

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА
МР.ПМКм-25.00.00.000.ПЗ

Група ПМКм-24-1

Цимбалістий Богдан

Романович

2025

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Інститут інженерної механіки та робототехніки
Кафедра: комп'ютеризованого машинобудування

Цимбалістий Богдан Романович
(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 62-93
(індекс)

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Виготовлення і дослідження навчально-демонстраційної мехатронної системи з ЧПК
(назва роботи)

Комп'ютеризовані та роботизовані технології машинобудування
(назва освітньої програми)

131 – Прикладна механіка
(шифр і назва спеціальності)

Б.Р. Цимбалістий
(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

Науковий керівник Онисько О.Р., 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

м. Івано-Франківськ — 2025 рік

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 Цимбалістому Богдану Романовичу _____

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) Виготовлення і дослідження навчально-демонстраційної мехатронної системи з ЧПК _____

2. Термін здачі студентом закінченого проєкту (роботи) _____

3. Вихідні дані до проєкту (роботи) Технічні вимоги до мехатронної системи з ЧПК для фігурного різання пінопласту. _____

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити) Вступ. 1.Огляд промислових мехатронних установок для різання пінопласту 2. Проектування мехатронної системи верстата з ЧПК. 3. Розробка системи керування та програмного забезпечення. 4. Виготовлення та експериментальні дослідження верстата
Висновки _____

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) 3D-модель і складальне креслення збірки верстата для порізки пінопласту, пульта керування _____

6. Дата видачі завдання - 26.09.2025

Реферат

Магістерська кваліфікаційна робота на тему: Виготовлення і дослідження навчально-демонстраційної мехатронної системи з ЧПК.

Дана робота складається зі 56 аркушів пояснювальної записки. До неї входять 17 рисунків, 5 графіків 1 додаток. Список використаної літератури містить 9 найменувань.

Об'єкт дослідження – виготовлення, налаштування і дослідження простої мехатронної системи з ЧПК.

Предмет дослідження – налаштування, випробування і підбір параметрів керування для власноруч виготовленого верстату фігурної різки пінопласту.

Мета роботи – розробка комплексу конструкторської документації, і виготовлення демонстраційної установки для фігурного різання пінопласту.

Основним завданням роботи є: виготовлення верстату, його налаштування, вибір програмного забезпечення для роботи, програмування, оцінка працездатності, тестування і підбір режимів.

Для демонстрації було обрано верстат для фігурної різки пінопласту в силу відкритої архітектури і конструкції. Для виготовлення потрібно було підготувати комплект конструкторської документації, технологічної документації, інструмент, розробити технологію збирання.

Робочим елементом верстату є ніхромові нитки, яка рухається по заданій траєкторії і при нагріванні плавить пінопласт. Для каркасу використано Т-подібний алюмінієвий профіль 20x20 мм, а переміщення влаштовано за допомогою лінійних підшипників на гладких стрижнях і крокових двигунів із ремінним приводом.

Для програмування і керування верстатом були використані плати Arduino Uno, CNC-shield з драйверами для крокових двигунів і прошивку GRBL – популярне безкоштовне рішення для верстатів такого формату. Також пройдено шлях підготовки контуру у векторній програмі (Inkscape), підготовка G-коду і його завантаження на верстат.

Цей верстат не можна вважати промисловими, радше як хобійний, чи для невеликої майстерні і непостійної роботи. Конструкція верстату не надто жорстка, але достатня для роботи з пінопластом і включає в себе мінімум комплектуючих. Верстати такого типу можуть застосовуватись в неочевидних, на перший погляд, потребах в нашому житті. Це і будівництво, і декоративне мистецтво, дизайн, сувеніри, виготовлення ложементів для обладнання, а також для переробки неформатного пінопласту на виробництвах у якісь вироби, щоби не випускати його у брак.

Ключові слова: верстат, пінопласт, мехатронна система, випробування, ЧПК.

Студент Цимбалістий Б.Р.

Summary

Master's qualification work on the topic: Manufacturing and research of a training and demonstration mechatronic system with CNC.

This work consists of 56 sheets of explanatory notes. It includes 17 figures, 5 graphs, and 1 appendix. The list of used literature contains 9 items.

The object of the research is the manufacture, configuration and research of a simple mechatronic system with CNC.

The subject of the research is the configuration, testing and selection of parameters for a self-made foam plastic figured cutting machine.

The purpose of the work is to develop a set of design documentation and manufacture a demonstration installation for figured cutting of foam plastic.

The main task of the work is: manufacturing the machine, its settings, selection of software for operation, programming, performance assessment, testing and selection of modes.

A machine for figured cutting of foam plastic was chosen for the demonstration due to its open architecture and design. For its manufacture, it was necessary to prepare a set of design documentation, technological documentation, tools, and develop an assembly technology. The working element of the machine is a nichrome thread, which moves along a given trajectory and melts the foam when heated. A 20x20 mm T-shaped aluminum profile was used for the frame, and the movement was arranged using linear bearings on smooth rods and stepper motors with a belt drive.

To program and control the machine, Arduino Uno boards, CNC shield with stepper motor drivers, and GRBL firmware were used - a popular free solution for machines of this format. The path of preparing the contour in a vector program (Inkscape), preparing the G-code and loading it onto the machine were also covered.

This machine cannot be considered industrial, rather as a hobby machine, or for a small workshop and intermittent work. The design of the machine is not too rigid, but sufficient for working with foam plastic and includes a minimum of

components. Machines of this type can be used in non-obvious, at first glance, needs in our lives. These include construction, decorative arts, design, souvenirs, the manufacture of housings for equipment, as well as for processing non-format foam plastic in factories into some products, so as not to let it go to waste.

Keywords: machine tool, foam plastic, mechatronic system, testing, CNC.

Student Tsymbalistyi B.R.

ЗМІСТ

Вступ		
1. ОГЛЯД ПРОМИСЛОВИХ МЕХАТРОННИХ УСТАНОВОК ДЛЯ РІЗАННЯ З ПІНОПЛАСТУ		11
2. ПРОЄКТУВАННЯ МЕХАТРОННОЇ СИСТЕМИ ВЕРСТАТА З ЧПК		15
2.1 Опис конструкції верстата		15
2.2 Конструкторська документація		17
2.3 Апаратні електронні засоби розроблюваної мехатронної системи		19
3. РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ		24
3.1 Прошивка контролера та налаштування ПЗ GRBL		34
3.2 Алгоритми керування рухом і температурою струни		30
3.3 Формування та обробка G-code для різання пінопласту		32
4. ВИГОТОВЛЕННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЕРСТАТА		35
4.1 Друк деталей, механічна обробка та складання		35
4.2 Монтування апаратних засобів		37
4.3 Методика експериментальних досліджень		41
4.4. Дослідження точності позиціонування та якості різання, вплив режимів різання на якість обробки пінопласту		43
Висновки.		48
Список використаних джерел.		50
Додатки.		51

					<i>МР.ПМКМ-25.00.00.000 ПЗ</i>			
Зм	Арк	№ Докум.	Підпис			Літ.	Арк.	Аркушів
Розроб.		<i>Шимдлігтії</i>			<i>Пояснювальна записка</i>			
Перевір.		<i>Онисько О.Р.</i>					9	
Затверд.								
						<i>ІФНТУНГ ПМКМ-24-1</i>		

ВСТУП

Пінополістирол – дуже поширений матеріал в житті людини. Його використовують для теплоізоляції та звукоізоляції в будівництві, декорацій чи макетів в рекламі або дизайні, для пакувальних елементів крихких речей, у виготовленні іграшок, одноразового посуду та багато іншого. Він достатньо міцний, недорогий і легко обробляється різними способами. Деякі з них сьогодні розглянемо, а також виготовимо демонстраційний верстат і спробуємо самі різати пінопласт гарячою струною.

Виготовлений верстат має конструкцію не найкращої жорсткості, але достатню для роботи з пінопластом, підбору параметрів різання, навчання ним керувати. Управління здійснюється за допомогою програмного забезпечення з відкритим кодом, яке є у вільному доступі для будь-якого користувача. Тут мінімальна кількість недорогих деталей, яка потрібна для функціональної моделі.

Результати цієї роботи можна використати для створення великого, жорсткого, повнорозмірного верстату, можливо під спеціалізовані деталі, з впевненістю що такі речі – робочі, і на них можна рівнятися.

Попри все цей проект має практичне застосування і може бути задіяний як для домашньої майстерні так і для малого бізнесу, де ручна обробка уже забирає занадто багато ресурсів.

Роботи виконуються на замовлення кафедри КМВ ІФНТУНГ.

					<i>МР.ПМКМ-25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		10

1. ОГЛЯД ПРОМИСЛОВИХ МЕХАТРОННИХ УСТАНОВОК ДЛЯ РІЗАННЯ З ПІНОПЛАСТУ

Найпоширеніші методи обробки матеріалу – різання струною і фрезерування. На просторах інтернету можна знайти велику кількість подібних систем, різної вартості і конструкції, розглянемо і порівняємо кілька пропозицій.

Ось приклад верстату без ЧПК-системи. Модель **АТО-KD-60К**, в якому використовується струна $\varnothing 0,5$ мм. Навколо нагрітої струни потрібно самотужки обертати заготовку, що не надто безпечно, потребує уважності і точності працівника. Важко досягнути повторюваності без допоміжних засобів.



Рис. 1.1 - Верстат АТО-KD-60К

Верстат чотирьохосьовий моделі **ZY-CNC3D**. Жорстка рама з алюмінієвого профілю, великого формату і з обертовою віссю, яка дає змогу обробляти складні поверхні для подальших ливарних операцій або декору. Нитку використано $\varnothing 0,4$ мм, керування здійснюється за допомогою ЧПК-системи.

					MP.ПМКМ-25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11



Рис. 1.2 – Верстат ZY-CNC3D

Фрезерні верстати виробника **StyleCNC** від невеликих моделей 3-ох осьових фрезерно-гравіювальних верстатів такі як модель STG6090 до великих машин з чотирма а то і п'яти осями, наприклад модель STM1530.

					<i>MP.ПМКМ-25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

Використовують для отримання складного різьблення, якого неможливо досягти струною.



Рис. 1.2 – Верстат StyleCNC STM1530

Ось приклади роботи на цих верстатах. Особливістю фрезерних верстатів для пінопласту відносно верстатів для металу:

1. Менша жорсткість, часто використовуються алюмінієві профілі, мдф.
2. Велике робоче поле, часто кратне формату листа.
3. Високообертові, але меншої потужності шпинделі до 2 кіловат, часто з повітряним охолодженням.
4. Слабші двигуни на приводах, оскільки заготовка і сам верстат не такі важкі.
5. Інструмент – однозубі або двозубі фрези, або сферичні фрези.
6. Великі швидкості різання і подача з невеликою глибиною різання.
7. Мінімальне навантаження, що дає чистий різ
8. Бажана система пиловидалення, оскільки пінопласт дає багато легкого сміття.

					<i>МР.ПМКМ-25.00.00.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		<i>13</i>



Рис. 1.4 – Верстат StyleCNC STM1530 в роботі

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

МР.ПМКМ-25.00.00.000 ПЗ

Арк.

14

2. ПРОЄКТУВАННЯ МЕХАТРОННОЇ СИСТЕМИ ВЕРСТАТА З ЧПК

2.1 Опис конструкції верстата

За основу було взято проєкт верстату автора How To Mechatronics, адаптованого під наші можливості виготовлення.

Було підготовано повний комплект конструкторської документації (креслення, специфікація) для виготовлення, файли для 3д-друку. Також сформовано повну специфікацію-таблицю комплектуючих на виріб разом з посиланнями для покупки.

Найменування	Матеріал	Кількість	Маса	Посилання
Кутовий кронштейн 20x20		6	0,039814124	https://www.aliexpress.com/
T-профіль 20x20 440		2	0,423085299	https://www.aliexpress.com/
Лінійний вал 10мм 500		4	1,234017594	https://uamper.com/
Лінійний вал 5мм 500		2	0,222123167	https://www.aliexpress.com/
Струна 0,2 мм		1	0,002695677	https://www.aliexpress.com/
Гайка 20TN-M4		60	0,057089482	https://www.aliexpress.com/
Кроковий двигун NEMA 17		3	1,526060276	https://www.aliexpress.com/
Кінцевик		2	0,019566334	https://www.aliexpress.com/
Натяжний шків GT2 (отв.5мм)		4	0,011134397	https://www.aliexpress.com/
Підшипник 80025 ГОСТ 7242-81		2	0,012	https://www.aliexpress.com/
Підшипник LM10UU		6	0,271368978	https://www.aliexpress.com/
Стілка розпірна M3x20		4	0,017960557	https://www.aliexpress.com/
Шків GT2 20 зубів (отв.5мм)		4	0,022145054	https://www.aliexpress.com/
Кроковий драйвер A4988 (червоний, якщо є різниця)		3		https://www.aliexpress.com/
Arduino CNC Shield		1		https://www.aliexpress.com/
DC-DC конвертер		1		https://www.aliexpress.com/
Джерело живлення постійного струму 12В 6А		1		https://www.aliexpress.com/
Ремінь зубчастий GT2 6мм		6м		https://www.aliexpress.com/

Рис. 2.1 – Фрагмент таблиці для покупки комплектуючих

Конструкція розроблюваного верстата базується на використанні простих, доступних та широко розповсюджених комплектуючих, характерних для малогабаритних CNC-систем і 3D-принтерів. Такий підхід дозволяє не лише зменшити вартість виготовлення, а й забезпечити наочність конструкції та можливість подальшої модернізації, що є важливим для навчального призначення верстата.

Основу каркасної частини верстата становить алюмінієвий T-подібний профіль перерізом 20×20 мм, який використовується для формування рами та порталної конструкції. Застосування алюмінієвого профілю обумовлене його достатньою жорсткістю, малою масою, корозійною стійкістю та зручністю монтажу. T-подібні пази профілю дозволяють легко змінювати конфігурацію

конструкції, виконувати регулювання та швидко встановлювати додаткові елементи без необхідності механічної обробки.

Для забезпечення точного та плавного переміщення рухомих вузлів верстата використовуються лінійні вали, які виконують функцію напрямних. У поєднанні з ними застосовуються лінійні підшипники, аналогічні тим, що використовуються у 3D-принтерах та компактних верстатах з ЧПК. Така комбінація забезпечує низький коефіцієнт тертя, стабільність руху та достатню точність позиціонування, необхідну для різання пінопласту нагрівною струною. Використання стандартних компонентів також спрощує обслуговування та заміну елементів у разі їх зносу.

Привід координатних осей реалізовано за допомогою крокових двигунів у поєднанні із зубчастими ременями. Даний тип приводу є поширеним рішенням для верстатів невеликого розміру, оскільки забезпечує достатню точність, високу швидкодію та простоту реалізації. Зубчастий ремінь дозволяє передавати рух без прослизання, зменшує рівень шуму та вібрацій, а також не потребує складного технічного обслуговування. Крокові двигуни, у свою чергу, забезпечують дискретне керування переміщенням та дозволяють точно позиціонувати ріжучий інструмент відповідно до керуючої програми.

Збирання каркасної та рухомої частин верстата здійснюється за допомогою Т-подібних гайок, призначених для використання з алюмінієвим профілем 20×20 мм, а також стандартних кутових кронштейнів, які застосовуються у таких конструкціях. Використання кутових кронштейнів дозволяє забезпечити надійну фіксацію елементів рами та дотримання геометричної точності, зокрема перпендикулярності між профілями. Це є важливим фактором для коректної роботи верстата та точності виконання технологічних операцій.

Окремі елементи конструкції, які мають нестандартну форму або виконують допоміжні функції, виготовляються за допомогою 3D-друку. До таких елементів належать спеціальні кронштейни, рухомі блоки, а також основа пульта керування. Застосування адитивних технологій дозволяє швидко адаптувати

					<i>MP.ПМКМ-25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

конструкцію під конкретні вимоги, оптимізувати розміщення компонентів та зменшити кількість механічних операцій. Крім того, 3D-друк дає змогу виготовити ізоляційні елементи, які мінімізують контакт електричних компонентів з поверхнею, на якій розміщено верстат.

Таке конструктивне рішення сприяє зниженню впливу електромагнітних завад та механічних вібрацій на роботу електроніки, що, у свою чергу, підвищує стабільність функціонування системи керування та зменшує ризик збоїв у роботі верстата. Розміщення електронних компонентів на спеціально спроектованій основі також підвищує ергономічність та безпеку експлуатації обладнання.

На етапі проектування було створено тривимірну модель верстата, у якій, окрім механічних елементів, змодельовано й основні електронні компоненти системи керування. Це дозволило заздалегідь спрогнозувати їх розміщення, оцінити габарити, взаємне розташування вузлів та забезпечити зручний доступ до елементів під час монтажу й обслуговування. Такий підхід сприяє підвищенню якості проектування та зменшенню ймовірності конструктивних помилок на етапі складання верстата.

2.2 Конструкторська документація

Комплект конструкторської документації складається з електронної 3D-моделі, 35 креслеників і специфікацій на листах. Основою комплекту є електронна тривимірна модель верстата, яка відображає повну компоновку виробу, включаючи несучий каркас, рухомі вузли, механізми приводу, а також елементи кріплення та допоміжні компоненти. Модель дозволяє наочно оцінити конструктивні рішення, взаємне розташування деталей і вузлів, а також перевірити відсутність геометричних конфліктів між елементами. Крім того, використання тривимірного моделювання дало змогу оптимізувати габарити верстата, масу конструкції та зручність доступу до основних вузлів під час складання й обслуговування.

					<i>MP.ПМКМ-25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

На основі електронної 3D-моделі було сформовано комплект креслеників, загальна кількість яких становить 35 аркушів. До складу графічної частини входять креслення загального вигляду верстата, складальні креслення окремих вузлів, а також робочі креслення деталей. Усі креслення виконані з дотриманням вимог стандартів до оформлення конструкторської документації, містять необхідні розміри, допуски, позначення поверхонь та технічні вимоги.

Окрему групу становлять креслення деталей, що виготовляються за допомогою 3D-друку. Для таких елементів, як кронштейни, рухомі блоки, корпусні та ізоляційні деталі, у кресленнях передбачено геометричні параметри, що враховують особливості адитивного виробництва.

Крім того, у складі конструкторської документації наявні креслення алюмінієвих профілів, які використовуються для формування каркасу верстата. Дані креслення містять точні лінійні розміри профілів, що дозволяє передавати їх постачальнику для порізки матеріалу у необхідний розмір без додаткової механічної обробки. Такий підхід спрощує процес виготовлення конструкції та зменшує ймовірність похибок під час складання.

Невід'ємною частиною комплекту є специфікації, оформлені на окремих аркушах.

Таким чином, розроблений комплект конструкторської документації є повним і завершеним, забезпечує можливість виготовлення верстата без залучення додаткових пояснень та може бути використаний як у виробничих, так і в навчальних цілях. Він також створює основу для подальшої модернізації конструкції та її адаптації під інші навчально-демонстраційні завдання.

					<i>МР.ПМКМ-25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

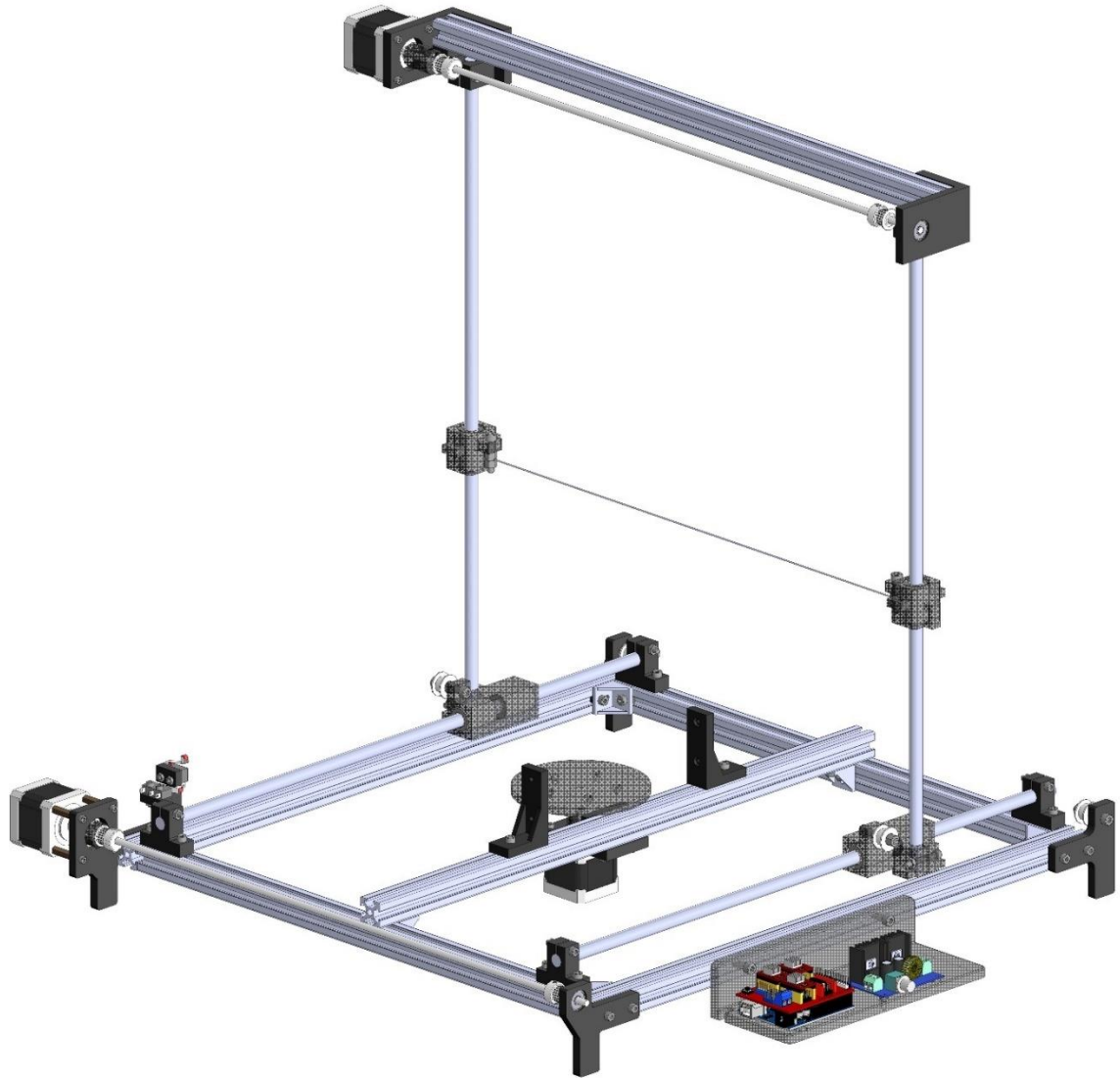


Рис. 2.2 – Загальний вигляд верстату

2.3 Апаратні електронні засоби розроблюваної мехатронної системи

Для реалізації автоматизованої системи керування навчально-демонстраційним верстатом з числовим програмним керуванням, призначеним для різання пінопласту за допомогою нагрівної струни, необхідно застосувати комплекс апаратних електронних засобів. Дані засоби утворюють єдину мехатронну систему, яка поєднує механічну частину верстата, електроприводи, силову електроніку та програмне керування. Коректний вибір компонентів є

					<i>МР.ПМКм-25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

визначальним чинником забезпечення надійності, функціональності та навчальної цінності розроблюваного верстата.

Нижче наведено перелік основних електронних комплектуючих, використаних для автоматизації верстата, а також подано їх призначення, принцип дії та обґрунтування вибору.

Основним елементом системи керування є плата керування, яка фактично виконує роль «мозку» верстата. У межах даного проєкту як центральний керуючий пристрій обрано мікроконтролерну платформу Arduino Uno. Дана плата побудована на базі мікроконтролера ATmega328P, який має достатні обчислювальні ресурси для реалізації завдань числового програмного керування, зокрема обробки G-коду, формування керуючих сигналів для драйверів крокових двигунів, опрацювання сигналів від кінцевих вимикачів та взаємодії з периферійними модулями.

Перевагою Arduino Uno є її широка популярність у навчальних та аматорських CNC-проєктах, відкритість апаратної і програмної архітектури, а також наявність великої кількості готових бібліотек і прошивок. Саме для цієї платформи розроблено прошивку GRBL, яка дозволяє реалізувати функції ЧПК без необхідності створення власного програмного ядра. Це робить Arduino Uno оптимальним вибором для навчально-демонстраційного верстата, де важливо не лише забезпечити працездатність, а й наочність та простоту розуміння принципів роботи системи керування.

Для керування кроковими двигунами у системі застосовуються драйвери крокових двигунів типу A4988. Дані драйвери призначені для керування біполярними кроковими двигунами шляхом перетворення логічних сигналів керування з мікроконтролера у необхідні струмові режими живлення обмоток двигуна. Драйвер A4988 підтримує режими повного кроку та мікрокрокування (1/2, 1/4, 1/8, 1/16 кроку), що дозволяє значно підвищити плавність руху та точність позиціонування координатних осей верстата.

					<i>MP.ПМКМ-25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

Крім того, драйвери A4988 мають вбудовані системи захисту від перевантаження по струму, перегріву та короткого замикання, що підвищує загальну надійність системи. Завдяки компактним розмірам і стандартному форм-фактору ці драйвери широко застосовуються у 3D-принтерах, лазерних граверах та малогабаритних верстатах з ЧПК, що підтверджує доцільність їх використання у даному проєкті.

Для зручної інтеграції драйверів крокових двигунів, кінцевих вимикачів та інших допоміжних компонентів використовується плата розширення Arduino CNC Shield V3.0. Ця плата встановлюється безпосередньо на Arduino Uno та значно спрощує процес монтажу електронної частини верстата. CNC Shield містить стандартні слоти для встановлення до чотирьох драйверів крокових двигунів, роз'єми для підключення двигунів, кінцевих вимикачів, а також контакти для підключення зовнішнього живлення.

Використання CNC Shield дозволяє мінімізувати кількість дровових з'єднань, зменшити ймовірність монтажних помилок та забезпечити акуратне компонування електроніки. Окрім цього, дана плата широко підтримується прошивкою GRBL, що дозволяє швидко налаштувати систему без складних програмних модифікацій. З освітньої точки зору CNC Shield є наочним прикладом модульного підходу до побудови систем ЧПК.

