

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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

Удосконалення конструкції плотера з
робототехнічною системою нанесення

кольорів

Назва теми

Галузь знань 13 «Механічна інженерія»

Шифр, назва

Спеціальність 133 «Галузеве машинобудування»

Шифр, назва

Освітня програма «Галузеве машинобудування»

Шифр МРМА 25.00.00.000 ПЗ

Виконав студент 2 курсу
група МБм-24-1


Підпис

Олексійко В.О.
Ініціали, прізвище

Керівник


Підпис, дата

проф. Скиба М.Є.
Ініціали, прізвище


Нормоконтролер


Підпис, дата

доц. Тимощук О.Г.
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:

Зав. кафедри МАЕЕС


Підпис, дата

доц. Неймак В.С.
Ініціали, прізвище

10 12 2025 р.

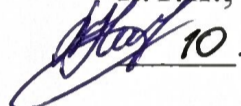
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту і архітектури
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем
Освітній рівень магістр
Галузь знань 13 «Механічна інженерія»
Шифр і назва
Спеціальність 133 «Галузеве машинобудування»
Шифр і назва
Освітня програма «Галузеве машинобудування»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МАЕЕС

к.т.н., доц. Неймак В.С.

 10. 12. 2025р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Олексійко Вадим Олександрович

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи Удосконалення конструкції плотера з робототехнічною системою нанесення кольорів

керівник роботи д.т.н., проф. Скиба М.Є.

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

Затверджено наказом ректора університету від 25 08 2025 р. № 65

2. Строк подання студентом роботи на кафедру 10.12.2025р.

3. Вихідні дані до роботи технічні характеристики плотерів-аналогів

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

Вступ. 1. Огляд і аналіз конструкцій плотерів та методів багатокольорового нанесення кольору. 2. Удосконалення конструкції плотера з робототехнічною системою нанесення кольорів. 3. Розрахунки, що підтверджують працездатність плотера. Висновки. Перелік джерел посилання.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)
Аркуш 1. Детальний аналіз плотерів. Документ оглядовий (A1). Аркуш 2. Загальний вигляд плотера. Вид загальний (A1). Аркуш 3. Основа кріплення напрямної. (A1). Аркуш 4. Кріплення механізму підйому робочого інструмента (A1). Аркуш 5. Структурна блок-схема. Схема комбінована функціональна (A1). Аркуш 6. Схема підключення приводів. Схема комбінована функціональна (A1).

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

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

7. Дата видачі завдання 5. 11. 25

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1. Огляд і аналіз конструкцій плотерів та методів багатокольорового нанесення кольору	до 29.10.24р.	
2. Удосконалення конструкції плотера з робототехнічною системою нанесення кольорів	до 11.11.24р.	
3. Розрахунки, що підтверджують працездатність плотера	до 21.11.24р.	
4. Оформлення пояснювальної записки та графічного матеріалу	до 12.12.24р.	

Студент


Підпис

Олексійко. В.О
Ініціали, прізвище

Керівник роботи


Підпис

М.Є. Скиба
Ініціали, прізвище

АНОТАЦІЯ

до магістерської роботи студента
спеціальності 133 «Галузеве машинобудування».


1. Прізвище, ім'я та по батькові Олексійко Вадим Олександрович

2. Тема магістерської роботи Удосконалення конструкції плотера з робототехнічною системою нанесення кольорів

3. Прізвище, ініціали, вчена ступінь та звання опонента _____

4. Об'єм магістерської роботи: креслень 6 арк., сторінок записки 70

5. Розвиток сучасних плотерних систем супроводжується зростанням вимог до їх функціональності, точності та рівня автоматизації. Актуальним напрямом є удосконалення конструкцій плотерів шляхом інтеграції робототехнічних систем, що дозволяє розширити їх технологічні можливості та підвищити ефективність роботи. Магістерська робота присвячена удосконаленню конструкції плотера з робототехнічною системою нанесення кольорів. У першому розділі виконано огляд і аналіз сучасних конструкцій плотерів, принципів їх роботи та сфер застосування. У другому розділі розроблено вдосконалену конструкцію плотера з автоматизованим механізмом зміни інструментів. Третій розділ містить інженерні розрахунки, що підтверджують працездатність, точність та ефективність роботи розробленої системи.

Підпис студента 

" 10 " 12 2025 р.

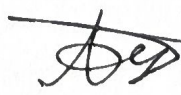
РІШЕННЯ ЕК:

Протокол 3 від " 23 " 12 2025 р.

Оцінка проекту ЕК добре 13/86

Рекомендації ЕК впровадження з виробництвом

Особливі відмітки -

Технічний секретар Кішова Д.В. 

" 23 " 12 2025 р.

ЗМІСТ

	Стор.
Вступ.....	6
1 огляд і аналіз конструкцій плотерів та методів багатокольорового нанесення кольору.....	8
1.1 Призначення плотера та історія розвитку.....	8
1.2 Конструкції та принцип роботи сучасних плотерів.....	9
1.3. Застосування плотерів у виробництві та легкій промисловості.....	11
1.4. Класифікація та типи плотерів.....	14
Висновок до першого розділу.....	23
2 Удосконалення конструкції плотера з робототехнічною системою нанесення кольорів.....	24
2.1 Існуюча конструкції плотера.....	24
2.2 Обґрунтування необхідності конструктивної модернізації.....	26
2.3 Огляд сучасних конструктивних систем та вибір компонентів для удосконаленого плотера.....	28
2.4 Конструктивні елементи порталної рами плотера.....	40
2.5 Програмна частина системи керування.....	47
3 Розрахунки, що підтверджують працездатність плотера.....	55
3.1 Аналіз міцності кріпильних елементів плотера з використанням програмного забезпечення SolidWorks.....	55
3.2 Розрахунок кінематичних характеристик плотера.....	61
3.3 Розрахунок ефективності роботи плотера.....	63
Висновок до третього розділу.....	65
Висновки.....	67
Додаток а.....	72

МРМА 25.00.00.000 ПЗ									
Зм.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата	УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ПЛОТЕРА З РОБОТОТЕХНІЧНОЮ СИСТЕМОЮ НАНЕСЕННЯ КОЛЬОРІВ	Літ.	Арк.	Архів	
Розроб.		Олексійко В.О						5	72
Перевір.		Поліщук О.С							
Реценз.									
Н. Контр.		ГІММОЦІУК							
Затверд.		Неймак В.С						ХНУ, Гр. МБм-24-1	

ВСТУП

Сучасний розвиток робототехніки та цифрових технологій створює нові можливості для автоматизації різних виробничих процесів. Особливо це стосується малогабаритних роботизованих систем, які дозволяють виконувати точні операції нанесення графічних елементів, маркування та технічної розмітки. Плотери стали одним із найбільш доступних і універсальних інструментів, що поєднують простоту конструкції, невисоку вартість та здатність працювати з великою точністю у двох координатах.

У галузях легкої промисловості, таких як швейне, взуттєве та текстильне виробництво, значна частина підготовчих операцій передбачає нанесення контурів деталей, міток, шаблонів та ескізів. Традиційне ручне маркування є трудомістким і часто супроводжується похибками, які можуть вплинути на якість кінцевого виробу. Тому актуальною задачею є використання компактних роботизованих систем, здатних виконувати ці операції автоматизовано та з високою повторюваністю.

Одним із напрямів розвитку таких пристроїв є створення недорогих плотерів із можливістю багатокольорового друку. Застосування різних кольорів дозволяє виділяти шви, припуски, технологічні лінії та інші елементи, що значно підвищує зручність роботи технологів і конструкторів. Однак більшість доступних аматорських конструкцій не мають автоматичного механізму зміни інструментів, що обмежує їх функціональність та потребує постійного втручання оператора.

Метою магістерської роботи є удосконалення конструкції плотера шляхом розроблення робототехнічного механізму автоматичної зміни кольорового інструмента, який дозволить виконувати багатокольорове нанесення без зупинки процесу та ручного переключення маркерів. Такий підхід дає змогу розширити можливості базового пристрою, підвищити точність і швидкість роботи та адаптувати його до технологічних потреб легкої промисловості.

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Адк.
						6
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Плотер працює в координатній системі X-Y, що дозволяє формувати контури та зображення із заданою точністю. Додавання механізму зміни інструмента вимагає вирішення задач узгодження переміщень, коректного позиціонування кожної ручки, розроблення надійного вузла фіксації та адаптації алгоритму керування. У роботі розглядаються конструктивні, електронні та програмні рішення, необхідні для створення повноцінного модуля автоматичного перемикачів кольорів.

Розроблена система має практичне застосування у навчальних лабораторіях, майстернях та на підприємствах легкої промисловості, де потрібне швидке й точне нанесення кольорових позначок або графічних елементів. Удосконалення конструкції дозволяє перетворити базову робототехнічну модель на багатфункціональний пристрій, здатний виконувати складніші виробничо-технологічні задачі.

					MPMA 25.00.00.000 ПЗ	Адк.
						7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 ОГЛЯД І АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ ПЛОТЕРІВ ТА МЕТОДІВ БАГАТОКОЛЬОРОВОГО НАНЕСЕННЯ КОЛЬОРУ

1.1 Призначення плотера та історія розвитку

Плотер (англ. *plotter*) - це спеціалізований пристрій, призначений для високоточного відтворення графічної інформації на папері чи інших листових матеріалах. На відміну від звичайних принтерів, плотер орієнтований на роботу з векторними даними та здатний відтворювати лінійні контури з дуже високою точністю позиціонування. Сучасні моделі найчастіше належать до широкоформатного обладнання та використовуються з матеріалами різних форматів - від А4 до А0, а також з папером підвищеної щільності, включаючи ватмани.

У практичному застосуванні плотери широко використовуються для створення креслень, картографічних матеріалів, технічної документації, рекламних макетів, великих постерів та інфографік. Завдяки точності та можливості роботи як у монохромному, так і кольоровому режимах, ці пристрої стали незамінними у поліграфії, дизайні, проектуванні та суміжних галузях.

Багато сучасних плотерів обладнані збільшеними резервуарами з чорнилом або системами неперервної подачі чорнила (СНПЧ), що дозволяє виконувати великі обсяги друку без перерв. Крім того, у частини моделей передбачена можливість швидкої заміни картриджів «на льоту», без зупинки роботи. Окремі різновиди оснащуються ріжучими головками чи перовими інструментами, що дає змогу вирізати аплікації, створювати наклейки або виконувати контурну порізку на плівках та інших тонких матеріалах. Графічні дані для роботи надходять із програм, які підтримують векторну графіку, таких як *CorelDRAW*, *Adobe Illustrator* тощо.

Розвиток плотерної техніки бере свій початок у другій половині ХХ століття. Однією з перших комерційно доступних моделей став Calcomp 565, який

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Адк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

з'явився у 1959 році на тлі стрімкого розвитку електронно-обчислювальної техніки. У цій моделі переміщення листа забезпечувало рух по осі X, а координата Y задавалася переміщенням пера. Це дозволяло будувати точні лінійні графіки та креслення [1].

Паралельно з такими рішеннями почали з'являтися й інші пристрої. Зокрема, система Computervision Interact I стала однією з перших САД-платформ, де плотер використовувався у зв'язці з обчислювальною технікою для автоматизованого перемальовування графічних матеріалів. Вона підтримувала використання кулькових та різнокольорових пір'їв, що значно підвищувало якість і гнучкість роботи.

Подальший етап розвитку припав на 1970-1980-ті роки, коли компанії HP та Tektronix представили компактні планшетні плотери з робочою площею, яка відповідала стандартному столу кресляра. У 1980-х роках з'явилася популярна модель HP 7470, яка стала своєрідним стандартом офісного графічного обладнання. Незважаючи на більш повільну роботу у порівнянні з принтерами, вона забезпечувала високу точність, необхідну для технічних креслень [2].

Зі зростанням продуктивності струменевих і лазерних принтерів попит на класичні перові плотери дещо знизився. Проте сьогодні інтерес до них знову зріс у зв'язку з розвитком робототехніки, цифрового прототипування, графічного дизайну та малоформатного виробництва. Сучасні плотери поєднують компактність, точність і можливість автоматизації, що робить їх актуальними в поліграфії, інженерії, освіті та легкій промисловості.

1.2 Конструкції та принцип роботи сучасних плотерів

Конструкція сучасного плотера базується на поєднанні механічної частини, електронної системи керування та програмного забезпечення, що забезпечує точне переміщення інструмента у відповідності до заданої графічної моделі. Незалежно від типу та призначення, більшість плотерів мають схожу базову

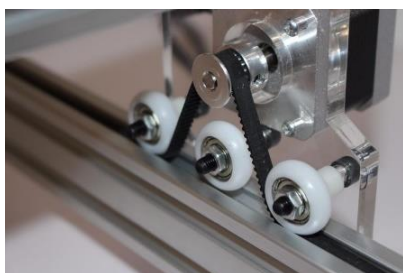
					MPMA 25.00.00.000 ПЗ	Адк.
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		9

архітектуру, що включає координатну систему, приводи руху, виконавчий інструмент та контролер, який здійснює обробку команд.

Основою роботи плотера є переміщення інструмента в двох або трьох координатах. У більшості малюючих та ріжучих моделей застосовується декартова система X-Y, де одна з осей забезпечує поступальне переміщення носія (паперу чи плівки), а інша - рух каретки з інструментом. У планшетних та порталних пристроях обидві осі рухаються відносно нерухомого листа, що підвищує стабільність та точність нанесення зображення [3].

Для забезпечення руху використовуються різні типи приводів - крокові двигуни, серводвигуни або їх поєднання. Крокові двигуни широко поширені завдяки низькій вартості, простоті керування та високій точності позиціонування. Серводвигуни забезпечують більшу швидкість та плавність руху, тому застосовуються у професійних широкоформатних плотерах та системах з високими вимогами до продуктивності.

