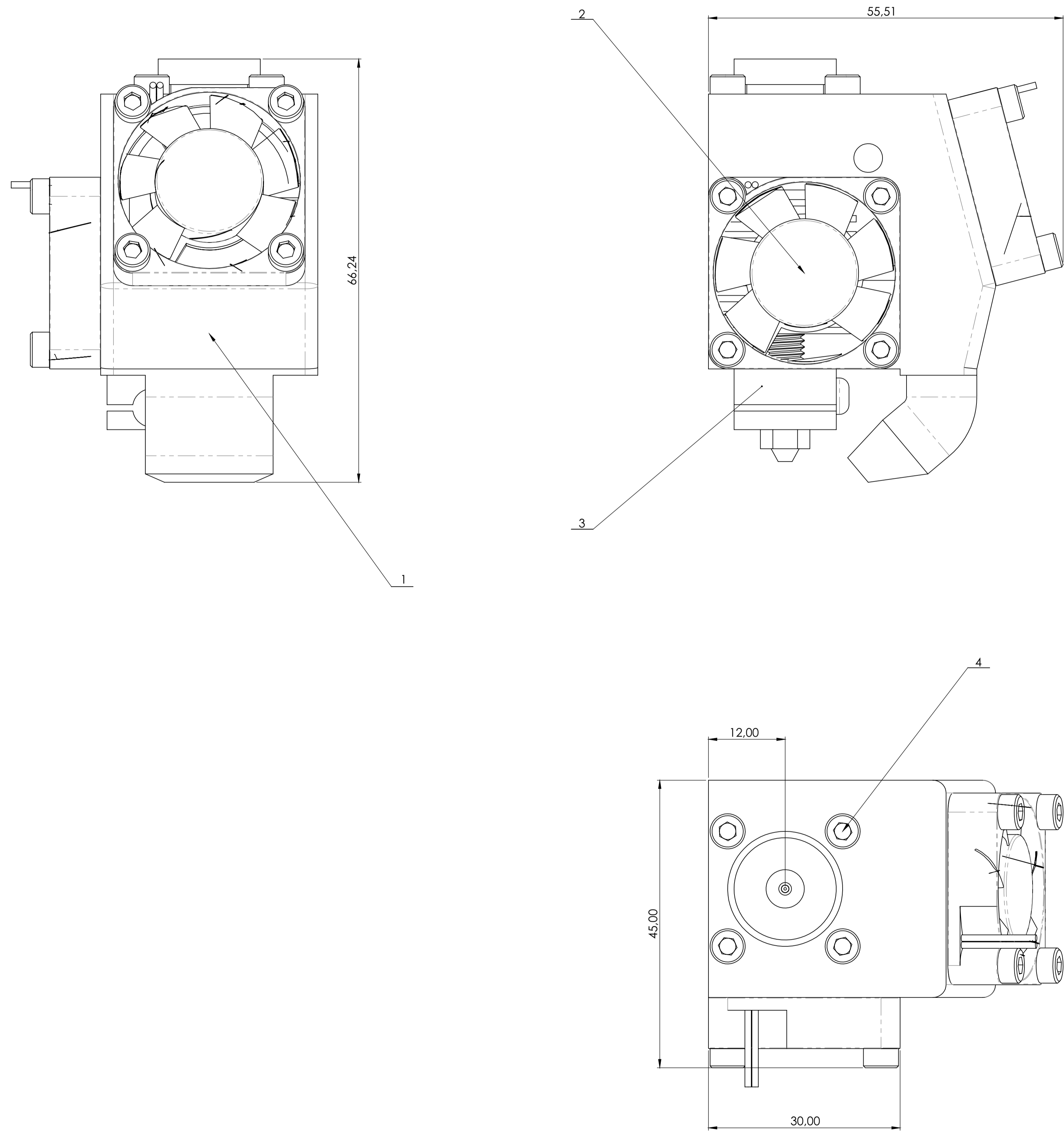
Процес управління температурою



Майнд-карта контролю температури за допомогою Arduino



				MP. ПМКМ-46.05.00.000			
Эмч. Арк.	№ докум.	Підп.	Дата	Схеми управління температурою	Лит.	Маса	Масштаб
Розроб.	Яворський В.				Аркци 5	Аркци 5	1:1
Перев.	Колей В.						
Т.контр.							
Нач. КБ							
Н.контр.							
Утв.							



MP.ПМКМ-46.00.02.000					Лит.	Маса	Масштаб
Эмн.	Арх.	№ док.	Підп.	Дата			2.5:1
Розроб.	Яворський В						
Перев.	Копей В						
Т.контр.					Аркцив 1	Аркцив 1	
Нач. КБ							
Н.контр.							
Утв.							