Окрему роль у даному верстаті відіграє система нагріву ріжучого елемента. Для різання пінопласту використовується ніхромовою струна, температура якої безпосередньо впливає на якість різки, швидкість обробки та стан матеріалу. Для керування температурним режимом у роботі застосовується понижуючий імпульсний перетворювач постійної напруги XL4016E1.

Даний модуль дозволяє регулювати вихідну напругу та струм у широких межах, що є критично важливим для стабільного нагріву ніхромової струни. Завдяки можливості обмеження струму забезпечується захист струни від перегріву та передчасного руйнування. Регулювання напруги дозволяє

					<i>МР.ПМКМ-25.00.00.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		<i>21</i>

адаптувати режими різання залежно від товщини та щільності пінопласту, що підвищує універсальність верстата та його навчальну цінність.

Для забезпечення безпечної роботи та коректного визначення положення рухомих вузлів у системі застосовуються кінцеві вимикачі типу KW12-3. Це роликові мікроперемикачі, які можуть працювати як у нормально розімкненому, так і в нормально замкненому режимі. У даному проєкті кінцеві вимикачі використовуються для обмеження ходу координатних осей, а також для реалізації процедури базування (homing), під час якої система визначає нульові координати.

Наявність кінцевих вимикачів підвищує рівень безпеки експлуатації верстата, оскільки запобігає виходу рухомих частин за межі допустимого діапазону. З навчальної точки зору вони дозволяють продемонструвати принципи роботи систем координат у верстатах з ЧПК та алгоритми автоматичного позиціонування.

Живлення електронних компонентів верстата здійснюється від джерела постійного струму з вихідною напругою 12 В та максимальним струмом до 6 А. Обрані параметри забезпечують стабільну роботу крокових двигунів, драйверів, плати керування та допоміжних модулів. Використання єдиного джерела живлення спрощує електричну схему верстата та зменшує кількість потенційних точок відмови.

Безпосередній рух порталу та інших механічних вузлів верстата забезпечується кроковими двигунами типу NEMA17, модель 17HS4401. Дані двигуни характеризуються достатнім крутним моментом, компактними габаритами та високою точністю позиціонування. Вони широко застосовуються у малогабаритних CNC-верстатах і 3D-принтерах, що підтверджує їх відповідність вимогам даного проєкту.

У розроблюваному верстаті крокові двигуни відповідають за переміщення портальної системи вздовж координатних осей, а також, за необхідності, за обертання заготовки. Їх використання дозволяє реалізувати точні та повторювані

					<i>MP.ПМКМ-25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

переміщення, що є ключовою вимогою для систем з числовим програмним керуванням.

Таким чином, перелічені електронні компоненти утворюють цілісну автоматизовану систему керування навчально-демонстраційним верстатом з ЧПК. Взаємодія між мікроконтролерною платою, драйверами, виконавчими механізмами та допоміжними модулями забезпечує реалізацію функцій точного позиціонування, керування процесом різання та безпечної експлуатації обладнання. У наступному підрозділі буде наведено схему електричного підключення усіх комплектуючих, яка наочно демонструє структурні зв'язки між елементами системи та принцип її роботи в цілому.

					<i>МР.ПМКМ-25.00.00.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		23

3. РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

3.1 Прошивка контролера та налаштування ПЗ GRBL

Для реалізації функцій числового програмного керування у навчально-демонстраційному верстаті використовується прошивка GRBL, яка є відкритим програмним забезпеченням для керування CNC-верстатами на базі мікроконтролерів сімейства Arduino. GRBL забезпечує інтерпретацію команд G-коду, формування сигналів керування кроковими двигунами, обробку сигналів кінцевих вимикачів та реалізацію базових алгоритмів безпеки.

Прошивка контролера здійснюється на мікроконтролерну плату Arduino Uno, яка підключається до персонального комп'ютера за допомогою USB-інтерфейсу. Для завантаження прошивки використовується середовище розробки Arduino IDE, у якому попередньо встановлюється бібліотека GRBL відповідної версії. Після відкриття проєкту прошивки у середовищі Arduino IDE здійснюється компіляція коду та його завантаження до пам'яті мікроконтролера. Успішне завершення цього процесу свідчить про готовність апаратної частини контролера до подальшого налаштування.

Після прошивки контролера виконується конфігурування параметрів GRBL, які визначають кінематичні та динамічні характеристики верстата. Налаштування здійснюється через спеціалізоване програмне забезпечення для роботи з G-кодом, наприклад Universal G-code Sender (UGS) або аналогічні програми. Зв'язок між комп'ютером та контролером здійснюється через послідовний порт із заданою швидкістю обміну даними.

Усі вищеперераховані програми безплатні і є у вільному доступі.

Основними параметрами, що налаштовуються у GRBL, є кількість кроків на одиницю переміщення для кожної координатної осі, максимальна швидкість переміщення, прискорення, напрямок обертання двигунів, а також параметри

					<i>MP.ПМКМ-25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

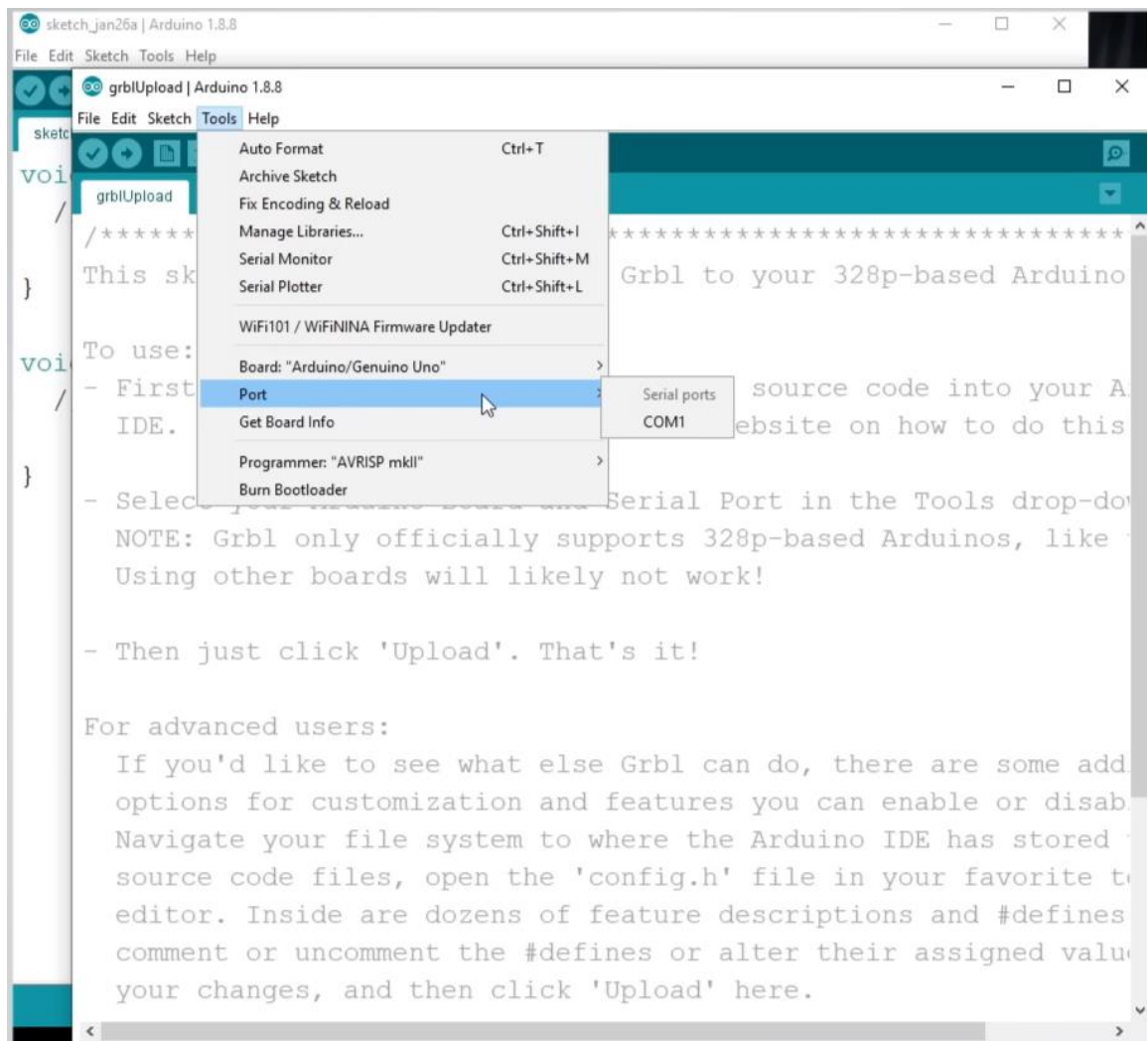


Рис. 3.2 – Шлях вибору порту для завантаження прошивки

Тепер плата вміє зчитувати G-коди і відповідно керувати верстатом. Крім того UGS має вікно візуалізації, де можна перевірити траєкторію обробки. Також в програмі за допомогою майстра налаштувань вибирають кроки і напрямки роботи двигунів, межі робочого поля і кінцеві вимикачі верстату.

Тож, після запуску програми, треба викликати майстер налаштувань «Setup Wizard» після цього треба обрати порт до якого підключено верстат, і підключити програму до Arduino (рис. 3.3).

Після під'єднання по кроках ми можемо налаштувати напрямки руху двигунів, зокрема нам потрібно змінити напрямок руху для осі X.

Далі потрібно відкалібрувати кроки двигунів. Оскільки ми обрали роздільну здатність на драйверах по 16 мікрокроків, а сам двигун має своїх 200 фізичних

кроків, це означає що для повного обертання на 360 градусів двигуну потрібно 3200 кроків. Тепер залежно від нашої передачі, потрібно вирахувати фактичну кількість кроків, яка потрібна щоб здійснити рух на 1 мм. За замовчуванням встановлено значення 250 кроків.

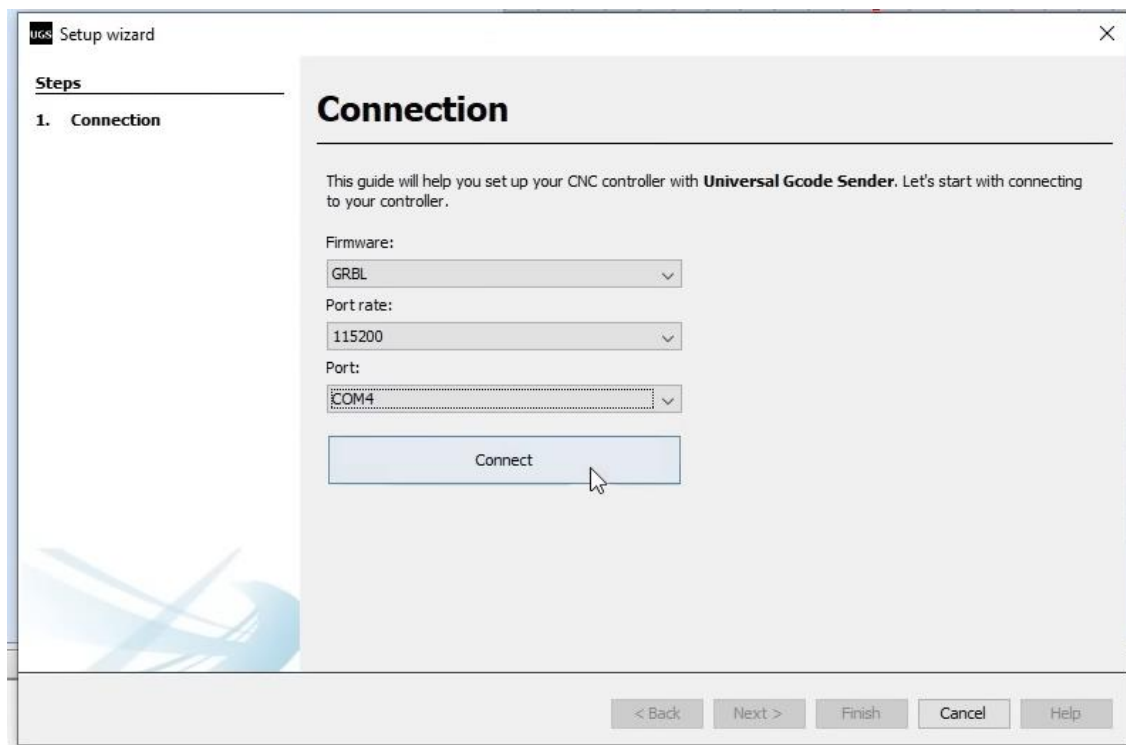


Рис. 3.3 – Вікно підключення до верстату

Отже, ми рухаємо верстатом на 1мм за теперішніми значеннями кроків і допомогою лінійки вимірюємо фактичну відстань, яку він пройшов. Далі вводимо її у програму і вона сама нам підказує яку кількість кроків слід встановити замість 250. У моєму випадку це 83 кроки на міліметр.

Що стосується обертової осі Z, встановлюємо її крок 400мм (3200/8). Це значить що за 1 крок двигун буде робити оберт на 45 градусів, а для повного обертну на 360 градусів потрібно 8 кроків.

Далі треба перевірити чи кінцеві вимикачі працюють належним чином. Залежно від того чи вони у нас нормально-замкнуті або нормально-розімкнуті, ми можемо інвертувати їх положення. Також важливо вимкнути кінцевий

вимикач осі Z, оскільки в нас його немає, а якщо ми цього не зробимо, то не зможемо повернути машину в початкове положення. Для цього потрібно перейти в папку «grbl» в Arduino і внести зміни у файл config.h.

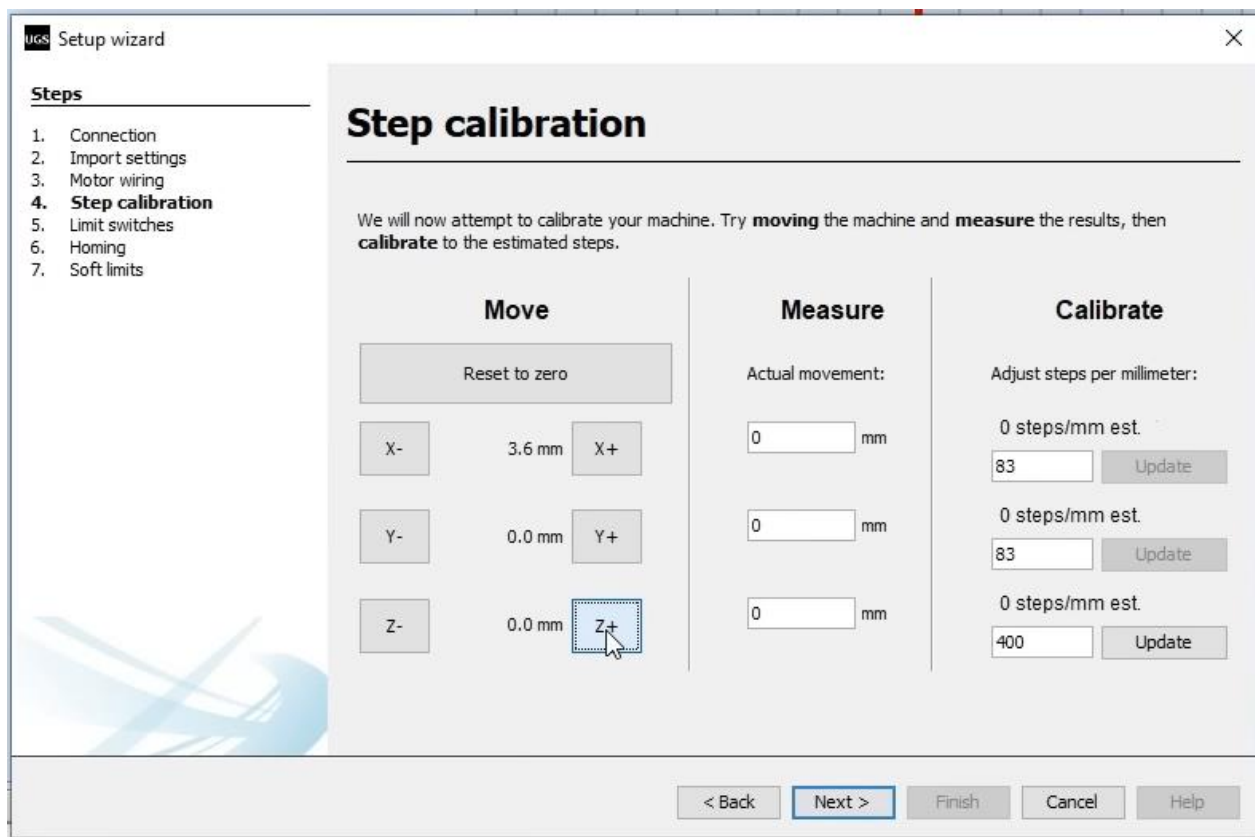


Рис. 3.4 – Налаштування крокових двигунів

Тут нам потрібно знайти цикл повернення до початкового положення і закомментувати налаштування за замовчування для 3-осьового верстату і розкомментувати налаштування для 2-осьового (рис. 4.6)

Після цього пробуємо повернути машину до початкового положення. Після натискання верстат повинен рухатися спочатку до вимикача по осі X, а після спрацювання – по осі Y. За потреби можна змінити спрацювання кінцевих вимикачів на протилежне.

Тут наші кінцевики не спрацювали ані як нормально-замкнуті, ані як нормально-розімкнуті. З цим питанням ще доведеться розібратися, а поки домашнє положення верстату виставлятимемо вручну

```

config.h: Блокнот
Файл Редагування Формат Вигляд Довідка
// in order starting with suffix 0 and completes the homing routine for the specified-axes only. If
// an axis is omitted from the defines, it will not home, nor will the system update its position.
// Meaning that this allows for users with non-standard cartesian machines, such as a lathe (x then z,
// with no y), to configure the homing cycle behavior to their needs.
// NOTE: The homing cycle is designed to allow sharing of limit pins, if the axes are not in the same
// cycle, but this requires some pin settings changes in cpu_map.h file. For example, the default homing
// cycle can share the Z limit pin with either X or Y limit pins, since they are on different cycles.
// By sharing a pin, this frees up a precious IO pin for other purposes. In theory, all axes limit pins
// may be reduced to one pin, if all axes are homed with separate cycles, or vice versa, all three axes
// on separate pin, but homed in one cycle. Also, it should be noted that the function of hard limits
// will not be affected by pin sharing.
// NOTE: Defaults are set for a traditional 3-axis CNC machine. Z-axis first to clear, followed by X & Y.
// #define HOMING_CYCLE_0 (1<<Z_AXIS) // REQUIRED: First move Z to clear workspace.
// #define HOMING_CYCLE_1 ((1<<X_AXIS)|(1<<Y_AXIS)) // OPTIONAL: Then move X,Y at the same time.
// #define HOMING_CYCLE_2 // OPTIONAL: Uncomment and add axes mask to enable

// NOTE: The following are two examples to setup homing for 2-axis machines.
// #define HOMING_CYCLE_0 ((1<<X_AXIS)|(1<<Y_AXIS)) // NOT COMPATIBLE WITH COREXY: Homes both X-Y in one cycle.

#define HOMING_CYCLE_0 (1<<X_AXIS) // COREXY COMPATIBLE: First home X
#define HOMING_CYCLE_1 (1<<Y_AXIS) // COREXY COMPATIBLE: Then home Y

// Number of homing cycles performed after when the machine initially jogs to limit switches.
// This help in preventing overshoot and should improve repeatability. This value should be one or
// greater.
#define N_HOMING_LOCATE_CYCLE 1 // Integer (1-128)

// Enables single axis homing commands. $HX, $HY, and $HZ for X, Y, and Z-axis homing. The full homing
// cycle is still invoked by the $H command. This is disabled by default. This here only to address

```

Рис. 3.5 – Рядки зміненого код

Наступним кроком встановлюємо обмеження на робоче поле верстату, в нашому випадку це 450x450мм

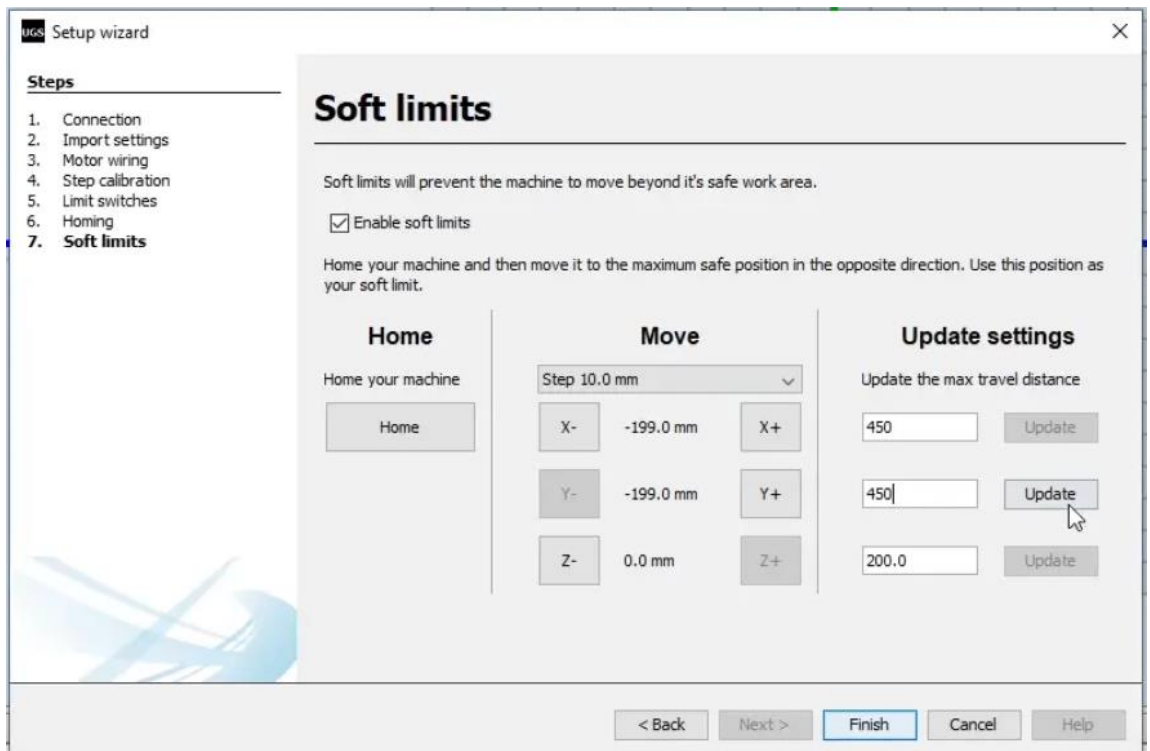


Рис. 3.6 – Вікно налаштування робочого поля

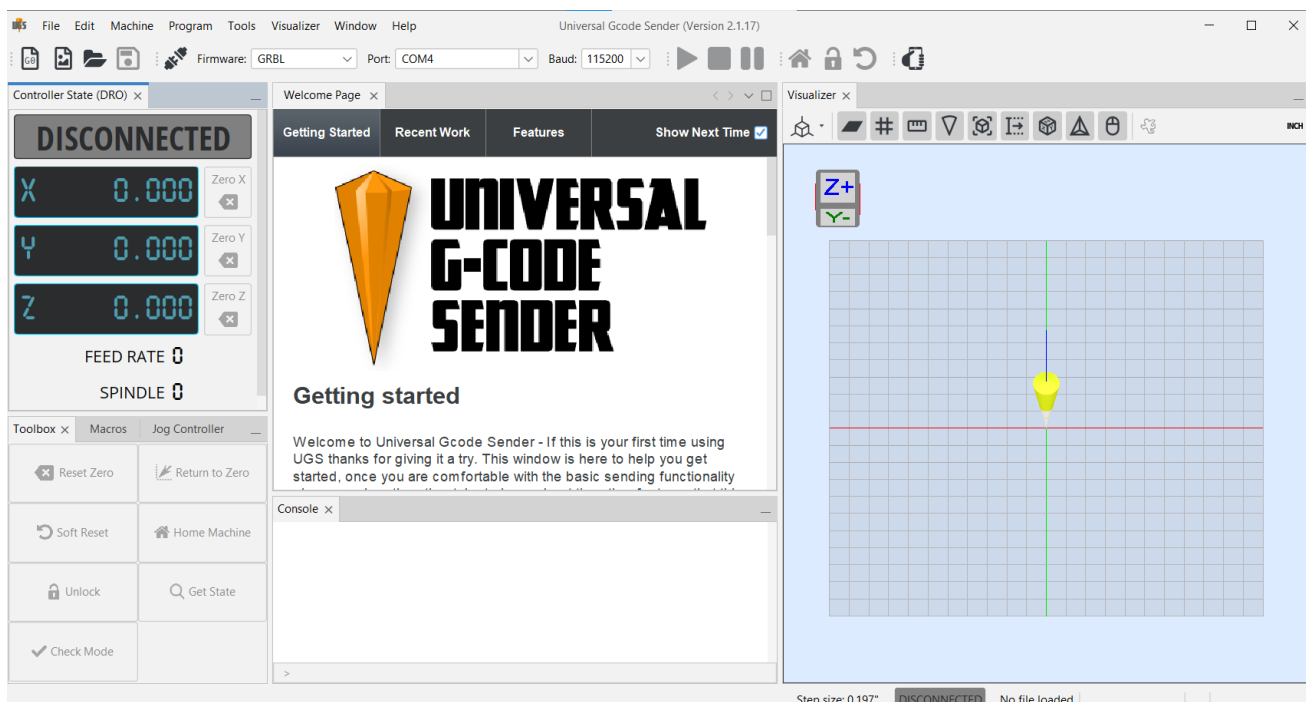


Рис. 3.7 – Вікно робочого інтерфейсу після проведення налаштувань

3.2 Алгоритми керування рухом і температурою струни

Функціонування верстата з ЧПК для різання пінопласту базується на узгодженій роботі двох основних підсистем: системи керування рухом координатних осей та системи керування температурою нагрівної струни. Ефективність і якість процесу різання визначаються правильністю побудови алгоритмів керування цими підсистемами та їх взаємною синхронізацією.

Керування рухом верстата реалізується за допомогою прошивки GRBL, яка інтерпретує команди G-коду та формує керуючі сигнали для драйверів крокових двигунів. Алгоритм роботи системи руху складається з декількох послідовних етапів. На першому етапі відбувається прийом та буферизація команд G-коду, що надходять з керуючого програмного забезпечення на персональному комп'ютері. Кожна команда аналізується, після чого визначаються необхідні переміщення по відповідних координатних осях.