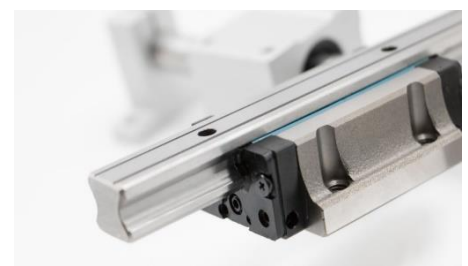
Переміщення здійснюється по напрямних різних типів - круглих, лінійних або профільних. Пасові передачі (рис.1.1 а) використовуються у побутових та малогабаритних пристроях через їхню легкість, низький рівень шуму та доступність. У промислових моделях частіше застосовуються кулькові гвинтові пари (рис.1.1 б) або рейкові механізми (рис.1.1 в), що забезпечують високу жорсткість конструкції та мінімізують люфти [4].



а)



б)



в)

а – пасова передача; б – кулькова гвинтова пара; в – рейковий механізм.

Рисунок 1.1 – Поширені механізми переміщення в плотерах

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Адк.
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		10

Важливим елементом плотера є виконавчий інструмент, який залежить від завдань пристрою. У графічних моделях це можуть бути перо, маркер або набір змінних ручок різної товщини. У ріжучих плотерах застосовуються леза, які дозволяють проводити контурну порізку на плівках, термотрансферних матеріалах та полімерних носіях. Струменеві та термографальові плотери використовують друкарські головки, що працюють за принципом виприскування мікрокрапель чорнила.

Керування плотером виконується за допомогою мікроконтролера або вбудованої електронної системи, що приймає команди у вигляді векторних даних формату HPGL, G-code чи спеціалізованих протоколів виробника. Контролер здійснює перетворення координат у послідовність точних рухів приводів, регулює швидкість, інтенсивність нанесення та інші параметри. Програмне забезпечення відіграє ключову роль у забезпеченні відповідності між цифровою моделлю і фізичним зображенням, коригуючи похибки та оптимізуючи траєкторію руху [5].

У сучасних умовах спостерігається тенденція до інтеграції плотерів у робототехнічні платформи, що дозволяє розширювати їхні можливості, автоматизувати процеси зміни інструментів та оптимізувати послідовність нанесення кольору. Такий підхід підвищує продуктивність та забезпечує точнішу відповідність складним графічним моделям, що є особливо актуальним у легкій промисловості, поліграфії та інженерному прототипуванні.

1.3. Застосування плотерів у виробництві та легкій промисловості

Легка промисловість є однією з галузей, де точність, повторюваність та висока швидкість виконання графічних операцій мають ключове значення. У процесах конструювання одягу, розкрою тканин, створення лекал, маркування деталей та нанесення технологічних елементів активно використовуються різні типи графічних і ріжучих плотерів. Такі пристрої забезпечують автоматизацію

					MPMA 25.00.00.000 ПЗ	Адк.
Зм.	Адк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

операцій, які раніше виконувалися вручну, що значно підвищує продуктивність, якість та точність готової продукції.

Одним з основних напрямів застосування плотерів у легкій промисловості є побудова лекал і шаблонів. Традиційні методи передбачають ручне креслення або перенесення лекал на папір, що вимагає значного часу та високої кваліфікації працівника. Використання плотера дозволяє виконувати ці операції автоматично на основі цифрових моделей, створених у САД-системах, що мінімізує ризик похибок та забезпечує високу точність контуру.

Важливою сферою є також маркування та нанесення контурів на тканини, особливо у виробництві дрібносерійних або індивідуальних партій одягу. Плотери можуть наносити контурні лінії, нумерацію деталей, розмітку для складних вузлів або декоративні елементи з використанням маркерів чи спеціальних інструментів. Це дозволяє швидко підготувати тканину до подальшого розкрою, скорочуючи час підготовчо-розкрійних операцій.

У сучасних швейних виробництвах значну популярність здобули ріжучі плотери (рис.1.4), що працюють з тонкими матеріалами, такими як плівка для термотрансферного друку, вініл, гнучкі полімери тощо.

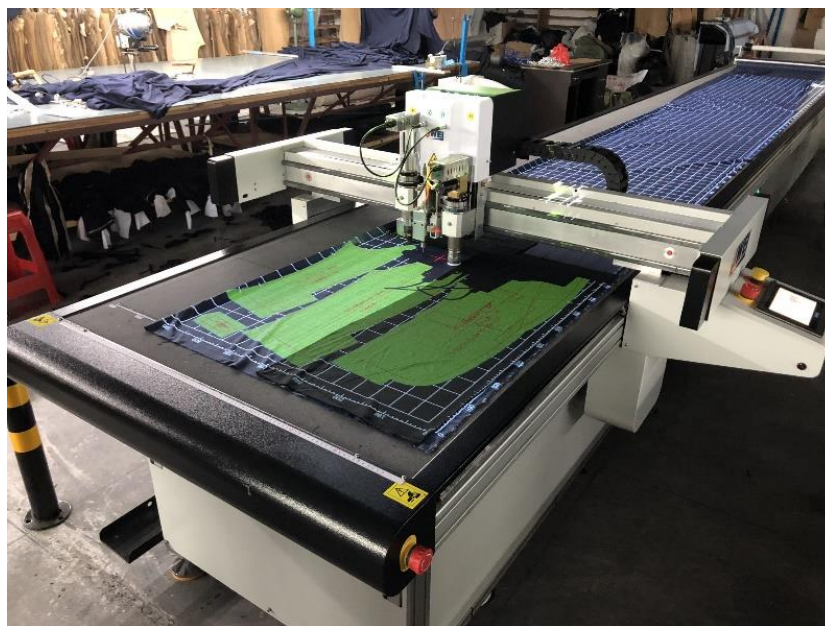


Рисунок 1.4 – Використання ріжучого плотера у легкій промисловості

										Арк.
										12
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

Вони використовуються для виготовлення логотипів, аплікацій, декоративних вставок та елементів брендування одягу. Завдяки високій точності контурної порізки ці пристрої забезпечують якісний повторюваний результат, що особливо важливо у виробництві спортивного та рекламного текстилю [6].

Окрему групу складають плотери для роботи з лекальною документацією, які широко застосовуються у конструкторських бюро підприємств легкої промисловості. Такі пристрої виконують друк лекал на великих форматах паперу (A0 і більші), що дозволяє створювати та зберігати документацію відповідно до вимог технологічного процесу.

Сучасний етап розвитку галузі характеризується інтеграцією графічних плотерів у роботизовані комплекси, що поєднують нанесення шаблонів, розмітки та порізки в єдиному автоматизованому циклі. Завдяки цьому підвищується ефективність виробництва, зменшується кількість ручних операцій та зростає універсальність обладнання. Особливо важливою стає можливість багатокольорового нанесення, яке дозволяє використовувати один пристрій для розмітки різних технологічних шарів, виділення функціональних зон або позначення деталей за категоріями. На рисунку 1.5 зображено роботизований плотерний комплекс, який реалізує автоматизований цикл нанесення розмітки та порізки матеріалу [7].



Рисунок 1.5 – Сучасний роботизований плотерний комплекс типу ZÜND

					MPMA 25.00.00.000 ПЗ	Адк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

У контексті цифрової трансформації легкої промисловості плотери виступають важливим технічним інструментом, який поєднує в собі точність, автоматизацію та можливість масштабування виробничих операцій. Їхнє застосування сприяє скороченню витрат, підвищенню якості продукції та впровадженню сучасних методів проектування й виготовлення одягу. Саме тому удосконалення конструкції плотерних систем, зокрема шляхом впровадження автоматичної зміни інструмента та багатокольорового нанесення, є актуальним напрямом розвитку інженерних рішень для галузі.

1.4. Класифікація та типи плотерів

Плотери можуть бути класифіковані за типом інструмента, конструкцією рухової системи, способом нанесення графічної інформації, сферою застосування та рівнем автоматизації. Залежно від принципу роботи та галузі використання виділяють такі основні типи:

Пір'яні плотери.

Пір'яні або маркерні плотери є одним із найстаріших та найбільш технічно точних типів графобудівників загального призначення. Вони здійснюють побудову зображення шляхом фізичного контакту пишучого інструмента (пера, маркера, олівця, технічної ручки або спеціального графітного наконечника) з поверхнею носія. Побудова траєкторії руху інструмента виконується відповідно до векторної моделі, сформованої в програмному забезпеченні. Рух здійснюється переважно у двох площинах - по осях X та Y, хоча в окремих конструкціях використовується також вісь Z для підняття або опускання інструмента при переміщенні по траєкторії [8].

Завдяки простій конструкції та можливості використання змінних пишучих елементів, такі пристрої широко застосовуються для створення високоточних креслень та графічних зображень. На рисунку 1.6 показано принцип переміщення пишучого інструмента по координатним осям.

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Адк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

зміни пишучого інструмента.

Значним недоліком класичних моделей є необхідність ручної заміни пера при використанні кількох кольорів або різних типів інструментів. Такий процес займає час, залежить від оператора та призводить до втрати точності в точці зміни інструмента. Це особливо критично при нанесенні багатокольорових схем або технічних діаграм, де важливе чітке позиціонування. Таким чином, автоматизація процесу зміни пишучих елементів є ключовим напрямом удосконалення перових плотерів.

Впровадження автоматизованого переключення інструментів, цифрового калібрування та комп'ютерного керування з використанням CAD/CAM-алгоритмів дозволяє адаптувати перові плотери до сучасних вимог автоматизації виробничих процесів

Струменеві плотери.

Струменеві плотери працюють за принципом нанесення графічної інформації шляхом виприскування мікрокрапель рідкого чорнила через спеціальну друкарську голівку. Передача зображення здійснюється у растровому форматі, що дозволяє відтворювати кольорові зображення з високою якістю та градацією відтінків. На відміну від перових плотерів, де лінія формується безперервним рухом інструмента, струменевий друк реалізується шляхом покрокового нанесення точок, що обумовлює меншу точність відтворення тонких контурів [9].

Однією з ключових переваг струменевих плотерів є можливість друку на матеріалах великого формату (A0 та більше), що робить їх ефективними для виготовлення рекламних банерів, плакатів, плоских схем та картографічних матеріалів. Такі пристрої здатні формувати повнокольорові зображення з багатим спектром відтінків, що значно розширює їх застосування у сфері графічного дизайну та архітектурної візуалізації.

Струменеві системи є чутливими до якості чорнила, умов експлуатації та вимагають регулярного технічного обслуговування. Використання картриджів

					MPMA 25.00.00.000 ПЗ	Адк.
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		16

обробку поверхні матеріалу шляхом спрямованого лазерного впливу.

У таких пристроях для формування зображення використовується сфокусований лазерний промінь, який переміщується по координатних осях відповідно до цифрової моделі. Завдяки високій щільності енергії лазера забезпечується надзвичайно точне позиціонування та можливість роботи з широким спектром матеріалів від паперу та картону до пластику, фанери, органічного скла та деяких металів [10,11]. Конструкцію лазерного плотера та результати його роботи показано на рисунку 1.8.



Рисунок 1.8 – Конструкція промислового лазерного плотера та приклади гравіювання

Головною перевагою лазерних плотерів є висока швидкість нанесення та відсутність необхідності у фізичному контакті з матеріалом, що виключає деформацію поверхні. Вони широко застосовуються для гравіювання, декоративної порізки, виготовлення прототипів, сувенірної продукції, а також у виробництві електронних компонентів та рекламних конструкцій. Крім того,

					MPMA 25.00.00.000 ПЗ	Адк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

лазерні системи здатні відтворювати складні геометричні форми та дрібні деталі, що робить їх ефективними у задачах художнього та технічного оформлення.

Лазерні плотери потребують суворого дотримання умов експлуатації, зокрема вентиляції та контролю температури, що пов'язано з виділенням продуктів термічної обробки матеріалів. Такі системи мають високу вартість та підвищені вимоги до електробезпеки, що обмежує їх використання в умовах малих підприємств. У легкій промисловості лазерні плотери застосовуються переважно для художнього маркування та декоративної обробки матеріалів, тоді як для технологічних процесів, що потребують точності та масштабованості, частіше використовуються ріжучі або перові системи.

Ріжучі плотери.

Ріжучі плотери призначені для високоточної контурної порізки тонких рулонних матеріалів, серед яких самоклеюча плівка, термотрансферні текстильні матеріали, папір, картон та інші полімерні основи. Основним робочим елементом таких пристроїв є ніж, закріплений у спеціальному тримачі, що здатний обертатися для коректного проходження по криволінійних ділянках. Порізка виконується відповідно до векторної моделі, сформованої у програмному забезпеченні, тоді як матеріал подається механічно за допомогою притискних роликів.

Основною перевагою ріжучих плотерів є висока точність відтворення контурів та здатність працювати зі складними замкненими геометричними фігурами, зберігаючи чіткість ліній незалежно від масштабу та матеріалу заготовки. Такі пристрої широко застосовуються у рекламній та поліграфічній галузях для виготовлення наліпок, аплікацій та декоративних вставок. У легкій промисловості ріжучі плотери використовуються для створення лекал, вирізання термотрансферних плівок, формування декоративних нашивок і елементів дизайну виробів, що значно пришвидшує технологічний процес та зменшує кількість ручної праці [12]. Вигляд плотера для розкрою настилу наведено на рисунку 1.9.

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Адк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19



Рисунок 1.9 – Ріжучий плотер для розкрою настилу iECHO GLSC

Разом з тим ріжучі системи мають певні обмеження. Для коректної роботи необхідно точно налаштувати глибину різання, щоб уникнути прорізання підкладки або пошкодження поверхні матеріалу. Крім того, такі плотери не забезпечують нанесення графічних зображень, що обмежує їх використання виключно операціями порізки. У випадках, коли потрібне поєднання друку та різання, ріжучі плотери застосовуються разом зі струменевими чи перовими системами або інтегруються в модульні комплекси.

Електростатичні плотери.

Електростатичні плотери працюють за принципом перенесення зображення на поверхню за допомогою електрично заряджених частинок, які притягуються до носія відповідно до сформованої моделі. У таких пристроях зображення спочатку створюється як електростатичний шаблон на спеціальному барабані або стрічці, після чого тонер закріплюється на поверхні матеріалу під дією нагріву та тиску. Цей метод дозволяє отримувати великоформатні монохромні зображення з високою швидкістю, що робило електростатичні системи популярними у друкарській та інженерній графіці до появи сучасних струменевих технологій.

										Адк.
										20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

друкарська головка або світловий модуль формує растрову структуру зображення прямо на поверхні носія, що дозволяє значно скоротити технологічний цикл. Такий принцип роботи забезпечує високу точність позиціонування та мінімізує похибки суміщення, характерні для багатокрокових друкарських процесів [14]. Приклад роботи пристрою прямого виведення наведено на рисунку 1.11.



Рисунок 1.11 – Плотер прямого виведення

До переваг систем прямого виведення належать висока деталізація растрових елементів, можливість роботи з різними типами матеріалів та стабільність якості друку. Завдяки відсутності проміжних етапів, такі пристрої широко застосовуються у поліграфії, виготовленні технічних креслень, картографічних матеріалів та дизайнерської продукції.

Плотери прямого виведення мають обмеження, пов'язані з вимогами до стану друкарської головки та якості поверхні матеріалу. Вони потребують регулярного технічного обслуговування та стабільних умов експлуатації. У легкій промисловості такі системи використовуються переважно для створення маркувальних шаблонів та графічних елементів, де необхідне точне відтворення ліній і текстових позначень.

									АДК.
									22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

МРМА 25.00.00.000 ПЗ

Висновок до першого розділу

Перший розділ магістерської роботи присвячений огляду та аналізу сучасних конструкцій плотерів, а також технічних рішень, що застосовуються у графічних роботизованих системах. Розглянуто основні типи плотерів, їхні конструктивні особливості, принципи роботи та сфери застосування. Окрема увага була зосереджена на механізмах переміщення по координатах X-Y, видах приводів, особливостях побудови кареток та загальних підходах до керування графічними пристроями.

Аналіз технічних джерел дозволив систематизувати існуючі методи формування зображення та класифікувати різні підходи до побудови плотерних систем. Визначено ключові особливості роботи різних типів пристроїв від перових до ріжучих, що дозволяє зрозуміти їхні переваги, конструктивні обмеження та можливі напрями вдосконалення.

Отримана інформація забезпечує необхідну теоретичну базу для подальшого розгляду конструктивних рішень у наступних розділах роботи та слугує основою для формування вимог до удосконаленої моделі плотера.

					MPMA 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

2 УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ПЛОТЕРА 3 РОБОТОТЕХНІЧНОЮ СИСТЕМОЮ НАНЕСЕННЯ КОЛЬОРІВ

У цьому розділі проводиться поетапний перехід від раніше розробленої конструкції плотера до вдосконаленої моделі з автоматичною робототехнічною системою зміни інструментів. Оцінюються недоліки вихідної конструкції, визначаються вимоги до модернізації, обґрунтовується вибір нової архітектури та виконується детальний опис механічних, електронних та програмних рішень вдосконаленого пристрою. Особлива увага приділяється розробленню механізму автоматичного вибору та фіксації кольорових інструментів, що є ключовою відмінністю та технічним удосконаленням нової конструкції.

2.1 Існуюча конструкції плотера

У магістерській кваліфікаційній роботі удосконалення конструкції плотера виконується на основі аналізу раніше розробленої моделі.

Вихідна конструкція, являла собою двокоординатний плотер власної конструкції (рис.2.1), побудований на порталній рамі з пасовим приводом осей. Для переміщення робочої каретки застосовувалися крокові двигуни NEMA17, а керування здійснювалося через мікроконтролер Arduino UNO у поєднанні з платою CNC Shield. Така конфігурація забезпечувала базову точність позиціонування та можливість створення графічних зображень [15].

Запропоноване конструктивне рішення відповідало вимогам початкового етапу проектування та дозволяло реалізувати основні функції плотера. Конструкція плотера забезпечувала переміщення робочої головки у двох координатних напрямках (X та Y) та мала додатковий сервопривід, який виконував функцію піднімання й опускання інструмента під час малювання. Основні деталі каркаса були виконані за допомогою 3D-друку, що дозволяло легко модифікувати конструкцію та відтворювати необхідні елементи з мінімальними витратами.

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Адк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

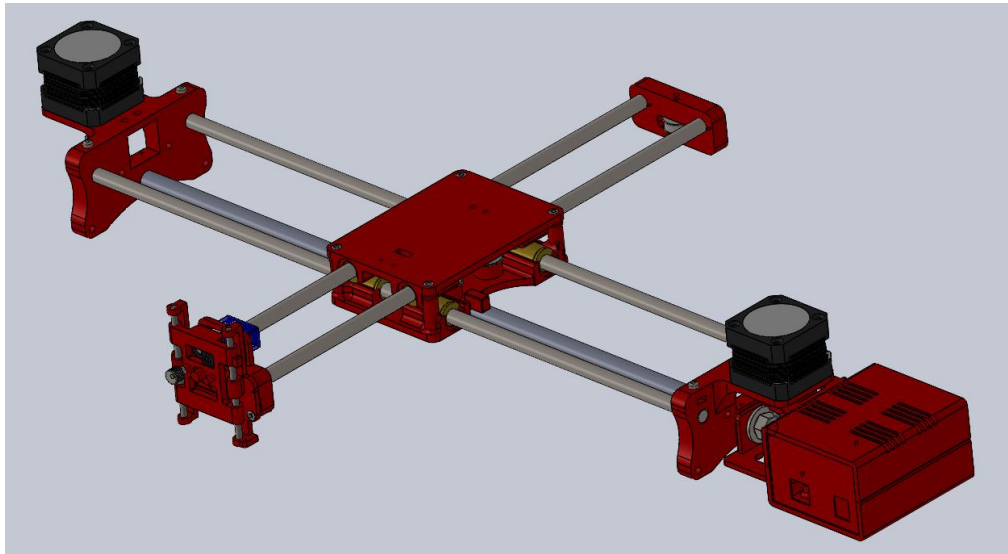


Рисунок 2.1 – 3D-модель базової конструкції двокоординатного плотера

Під час експлуатації та подальшого дослідження роботи пристрою було виявлено низку обмежень, що знижували можливості базової моделі та ускладнювали її використання для задач багатокольорового нанесення графічної інформації. Серед основних недоліків виділяються такі:

- відсутність механізму автоматичної зміни інструментів. Перехід між кольорами вимагав ручного втручання оператора;
- обмежена жорсткість 3D-друкованих елементів, що призводило до коливань каретки при високих швидкостях;
- нестабільна стійкість конструкції. У крайніх положеннях робочої зони, особливо при максимальному виносі маркера вперед, центр мас зміщувався, що в окремих випадках могло спричинити часткове піднімання або навіть перекидання пристрою;
- чутливість пасової передачі до зміни натягу, що знижувало точність позиціонування;
- відсутність повноцінної осі Z , що обмежувало можливість встановлення інструментального магазину чи механізму фіксації інструментів;

										Арк.
										25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

– недостатня точність при малюванні дрібних або складних контурів через конструктивні коливання.

Проведений аналіз показав, що модернізація існуючої конструкції під вимоги автоматичного нанесення кольорів потребує не лише заміни окремих деталей, а й кардинальної зміни кінематичної схеми пристрою. Інтеграція модуля автоматичної зміни інструментів вимагає:

- жорсткішої порталльної рами;
- збільшеної точності позиціонування;
- наявності окремої осі Z із чітким контролем висоти;
- можливості розміщення магазину кольорових інструментів та механізму їх фіксації;
- більш стабільної та надійної механіки руху.

З огляду на конструктивні обмеження попереднього пристрою виникла необхідність переходу до нової конструкційної схеми плотера. У вдосконаленому варіанті передбачено підвищення жорсткості рами, оптимізацію механізму переміщення та інтеграцію автоматизованого вузла зміни робочих інструментів. Такий підхід забезпечує підвищену точність нанесення, стабільність руху та автономний перехід між кольорами, що є ключовою вимогою багатокольорових технологічних процесів.

2.2 Обґрунтування необхідності конструктивної модернізації

Виявлені недоліки базової конструкції свідчать про те, що її модернізація у напрямку реалізації автоматизованого багатокольорового нанесення значною мірою обмежена самою кінематикою та принципами побудови пристрою. Попередня модель була розрахована на роботу лише з одним інструментом, а її механічна схема не передбачала можливості інтеграції додаткових модулів без суттєвого втручання у конструкцію.

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Адк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

Однією з ключових проблем є те, що вихідний варіант плотера не мав достатнього запасу жорсткості та конструкційного простору для встановлення вузла автоматичної зміни інструментів. Навіть локальне посилення рами або заміна окремих елементів не забезпечили б необхідного рівня стабільності. Будь-яка спроба інтегрувати додатковий механізм призводила б до збільшення маси рухомої частини та погіршення якості позиціонування.

У попередній конструкції вертикальне переміщення реалізовувалося лише за допомогою сервоприводу, призначеного для піднімання та опускання пера, що не може забезпечити необхідної точності для роботи з інструментальним магазином.

Додатковим обмеженням була нестабільність переміщення каретки, обумовлена використанням гладких валів з латунними втулками ковзання. При встановленні будь-якого додаткового навантаження, включаючи вузол фіксації інструмента, підвищувалась імовірність появи коливань, що негативно впливало б на якість нанесення графічних елементів.

У сукупності ці фактори вказують на те, що модернізація попереднього пристрою шляхом часткових змін є недоцільною. Для реалізації функції автоматичної зміни інструментів необхідна інша конструкційна схема, що забезпечує:

- підвищену жорсткість та геометричну стабільність рами;
- точну роботу механізму переміщення по всіх осях;
- наявність або можливість інтеграції повноцінної осі Z;
- достатній простір для розміщення магазину кольорових інструментів;
- можливість встановлення механізму автоматичного захоплення інструментів.

Таким чином, подальший розвиток плотера передбачає не локальну модернізацію наявної конструкції, а перехід до нової кінематичної та механічної концепції, здатної забезпечити повноцінну реалізацію автоматичної багатокольорової роботи в автономному режимі.

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Адк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

2.3 Огляд сучасних конструктивних систем та вибір компонентів для удосконаленого плотера

У процесі проектування удосконаленого багатокольорового плотера важливим етапом є вибір оптимальних конструктивних рішень, що забезпечують високу точність переміщення, стабільність роботи та можливість інтеграції модуля автоматичної зміни інструментів. Сучасні координатні системи типу X-Y-Z мають різні технічні рішення для організації лінійного руху, приводу, жорсткості рами та взаємодії виконавчих механізмів. У даному підрозділі наведено огляд основних систем, що застосовуються в робототехніці та плотерних установках, а також обґрунтування вибору конкретних варіантів для створюваного пристрою.

Системи напрямних для координатного переміщення:

Для переміщення робочої каретки у плотерах використовуються різні типи направляючих [16]. Основними з них є:

1. Гладкі вали з втулками ковзання.

Такі направляючі характеризуються простою конструкцією, низькою вартістю та достатньою зносостійкістю. Латунні втулки ковзання, використані у попередньому пристрої, забезпечують базову плавність руху, однак мають низку недоліків: невелика жорсткість, підвищений коефіцієнт тертя, чутливість до перекосів, наявність мікролюфтів та обмежена стабільність при швидкісних переміщеннях.

2. Гладкі вали з лінійними підшипниками (LM).

Каретки типу LM забезпечують нижчий рівень тертя та більшу плавність ходу, проте потребують точного монтажу та мають тенденцію до появи люфтів у разі зношування. Крім того, така система менш стійка до вібрацій, що негативно позначається на точності нанесення графічних елементів.

3. Рейкові лінійні направляючі з каретками на кулькових підшипниках.

					MPMA 25.00.00.000 ПЗ	Адк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

Це найбільш точний і стабільний варіант лінійного переміщення. Рейкові направляючі забезпечують високий рівень жорсткості, мінімальний люфт і плавність руху навіть під навантаженням. Використання сталевий рейки та каретки з кульковими доріжками гарантує точне позиціонування і повторюваність переміщень, що є критично важливим для роботи з автоматичним інструментальним магазином.

З огляду на вимоги до точності, стабільності та можливості встановлення додаткових модулів у вдосконаленому плотері обрано рейкові лінійні направляючі, які забезпечують найкращий баланс між точністю, жорсткістю та довговічністю конструкції (рис. 2.2).



Рисунок 2.2 – Рейкові лінійні направляючі з каретками

Системи приводів для осей X, Y та Z

Лінійні приводи координатних систем у сучасних плотерах можуть реалізовуватися різними способами залежно від вимог до точності, швидкості та конструкційної складності.

Найпоширенішими є:

1. Пасові приводи GT2

Забезпечують високу швидкість переміщення, плавність ходу та низьку інерційність рухомих елементів. Найчастіше застосовуються для осей X та Y у настільних плотерах завдяки простоті монтажу та достатній точності при роботі з графічними матеріалами;

2. Зубчаста рейка з шестернею.

Забезпечує передавання значних зусиль і підвищену жорсткість конструкції, однак має вищий рівень шуму та маси, тому рідко використовується в компактних пристроях;

3. Гвинтові передачі та кулько-гвинтові пари (КГП).

Характеризуються високою точністю та мінімальним люфтом, проте мають більшу вартість і складність виготовлення;

4. Механізми підйому інструмента з використанням кривошипів та важелів .

Такі механізми застосовуються у системах, де потрібна невелика амплітуда вертикального переміщення, висока швидкість та мінімальна маса рухомих частин. Конструкція є простою, надійною та оптимальною для піднімання і опускання інструмента.

У вдосконаленій конструкції було застосовано комбінований принцип приводу:

- Для осей X та Y використовується пасовий привід GT2 (рис. 2.3 а). Він забезпечує швидке та плавне переміщення каретки без збільшення її маси, що позитивно впливає на точність та продуктивність пристрою.