Далі прошивка GRBL виконує планування траєкторії руху з урахуванням заданих швидкостей подачі та прискорень. Для цього використовується алгоритм лінійної та кругової інтерполяції, який дозволяє розбити задану траєкторію на малі кроки, що відповідають можливостям крокових двигунів. На основі цього формується послідовність імпульсів керування, які передаються на драйвери двигунів. Застосування мікрокрокового режиму забезпечує плавність руху порталу та зменшення механічних вібрацій.

Особливістю процесу різання пінопласту є необхідність забезпечення безперервного та рівномірного руху ріжучої струни вздовж заданої траєкторії. Різкі зупинки або зміни швидкості можуть призвести до дефектів різу, таких як підпалювання матеріалу або нерівність кромки. Тому в алгоритмі керування рухом особливу увагу приділено обмеженню прискорень та згладжуванню траєкторії, що реалізується за допомогою відповідних параметрів GRBL.

Керування температурою ніхромової струни здійснюється окремо від керування рухом, однак логічно пов'язане з ним у рамках загального технологічного процесу. Температура струни визначається величиною електричного струму, що протікає через неї, та регулюється за допомогою понижуючого перетворювача постійної напруги. Основним завданням алгоритму керування є забезпечення стабільного теплового режиму, достатнього для якісного різання пінопласту без його надмірного оплавлення або руйнування.

Перед початком різання оператор встановлює необхідний рівень нагріву струни шляхом регулювання вихідної напруги та струму перетворювача. Обране значення залежить від типу та щільності пінопласту, товщини заготовки та швидкості різання. Після досягнення робочої температури струна підтримується у стабільному тепловому стані протягом усього процесу обробки.

У межах розроблюваного верстата алгоритм керування температурою має спрощений характер і не передбачає замкненого контуру зворотного зв'язку за температурою. Однак така реалізація є достатньою для демонстрації принципів роботи верстатів з ЧПК та дозволяє наочно показати вплив температурного

					<i>МР.ПМКМ-25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

режиму на якість різання. За потреби алгоритм може бути розширений шляхом введення температурного датчика та реалізації автоматичного регулювання.

Ефективність процесу різання досягається за рахунок узгодження алгоритмів керування рухом і температурою струни. Зокрема, перед початком виконання програми G-коду необхідно забезпечити попередній нагрів струни до заданої температури. Лише після цього дозволяється запуск руху координатних осей. Аналогічно, після завершення різання подача струму на нагрівну струну вимикається, а верстат переходить у безпечний режим.

Таким чином, алгоритми керування рухом і температурою струни забезпечують стабільну, передбачувану та безпечну роботу навчально-демонстраційного верстата з ЧПК. Реалізований підхід дозволяє досягти необхідної якості різання пінопласту та створює основу для подальшого вдосконалення системи керування.

3.3 Формування та обробка G-code для різання пінопласту

Для забезпечення автоматизованого різання пінопласту у навчально-демонстраційному верстаті з числовим програмним керуванням використовується G-code – універсальна мова програмування верстатів з ЧПК, яка описує траєкторію руху ріжучого інструмента та параметри виконання технологічного процесу. Формування та обробка G-code є ключовим етапом у забезпеченні точності, повторюваності та якості обробки матеріалу.

Процес формування G-code починається з побудови тривимірної або двовимірної моделі заготовки та визначення траєкторії різання. У випадку пінопласту траєкторія задається у вигляді контурів або векторних шляхів, що повторюють форму майбутньої деталі. Для побудови траєкторій використовуються CAD-програми, які дозволяють отримати контури, криві та лінії, що відповідають конструктивним вимогам виробу.

Отримані геометричні дані передаються у САМ-програму, де здійснюється планування траєкторії руху ріжучої струни з урахуванням обмежень верстата: максимально допустимих швидкостей переміщення, прискорень, довжини робочого ходу та допустимого радіусу повороту. Параметри подачі визначаються залежно від щільності та товщини пінопласту, а також від робочої температури струни. Результатом роботи САМ-програми є файл G-code, що містить послідовність команд для контролера верстата.

Файл G-code складається з рядків команд, де кожна команда визначає певну дію верстата. Основними типами команд є:

- G0 / G1 – лінійні переміщення інструмента з визначеною швидкістю;
- G2 / G3 – кругові інтерполяції (за потреби для криволінійних контурів);
- M-коди – керування допоміжними функціями, наприклад увімкнення та вимкнення нагріву струни;
- F-параметри – швидкість подачі, що визначає швидкість переміщення ріжучої струни;
- X, Y, Z – координати точки призначення переміщення у відповідній системі координат.

Для різання пінопласту ключовим є лінійне переміщення G1 із встановленою швидкістю подачі, яка дозволяє забезпечити рівномірний та чистий різ. Параметр швидкості обирається експериментально з урахуванням товщини та щільності матеріалу, а також температури нагрівної струни.

Для створення G-коду в роботі використано Inkscape (<https://inkscape.org/>), яка теж є у відкритому доступі для завантаження. У програмі спочатку необхідно встановити робочу область верстата, яка у нашому випадку має розміри 370×450×450 мм. Після визначення меж робочої зони можна переходити до підготовки зображення для різання.

Якщо на зображенні присутні два або більше окремих об'єктів, які не поєднані між собою, необхідно забезпечити безперервність контуру. Це обов'язкова умова для роботи з нагрітою струною, оскільки вона завжди перебуває в робочій зоні і

					<i>МР.ПМКМ-25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

постійно контактує з пінопластом. На відміну від лазера або фрези, струну неможливо вимкнути або підняти під час переміщення.

Щоб створити суцільний контур, між окремими об'єктами вручну малюються з'єднувальні перемички, які об'єднують всі частини в єдиний шлях різання. При цьому зовнішній контур заготовки має залишатися відкритим, щоб відповідати вимогам технологічного процесу. Таким чином досягається оптимальна траєкторія для безперервного різання пінопласту струною.

Після формування файл G-code завантажується на контролер верстата через програмне забезпечення. У нашому випадку це Universal G-code Sender. Контролер на базі Arduino Uno із прошивкою GRBL інтерпретує команди та перетворює їх у керуючі сигнали для крокових двигунів і допоміжних виходів.

Для підвищення ефективності та якості різання застосовуються додаткові методи обробки G-коду.

Згладжування траєкторій задля усунення різких кутових переходів, що можуть викликати нерівномірність різку або пошкодження струни.

Оптимізація подачі у залежності від кривизни траєкторії або товщини матеріалу.

Коментарі та маркери використовуються для контролю проміжних операцій або інтеграції з додатковими модулями керування.

Завдяки такому підходу до формування та обробки G-коду забезпечується висока точність різання, мінімізація дефектів пінопласту та оптимальне використання матеріалу. Крім того, методика легко адаптується до зміни форм заготовок або параметрів матеріалу, що робить її універсальною для навчально-демонстраційних та дослідницьких завдань.

4. ВИГОТОВЛЕННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЕРСТАТА

4.1 Друк деталей, механічна обробка та складання

Після виготовлення всіх необхідних комплектуючих, збірка навчально-демонстраційного верстата з числовим програмним керуванням до першого пуску зайняла два дні. Цей процес включав як механічну збірку, так і встановлення електронних компонентів, але загальний обсяг ручної обробки деталей був відносно невеликий завдяки попередній підготовці елементів.

Алюмінієвий Т-подібний профіль, що формує каркас верстата, був попередньо порізаний на потрібні розміри, після чого деталі оброблялися для видалення задирок та гострих кромки, що могло б ускладнити збірку або спричинити пошкодження лінійних підшипників. Лінійні вали, на яких рухаються вузли порталу, додатково оброблялися шляхом формування фасок на торцях, що полегшує встановлення підшипників і запобігає їхньому зачіпанню під час монтажу.

Деталі, виготовлені за допомогою 3D-друку, перед складанням потребували видалення підтримок і легкого шліфування контактних поверхонь, щоб забезпечити точне прилягання та плавний хід рухомих вузлів. Це особливо стосувалося кронштейнів, рухомих блоків і основи пульта керування, оскільки їхнє точне розташування впливає на стабільність та правильну роботу всього верстата. Кількість друкованих деталей – 19 шт, деталі виготовлені з матеріалу PETG на принтері BambuLAB P1S. В частину деталей потрібно змонтувати підшипники (лінійні та радіальні) згідно креслеників.

Збірка здійснювалась поетапно, починаючи з формування основних конструктивних модулів. Спершу збиралася рама, яка є «фундаментом» верстата та визначає жорсткість усієї системи. Після цього встановлювався портал, що забезпечує переміщення ріжучого вузла вздовж координатних осей. Окремо

					<i>МР.ПМКм-25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

збиралися допоміжні вузли та кріпильні елементи, що забезпечують точність позиціонування та жорсткість конструкції.

Після зборки основних модулів верстат набував свого остаточного вигляду та був готовий до першого підключення електроніки та проведення тестового запуску. Завдяки модульній конструкції і точній підготовці деталей процес складання пройшов швидко та ефективно, а також дозволив наочно оцінити взаємне розташування рухомих вузлів, забезпечити коректну установку лінійних напрямних та підшипників, а також перевірити сумісність елементів після 3D-друку з алюмінієвим каркасом.

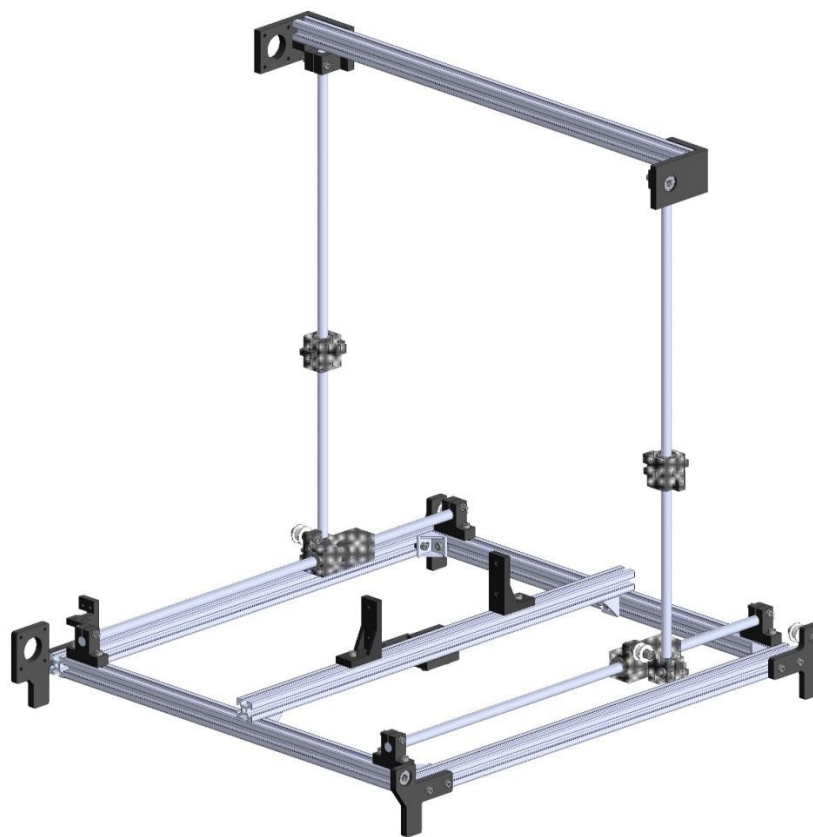


Рис.4.1 – Проміжний вигляд верстату при збиранні

Для забезпечення натягу і компенсації видовження пружини при нагріванні – з одного боку підбираємо і встановлюємо пружину. З іншого боку струну фіксуємо через вухо з товстого мідного дроту. В результаті чого і вухо і пружина не дає передати тепло від нагріву на пластикові кронштейни, і забезпечує натяг

					<i>MP.ПМКМ-25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

струни як в холодному так і в гарячому стані.



Рис. 4.2 – Кріплення струни

Для випробувань було обрано дві струни діаметром 0,45 і 0,2 мм, виходячи з тих розмірів, які встановлено на верстаті, що є у продажу. Так ми зможемо підібрати оптимальний варіант для нашого випадку. Поки встановлюємо нитку 0,45 мм.

4.2 Монтування апаратних засобів

Наступним етапом складання навчально-демонстраційного верстата з числовим програмним керуванням є монтаж електричної обв'язки, що включає встановлення крокових двигунів, кінцевих вимикачів, блока керування з платами та підключення допоміжних елементів, таких як нагріта струна для різання пінопласту. Даний етап є критично важливим для забезпечення стабільної роботи верстата та безпечної експлуатації.

Для керування рухомими вузлами обрано мікроконтролер Arduino Uno у поєднанні з надбудовою CNC Shield V3.0, яка забезпечує можливість підключення драйверів крокових двигунів та інтеграцію додаткових периферійних модулів. Після встановлення плати Arduino Uno на основу блока керування, поверх неї монтується плата CNC Shield V3.0. У спеціальні роз'єми

					<i>МР.ПМКМ-25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

надбудови вставляються драйвери крокових двигунів А4988, які відповідальні за точне переміщення координатних осей. Горизонтальне переміщення рухомого вузла прийнято за вісь Х, вертикальне – за вісь Y, а обертовий вузол позначається як вісь Z.

Для забезпечення роботи нагрітої струни та регулювання її температури встановлюється понижуючий перетворювач напруги XL-M401, який дозволяє плавно змінювати напругу та підтримувати необхідний тепловий режим струни. Цей модуль підключається до контролера та живлення, що дає змогу координувати нагрів з рухом верстата, забезпечуючи безпечну та стабільну роботу під час різання пінопласту.

На наступному етапі до кінцевих вимикачів та кнопки управління підпаюються відповідні дроти для підключення до плати контролера. Одночасно вимірюються та готуються дроти для нагріву струни: один провід має довжину приблизно 500 мм, а інший на 200–300 мм довший, що забезпечує можливість підведення струму до більш віддаленої частини робочої зони від блока керування. Оскільки перетин нагрівного дроту був невеликий і існувала ймовірність його оплавлення при тривалому навантаженні, було прийнято рішення подвоїти дроти на кожен бік, тобто з'єднати по два дроти паралельно для кожного контакту. Це дозволяє зменшити струмове навантаження на окремий провід та підвищити надійність нагрівного контуру, а також уникнути перегріву та можливого пошкодження проводки.

Після встановлення та підключення всіх електронних компонентів проводиться перевірка цілісності електричного кола, правильності підключення драйверів, кінцевих вимикачів та нагрівного елемента. Особлива увага приділяється тому, щоб дроти не заважали руху порталу та не піддавалися механічному тертю під час роботи, а також забезпечували зручний доступ для обслуговування та регулювання параметрів струни.

Таким чином, завершення монтажу електричної обв'язки формує повноцінну систему керування верстатом, готову до прошивки контролера,

					<i>MP.ПМКМ-25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

налаштування програмного забезпечення GRBL та подальшого тестування функцій руху і нагріву (описано у розділі 3).

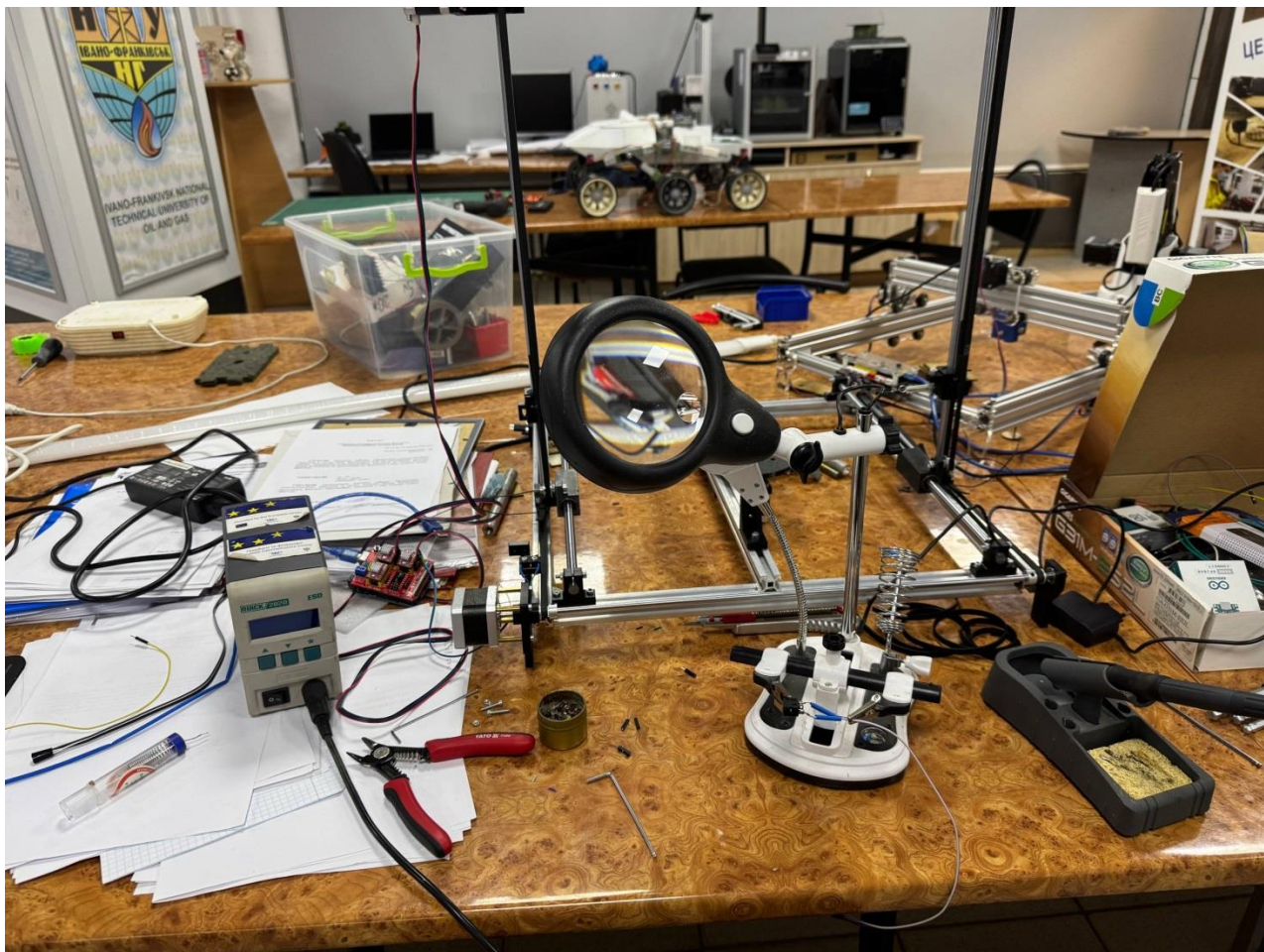


Рис. 4.3 – Процес збирання електричної обв'язки

Для забезпечення безпечної роботи нагрітої струни додатково встановлюється кнопка вимикання, яка виконує роль запобіжника. Це дозволяє уникнути ситуації, коли струна опиняється під напругою відразу після підключення верстата до електромережі, забезпечуючи безпечний контроль процесу нагріву.

Усі електричні компоненти підключаються відповідно до схеми, наведеної на рис. 4.4, що відображає послідовність з'єднань між контролером, драйверами крокових двигунів, кінцевими вимикачами, нагрівною струною та понижуючим перетворювачем напруги. Для більш зручного контролю параметрів напруги на

виході регулятора можна послідовно під'єднати вольтметр, що дозволяє оперативно стежити за робочим режимом струни.

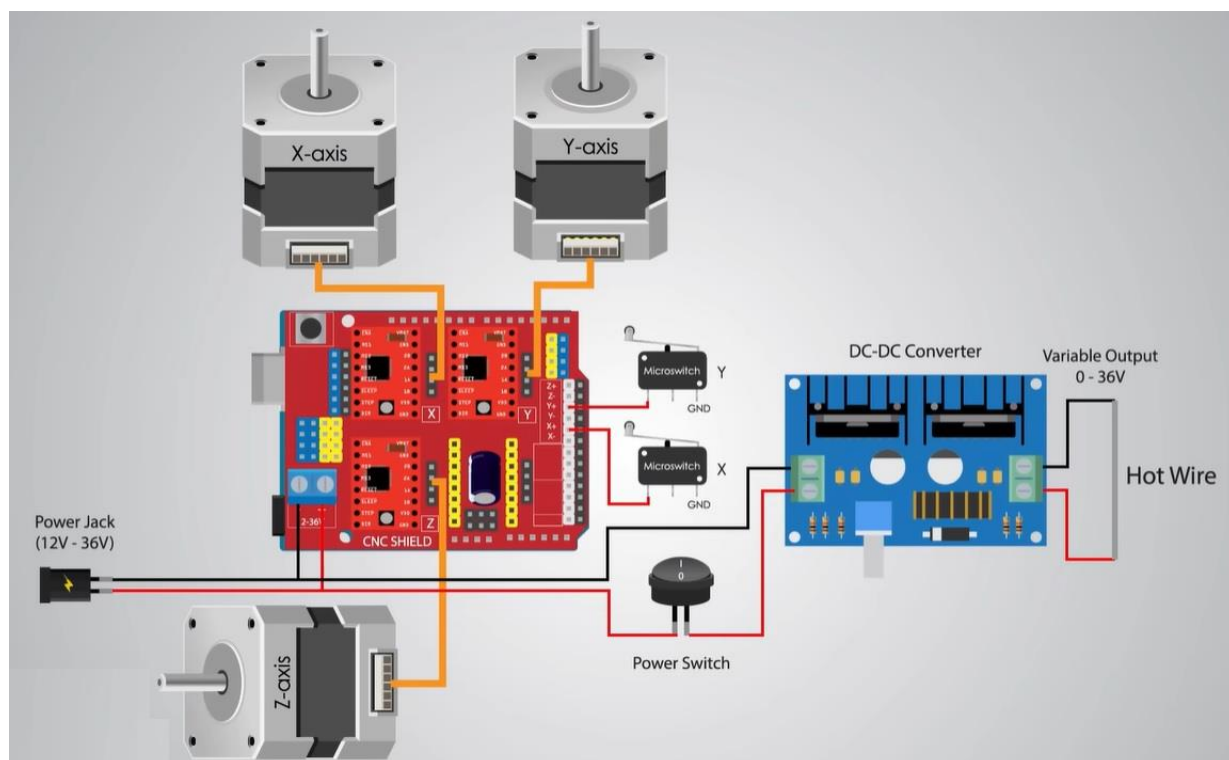


Рис. 4.4 – Схема підключення компонентів верстату

Під час експериментальної роботи, на етапі первинних тестів та налагодження, замість стаціонарного вольтметра використовується мультиметр, який дозволяє проводити виміри напруги на нагрівній струні та оперативно коригувати її робочий режим. Такий підхід забезпечує гнучкість під час налаштування, контроль стабільності нагріву та безпечне проведення дослідів.

Після виконання вище зазначених дій можемо робити перші пробні запуски. Вмикаємо блок живлення в розетку, кнопку живлення яка відповідає за нагрів нитки і збільшуємо регулятором напругу до 5-6 В. Беремо фрагмент пінопласту і пробуємо прорізати.

Як видно на фото, перший результат є, нитка нагрілась до потрібної температури і розплавилась пінопласт.

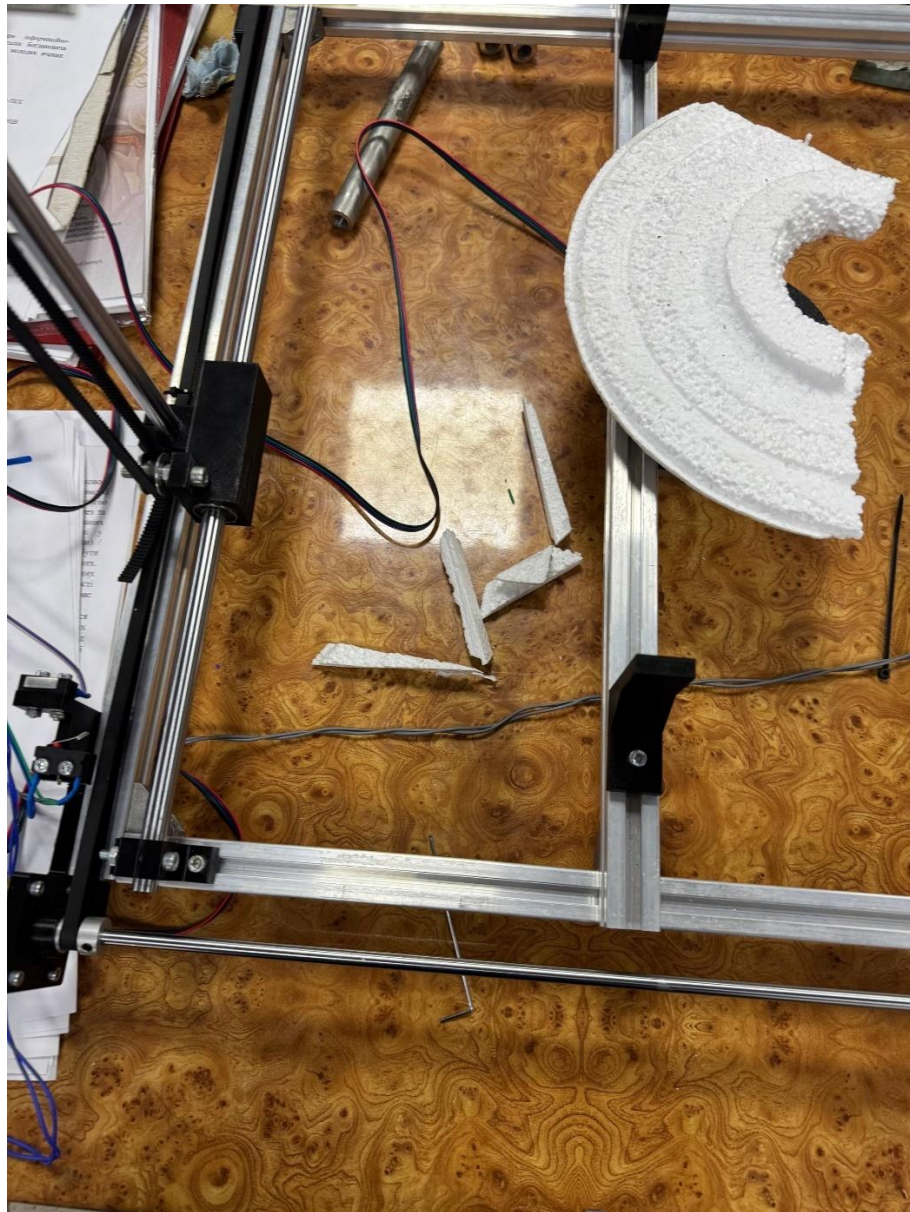


Рис. 4.5 – Перший пробний різ

4.3 Методика експериментальних досліджень

Експериментальні дослідження навчально-демонстраційного верстата з числовим програмним керуванням для різання пінопласту спрямовані на оцінку точності позиціонування, стабільності роботи рухомих вузлів, ефективності алгоритмів керування та впливу температурного режиму на якість різання. Методика досліджень передбачає систематичне проведення тестів із

					<i>МР.ПМКМ-25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

варіюванням параметрів руху та нагріву струни, а також документування отриманих результатів для подальшого аналізу.