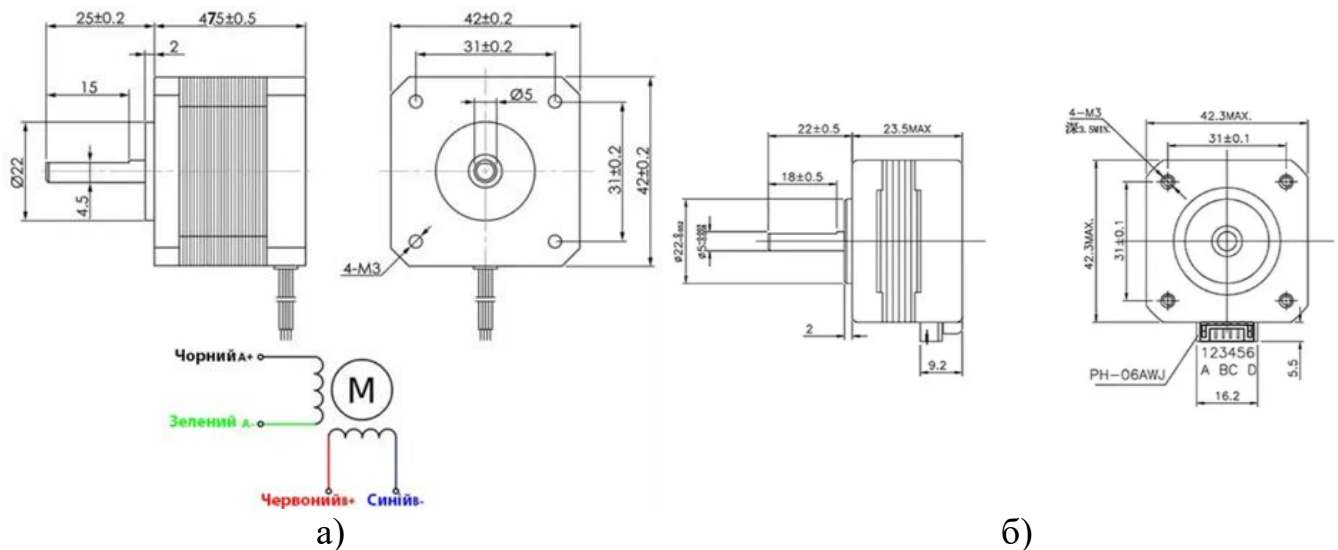
- Для осі Z використовується кроковий двигун з кривошипним механізмом (рис. 2.3 б).

На валу двигуна встановлено кривошип, який через важіль підйому інструмента здійснює вертикальне переміщення пера. Вся конструкція переміщується по прямолінійних напрямних осі Z, що забезпечує стабільність і відсутність люфтів.

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Адк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

завданням цього приводу є забезпечення надійного та достатньо швидкого вертикального переміщення інструмента в момент автоматичної заміни маркера.

Використання компактної модифікації двигуна на осі Z дозволило зменшити масу рухомої частини каретки, що позитивно впливає на динамічні характеристики системи та знижує інерційні навантаження під час роботи на високих швидкостях.



а – двигуни осей X, Y; б – двигун осі Z.

Рисунок 2.4 – Крокові електродвигуни NEMA 17

Крокові двигуни NEMA17 є поширеним рішенням у компактних роботизованих системах завдяки точності позиціонування та простоті інтеграції з контролерами керування загалом. На відміну від сервоприводів, вони не потребують зворотного зв'язку, що спрощує конструкцію та зменшує вимоги до електроніки [17].

У даному пристрої керування переміщенням здійснюється контролером GRBL на базі мікроконтролера Arduino, що забезпечує використання стандартного G-коду та синхронізовану роботу всіх осей під час нанесення зображень та автоматичної зміни інструментів. Така конфігурація гарантує

										Арк.
										32
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	MPMA 25.00.00.000 ПЗ					

стабільність переміщення і високу точність позиціонування каретки у робочому режимі.

Сервопривід механізму фіксації інструмента.

У конструкції удосконаленого багатокольорового плотера застосовано мініатюрний сервопривід SG90 (рис. 2.5), який забезпечує кероване переміщення притискного елемента тримача маркера. Поворот вихідного вала сервопривода задається сигналом широтно-імпульсної модуляції (PWM) від контролера Arduino, що дозволяє послідовно переходити між положеннями фіксації та звільнення інструмента [18].

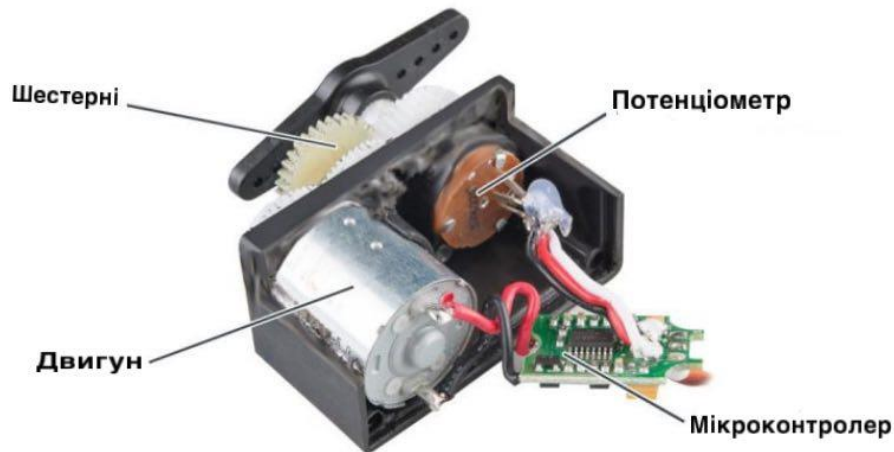


Рисунок 2.5 – Сервопривід SG90

Застосовано мініатюрний сервопривід SG90, який забезпечує керований притиск маркера в тримачі під час автоматичної зміни інструментів. Компактні габарити та низька маса дозволяють розміщувати привід без збільшення навантаження на каретку. Керування здійснюється широтно-імпульсною модуляцією, що забезпечує точне встановлення положення притискного елемента.

Крутного моменту SG90 достатньо для надійного утримання маркера, оскільки механізм фіксації не потребує значних силових зусиль. Привід стабільно

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

Драйвери дозволяють регулювати струм у фазах двигуна, працювати у режимах мікрокроку та містять інтегрований транслятор, що спрощує формування сигналів типу Step/Dir. Крім того, вони встановлюються безпосередньо у посадочні місця CNC-плати, що прискорює монтаж та забезпечує стандартизоване підключення.

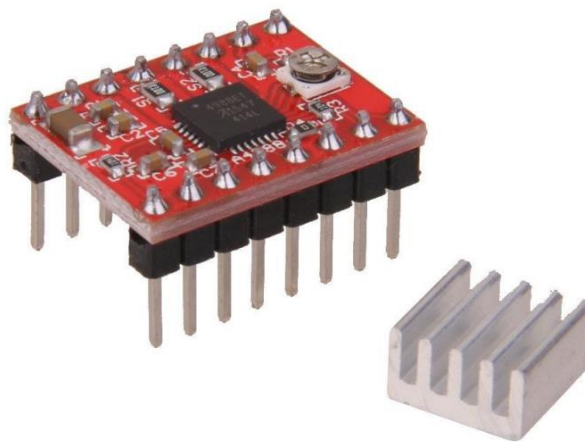


Рисунок 2.7 – Драйвер крокового двигуна

Для підтримання стабільної температури під час роботи на корпус драйвера встановлюється алюмінієвий радіатор. Також використовується термопаста, що зменшує тепловий опір між поверхнею модуля та радіатором. Завдяки цьому забезпечується ефективне тепловідведення, що запобігає перегріву електронної частини та гарантує стабільну роботу приводу при підвищених навантаженнях.

CNC-щит.

CNC-щит V3.0 застосовується у даному плотері як плата розширення для підключення драйверів крокових двигунів та організації апаратної частини системи керування. Його використання дає змогу реалізувати керування одразу кількома осями та забезпечити можливість подальшого розширення функціональних можливостей пристрою. Загальний принцип побудови системи автоматичного керування подано на рисунку 2.8, де відображено взаємодію контролера, виконавчих механізмів та зворотного зв'язку.

										Арк.
										36
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

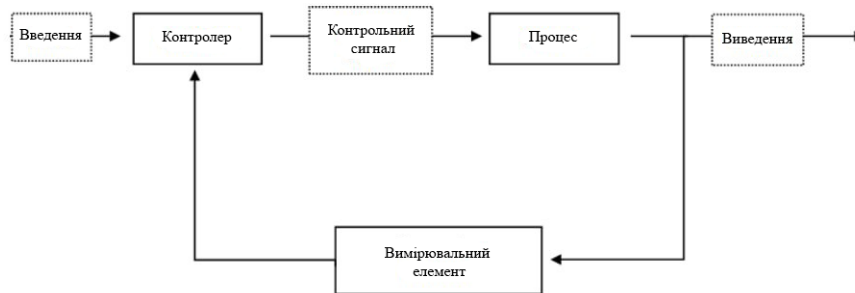


Рисунок 2.8 – Узагальнена структурна схема системи керування

У даній конструкції задіяно три крокові двигуни, проте наявні додаткові слоти забезпечують резерв для модернізації або підключення інших виконавчих механізмів у майбутньому. CNC-щит встановлюється безпосередньо на Arduino, що забезпечує компактність апаратної частини та мінімізує кількість необхідних з'єднань. Таке компонування також спрощує процес обслуговування і дозволяє оперативно замінювати окремі модулі, включаючи драйвери крокових двигунів (рисунок 2.9).

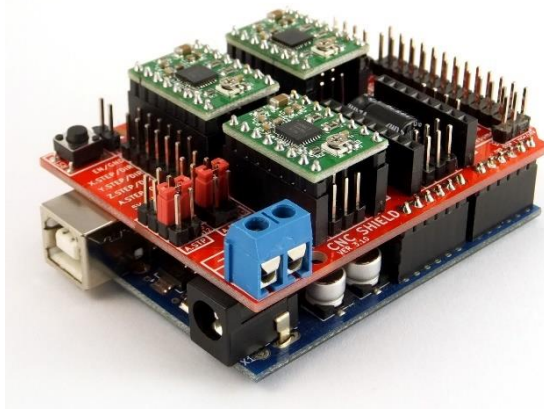


Рисунок 2.9 – Встановлений CNC-щит на Arduino з драйверами крокових двигунів

Щит підтримує прошивку GRBL, яка здійснює інтерпретацію G-code та формує сигнали Step/Dir для виконавчих механізмів. За допомогою перемичок на платі можна налаштувати режими мікрокрокування, що підвищує точність

позиціонування та плавність руху по координатних осях. Підтримка напруги до 36 В дозволяє застосовувати потужніші двигуни та приводи, що розширює сферу використання плати у CNC-пристроях різного призначення [20].

Таким чином, CNC-щит V3.0 відіграє ключову роль у побудові апаратної архітектури системи керування, забезпечуючи гнучкість конфігурації, можливість модернізації та надійне функціонування плотера під час виконання різних технологічних операцій.

Кінцеві вимикачі.

Кінцеві вимикачі (limit switches) використовуються для визначення нульового положення механізму та забезпечують виконання процедури початкового позиціонування перед початком роботи плотера. Після отримання команди «homing» каретки переміщуються до фіксованих позицій і визначають початкові координати по кожній осі.

На рисунку 2.10 показано принцип підключення кінцевих вимикачів та їх взаємодію з елементами електронної системи керування.

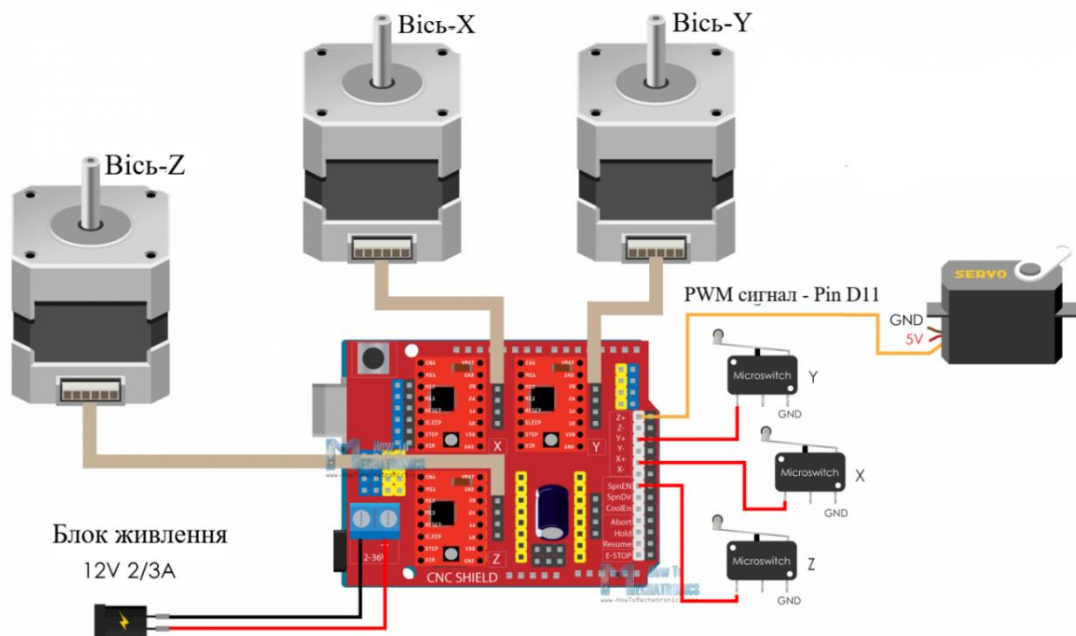


Рисунок 2.10 – Схема підключення кінцевих вимикачів у складі електронної системи плотера

Передбачено встановлення трьох кінцевих вимикачів - по осях X, Y та Z. Кожен мікрвимикач формує сигнал про досягнення крайнього положення рухомих елементів, який подається на відповідні входи CNC-щита. Це дозволяє контролеру однозначно визначати стартову позицію та забезпечує коректне виконання подальших переміщень механізмів.