На підготовчому етапі здійснюється перевірка механічної та електронної складових верстата та передбачено калібрування координатної системи та перевірку початкового нульового положення, що забезпечує коректну інтерпретацію команд G-коду.

Для проведення дослідів обираються зразки пінопласту різної щільності та товщини. Готуються тестові контури, які включають прості геометричні фігури (лінії, квадрати, кола) та складні контури. Перед різанням забезпечується безперервність контурів, з'єднання окремих елементів перемичками та перевірка відкритих/закритих ділянок, що важливо для роботи струни.

Налаштування верстата включає встановлення робочої області (370×450×450 мм), підключення нагрітої струни, контроль її напруги та температури, встановлення початкового положення.

Виконання тестових програм G-коду включає переміщення по осях X та Y, а також увімкнення нагріву струни. Під час тестів використовуються варіанти різання із різними швидкостями подачі, прискореннями та температурними режимами.

Під час тестового різання ведуть спостереження та фіксацію результатів: точності позиціонування, рівномірності різу, наявності дефектів, таких як нерівні кромки, підпалювання або розриви матеріалу. Також ведуть вимірювання параметрів напруги на струні за допомогою тестера.

Для оцінки впливу параметрів процесу на якість різання застосовуються серії тестів, у яких змінюються: швидкість подачі ріжучого вузла, температура струни, щільність та товщина пінопласту, конфігурація контурів (простий або складний вектор).

Після завершення експериментів проводиться аналіз отриманих даних:

- порівнюються заплановані та фактичні траєкторії руху;
- оцінюється вплив температури струни на якість різу;

					<i>MP.ПМКМ-25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

Для оцінки точності роботи верстата та впливу параметрів нагріву струни на якість різання було проведено серію експериментів з виготовлення квадратиків розміром 16×24 мм із пінопласту густиною 100 кг/м^3 . Основними параметрами дослідів були напруга на струні, що визначає її температуру, та швидкість подачі ріжучого вузла. Прискорення переміщення встановлювалось на рівні 5 мм/с^2 та 10 мм/с^2 , що дозволяло оцінити вплив інерційних ефектів рухомих вузлів на форму готових виробів.

Після обробки зразки оцінювались за геометричною точністю та якістю кромки. Основним недоліком, який було виявлено при різанні, стало зрізання кутів квадратиків. Це явище пов'язане з інерцією рухомого вузла та особливостями роботи нагрітої струни при різких змінах напрямку руху. При проходженні ріжучого вузла через кутові ділянки струна продовжувала переміщатися по інерції, що призводило до часткового зрізання матеріалу за межами запланованого контуру. Такі зразки не брали до уваги при побудові графічних залежностей.

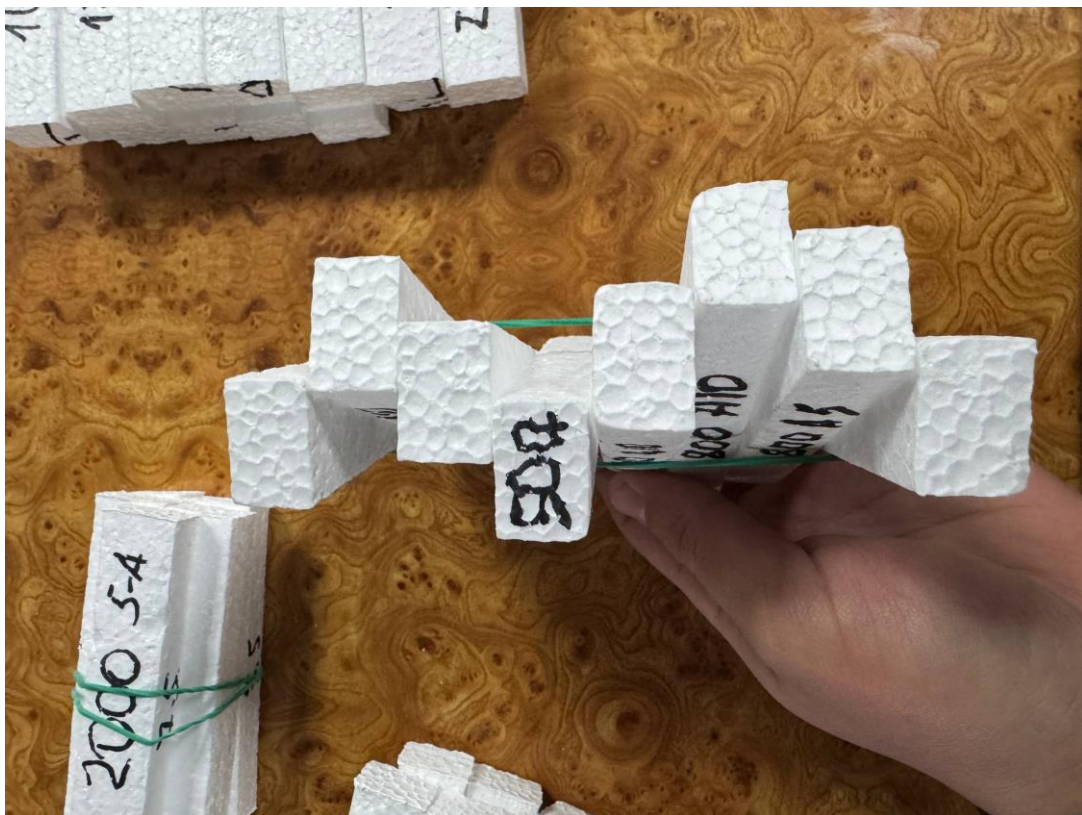


Рисунок 4.7 – Зразки, отримані в ході дослідження (вид з торця)

Інші залежності, такі як величина оплавлення пінопласту на кромках, від швидкості подачі струни при різних напругах (6 В, 6,5 В, 7,5 В, 8,2 В), а також від прискорення (5 мм/с² та 10 мм/с²), наведені нижче у вигляді графічних залежностей (рис. 4.8 – рис. 4.12).

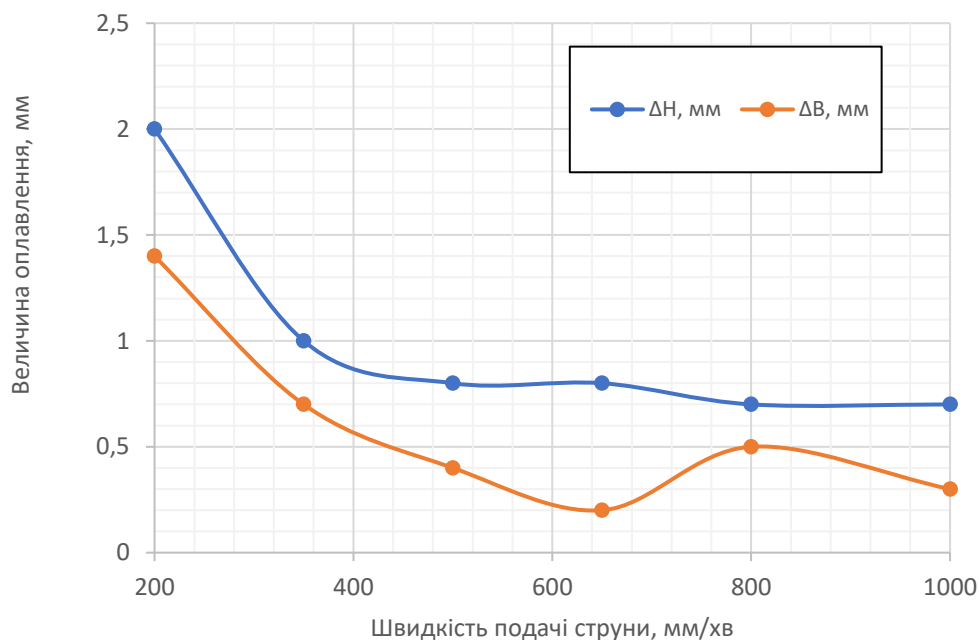


Рисунок 4.8 – Залежність величини оплавлення від швидкості подачі струни при напрузі 6,0 В та прискоренні 5 мм/с

У процесі експериментальних досліджень було встановлено, що величина оплавлення кромки пінопласту коливалася від 0,3 до 1,5 мм. Ці коливання безпосередньо залежали від напруги на нагрітій струні та швидкості подачі ріжучого вузла. При нижчих напругах (6–6,5 В) оплавлення кромки було мінімальним, близько 0,4–0,6 мм, проте зростання швидкості подачі ріжучого вузла приводило до нерівного зрізу на кутах. При збільшенні напруги до 7,5–8,2 В спостерігалася збільшення оплавлення до 0,8–1,2 мм, що обумовлено підвищеною температурою струни і більш інтенсивним нагрівом матеріалу під час різання.

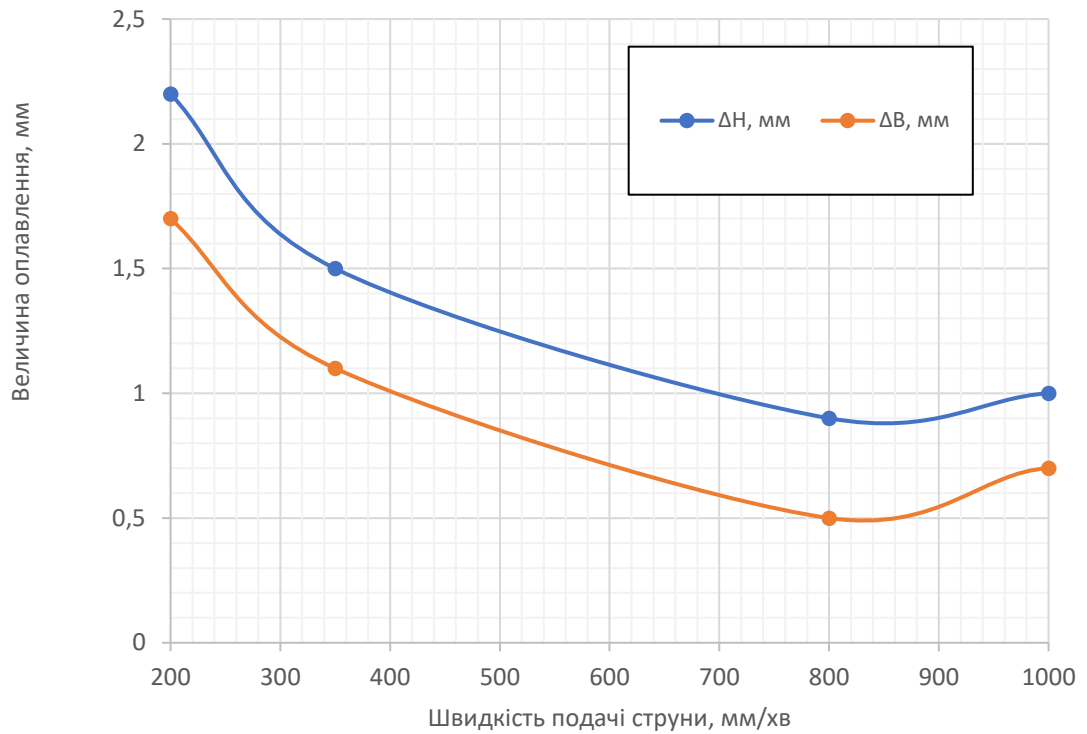


Рисунок 4.9 – Залежність величини оплавлення від швидкості подачі струни при напрузі 6,5 В та прискоренні 5 мм/с

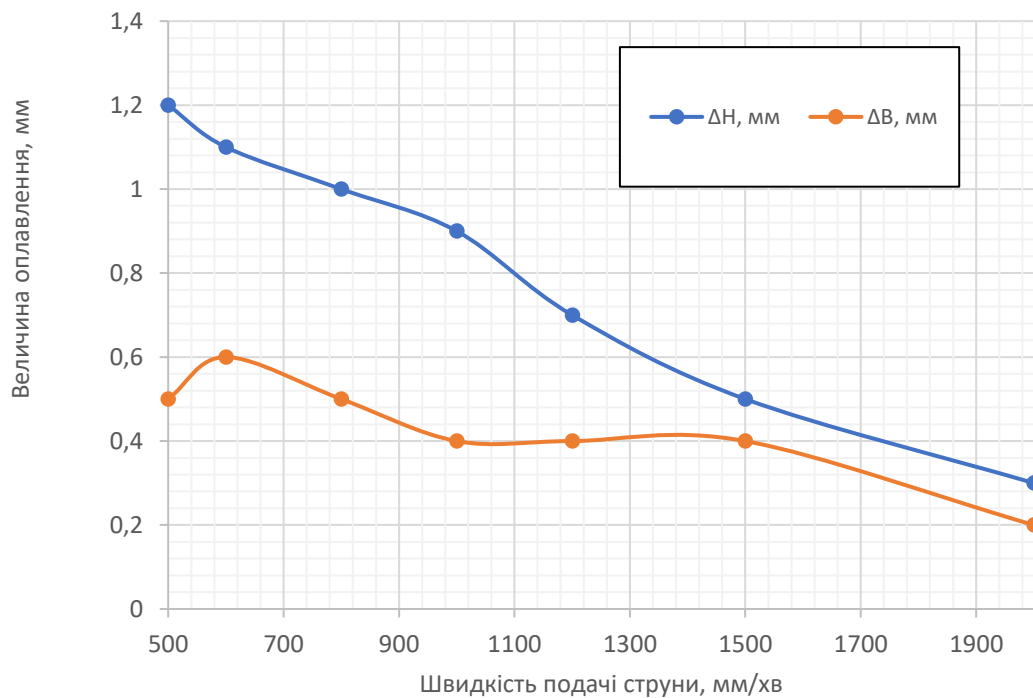


Рисунок 4.10 – Залежність величини оплавлення від швидкості подачі струни при напрузі 6,5 В та прискоренні 10 мм/с

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

МР.ПМКМ-25.00.00.000 ПЗ

Арк.

46

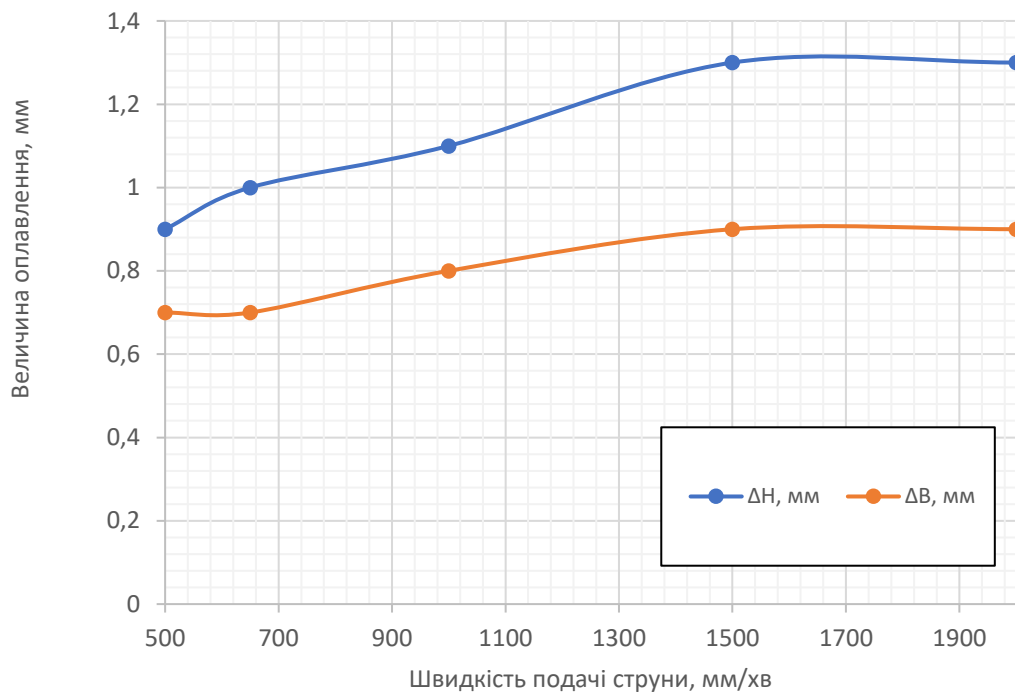


Рисунок 4.11 – Залежність величини оплавлення від швидкості подачі струни при напрузі 7,5 В та прискоренні 5 мм/с

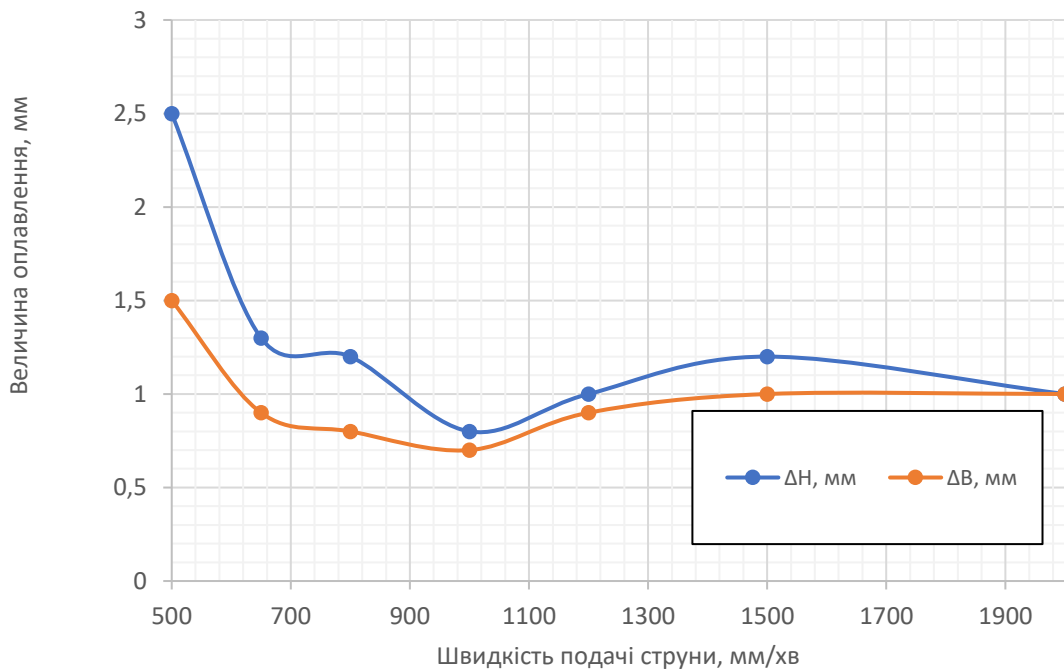


Рисунок 4.12 – Залежність величини оплавлення від швидкості подачі струни при напрузі 8,2 В та прискоренні 5 мм/с

Аналіз показав, що основним дефектом залишалось зрізання кутів, а інші залежності, зокрема прискорення 5–10 мм/с², були недостатньо суттєвими і не впливали істотно на величину оплавлення, тому їх було відкинуто з подальшого аналізу.

Отримані дані дозволяють зробити висновок, що оптимальні режими різання для квадратиків 16×24 мм полягають у поєднанні помірної напруги струни (близько 6,5 В) та середньої швидкості подачі (600–800 мм/хв), що забезпечує мінімальне оплавлення та збереження геометрії кутів.

					<i>МР.ПМКМ-25.00.00.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		48

ВИСНОВКИ

У ході виконання магістерської роботи було розроблено, виготовлено та досліджено навчально-демонстраційний верстат з числовим програмним керуванням для різання пінопласту струною, що дозволяє відпрацьовувати основні принципи роботи систем ЧПК та методики механатроніки на прикладі простого та наочного експериментального обладнання. Основною метою роботи було створення функціонального прототипу верстата, який дозволяє вивчати особливості керування кроковими двигунами, алгоритмів руху, температурного режиму нагрітої струни та оцінки якості обробки матеріалу.

У процесі роботи було виконано повний цикл конструкторської та експериментальної підготовки. На першому етапі здійснено проектування механічної частини верстата, яка базується на простих, доступних та недорогих компонентах: алюмінієвому Т-подібному профілі, лінійних напрямних та підшипниках, крокових двигунах NEMA17 і зубчастому ремені. Конструкція верстата модульна, що дозволило окремо збирати раму, портал та вузли керування, забезпечуючи високу жорсткість і точність взаємного розташування рухомих елементів. Для нестандартних деталей, таких як кронштейни, рухомі блоки та основа пульта керування, використовувався 3D-друк.

Далі було проведено збірку електронної частини верстата, що включала монтаж крокових двигунів, кінцевих вимикачів, пульта керування з платами Arduino Uno та CNC Shield V3.0, а також драйверів крокових двигунів A4988. Для забезпечення регулювання нагріву струни був встановлений понижуючий перетворювач напруги XL4016E1.

Наступним етапом роботи стала підготовка програмного забезпечення та G-коду. За допомогою GRBL було виконано прошивку контролера, налаштування робочої області верстата (370×450×450 мм) та параметрів руху по осях X, Y та Z.

Експериментальна частина роботи включала дослідження точності позиціонування та якості різання пінопласту. Для оцінки якості різання

					<i>МР.ПМКМ-25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

проводилося виготовлення квадратиків розміром 16×24 мм із пінопласту густиною 100 кг/м³. Основним виявленим дефектом стало зрізання кутів, обумовлене інерцією рухомого вузла при зміні напрямку. Величина оплавлення кромки коливалася від 0,3 до 1,5 мм залежно від напруги на струні (6, 6,5, 7,5 та 8,2 В) і швидкості подачі ріжучого вузла, тоді як вплив прискорення переміщень був мінімальним і відкидався з подальшого аналізу.

Отримані результати дозволяють визначити оптимальні режими роботи верстата, при яких забезпечується мінімальне оплавлення кромки та максимальна точність геометрії виробів. Зокрема, для квадратиків 16×24 мм рекомендовано поєднання помірної напруги струни (6–6,5 В) із середньою швидкістю подачі (600-800 мм/хв), що зменшує дефекти кутів і зберігає якість різки.

Таким чином, виконана робота дозволила:

- Розробити функціональний навчально-демонстраційний верстат з ЧПК для різання пінопласту.
- Забезпечити комплексне поєднання механічної, електронної та програмної складових.
- Визначити параметри роботи струни та рухомого вузла, які оптимізують точність і якість обробки.
- Надати методичку експериментальних досліджень, що дозволяє систематично оцінювати вплив технологічних параметрів різання пінопласту на якість отриманих виробів.

Результати магістерської роботи підтверджують практичну придатність створеного верстата для навчальних, демонстраційних та дослідницьких завдань, а також закладають основу для подальшого вдосконалення конструкції, алгоритмів керування та адаптації верстата для роботи з іншими матеріалами або більш складними контурами.

					<i>МР.ПМКМ-25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

Список використаних джерел

1. Universal Gcode Sender: The Basics Simply Explained, -URL:
<https://all3dp.com/2/universal-gcode-sender/>
2. Arduino CNC Foam Cutting Machine – URL:
<https://howtomechatronics.com/projects/arduino-cnc-foam-cutting-machine/>
3. Arduino IDE - URL:
<https://www.arduino.cc/en/software>
4. G-code Explained. - URL:
<https://howtomechatronics.com/tutorials/g-code-explained-list-of-most-important-g-code-commands/>
5. LinuxCNC User Guide. Open Source CNC Control Software. – Community Documentation, 2023. - URL:
https://linuxcnc.org/docs/2.8/pdf/LinuxCNC_Documentation.pdf
6. Java Downloads - URL:
<https://www.oracle.com/java/technologies/downloads/#java8>
7. GRBL Project Documentation. Open Source G-code Interpreter for CNC. – GitHub, 2023.
8. How to Setup GRBL & Control CNC Machine with Arduino – URL:
<https://howtomechatronics.com/tutorials/how-to-setup-grbl-control-cnc-machine-with-arduino/>
9. Михайлюк В., Ердей З., Джус А., Дічюк В., Родіч В. Проектування та 3D прототипування: посібник. Івано-Франківськ: Фоліант, 2022. 124с.