Наявність кінцевих вимикачів підвищує точність позиціонування та запобігає виходу рухомих частин за межі робочої зони, що сприяє підвищенню надійності функціонування пристрою. Також правильно визначена нульова позиція дає можливість точно суміщувати зображення під час зміни інструмента або кольору, що має важливе значення для роботи багатокольорового плотера.

Структурна схема.

На рисунку 2.11 подано структурну схему, яка відображає основні апаратні елементи та їх взаємодію у складі удосконаленого плотера. Завдяки ній можна наочно побачити, які компоненти використовуються в системі та яку роль вони виконують під час роботи пристрою.

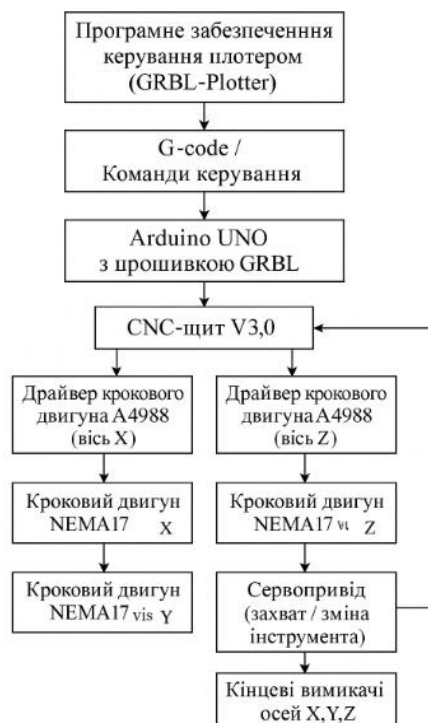


Рисунок 2.11 – Структурна блок схема пристрою

Аналіз структурної схеми дозволяє зрозуміти особливості роботи апаратної частини та визначити можливі варіанти покращення конструкції в перспективі. Такий підхід сприяє підвищенню ефективності та надійності функціонування плотера загалом стабільно під навантаженням і під час виконання технологічних операцій.

2.4 Конструктивні елементи порталної рами плотера

Портальна рама є основним несучим елементом удосконаленого багатокольорового плотера. Вона забезпечує жорсткість конструкції, точність переміщення порталу та стабільність роботи механізму автоматичної зміни інструментів. Для забезпечення високої геометричної стабільності в конструкції застосовано рейкові лінійні направляючі, посилені опорні елементи та розширену базу кріплення.

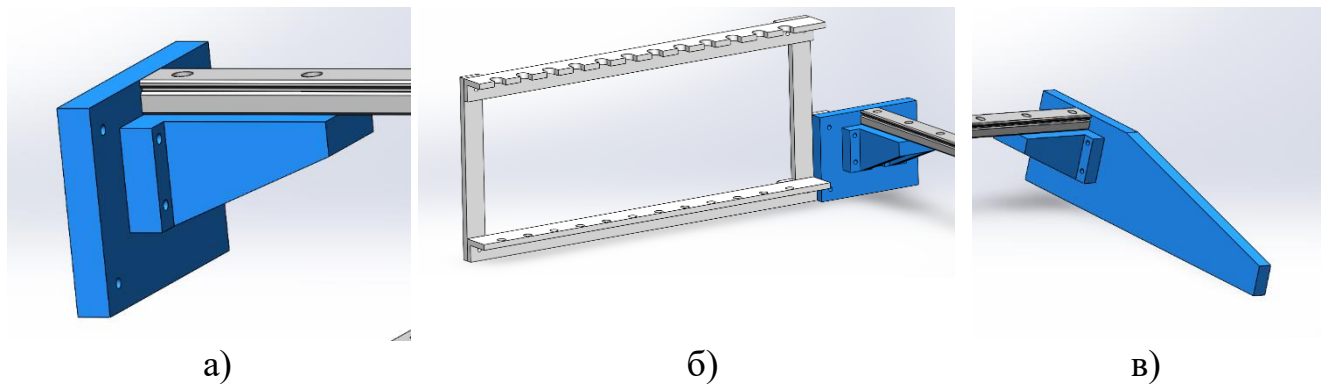
Ліва опора порталу.

Ліва опора (рис.2.12 а) складається з двох жорстких елементів вертикальної плити та косої підсилюючої стойки. Така конфігурація мінімізує вигин при роботі порталу та рівномірно розподіляє навантаження від рейкової направляючої. Додатковою особливістю конструкції є те, що до лівої опори кріпиться магазин інструментів, який виконує не лише функцію зберігання маркерів, але й служить додатковим ребром жорсткості, підсилюючи раму з фронтальної сторони (рис. 2.12 б).

Права опора порталу.

Права опора (рис. 2.12 в) також складається з двох частин вертикальної плити та похилої підсилюючої стойки. Її геометрія оптимізована для роботи з довгою рейковою направляючою, яка передає навантаження від рухомої каретки під час переміщення. Завдяки такому виконанню конструкція витримує значні прискорення осі X у робочому режимі без втрати точності й не допускає перекосів балки.

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Адк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40



а – ліва опора порталу; б – ліва опора з закріпленим магазином інструментів, що додатково підсилює раму; в – права опора порталу.

Рисунок 2.12 – Опорні елементи порталної рами плотера

Рейкова лінійна направляюча як несучий елемент.

На відміну від традиційних порталних конструкцій, де верхня балка виконується у вигляді профілю або труби, у цьому проєкті рейкова лінійна направляюча виконує подвійну роль:

- несучого елемента порталу,
- напрямної високої точності для переміщення каретки по осі X.

Це дозволило значно зменшити масу порталної балки та одночасно збільшити точність позиціонування, оскільки жорсткість рейки HIWIN достатня для виконання таких функцій (рис. 2.13).



Рисунок 2.13 – Рейкова лінійна направляюча, що виконує роль несучого елемента порталу та високоточної напрямної переміщення каретки по осі X

					MPMA 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

Взаємодія опор і магазину інструментів.

Магазин маркерів, закріплений на лівій опорі (рис.2.12 б), виконує важливу роль у конструктивній схемі:

- збільшує ширину бази опори;
- перешкоджає горизонтальному відхиленню при русі порталу;
- додає торсійну жорсткість усій конструкції.

Таким чином, обидві опори спільно з магазином та рейковою направляючою формують збалансовану просторову систему, яка забезпечує точність та стабільність роботи плотера.

Конструктивна схема портальної рами розроблена з урахуванням необхідності забезпечення високої жорсткості та стабільності при мінімальній масі рухомих елементів. Основу рами формують ліва та права опори, центральний несучий вузол та дві рейкові лінійні направляючі HIWIN, що виконують роль балок порталу та напрямних високої точності.

Загальний вигляд портальної рами представлено на рисунку 2.14, де продемонстровано взаємне розташування силових елементів та базові принципи просторової компоновки конструкції.

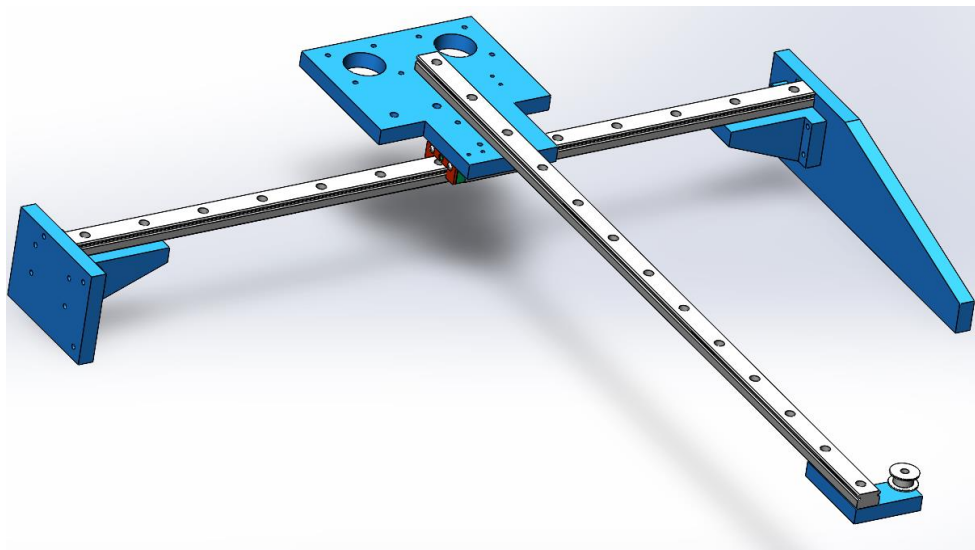


Рисунок 2.14 – Загальний вигляд портальної рами удосконаленого багатокольорового плотера

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Адк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

Опорні елементи рами мають розширену основу, що зменшує ризик виникнення крутильних деформацій під час прискорень осі X. Рейкові направляючі забезпечують плавне та точне переміщення каретки, а інтегрований у ліву частину рами магазин інструментів виконує функцію додаткового ребра жорсткості та підвищує стабільність конструкції.

Завдяки такому компонованню портална рама утворює просторову систему з рівномірним розподілом навантажень, зберігає правильну геометрію під час роботи та забезпечує високоточне багатокольорове нанесення зображень.

Аналіз жорсткості конструкції та вибір матеріалу.

Під час експлуатаційних випробувань попередньої версії плотера було виявлено, що використання друкованих елементів з матеріалу PLA не забезпечує достатньої жорсткості конструкції при максимальних координатах руху. У положенні найбільшого вильоту осі Y спостерігався прогин несучої частини на величину до 4 мм відносно опорної сторони, що призводило до зміщення положення інструмента по осі Z та зниження точності нанесення ліній.

Для усунення зазначеного недоліку у модернізованій конструкції елементи несучої частини були виготовлені з більш жорстких матеріалів - PETG та ABS. Було збільшено переріз окремих несучих деталей та додано підсилюючі елементи, що зменшують згинальний момент під час роботи на крайніх положеннях.

Таке конструктивне рішення дало змогу забезпечити стабільність геометрії порталної системи, мінімізувати прогини та підвищити точність роботи плотера при автоматичній зміні інструментів і нанесенні багатокольорових зображень.

Механізм фіксації інструмента сервоприводом.

У конструкції удосконаленого багатокольорового плотера передбачено використання автоматизованого механізму зміни інструментів, який дозволяє працювати з кількома маркерами без участі оператора. Для реалізації такого процесу необхідно забезпечити надійне утримання маркера на каретці під час роботи та можливість його швидкого звільнення під час автоматичної заміни.

					MPMA 25.00.00.000 ПЗ	Адк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

Для цього застосовується сервопривід з поворотним затискним механізмом (рисунок. 2.15), який забезпечує фіксацію та розблокування маркера шляхом керованого повороту важеля.

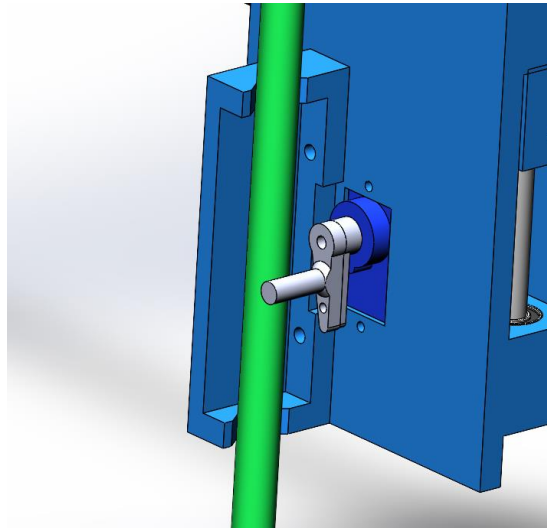


Рисунок 2.15 – Механізм фіксації маркера на каретці: сервопривод із поворотним затискним важелем

Конструкція складається з таких елементів:

- сервопривод, який виконує поворот на заданий кут;
- затискний важіль, закріплений на вихідному валу сервопривода;
- тримач інструмента, у якому розташовується маркер;
- фіксуючий упор, що взаємодіє з важелем під час блокування або розблокування інструмента.

Принцип роботи механізму.

Сервопривод повертає важіль у положення «фіксація», притискаючи тримач маркера та запобігаючи будь-якому зміщенню інструмента. Маркер надійно утримується в робочому положенні, що забезпечує точність позиціонування та стабільність нанесення ліній.

Під час автоматичної заміни інструмента:

Каретка переміщується у зону магазину інструментів. Сервопривод

										Арк.
										44
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

повертає важіль у положення «звільнення», після чого маркер легко виходить із тримача. Після переміщення до іншої позиції магазину сервопривод повертає важіль у режим фіксації, надійно затискаючи новий інструмент.

Переваги застосування сервофіксатора:

- висока швидкість та точність процесу автоматичної заміни інструмента;
- відсутність складних пружинних чи кулачкових механізмів;
- надійне утримання маркера без люфтів;
- можливість точного налаштування кута повороту;
- низька маса конструкції, що зменшує інерцію каретки та покращує динаміку руху.

У поєднанні з механізмом підйому інструмента та магазином маркерів, система фіксації на сервоприводі формує повноцінний модуль автоматичної зміни інструментів, що забезпечує автономність, точність і зручність роботи плотера.

Для кращого розуміння взаємного розташування основних вузлів та принципу функціонування механізму автоматичної зміни інструментів доцільно розглянути загальний вигляд удосконаленого координатного плотера. Загальний вигляд конструкції наведено на рисунку 2.16.

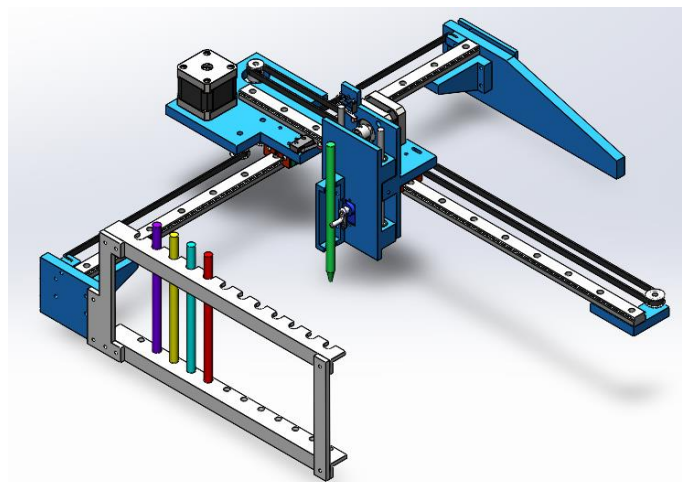


Рисунок 2.16 – Загальний вигляд удосконаленого координатного плотера

									АДК.
									45
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

Алгоритм автоматичної зміни інструментів.