Додатки:

Додаток А

```
%  
(Header)  
(Generated by gcodetools from Inkscape.)  
(Using default header. To add your own header create file "header" in the  
output dir.)  
M3  
(Header end.)  
G21 (All units in mm)  
  
(Start cutting path id: path45048-4)  
(Change tool to Cylindrical cutter)  
  
G00 Z0.000000  
G00 X23.644467 Y30.169740  
  
G01 Z-1.000000 F100.0(Penetrate)  
G01 X34.088755 Y28.324160 Z-1.000000 F200.000000  
G01 X44.512061 Y26.520530 Z-1.000000  
G01 X54.956351 Y24.674960 Z-1.000000  
G01 X65.421610 Y22.850340 Z-1.000000  
G01 X75.886861 Y21.067690 Z-1.000000  
G01 X86.373097 Y19.368920 Z-1.000000  
G01 X96.880310 Y17.795990 Z-1.000000  
G01 X107.408490 Y16.411800 Z-1.000000  
G01 X117.957630 Y15.216370 Z-1.000000  
G01 X128.506780 Y14.293580 Z-1.000000  
G01 X139.076890 Y13.622470 Z-1.000000  
G01 X149.647020 Y13.265940 Z-1.000000  
G01 X160.217150 Y13.265940 Z-1.000000  
G01 X170.787270 Y13.664420 Z-1.000000  
G01 X181.357390 Y14.440390 Z-1.000000  
G01 X191.906540 Y15.635820 Z-1.000000  
G01 X202.455690 Y17.292640 Z-1.000000  
G01 X212.983870 Y19.557680 Z-1.000000  
G01 X218.226980 Y20.983790 Z-1.000000
```

					MP.ПМКМ-25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

G01 X223.449130 Y22.745480 Z-1.000000
G01 X228.629320 Y25.010510 Z-1.000000
G01 X231.187970 Y26.562470 Z-1.000000
G01 X232.173670 Y27.401370 Z-1.000000
G01 X232.656040 Y27.925690 Z-1.000000
G01 X233.369100 Y30.169740 Z-1.000000
G01 X231.984920 Y31.994340 Z-1.000000
G01 X231.418660 Y32.350870 Z-1.000000
G01 X230.307120 Y32.875180 Z-1.000000
G01 X227.622640 Y33.777000 Z-1.000000
G01 X222.316610 Y34.951460 Z-1.000000
G01 X217.052520 Y35.811340 Z-1.000000
G01 X211.809410 Y36.461490 Z-1.000000
G01 X201.344140 Y37.405230 Z-1.000000
G01 X190.920830 Y38.034420 Z-1.000000
G01 X180.518490 Y38.390940 Z-1.000000
G01 X170.116160 Y38.516750 Z-1.000000
G01 X159.734780 Y38.432850 Z-1.000000
G01 X149.311460 Y38.097290 Z-1.000000
G01 X138.909120 Y37.531030 Z-1.000000
G01 X128.506780 Y36.797000 Z-1.000000
G01 X118.083460 Y35.937130 Z-1.000000
G01 X107.660150 Y34.951420 Z-1.000000
G01 X97.215867 Y33.944750 Z-1.000000
G01 X86.750607 Y32.833200 Z-1.000000
G01 X76.264363 Y31.763610 Z-1.000000
G01 X65.757158 Y30.819840 Z-1.000000
G01 X55.249962 Y30.022890 Z-1.000000
G01 X44.721780 Y29.477610 Z-1.000000
G01 X34.172630 Y29.477610 Z-1.000000
G01 X23.644467 Y30.169700 Z-1.000000
G00 Z0.000000

(End cutting path id: path45048-4)

(Start cutting path id: path45048)

(Change tool to Cylindrical cutter)

					<i>МР.ПМКМ-25.00.00.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		53

G00 Z0.000000

G00 X17.454864 Y67.039620

G01 Z-1.000000 F100.0(Penetrate)

G01 X27.899155 Y65.194040 Z-1.000000 F200.000000

G01 X38.322460 Y63.390410 Z-1.000000

G01 X48.766750 Y61.544840 Z-1.000000

G01 X59.232009 Y59.720220 Z-1.000000

G01 X69.697260 Y57.937570 Z-1.000000

G01 X80.183496 Y56.238800 Z-1.000000

G01 X90.690706 Y54.665870 Z-1.000000

G01 X101.218880 Y53.281680 Z-1.000000

G01 X111.768020 Y52.086250 Z-1.000000

G01 X122.317170 Y51.163460 Z-1.000000

G01 X132.887290 Y50.492350 Z-1.000000

G01 X143.457420 Y50.135820 Z-1.000000

G01 X154.027540 Y50.135820 Z-1.000000

G01 X164.597660 Y50.534300 Z-1.000000

G01 X175.167770 Y51.310270 Z-1.000000

G01 X185.716920 Y52.505700 Z-1.000000

G01 X196.266070 Y54.162520 Z-1.000000

G01 X206.794260 Y56.427560 Z-1.000000

G01 X212.037370 Y57.853670 Z-1.000000

G01 X217.259520 Y59.615360 Z-1.000000

G01 X222.439720 Y61.880390 Z-1.000000

G01 X224.998350 Y63.432350 Z-1.000000

G01 X225.984050 Y64.271250 Z-1.000000

G01 X226.466420 Y64.795570 Z-1.000000

G01 X227.179490 Y67.039620 Z-1.000000

G00 Z0.000000

(End cutting path id: path45048)

(Start cutting path id: path45048)

(Change tool to Cylindrical cutter)

					<i>MP.ПМКМ-25.00.00.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		<i>54</i>

G00 Z0.000000
 G00 X227.179490 Y67.039620

 G01 Z-1.000000 F100.0(Penetrate)
 G01 X225.795300 Y68.864220 Z-1.000000 F200.000000
 G01 X225.229050 Y69.220750 Z-1.000000
 G01 X224.117510 Y69.745060 Z-1.000000
 G01 X221.433040 Y70.646880 Z-1.000000
 G01 X216.127000 Y71.821330 Z-1.000000
 G01 X210.862910 Y72.681220 Z-1.000000
 G01 X205.619800 Y73.331370 Z-1.000000
 G01 X195.154540 Y74.275110 Z-1.000000
 G01 X184.731220 Y74.904300 Z-1.000000
 G01 X174.328880 Y75.260820 Z-1.000000
 G01 X163.926540 Y75.386630 Z-1.000000
 G01 X153.545170 Y75.302730 Z-1.000000
 G01 X143.121850 Y74.967170 Z-1.000000
 G01 X132.719520 Y74.400910 Z-1.000000
 G01 X122.317170 Y73.666880 Z-1.000000
 G01 X111.893860 Y72.807010 Z-1.000000
 G01 X101.470540 Y71.821300 Z-1.000000
 G01 X91.026262 Y70.814630 Z-1.000000
 G01 X80.560998 Y69.703080 Z-1.000000
 G01 X70.074762 Y68.633490 Z-1.000000
 G01 X59.567557 Y67.689720 Z-1.000000
 G01 X49.060361 Y66.892770 Z-1.000000
 G01 X38.532179 Y66.347490 Z-1.000000
 G01 X27.983029 Y66.347490 Z-1.000000
 G01 X17.454864 Y67.039580 Z-1.000000
 G00 Z0.000000

(End cutting path id: path45048)

(Footer)

M5
 G00 X0.0000 Y0.0000
 M2

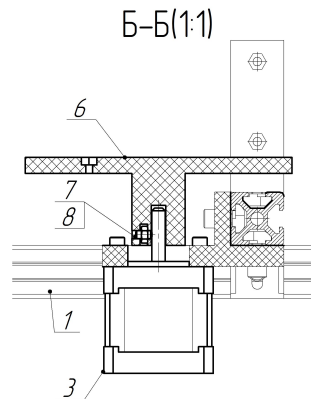
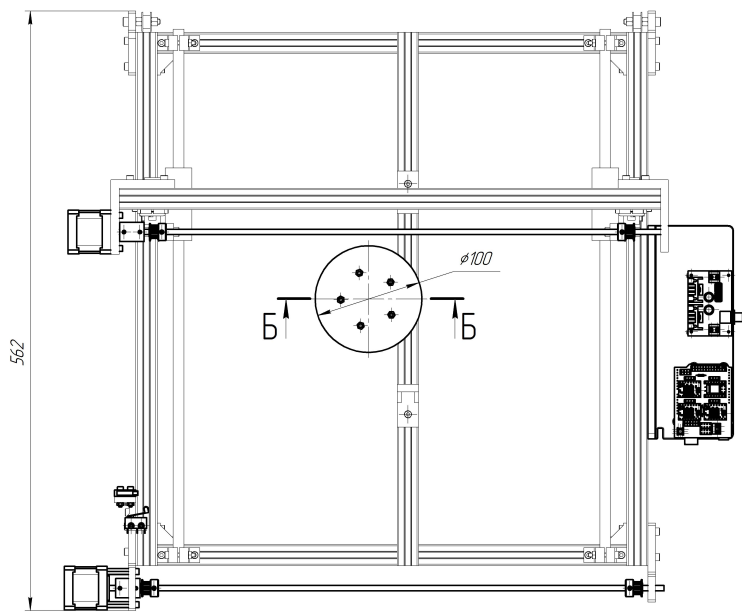
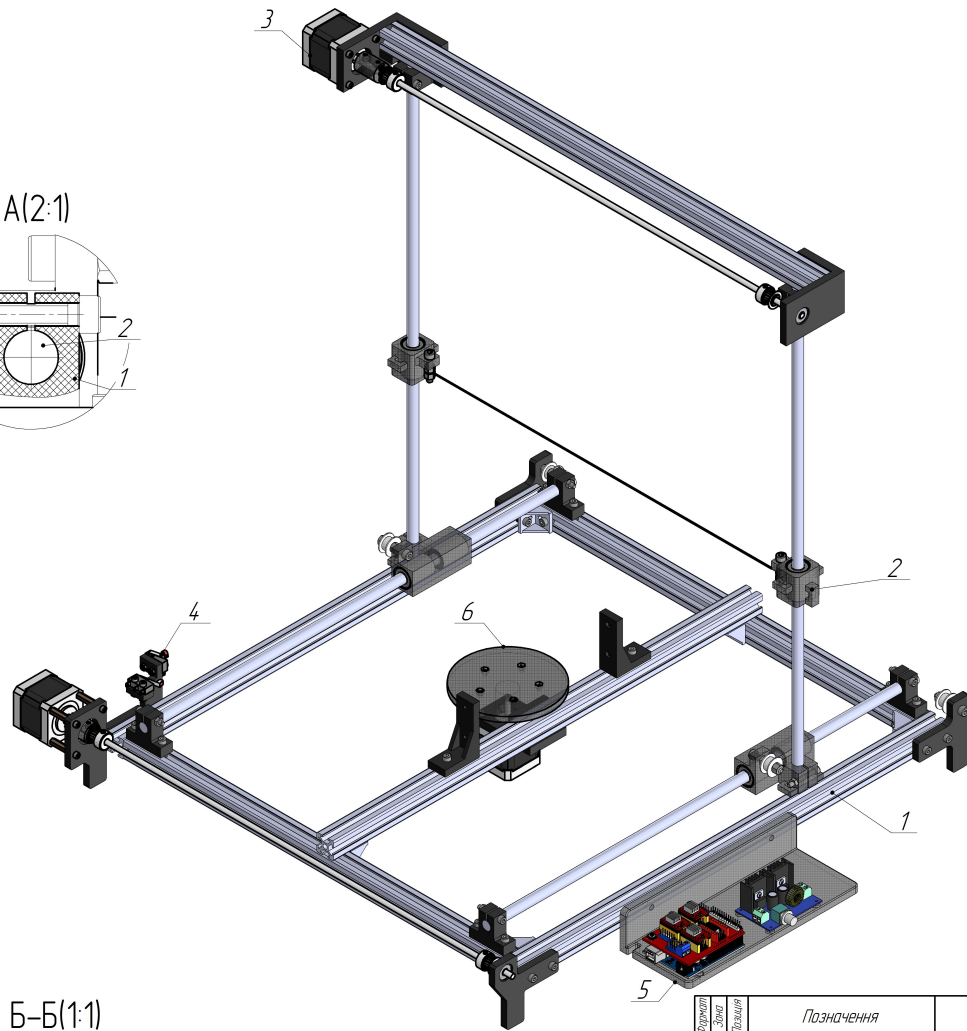
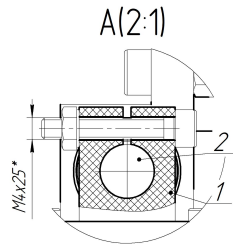
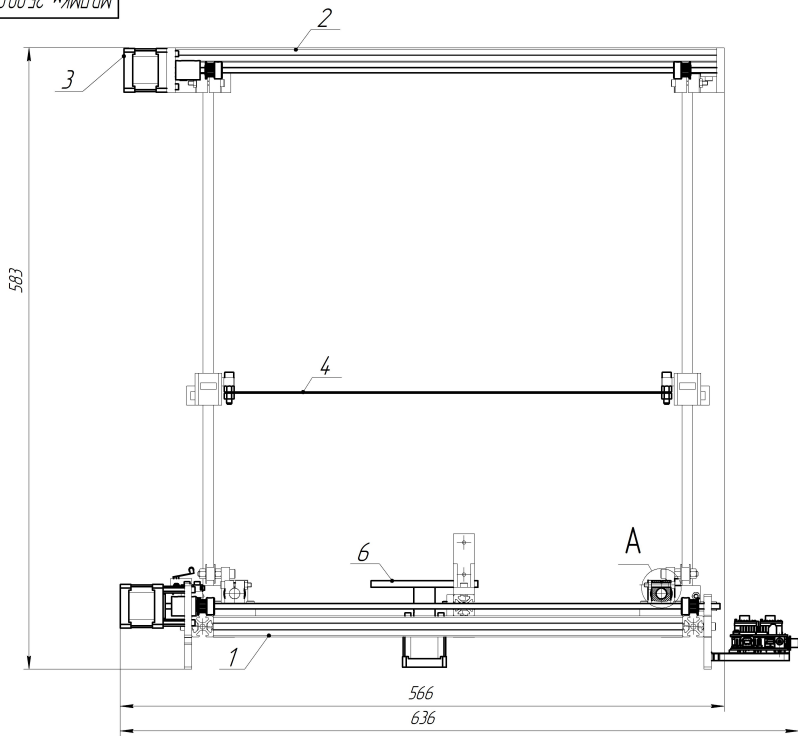
					<i>MP.ПМКМ-25.00.00.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		55

(Using default footer. To add your own footer create file "footer" in the output dir.)

(end)

%

					<i>МР.ПМКМ-25.00.00.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		<i>56</i>



- 1 * Розміри для довідок.
- 2 Лінійні вали парталу (поз. 2) фіксувати в передбачених місцях попередньо встановленими зажимними долотами.
- 3 Підшипникові вузли повинні рухатися без запинання і зайвих зусиль.
- 4 Встановити ремінь у передбачених місцях, забезпечивши достатній натяг. Фіксувати кінці на рухомих блоках довшим способом (зажим, хомут).
- 5 Спосіб нагріву струни - довідний. Робоча температура 190-240°.

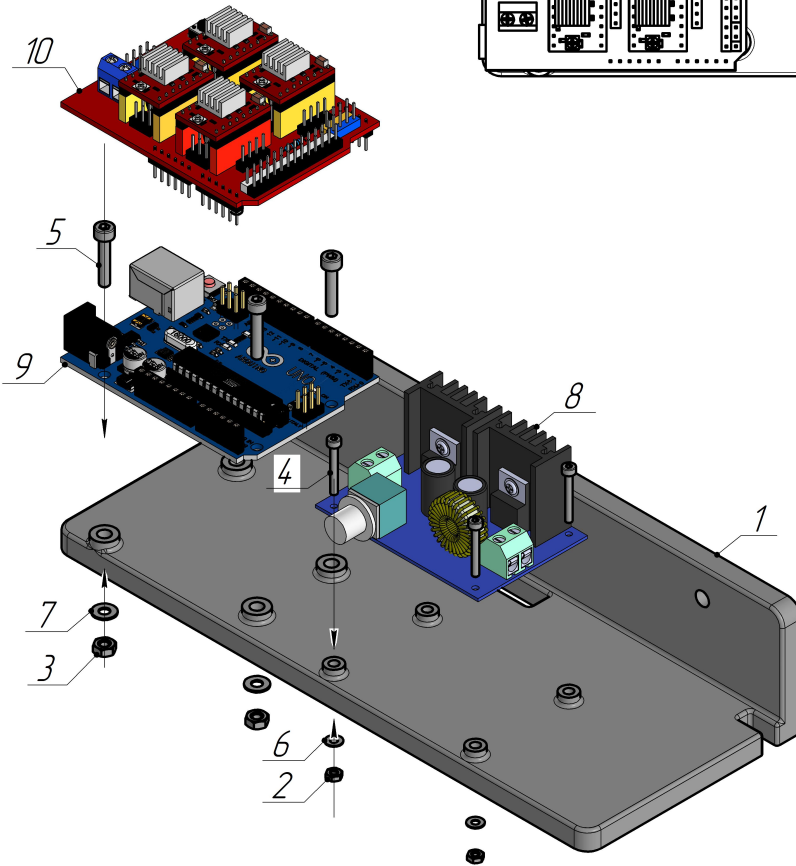
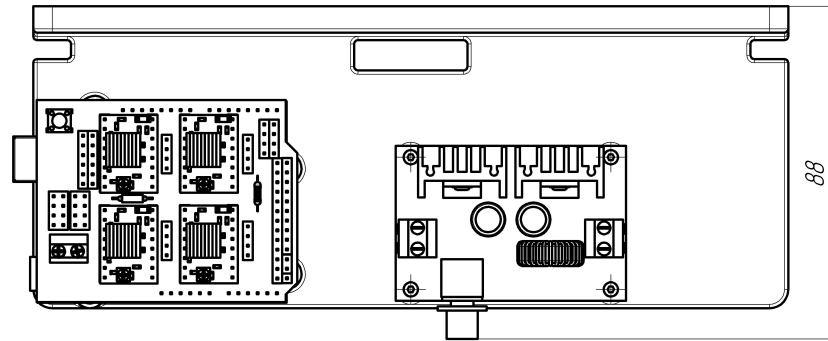
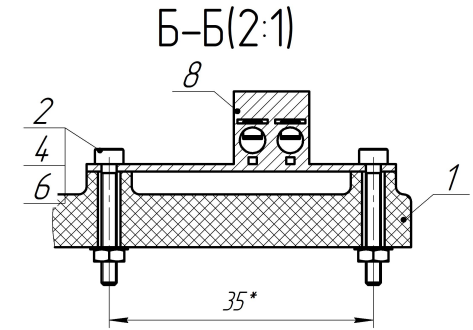
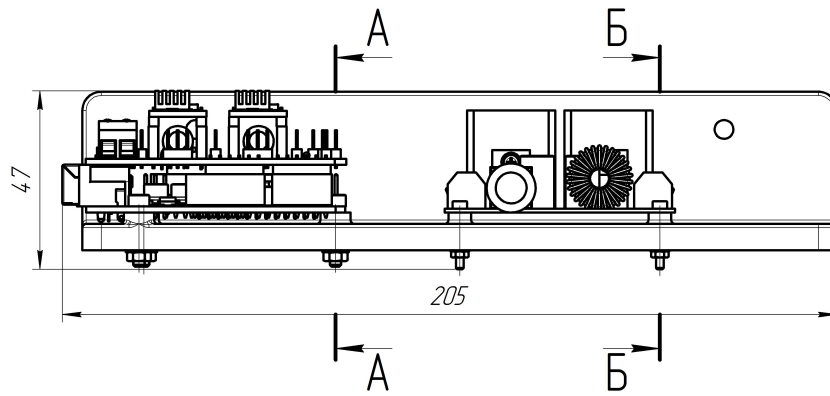
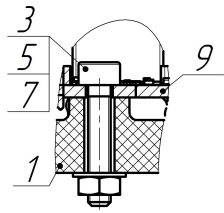
Формат	Знак	Позначення	Найменування	К-сть	Примітки
			Складальні одиниці		
A2	1	МР.ПМК-25.10.00.00.00 СК	Рама	1	
A2	2	МР.ПМК-25.20.00.00.00 СК	Портал	1	
A1	3	МР.ПМК-25.30.00.00.00 СК	Встановлення двигунів	1	
*1	4	МР.ПМК-25.40.00.00.00 СК	Встановлення струни і кінцевиків	1	*1А3x3
	5	МР.ПМК-25.50.00.00.00 СК	Пульт	1	
			Деталі		
A1	6	МР.ПМК-25.00.00.00.01	Платформа	1	
			Стандартні вироби		
	7		Hexagon regular nut ISO 4032-M3	1	
	8		Hexagon socket set screw ISO 4026-M3 x 6	1	

МР.ПМК-25.00.00.00 СК

Верстат порізки пінопласту

Листів	7,01	Масштаб	1:2,5
Архив		Архив	1

A-A(2:1)
4 місця



1 * Розміри для довідок..

Формат	Зона	Позиція	Позначення	Назва	К-сть	Примітки
				Деталі		
A2	1		MP.ПМКМ-25.50.00.001	Основа	1	
				Стандартні вироби		
		2		Hexagon regular nut ISO 4032-M2	4	
		3		Hexagon regular nut ISO 4032-M3	4	
		4		Hexagon socket head cap screw I SO 4762-M2 x 16	4	
		5		Hexagon socket head cap screw I SO 4762-M3 x 16	4	
		6		Washer ISO 7089-2-200 HV	4	
		7		Washer ISO 7089-3-200 HV	4	
				Інші вироби		
		8		Перетворювач напруги XL4016E1	1	
		9		Плата Arduino UNO	1	
		10		Плата CNC Shield V3	1	

MP.ПМКМ-25.50.00.000 СК

Зм. Арк.	№ док.м.	Лістк.	Дата	Літера	Маса	Масштаб
Розроб.	Цимбалістий				0,59	1:1
Перев.	Оницько			Аркши		Аркшиб 1
І.контр.						
Н.контр.						
Затв.						

Лист застос.

Додаток №

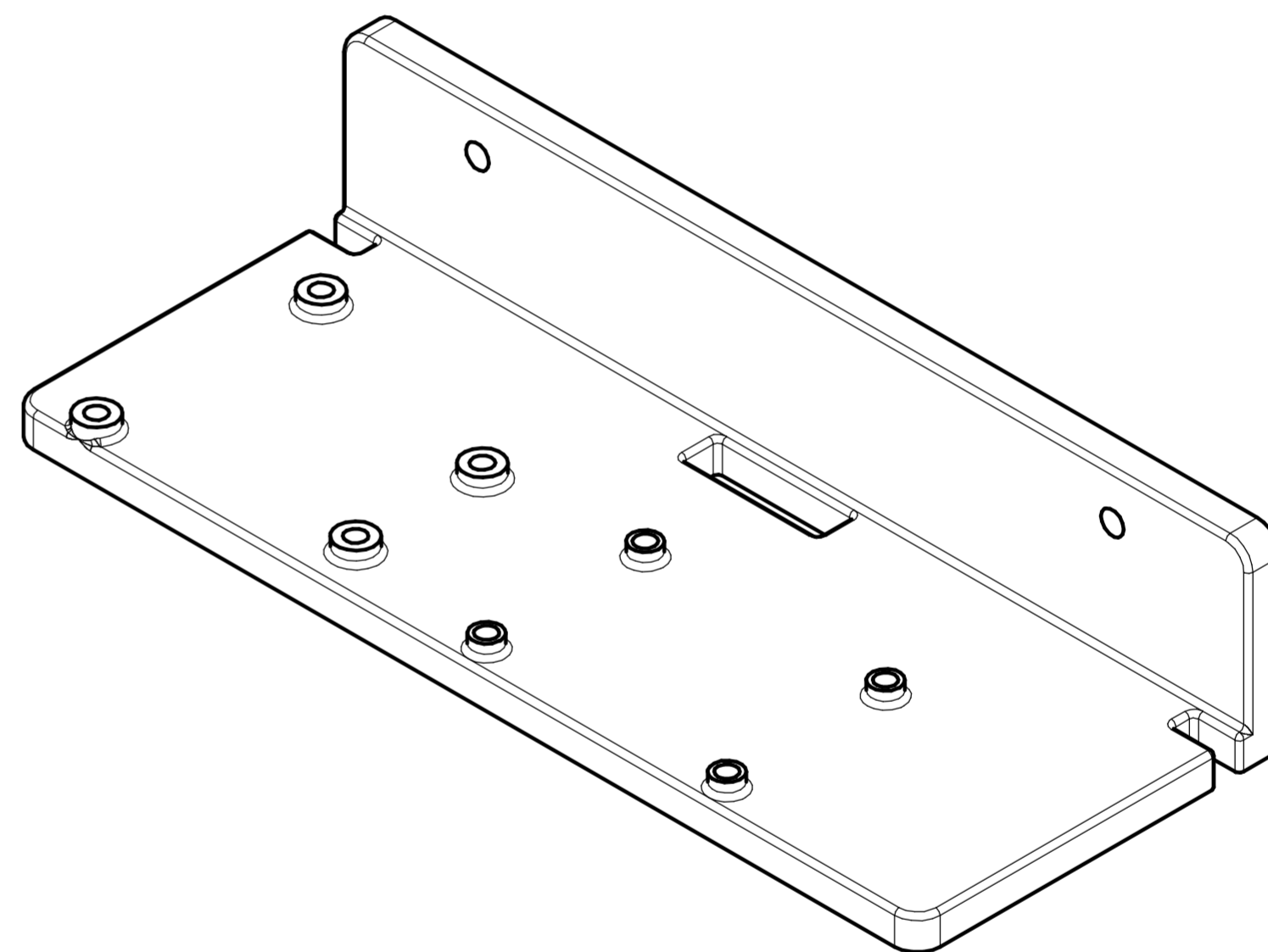
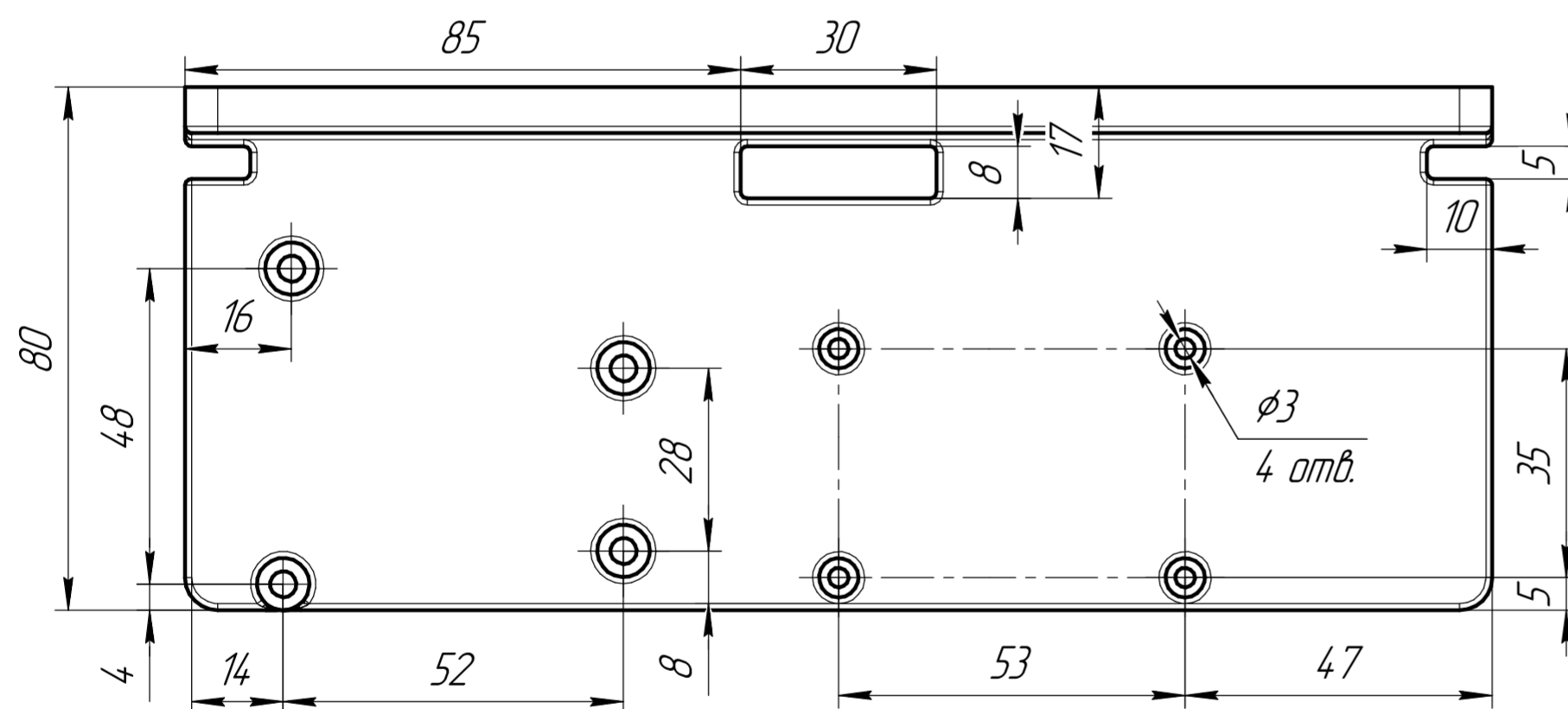
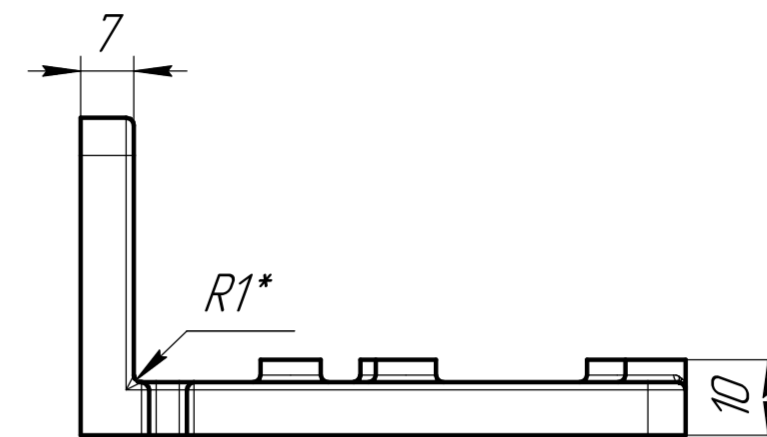
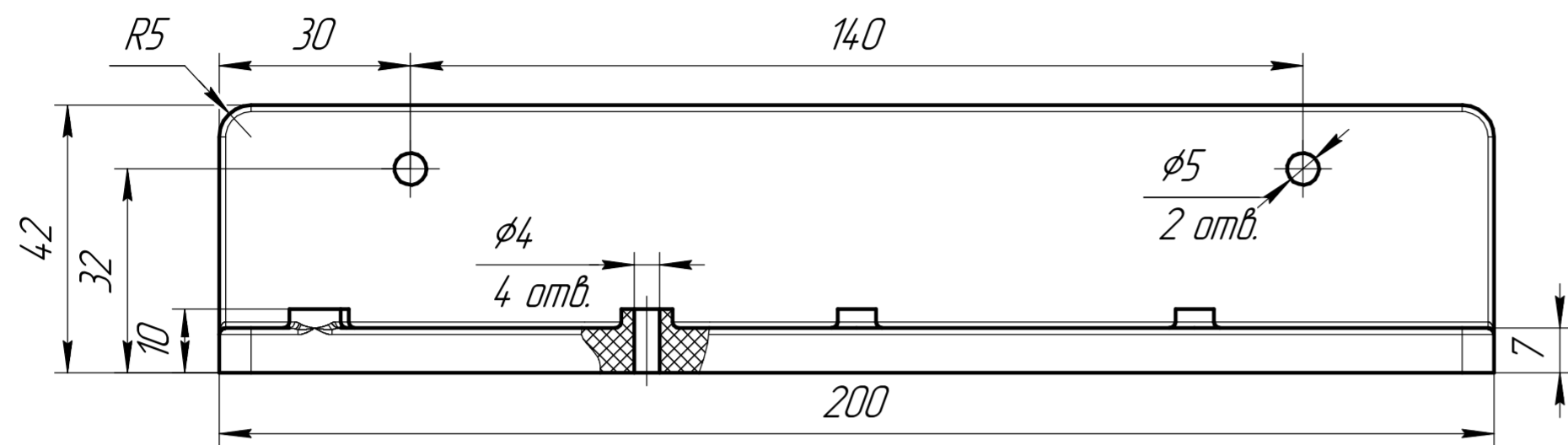
Лист і дані