Удосконалена конструкція плотера передбачає повністю автоматизований процес зміни інструментів, що дає можливість виконувати багатокольорове нанесення без втручання оператора. Робота механізму зміни маркерів здійснюється за допомогою автоматизованого позиціювання каретки, сервоприводу фіксації та програмного керування на основі координатних команд G-коду.

Реалізація нижче описаного алгоритму виконується програмними засобами середовища Arduino на основі передавання G-коду до контролера GRBL. На рисунку 2.17, подано приклад фрагмента коду, що ілюструє основні етапи автоматичної зміни інструмента під час роботи модернізованого багатокольорового плотера.

```
// Координати магазинів маркерів
float toolX[= 120, 150, 180];
float toolY = 10;
float safeZ = 20;
float pickupZ = 4;
void changeTool(int i){
  // Підйом інструмента
  Serial.println(cZ)
  // Під'їзд до магазину
  Serial.print("G0 Z20);
  Serial.print(G0rial pr^);
  // Відпуск старого інструмента
  servo.write(0);
  // Опускання для захоплення
  Serial.print("G0 Z)
  Serial.println(pickuZ);
  // Фіксація
  servo.write(45) ;;
  // Передача команд до контролера
```

Рисунок 2.17 – Приклад фрагмента програмного коду

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Адк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

Процес автоматичної заміни інструментів у даній конструкції реалізовано шляхом координатного під'їзду каретки до магазину маркерів, механічного звільнення встановленого інструмента та подальшого захоплення нового. В основі роботи лежить узгоджена взаємодія приводів осей X та Z із сервоприводом фіксації, що забезпечує безпечне та точне виконання операцій без участі оператора. Після завершення нанесення чергового кольору каретка переміщується у позицію магазину за попередньо визначеними координатами. Далі інструмент піднімається на безпечну висоту, після чого сервопривод переводиться у режим «звільнення». Маркер залишає посадочне місце й опускається в гніздо магазину. Після цього каретка переміщується до позиції іншого маркера, виконується опускання на відповідну глибину та вмикається режим «фіксації». Новий інструмент фіксується й система повертається у робочу зону для продовження друку.

Така схема дозволяє виконувати зміну інструмента без втрати точності позиціонування, а також забезпечує повторюваність процесу. Конструкція не потребує складних механізмів додаткового центрування, оскільки фіксування маркера відбувається в одному положенні відносно каретки та магазину. Завдяки цьому система забезпечує стабільність геометрії та знижує кількість помилок під час автоматичного переключення кольорів.

2.5 Програмна частина системи керування

Програмна частина є ключовим елементом у забезпеченні автоматизованої роботи багатокольорового плотера. Вона відповідає за формування керуючих сигналів, їх інтерпретацію та послідовне виконання рухів по координатах (рис. 2.18). У розробленій системі використовується концепція відокремлення апаратного рівня від логіки управління, що дає можливість модернізувати та адаптувати функціональні можливості без внесення змін у механічну конструкцію.

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Адк.
						47
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

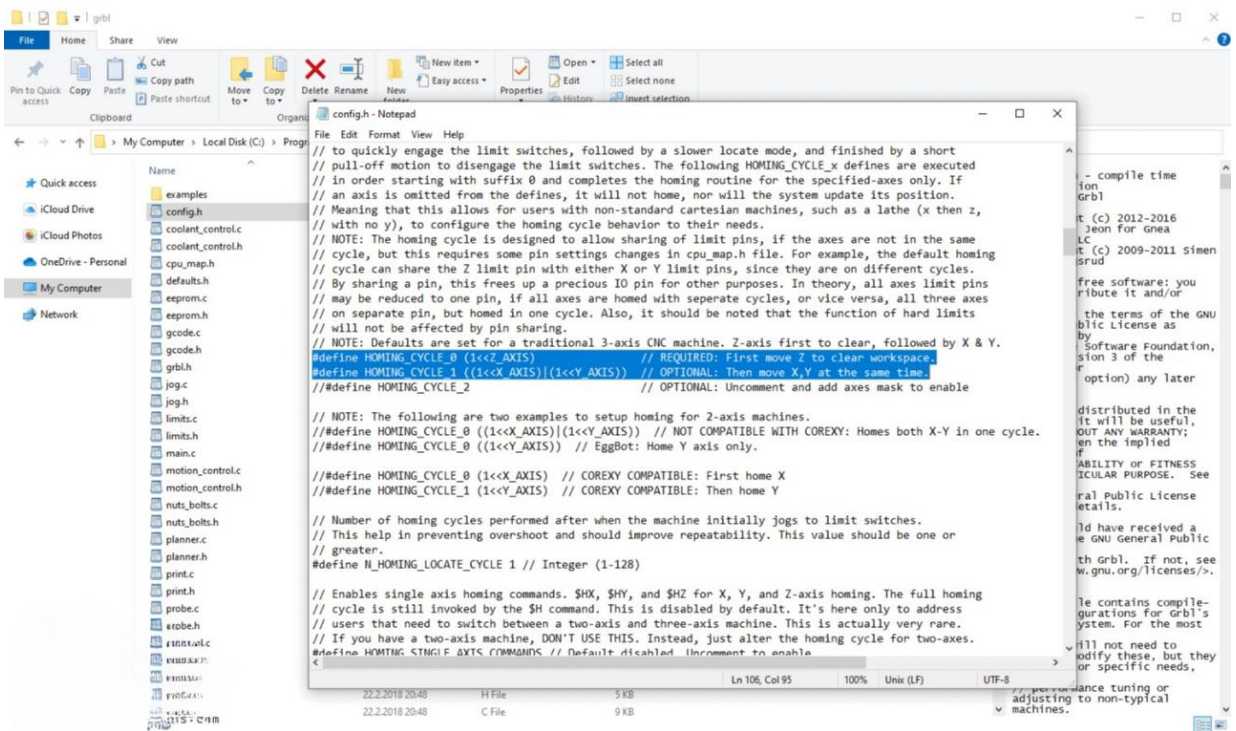


Рисунок 2.19 – Фрагмент файлу config.h з параметрами осей при налаштуванні прошивки GRBL

Модифікація конфігураційного файлу забезпечує коректну взаємодію прошивки із механізмом автоматичного захоплення та дозволяє реалізувати незалежне керування кожною віссю.

Налаштування параметрів GRBL .

Одним із ключових етапів є встановлення параметрів переміщення осей, які визначають кількість кроків на міліметр. Значення залежить від типу крокового двигуна, передавального механізму та роздільної здатності драйверів.

Для реалізованої конструкції використано значення 80 кроків/мм для осей X та Y, що забезпечує належну точність при переміщенні по напрямних, та 40 кроків/мм для осі Z, яка реалізована за допомогою сервопривода (рис. 2.20). Зазначені параметри є оптимальними для використаних в конструкції двигунів NEMA 17 та передавальних елементів типу GT2, оскільки забезпечують оптимальний баланс між швидкістю та плавністю руху каретки під навантаженням.

									Адк.
									49
Зм.	Адк.	№ докум.	Підпис	Дата	МРМА 25.00.00.000 ПЗ				

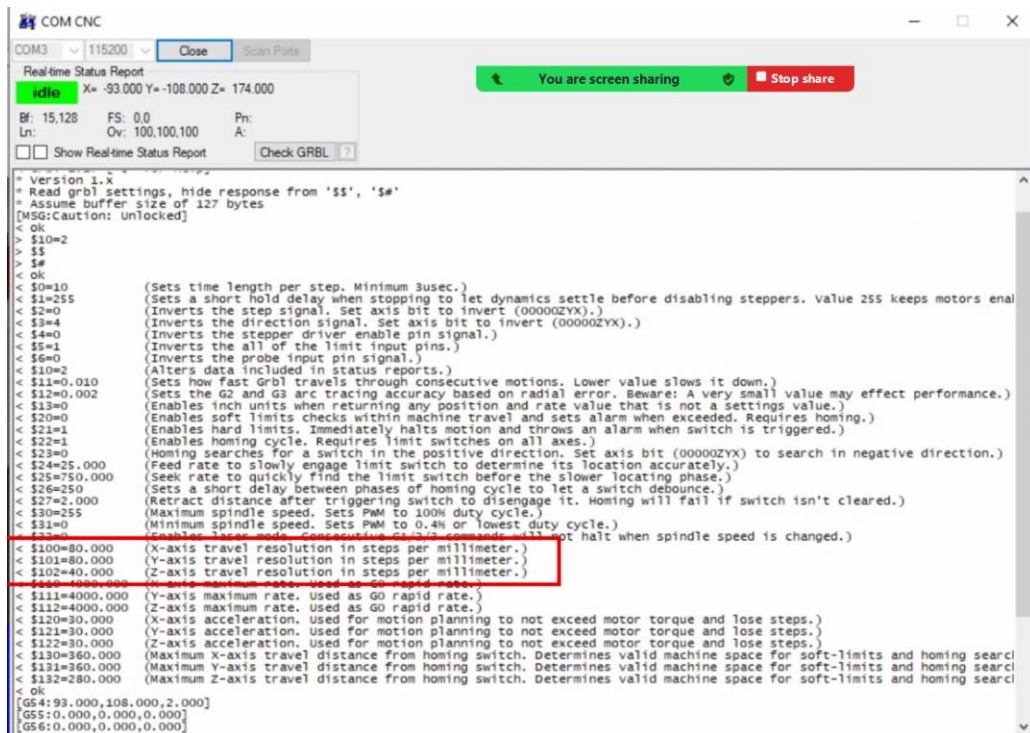


Рисунок 2.20 – Значення параметрів \$100 - \$102 при налаштуванні GRBL

В подальшому ці параметри можуть бути уточнені шляхом пробного переміщення осі та внесення відповідних поправок у значення \$100 - \$102. Така корекція дозволяє досягти необхідної точності позиціонування.

Налаштування підйому та опускання інструмента.

У програмному забезпеченні GRBL-Plotter задаються параметри руху осі Z, що визначають піднімання та опускання інструмента, необхідні для коректної зміни інструментів (рис. 2.21).

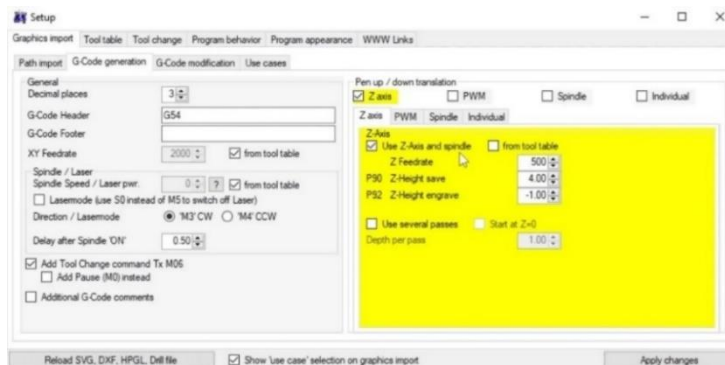


Рисунок 2.21 – Налаштування параметрів переміщення осі Z у GRBL-Plotter

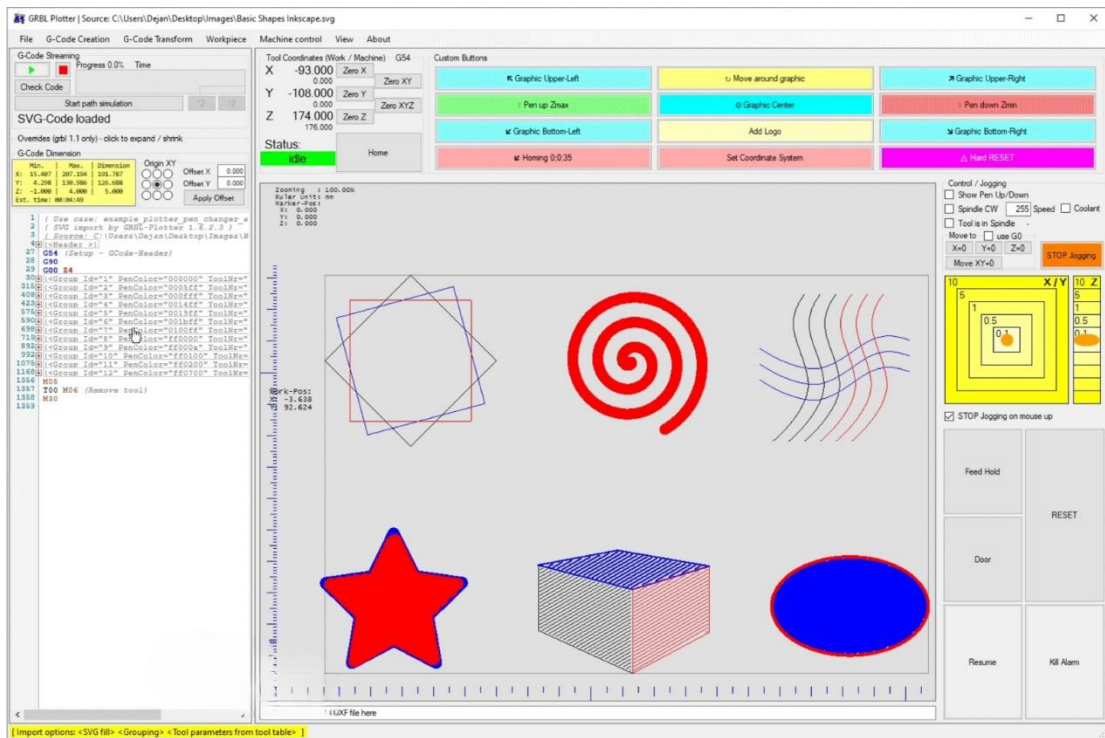


Рисунок 2.24 – Приклад створення G-коду зі зображення з урахуванням кольорів

Особливо варто відзначити можливість роботи з векторними файлами формату SVG. Для цього достатньо перетягнути файл у робочу область програми, після чого система автоматично формує відповідний G-код.