Інв. № док.м.

Зам. інв. №

Лист і дані

Інв. № док.м.



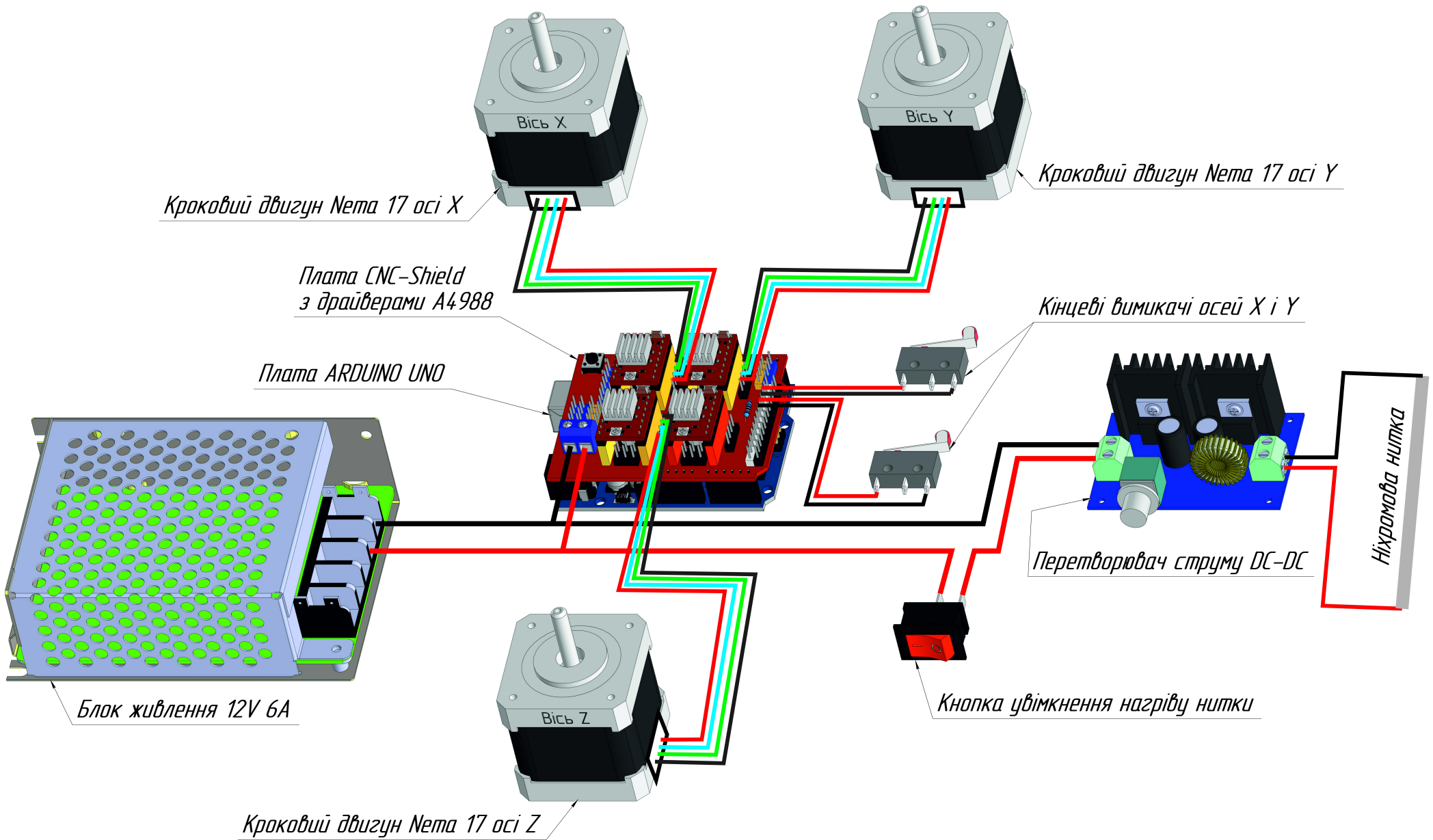
1 * Розміри для довідок.

2 Н14, н14, $\frac{IT14}{2} \pm$.

3 Допускається друк на 3D-принтері. Товщина усіх зовнішніх поверхонь не менше 1,2мм. Заповнення не менше 20%.

Перш. застос.	
Додат. №	
Підп. і дата	
Інв. № додт.	
Зам. інв. №	
Підп. і дата	
Інв. № ориг.	

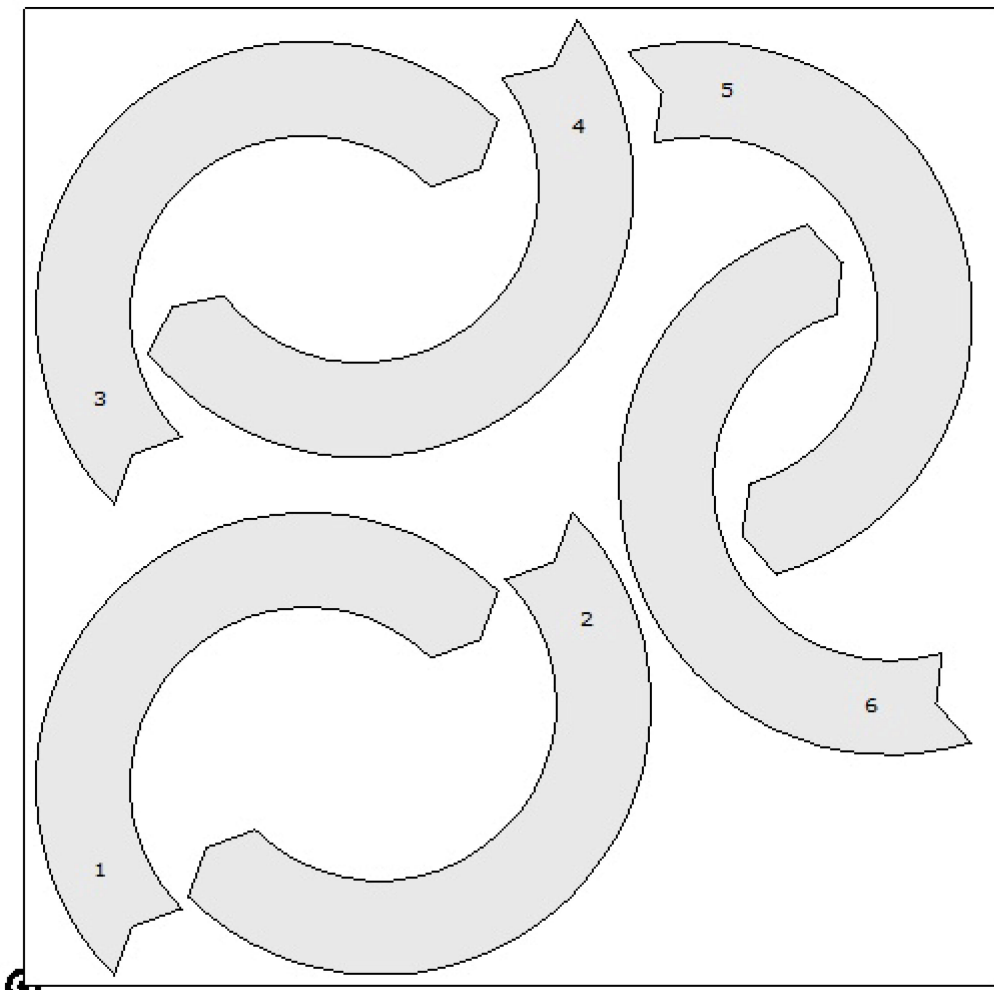
					MP.ПМКМ-25.50.00.001			
Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата	Основа	Литера	Маса	Масштаб
Розроб.	Цимбалістий						0,16	1:1
Перев.	Онисько				Аркцш	Аркцшів	1	
Т.контр.					Поліамід П-125-20			ІФНТУНГ
Н.контр.								ПМКМ-24-1
Затв.					Копіював			Формат А2



Лист № 1
Зем. каб. № 1
Лист № 1
Лист № 1
Лист № 1
Лист № 1

MP.ПМКМ-25.00.00.001 СХ				Лист №	Маск	Масштаб
Знак	Друк	№ докум.	Підпис	Дата	Схема підключення електричних компонентів	
Розроб	Цимбалюк				Архив	Архив
Перев	Олійська				ІФНТУНГ ПМКМ-24-1	
Технік					Формат А1	
Начальн					Копія	
Затв.						

Звіт розкорою у ProNest

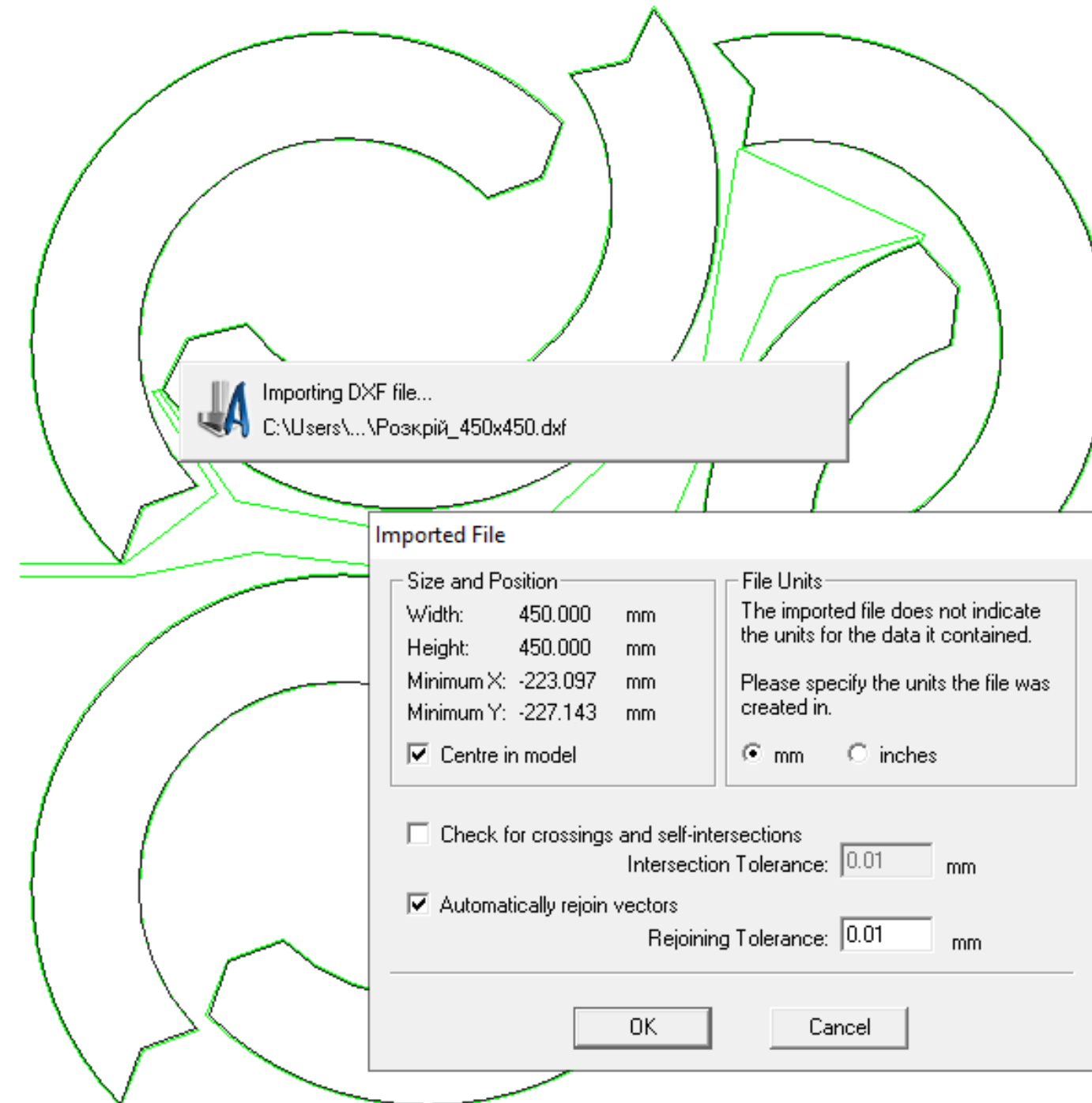


Обладнання: Demo Laser Machine	Розрив: 1 із 1	Коефіцієнт використання обрізків: 41,67%
Ім'я вихідного файлу:	Різка - кількість разів: 1	Назва листа: Пінноласт
Матеріал: MS 1,00 mm	Базова швидкість подачі: 5000,00 мм/хв	Номер плашки:
Клас:	Базовий проміл: 0,00 мм	Вага листа: 1,59 кг
Розмір листа: 450,00 × 450,00 mm	Час виробництва: 0:01:56	Ідентифікаційний номер інвентарю: 0
Розмір розкрою: 441,40 × 449,97 mm	Загальна довжина розкрою: 4453,75 mm	Розташування:
Використані процеси: Laser	Проколи (всього): 6	
Коефіцієнт фактичного використання площі: 41,67%		

Детальна інформація про прямокутну область деталі

Півмісяць труби	Розмір: 250,00 × 134,45 mm	Одна деталь	Усі деталі (6)
	Матеріал: MS 1,00 mm	Час виробництва: 0:00:19	0:01:56
	Клас:	Довжина розкрою: 742,29 mm	4453,75 mm
	К-ть поміщених у розриві: 6	Проколи: 33611,96 мм²	201671,77 мм²
	Обмеження обертання: 0°	Вага: 0,26 кг	1,58 кг
	Замовник:	Вартість виробництва:	
	Довідка:	Вартість матеріалу:	
	Нотатки:	Загальна вартість:	
	Рівне 1:		
	Рівне 2:		
Загальні підсумки роботи:	К-ть поміщених у розриві: 6	Усі деталі (6)	
		Час виробництва: 0:01:56	
		Довжина розкрою: 4453,75 mm	
		Проколи: 6	
		Площа: 201671,77 мм²	
		Вага: 1,58 кг	
		Вартість виробництва:	
		Вартість матеріалу:	
		Загальна вартість:	

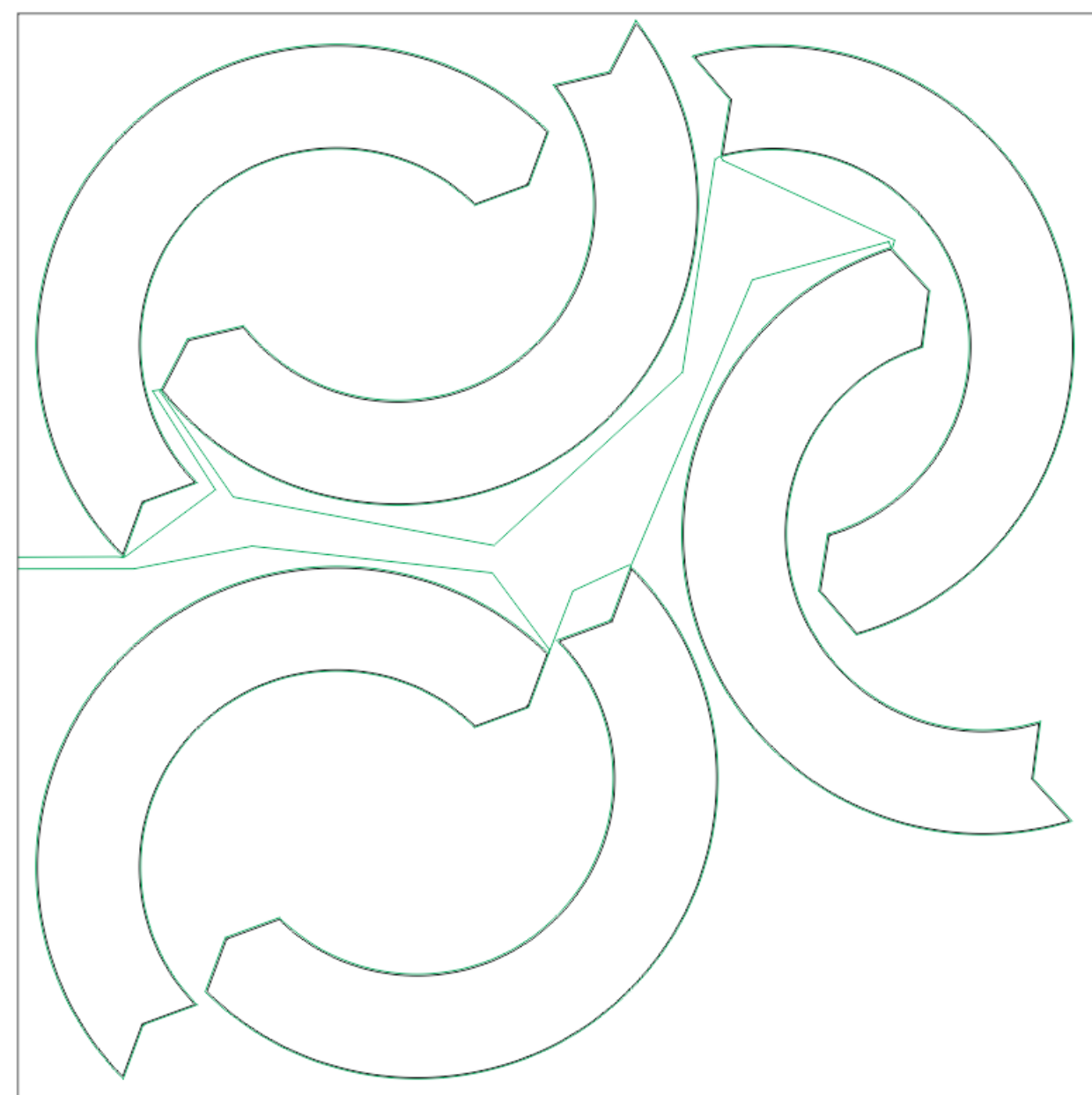
Імпорт траєкторії у ArtCAM



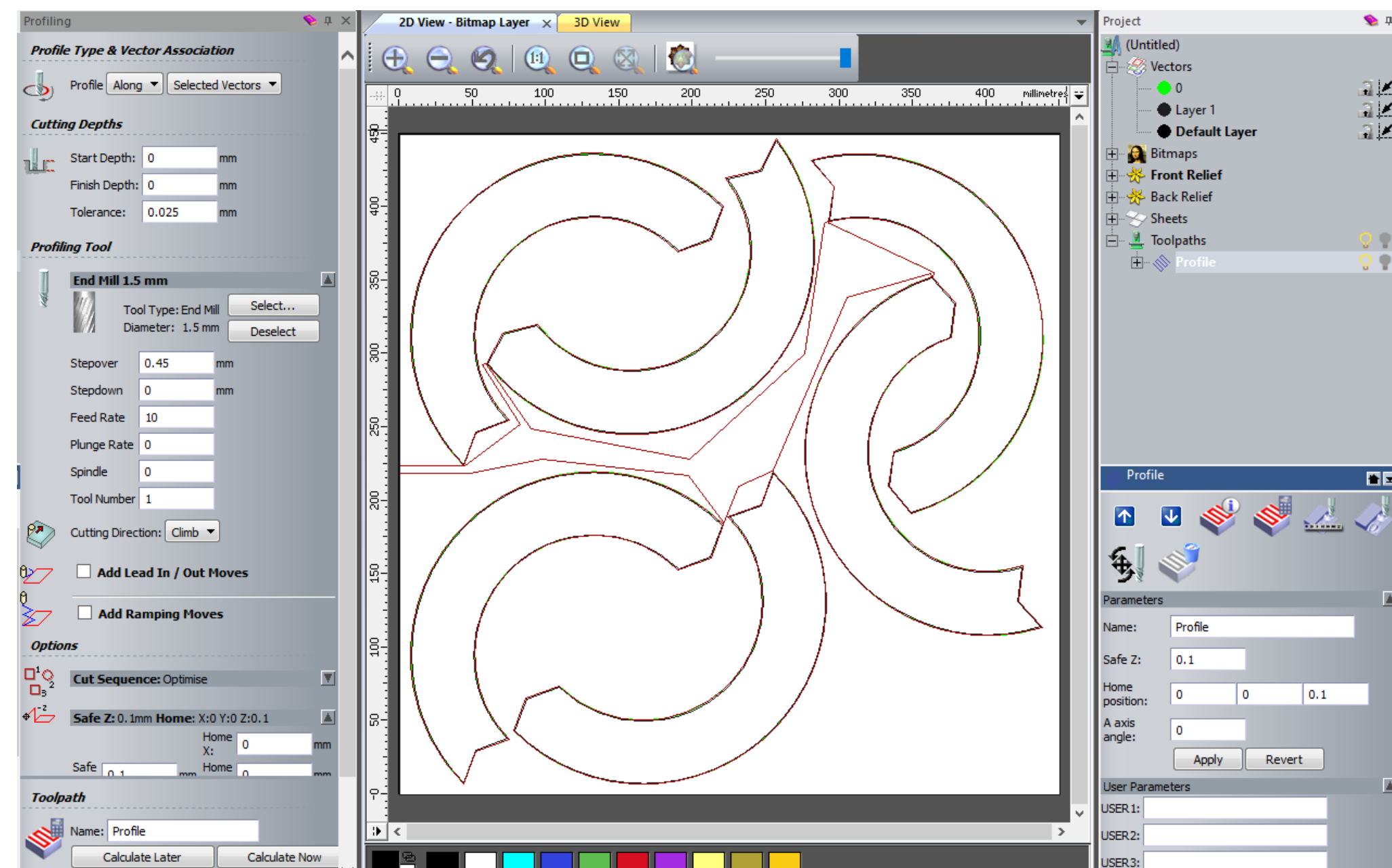
Код керуючої програми ЧПК

G17
G0X0.000Y0.000S0M3
G0X0.000Y217.000
G1X48.479Y217.000F600.0
X97.766Y226.498
X197.555Y215.403
X221.189Y183.590
G2X220.920Y1818961-12.459J1112
G3X108.850Y215.7731-87.973J-88.715
G3X38.026Y174.456123.982J-122.470
G3X9.634Y72.517194.801J-81.327
G3X44.160Y5.1061122.878J20.387
G1X52.468Y27.555
X74.921Y35.864
G2X51.983Y83.658157.776J57.130
G2X89.726Y162.226181010J9.433
G2X119.085Y173.424143.044J-68.767
G2X157.662Y170.780113.851J-80.661
G2X190.175Y151.1211-24.628J-77.447
G1X212.628Y159.430
X220.947Y181.830
G2X24.7235Y1395511-57.776J-57.130
X231017Y207.863
X254.349Y218.643
X255.058Y218.103
X246.750Y195.654
X224.297Y187.345
G2X24.7235Y1395511-57.776J-57.130
G2X209.491Y60.9831-81010J-9.433
G2X180.133Y4.97851-43.043J68.767
G2X14.1556Y52.4291-13.851J80.661
G2X109.043Y72.088124.628J77.447
G1X86.590Y63.779
X78.282Y4.1330
G3X190.361Y74.35187.989J88.699
G3X263.215Y51.1701-24.001J122.530
G3X290.052Y14.76361-96.866J78.914
G3X255.213Y217.9901-123.395J-17.301
G1X255.401Y218.911
X305.566Y337.186
X362.317Y353.068
X363.215Y350.626
G3X281.398Y266.862138.048J-119.004
G3X285.342Y184.9561119.704J-35.285
G3X362.653Y112.7021115.912J46.537
G3X4.38.390Y112.200138.655J118.408
G1X4.22313Y129.935
X425.310Y153.687
G2X372.325Y155.4101-23.997J77.628
G2X320.062Y225.167129.039J76.213
G2X323.686Y256.379180.872J6.427
G2X34.3.844Y289.377177.943J-24.959
G2X376.295Y309.139157.324J-57.607
G1X379.292Y332.891
X363.653Y350.119
X364.724Y353.690
X293.271Y386.830
G2X292.928Y387.20410.332J0.649
G2X292.816Y388.45111.921J0.801
G2X34.7.350Y384.231121.363J-78.402
G2X395.289Y301.8401-33.207J-74.463
G2X384.4.76Y268.5951-81.215J8.033
G2X363.903Y245.2111-70.386J4.185
G2X336.890Y2315301-4.9.639J64.4.99
G1X333.193Y207.876
X348.740Y189.674
G3X4.32.993Y270.9871-34.520J120.075
G3X4.314.68Y352.9751-118.611J38.802
G3X356.323Y427.4781-117.235J-4.3.096
G3X280.633Y4.30.2151-4.2.133J-117.215
G1X296.179Y4.12.013
X292.542Y388.739
X290.105Y387.377
X276.529Y298.615
X198.198Y226.793
X89.891Y24.6.933
X59.653Y290.642
G2X59.890Y291.34510.719J0.149
G3X166.891Y24.3.866198.269J77.154
G3X24.2.278Y276.0881-8.633J124.497
G3X283.082Y373.7241-83.994J92.446
G3X257.174Y444.8941-124.457J-5.004
G1X24.6.14.9Y4.23.647
X222.840Y4.18.184
G2X239.679Y367.9161-64.410J-4.9.531
G2X192.491Y294.6301-81.555J0.677
G2X161.971Y287.1561-34.191J73.570
G2X124.019Y294.5601-3.750J81.756
G2X94.193Y318.096134.035J73.798
G1X70.883Y312.633
X59.953Y291.569
X56.390Y291.016
X82.492Y24.9.886
X44.987Y222.044
X44.356Y222.195
X52.468Y244.550
X74.921Y252.859
G2X51.983Y300.652157.776J57.130
G2X89.726Y379.221181010J9.433
G2X119.085Y390.4184.3.044J-68.767
G2X157.662Y387.774113.851J-80.661
G2X190.175Y368.1161-24.628J-77.447
G1X212.628Y376.425
X220.936Y398.874
G3X108.857Y4.32.7691-87.989J-88.699
G3X38.027Y391452123.975J-122.472
G3X9.629Y289.54.1194.799J-81.328
G3X44.123Y222.1381122.882J20.357
G1X44.249Y221.862
X44.168Y221.810
X4.2.198Y222.070
X4.1310Y222.116
X0.000Y220.000
G0X0.000Y0.000
M30

Створення допоміжних траєкторій

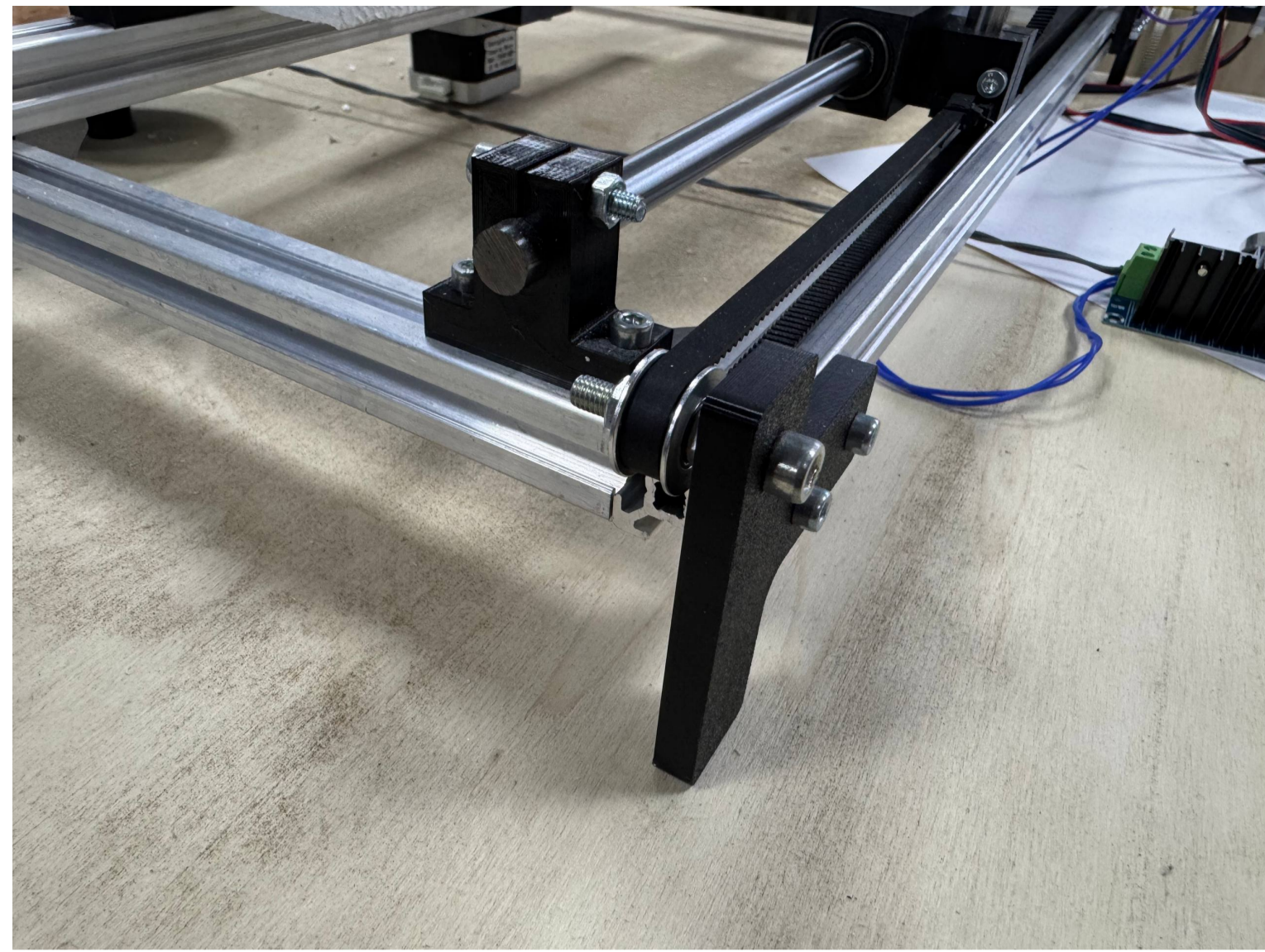


Вибір інструменту та налаштування режимів різання

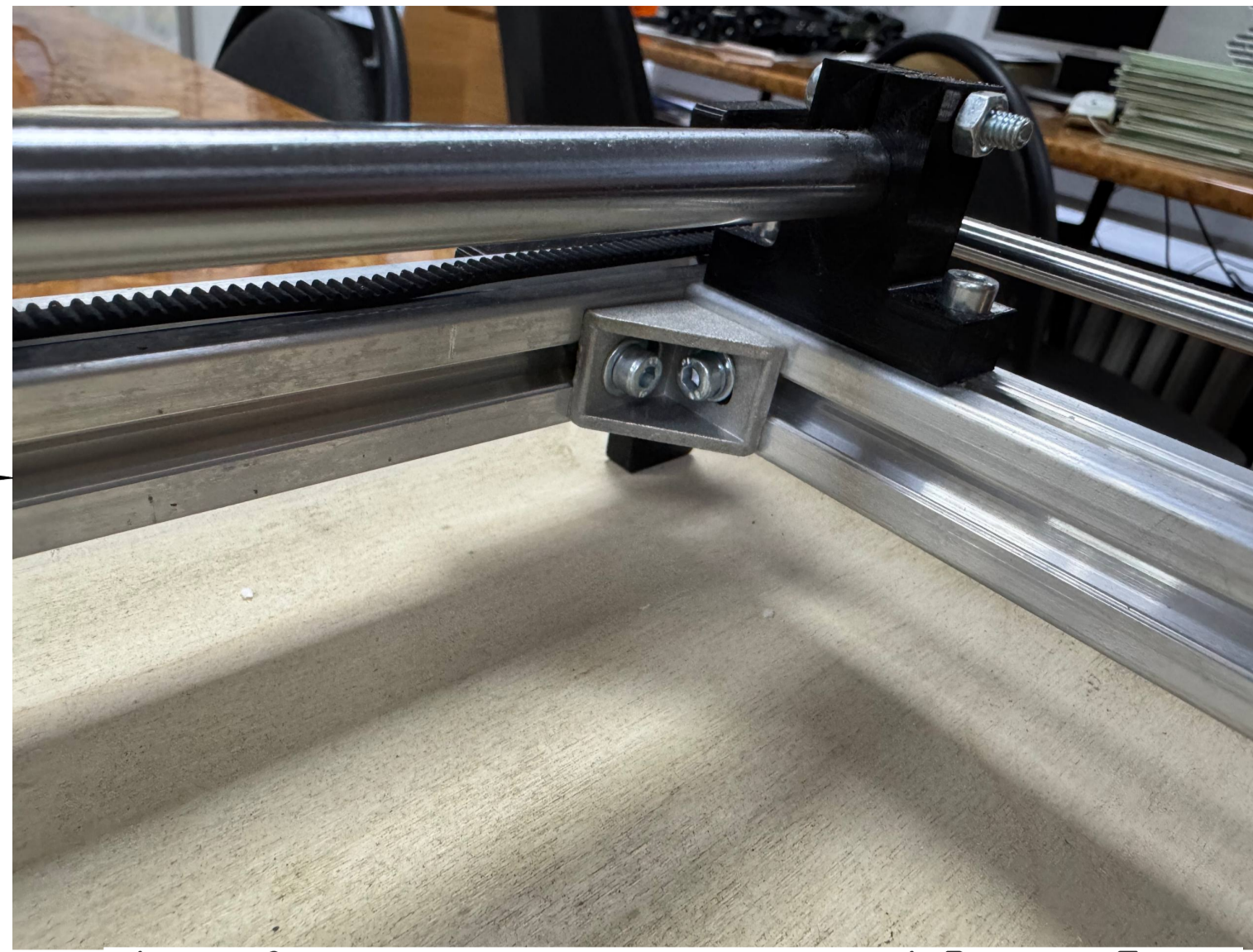


MP.ПМКМ-25.00.00.002			
Ізм.	Лист	№ док.	Подп.
Розроб.	Лист	Лист	Лист
Проб.	Лист	Лист	Лист
Т.контр.	Лист	Лист	Лист
Н.контр.	Лист	Лист	Лист
Утв.	Лист	Лист	Лист
Розроблення керуючої програми ЧПК			
Лист	Масштаб	Масштаб	Масштаб
Лист	Лист	Лист	Лист
1:1			
ІФНТЧНГ			
ПМКМ-24-1			
Формат А1			

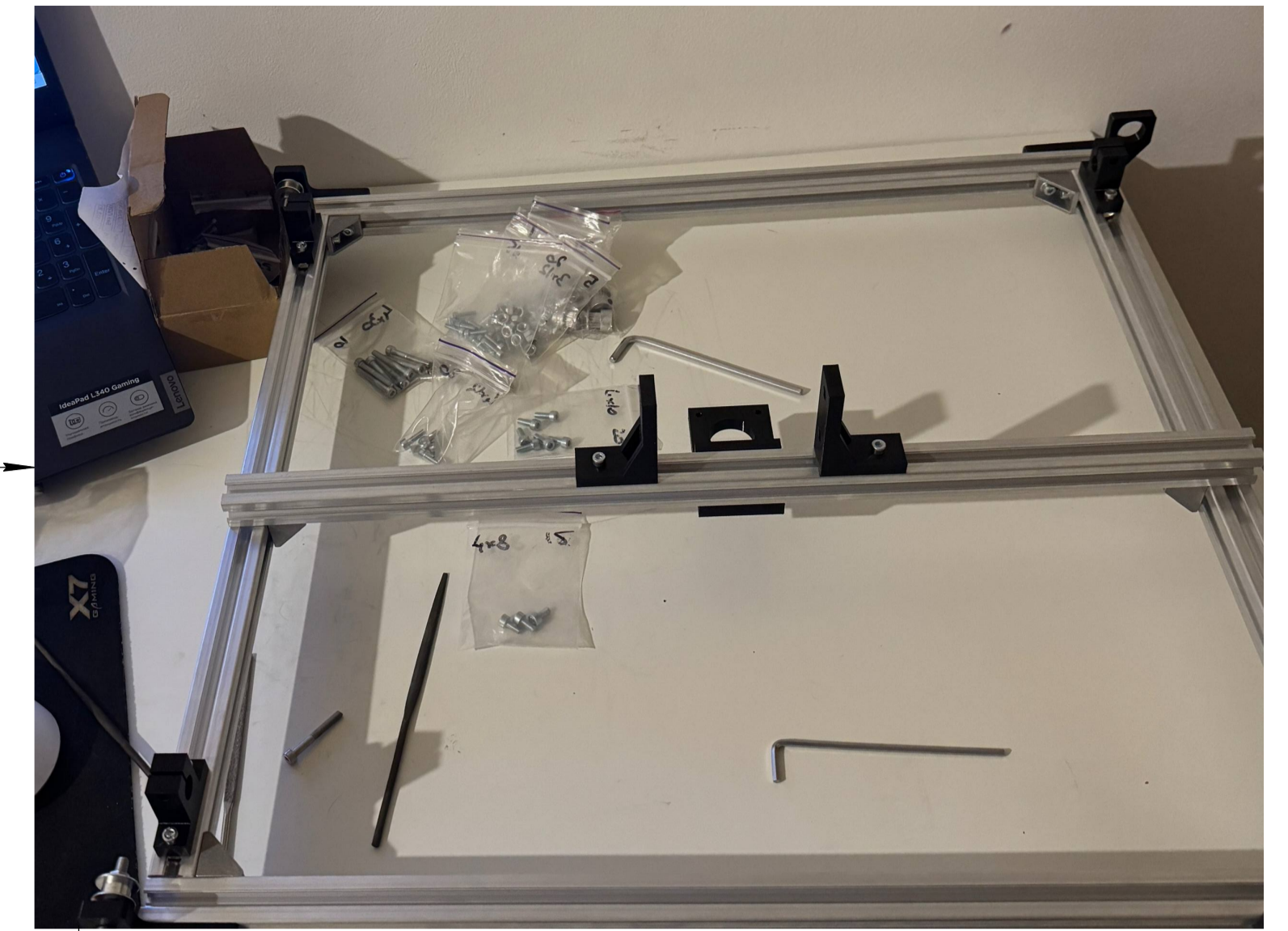
Лист № 1
Лист № 2
Лист № 3
Лист № 4
Лист № 5
Лист № 6
Лист № 7
Лист № 8
Лист № 9
Лист № 10
Лист № 11
Лист № 12
Лист № 13
Лист № 14
Лист № 15
Лист № 16
Лист № 17
Лист № 18
Лист № 19
Лист № 20
Лист № 21
Лист № 22
Лист № 23
Лист № 24
Лист № 25



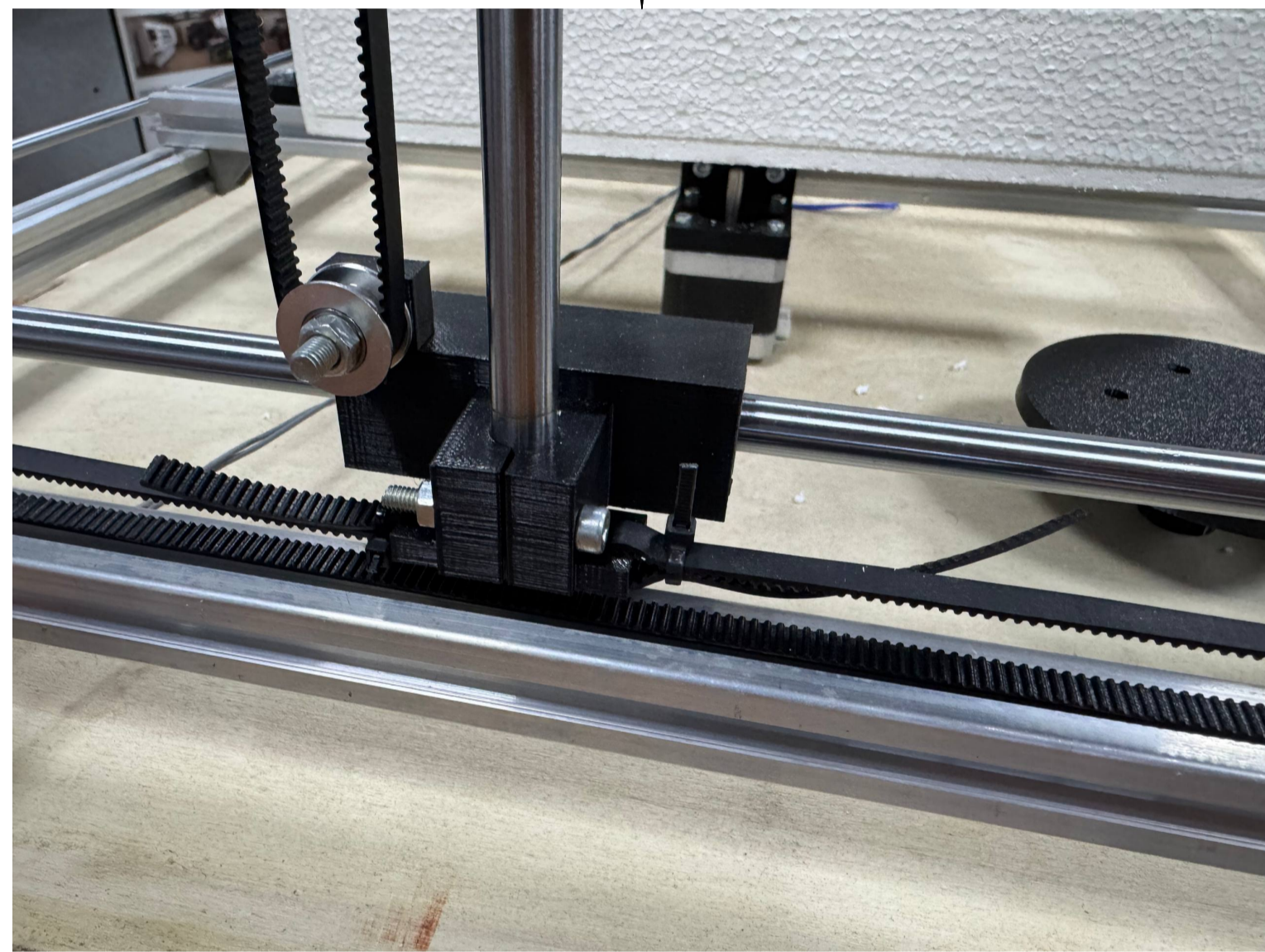
Збирання балок – монтаж ніжок і кронштейнів лінійних валів



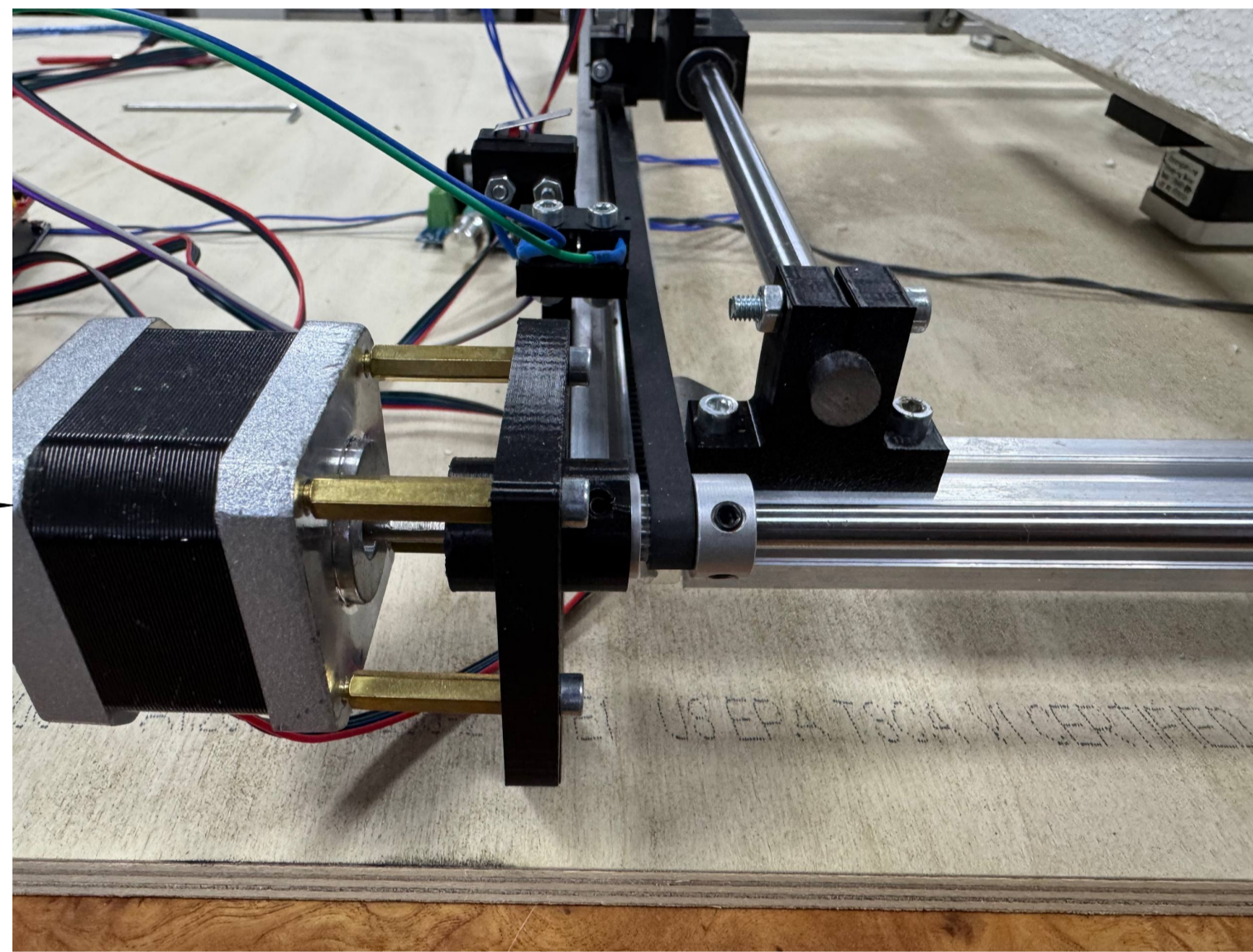
Формування нижнього каркасу – з'єднання балок між собою за допомогою кутових кронштейнів