Після формування G-коду потрібно встановити нульову точку робочої системи координат та запустити виконання програми, при цьому зміна інструментів відбувається автоматично відповідно до визначених кольорів.

Висновок до другого розділу

У другому розділі магістерської роботи проведено детальний аналіз вихідної конструкції двокоординатного плотера, визначено її конструктивні обмеження та сформульовано вимоги до удосконалення. Показано, що застосування окремих 3D-друкованих елементів та початкова кінематична схема

										АДК.
										МРМА 25.00.00.000 ПЗ
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата						53

не забезпечують необхідної жорсткості й точності для реалізації механізму автоматичної зміни інструментів і стабільного багатокольорового нанесення.

Виявлені недоліки конструкції підтвердили необхідність переходу від часткової модернізації до повноцінного перегляду кінематичної структури пристрою. Обґрунтовано доцільність використання рейкових напрямних, окремого механізму вертикального переміщення, підвищеної жорсткості порталної рами та комбінованої системи приводів на основі крокових двигунів та сервопривода SG90.

На основі аналізу сучасних технічних рішень сформовано оптимальну архітектуру удосконаленого багатокольорового плотера, що передбачає застосування координатної системи X-Y-Z, інструментального магазину, механізму автоматичної фіксації інструментів та системи керування на базі Arduino з прошивкою GRBL. Зроблений вибір компонентів і конструктивних підходів забезпечує можливість надійного позиціонування, підвищення точності, зменшення люфтів та автономного переходу між різними пишучими інструментами.

					MPMA 25.00.00.000 ПЗ	АДК.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

3 РОЗРАХУНКИ, ЩО ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ПРАЦЕЗДАТНІСТЬ ПЛОТЕРА

3.1 Аналіз міцності кріпильних елементів плотера з використанням програмного забезпечення SolidWorks

Аналіз конструктивних елементів виконується у SolidWorks Simulation із застосуванням статичного нелінійного розрахунку, що дає можливість оцінити напружено-деформований стан деталей під дією постійних навантажень та визначити їхню міцність. Такий підхід забезпечує коректне відтворення роботи конструкції, оскільки дозволяє врахувати реальну поведінку матеріалів і геометричних елементів під навантаженням.

Процес розрахунку включає створення тривимірної моделі, задання властивостей матеріалу, визначення граничних умов, прикладення силових навантажень та подальший аналіз отриманих результатів. Це дає змогу отримати достовірну інформацію про рівень напружень, деформацій і потенційні зони їх концентрації у вузлах конструкції [21].

У даній роботі кріпильні елементи виготовлені з PETG, матеріалу з нелінійною діаграмою напруження–деформації та без чітко вираженої границі текучості. Через це застосовується статичне нелінійне дослідження, а для визначення запасу міцності використовується критерій максимальних нормальних напружень, що дозволяє оцінити надійність елементів та виявити ділянки, які потребують конструктивного удосконалення.

Критерій максимального нормального напруження [22]:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_{Limit}} < 1, \quad (3.1)$$

де σ_1 - прикладене навантаження;

σ_{Limit} - максимальне допустиме навантаження.

					MPMA 25.00.00.000 ПЗ	Адк.
Зм.	Адк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

Процес статичного нелінійного аналізу виконується згідно з наступними етапами:

1. Виконується статичний нелінійний розрахунок. У вкладці Simulation створюється нове дослідження через команду Create New Simulation Study. У вікні вибору типу аналізу встановлюється Nonlinear, після чого обирається режим Static, що відповідає статичному нелінійному моделюванню.

2. Задаються матеріальні властивості деталі. Для цього через команду Apply Material зі списку матеріалів обирається пластик PETG, після чого параметри матеріалу підтверджуються натисненням Apply.

3. Визначаються фіксуючі умови для рейкової направляючої. У дереві дослідження відкривається розділ Fixtures, після чого обирається команда Fixed Geometry. Фіксація накладається на опорні поверхні, якими направляюча кріпиться до рами плотера. За необхідності використовується режим Advanced, що дозволяє точніше задати обмеження за допомогою опорних геометричних елементів.

4. Задається зовнішнє навантаження. Через меню External Loads активується команда Force, після чого сила прикладається у вибраному напрямку (Selected Direction). Значення сили становить $F = 50 \text{ Н}$, а її точка прикладання визначається на основі допоміжного ескізу, як показано на рисунку 3.1.



Рисунок 3.1 – Місце прикладання сили на деталь

										Арк.
										56
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

5. Створюється кінцево-елементна сітка для подальшого розрахунку. У дереві симуляції обирається пункт Mesh, після чого активується команда Create Mesh. У відкритому вікні задається бажаний рівень деталізації сітки шляхом регулювання параметра її щільності. Після побудови сітки запускається розрахунок кнопкою Run This Study. Після завершення обчислень результати аналізу відображаються у відповідних розділах симуляції.

Досліджуваний елемент, а саме рейкова направляюча типу MGN15H, представлений на рисунку 3.2. Дана направляюча є основним лінійним елементом портальної системи плотера та забезпечує точне та плавне переміщення каретки за рахунок взаємодії сталевих рейки з підшипниковою кареткою. Її міцність і жорсткість безпосередньо впливають на точність позиціонування інструмента та загальну стабільність роботи механізму.



Рисунок 3.2 – Рейкова направляюча MGN15H

Об'ємні властивості моделі:

- маса: 0,537291 kg;
- об'єм: 6,9778e-05 m³;
- щільність: 7 700 kg/m³;

					MPMA 25.00.00.000 ПЗ	Адк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

Дослідження було зосереджене на чотирьох основних характеристиках: границі текучості, переміщенні, деформації та коефіцієнті запасу міцності.

Результати досліджень:

1) Границя текучості (рис. 3.3):

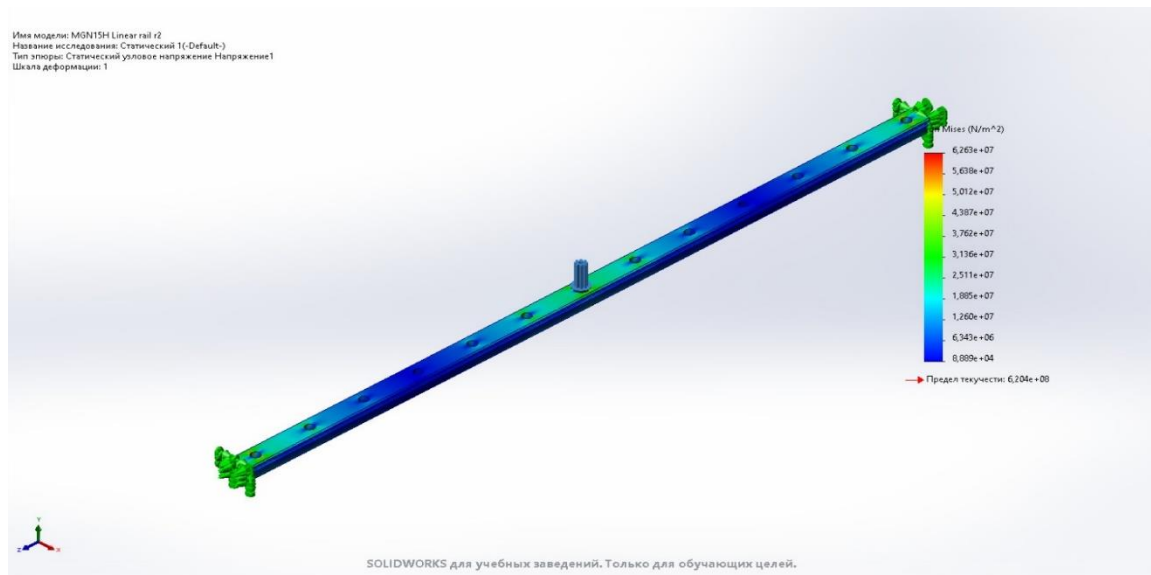


Рисунок 3.3 – Дослідження границі текучості

Таблиця 3.1 – Границя текучості

Мін.	Макс.
0,000e+00mm Вузол: 89	2,871e-01mm Вузол: 25000

2) Переміщення (рис. 3.4):

Таблиця 3.2 – Переміщення

Мін.	Макс.
5,631e-07 Вузол: 4372	2,043e-04 Вузол: 12584

Имя модели: MGN15H Lineag rail r2
 Название исследования: Статический 1(-Default-)
 Тип элюры: Статическое перемещение Перемещение1
 Шкала деформации: 1

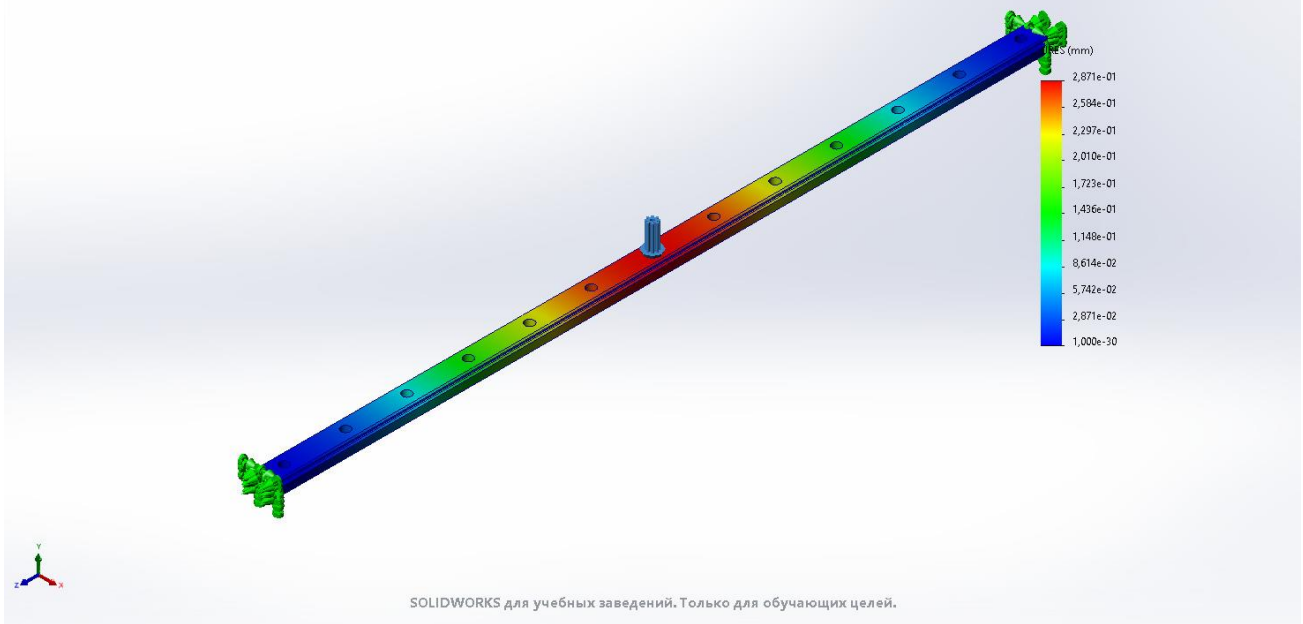


Рисунок 3.4 – Дослідження переміщення

3) Деформація (рис. 3.5):

Имя модели: MGN15H Lineag rail r2
 Название исследования: Статический 1(-Default-)
 Тип элюры: Статическая деформация Деформация1
 Шкала деформации: 1

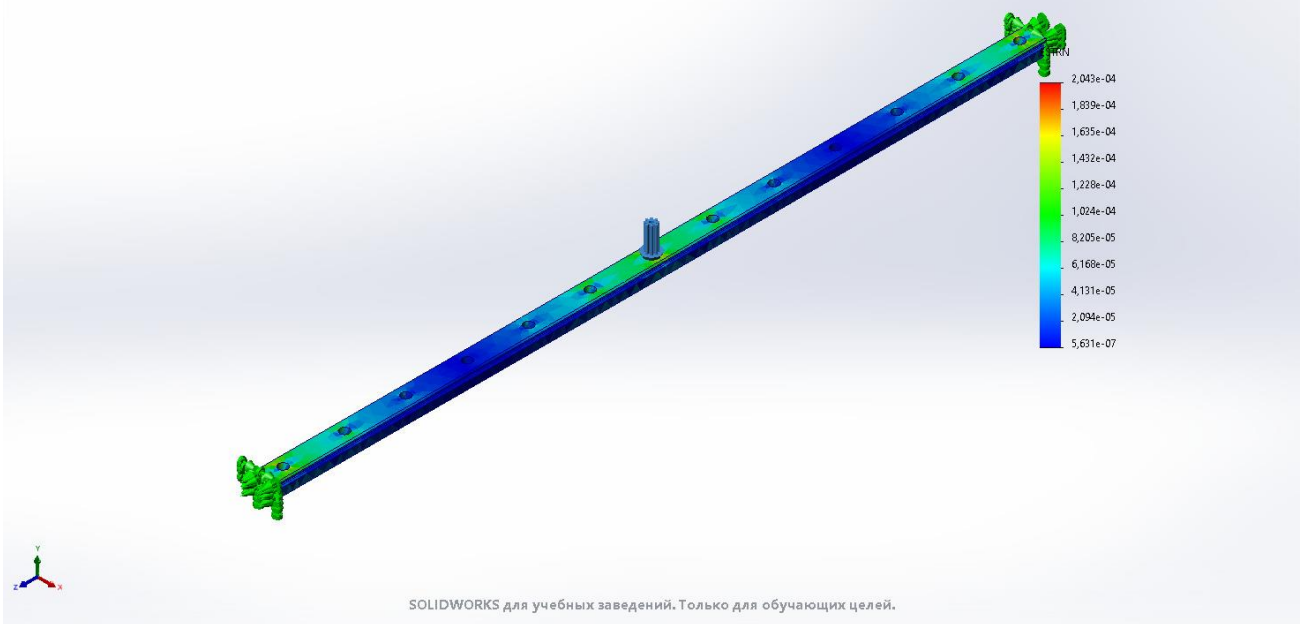


Рисунок 3.5 – Дослідження деформації

					<i>MPMA 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

Таблиця 3.3 – Деформація

Мін.	Макс.
9,906e+00 Елемент: 26782	6,980e+03 Елемент: 20983

1) Границя міцності (рис. 3.6):