Кінцевий вигляд зібраної рами



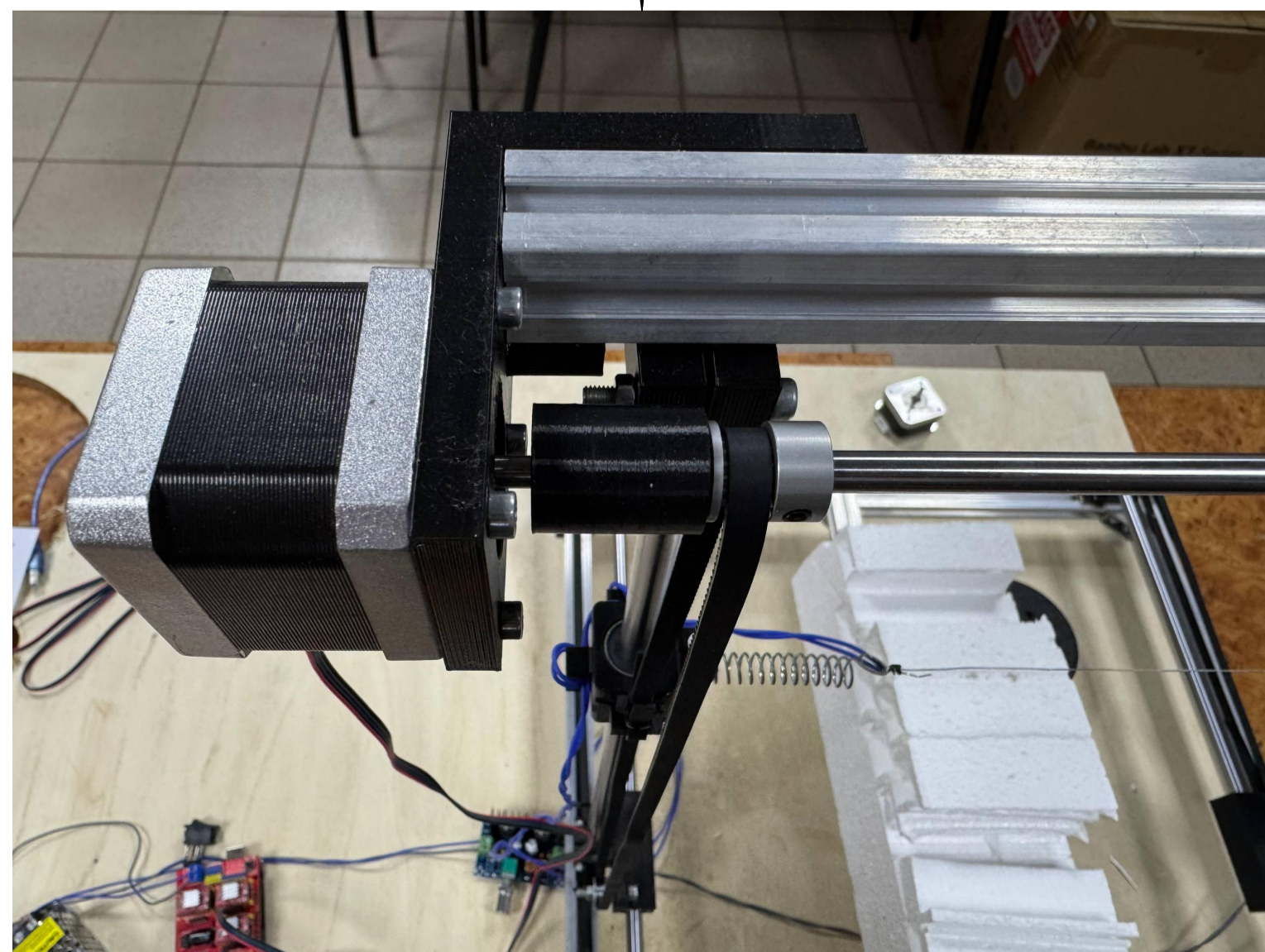
Монтаж кронштейнів з лінійними підшипниками і шківом, фіксація ременів і напрямного валу осі Y



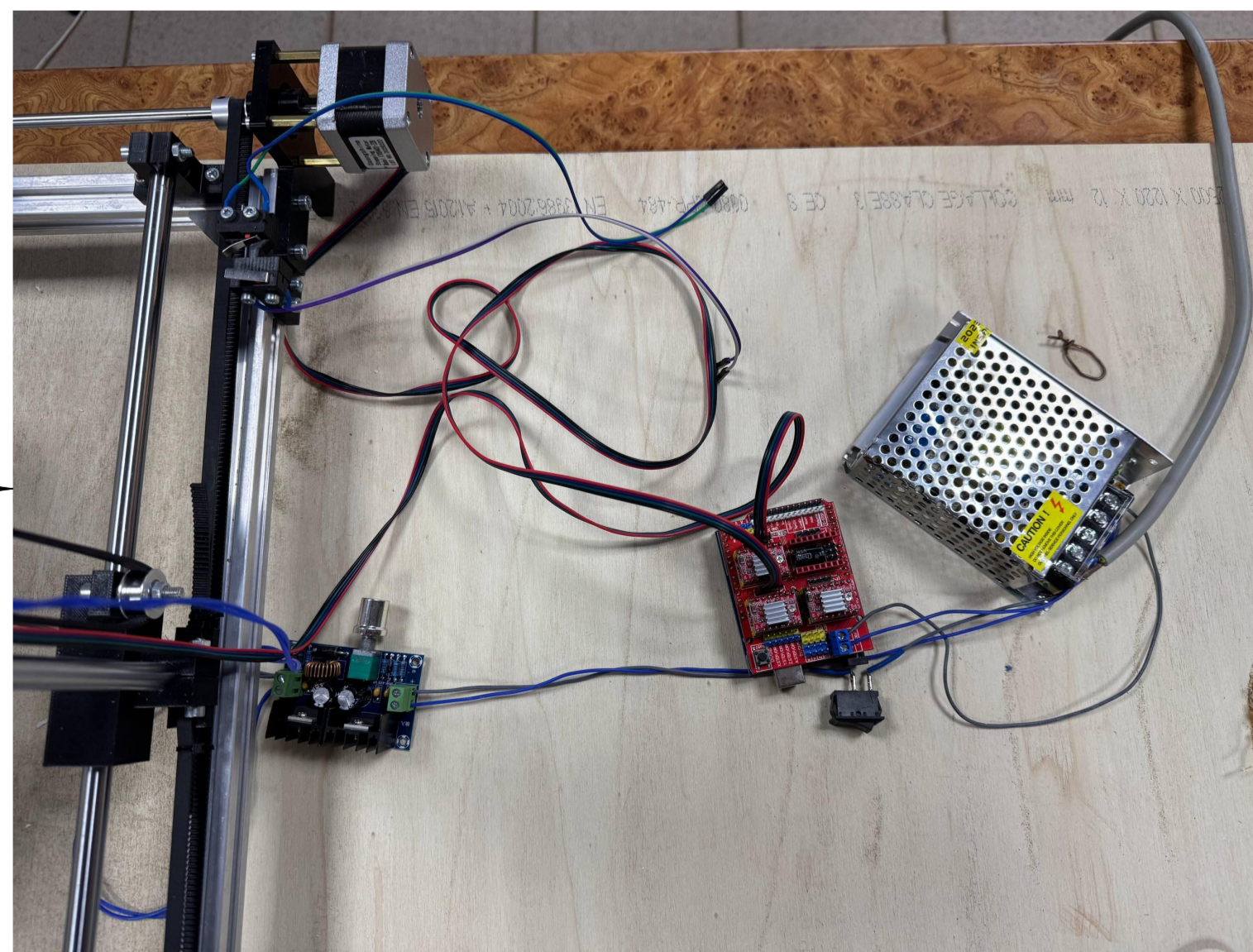
Монтаж крокових двигунів і кінцевих вимикачів



Монтаж кронштейну і фіксація струни на ньому



Монтаж поперечки порталу і двигуна осі Y



Монтаж електричної обв'язки – підключення двигунів і кінцевиків під'єднання плат, блоку живлення і кабелів для нагріву струни

				MP.ПМКМ-25.00.00.003		
Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата	Процес збирання	
Розроб.		Цимбалюк			Літера	Маса
Перев.		Олексюк			Масштаб	
Т.контр.					Аркши	Аркши 1
Н.контр.					ІФНТУНГ	
Затв.					ПМКМ-24-1	
						Формат А1

Лист застос.

Лист №

Лист і дата

Лист №

Зем. №

Лист і дата

Лист №

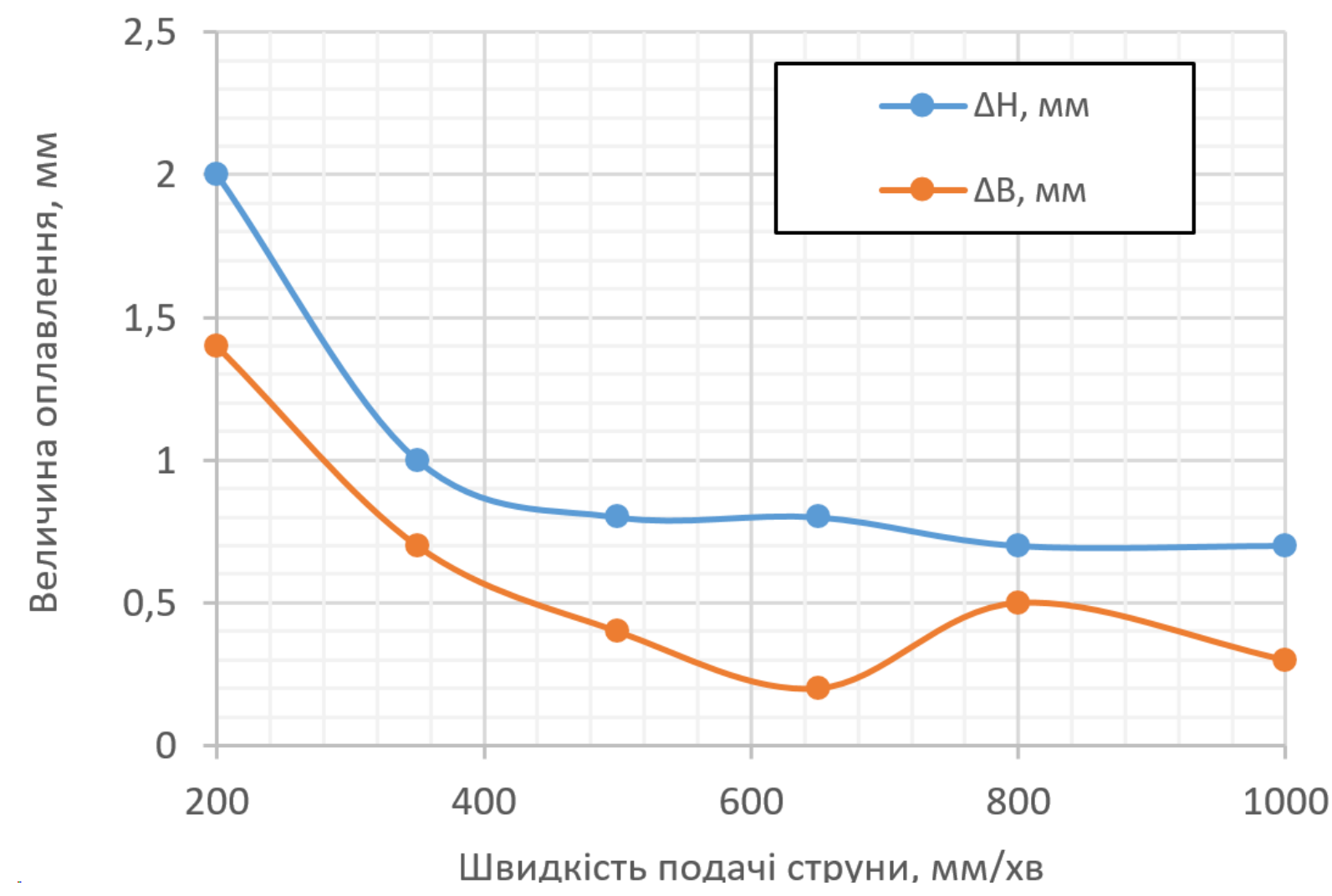


Рисунок 4.8 – Залежність величини оплавлення від швидкості подачі струни при напрузі 6,0 В та прискоренні 5 мм/с

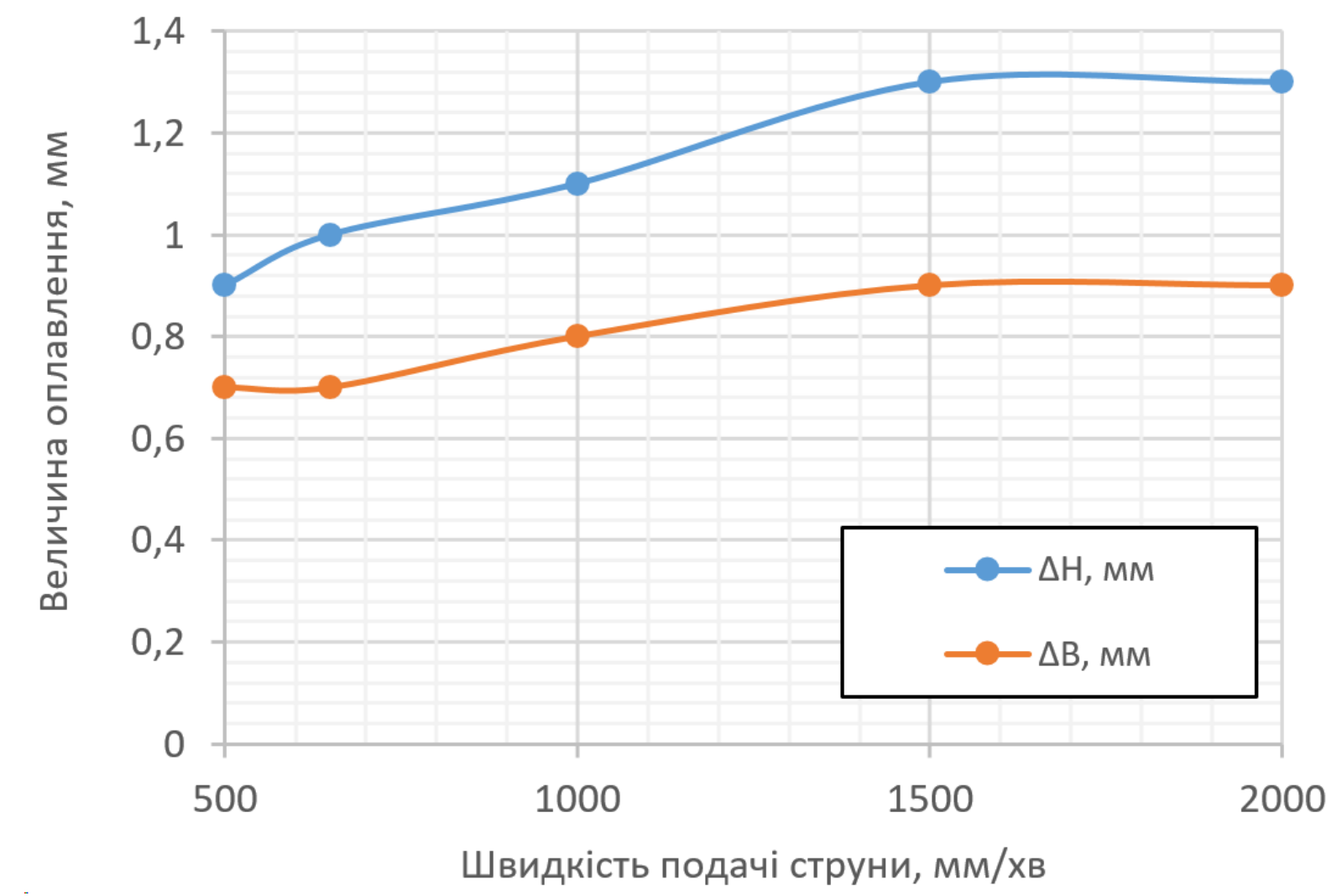


Рисунок 4.11 – Залежність величини оплавлення від швидкості подачі струни при напрузі 7,5 В та прискоренні 5 мм/с

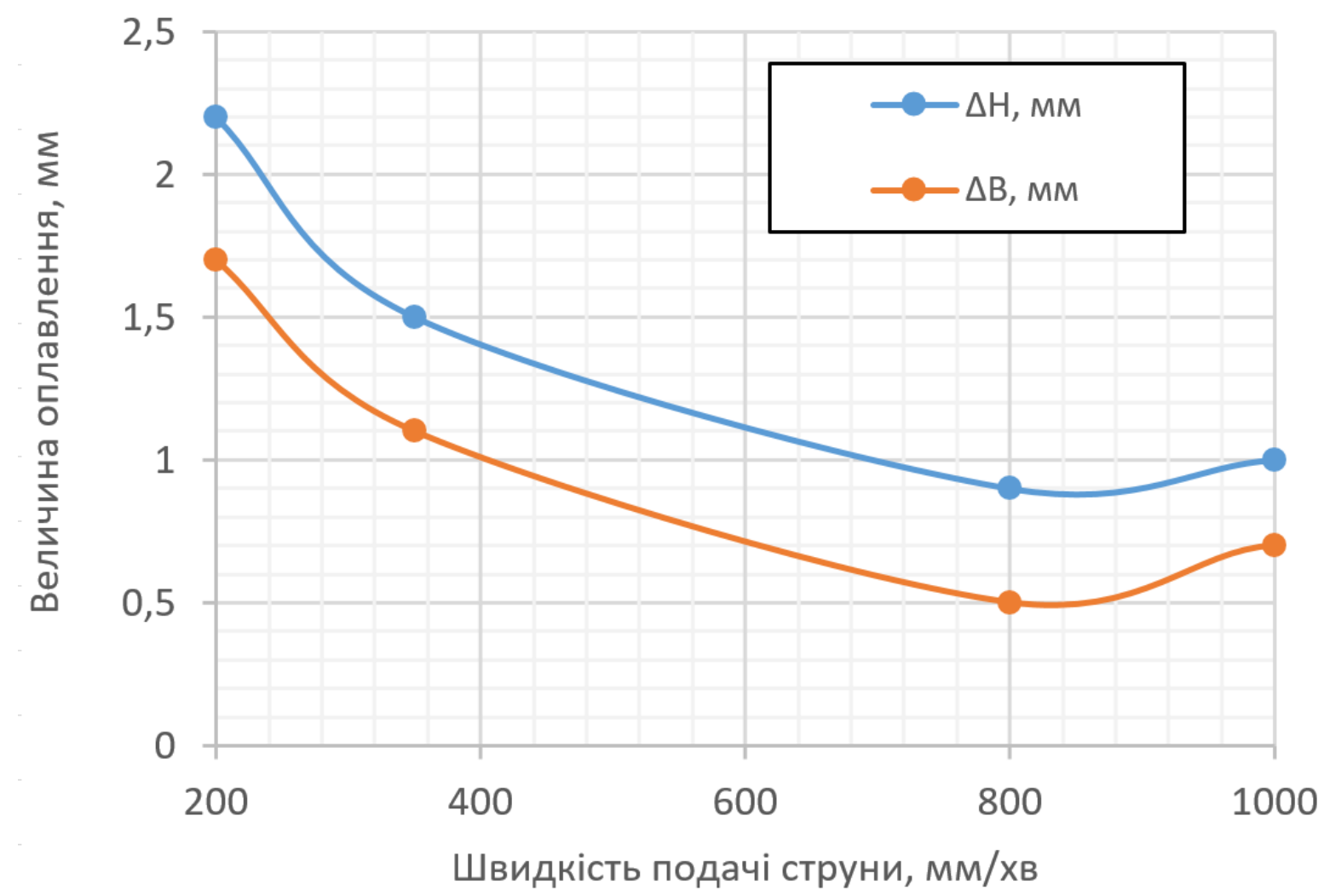


Рисунок 4.9 – Залежність величини оплавлення від швидкості подачі струни при напрузі 6,5 В та прискоренні 5 мм/с

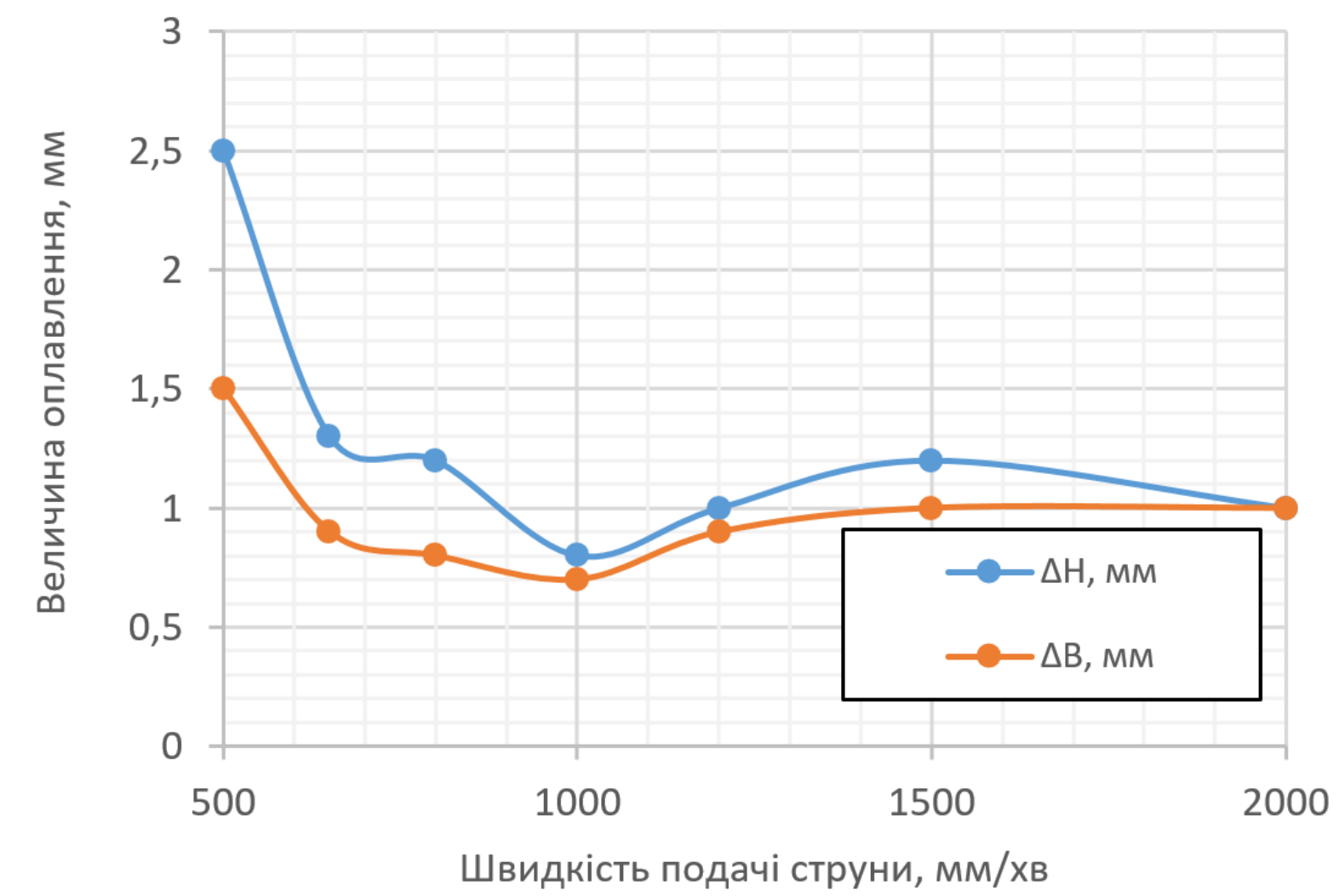


Рисунок 4.12 – Залежність величини оплавлення від швидкості подачі струни при напрузі 8,2 В та прискоренні 5 мм/с

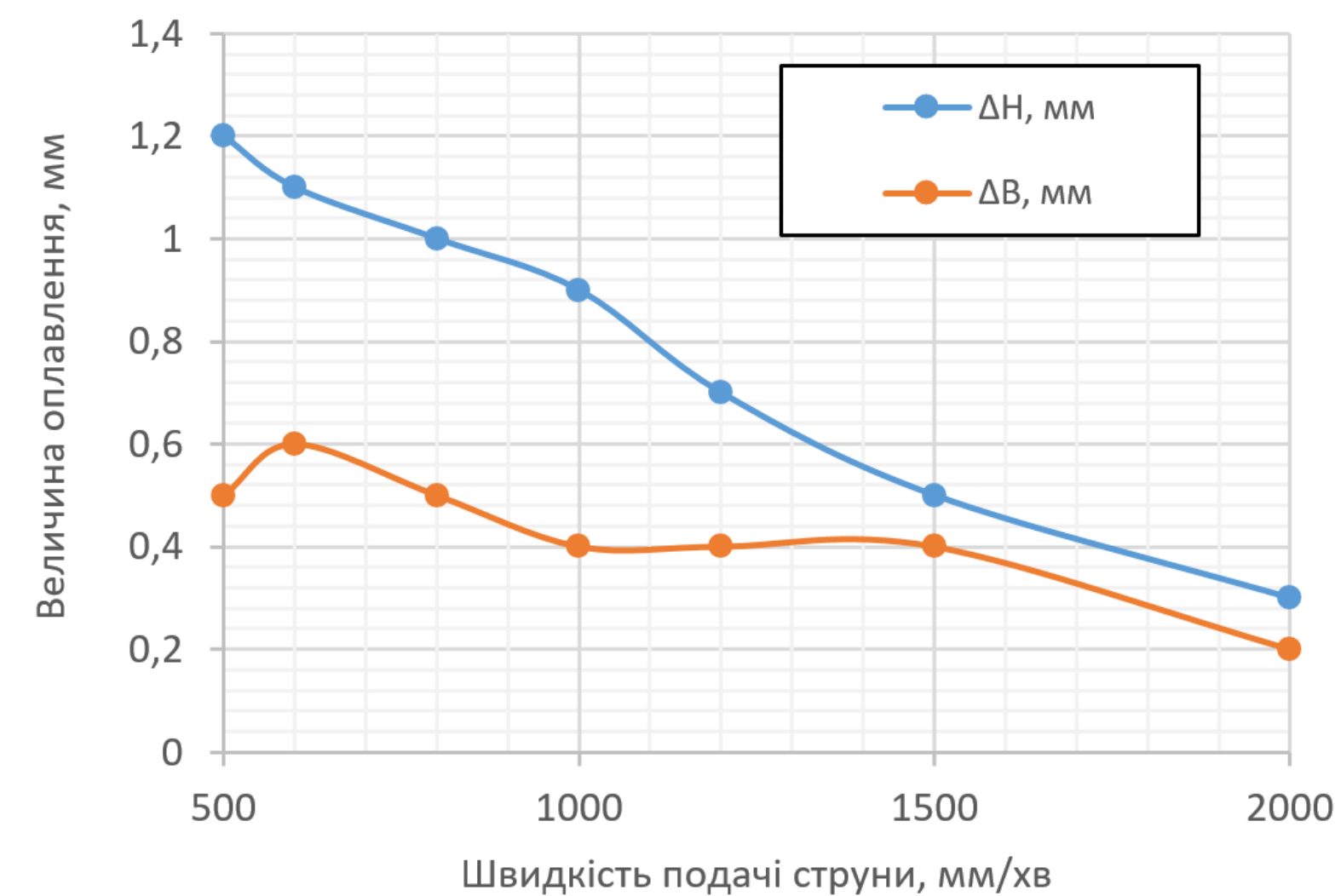


Рисунок 4.10 – Залежність величини оплавлення від швидкості подачі струни при напрузі 6,5 В та прискоренні 10 мм/с

				MP.ПМКМ-25.00.00.004		
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата	Результати експериментальних досліджень	
Розроб.		Димчасний			Лист	Масштаб
Проб.		Онисько			Листов	1
Т.контр.					ІФНТЧНГ	
Н.контр.					ПМКМ-24-1	
Утв.					Формат А1	