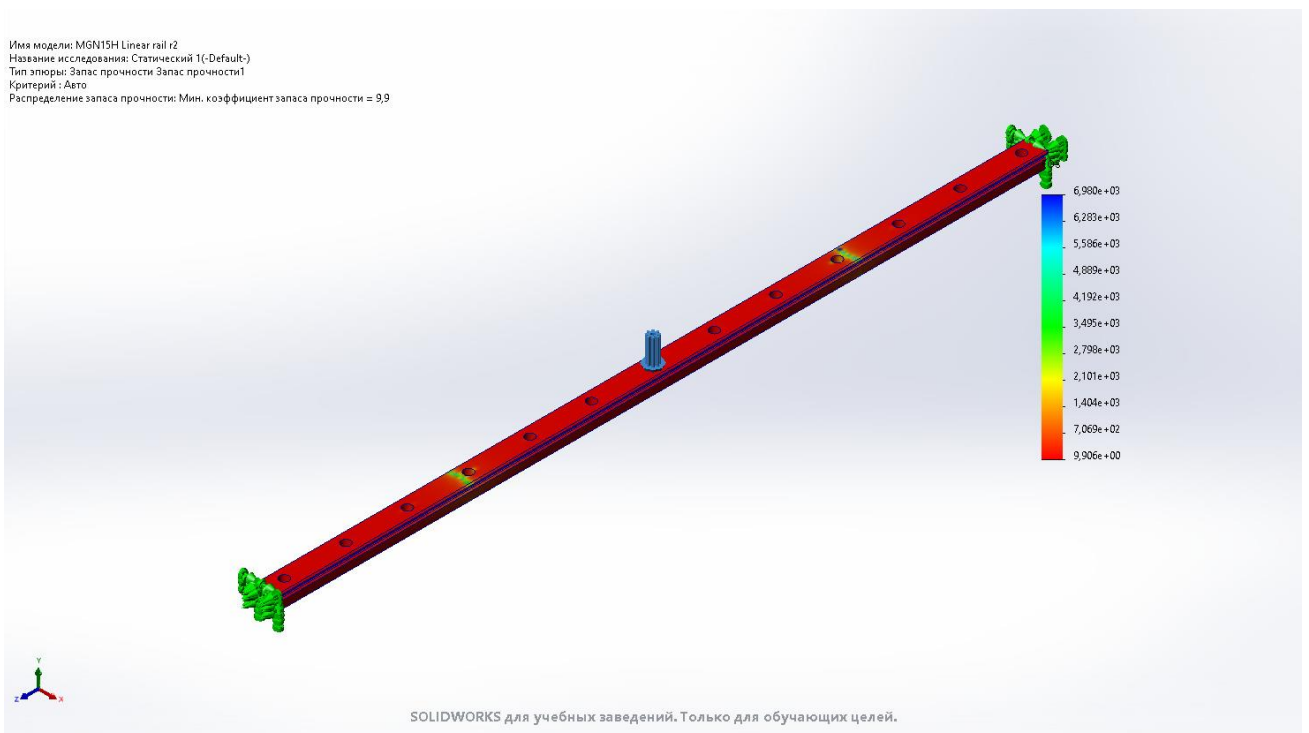


Рисунок 3.6 – Дослідження границі міцності

Таблиця 3.4 – Границя міцності

Мін.	Макс.
6,323e-07 Елемент: 5860	7,635e-03 Елемент: 8719

Проведений аналіз підтверджує, що лінійна рейка MGN15 має значний запас міцності та жорсткості для використання в удосконаленому багатокольоровому плотері. Навіть при навантаженнях, які значно перевищують реальні, елемент демонструє низький рівень напружень та мінімальні деформації. Проведений аналіз демонструє, що направляючі MGN15 мають достатній запас міцності та забезпечують стабільну роботу системи координатного переміщення, що робить їх раціональним вибором для даної конструкції.

3.2 Розрахунок кінематичних характеристик плотера

У вдосконаленому багатокольоровому плотері для приводу осей X та Y використовується пасова передача на основі зубчастого ременя типу GT2 з кроком зуба 2 мм у поєднанні з кроковими двигунами NEMA17 з кроковим кутом $1,8^\circ$. Така комбінація є типовою для високоточного лінійного позиціонування у 3D-принтерах та малогабаритних ЧПК-системах і забезпечує достатню точність та швидкість переміщення каретки. Пасова передача GT2 у поєднанні з NEMA17 забезпечує стабільне мікропозиціонування без суттєвих люфтів, що є критично важливим для формування дрібних графічних елементів зображення у процесі роботи [23].

Визначення переміщення за один крок.

Переміщення каретки за один оберт двигуна визначається як добуток кроку ременя на кількість зубів шківів:

$$S_{об} = p \cdot z, \quad (3.2)$$

де p - крок ременя, $p = 2$ мм;

z - кількість зубів шківів, для даної конструкції $z = 20$.

Тоді:

$$S_{об} = 2 \cdot 20 = 40 \text{ мм.}$$

					MPMA 25.00.00.000 ПЗ	Адк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

Кількість повних кроків двигуна на один оберт становить:

$$N = \frac{\beta}{360^\circ} = \frac{1.8}{360^\circ} = 200 \text{ кроків.} \quad (3.3)$$

Переміщення за один повний крок:

$$S_{\text{крок}} = \frac{S_{\text{об}}}{N} = \frac{40}{200} = 0,2 \text{ мм.} \quad (3.4)$$

У системі мікрокрокування з поділом 1/16 кількість мікрокроків на оберт:

$$N_{\mu} = 200 \cdot 16 = 3200 \text{ мікрокроків.} \quad (3.5)$$

а переміщення за один мікрокрок:

$$S_{\mu} = \frac{3200}{40} = 0,0125 \text{ мм.} \quad (3.6)$$

Роздільна здатність приводу становить:

- 5 повних кроків/мм або;
- 80 мікрокроків/мм.

Розрахунок максимальної лінійної швидкості.

Теоретична максимальна лінійна швидкість переміщення каретки визначається через швидкість обертання двигуна [24]:

$$V_{\text{max}} = S_{\text{об}} \cdot n_{\text{об/с}}, \quad (3.7)$$

де $S_{\text{об}} = 40$ мм - переміщення за один оберт;

$n_{\text{об/с}}$ - швидкість обертання в обертах за секунду.

Для крокового двигуна NEMA17 приймаємо робочу швидкість близько $n = 600$ об/хв ≈ 10 об/с при невеликому навантаженні.

Тоді:

					MPMA 25.00.00.000 ПЗ	Адк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

$$V_{max} = 40 \cdot 10 = 400 \text{ мм/с.}$$

У реальних умовах експлуатації, з урахуванням маси порталу, інерційних навантажень та обмежень керуючої електроніки, робоча швидкість задається нижчою (приблизно 150-250 мм/с), що дозволяє забезпечити стабільний рух без пропуску кроків та збереження точності позиціонування.

3.3 Розрахунок ефективності роботи плотера

Ефективність роботи плотера визначається здатністю механічної системи забезпечувати необхідну швидкість та точність переміщення каретки при мінімальних витратах енергії. Запропонована конструкція використовує привід на основі зубчастого ременя GT2 та крокових двигунів NEMA17, що дозволяє досягти високої динамічності руху з одночасним збереженням позиційної точності [25].

Розрахунок часу переміщення по площині формату А4.

Площа обробки задається розмірами аркуша:

- ширина: $W = 210$ мм,
- довжина: $L = 297$ мм.

Сумарна довжина ліній, яку проходить каретка під час одного циклу малювання:

$$S = 2(W + L) = 2(210 + 297) = 1004 \text{ мм.} \quad (3.8)$$

Час переміщення:

$$t = \frac{S}{V_{роб}}. \quad (3.9)$$

Для середньої робочої швидкості $V_{роб} = 200$ мм/с:

					<i>МРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

$$t = 2001004 \frac{1004}{200} \approx 5,02 \text{ с.}$$

Це значення стосується саме "порожнього" переміщення; під час реального малювання час збільшується залежно від складності траєкторії.

Розрахунок споживаної потужності приводу.

Потужність крокового двигуна оцінюється добутком напруги та сили струму:

$$P_{\text{дв}} = U \cdot I, \quad (3.10)$$

де $U = 3.6 \text{ В}$,

$I = 2 \text{ А}$.

Потужність одного двигуна:

$$P_{\text{дв}} = 3.6 \cdot 2 = 7.2 \text{ Вт.}$$

Оскільки у плотері працюють два двигуни одночасно:

$$P_{\text{заг}} = 2 \cdot 7.2 = 14.4 \text{ Вт.}$$

Розрахунок енерговитрат за один робочий цикл.

Енергія визначається як:

$$E = P_{\text{заг}} \cdot t, \quad (3.11)$$

$$E = 14.4 \cdot 5.02 = 72.28 \text{ Дж.}$$

У перерахунку на кВт·год:

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						64
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$E = \frac{72.28}{3.6 \cdot 10^6} \approx 2.0 \times 10^{-5} \text{ кВт}\cdot\text{год.} \quad (3.12)$$

Отже, енергоспоживання одного циклу є вкрай низьким та практично не впливає на загальні витрати.

Ефективність переміщення каретки.

Ефективність можна оцінити як відношення пройденої довжини до витраченої енергії:

$$\eta = \frac{S}{E}, \quad (3.13)$$

$$\eta = \frac{1004}{72.28} \approx 13.88 \text{ мм/Дж.}$$

Отримане значення вказує на достатньо високу ефективність механічної частини приводу, що пояснюється низькими втратами в пасовій передачі та відсутністю значних моментів інерції.

Висновок до третього розділу

У третьому розділі виконано кінематичний та розрахунковий аналіз удосконаленої конструкції багатокольорового плотера. Проведені розрахунки дозволили визначити основні параметри руху каретки, робочу швидкість, час переміщення та енергетичні витрати привідної системи. Також оцінено вплив маси рухомих елементів та жорсткості механічних вузлів на точність позиціонування інструмента.

Встановлено, що використання крокових двигунів NEMA17 у поєднанні з пасовою передачею типу GT2 забезпечує необхідну точність позиціонування та стабільність руху при раціональних режимах роботи. Експериментальні й

					<i>МРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

розрахункові дані засвідчили, що система здатна виконувати переміщення з мінімальними коливаннями та допустимою похибкою, що є важливим для процесів нанесення графічних елементів.

Розрахунок енергоспоживання показав, що конструкція характеризується низькими витратами електроенергії при збереженні достатньої продуктивності. Це свідчить про можливість економічної експлуатації пристрою у виробничих умовах. Окрім того, результати аналізу підтвердили, що впровадження автоматизованого модуля зміни інструментів не призводить до суттєвого збільшення навантаження на приводи, а отже не впливає негативно на динаміку руху.

Отримані результати підтверджують доцільність обраних технічних рішень і можуть бути використані для подальшої оцінки експлуатаційних характеристик удосконаленого плотера, а також для оптимізації конструктивних параметрів на наступних етапах модернізації.

					MPMA 25.00.00.000 ПЗ	Адк.
						66
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі розроблено та досліджено удосконалену конструкцію багатокольорового координатного плотера з елементами автоматизованої зміни інструментів. Основною метою роботи було забезпечення можливості багатокольорового нанесення графічної інформації за рахунок удосконалення конструкції координатного плотера та впровадження системи автоматизації процесу зміни маркерів.

У ході роботи проаналізовано існуючі типи плотерів, визначено їх характеристики, переваги та недоліки, а також виокремлено ключові напрями розвитку сучасних конструкцій. На основі проведеного аналізу обґрунтовано модернізовану конструктивну схему з використанням рейкових напрямних, порталної рами підвищеної жорсткості та окремого механізму вертикального переміщення інструмента. Запропонована система дозволяє реалізувати функцію автоматизованої зміни кольорових інструментів, що скорочує цикли перемикання та зменшує залежність від оператора.

Виконано кінематичні та розрахункові дослідження, які дозволили визначити раціональні режими роботи приводів. Показано, що застосування крокових двигунів NEMA17 у поєднанні з пасовою передачею типу GT2 забезпечує необхідну точність позиціонування та стабільність руху. Результати міцнісного аналізу підтвердили наявність достатнього запасу міцності основних елементів конструкції, а аналіз енергоспоживання вказав на економічність роботи приводної системи.

Отримані результати свідчать про доцільність запропонованих технічних рішень та можливість практичного використання удосконаленого плотера для задач багатокольорового графічного нанесення. Реалізація автоматизованої зміни інструментів розширює функціональні можливості пристрою, підвищує продуктивність та забезпечує стабільність якості нанесення зображення при роботі з різнокольоровими шарами.

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Адк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

Розроблена конструкція може бути впроваджена у навчальних, експериментальних або виробничих умовах, зокрема в галузях легкої промисловості та прототипування. Перспективними напрямками подальших досліджень є оптимізація системи керування, розширення номенклатури інструментів, інтеграція системи зворотного зв'язку, а також підвищення швидкодії та точності позиціонування для роботи з більш складними графічними моделями.

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Адк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68

22. Maximum normal stress fatigue criterion applied to random triaxial stress state [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://surli.cc/tthvhu>

23. Proceedings of the 2nd International Conference on Vocational Education and Training (ICOVET 2018) [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.atlantis-press.com/proceedings/icovet-18/55913311>

24. A numerical method of calculating the optimum high speed control for linear systems [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://surli.li/ahaiho>

25. HEWLETT-PACKARD JOURNA [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://vtda.org/pubs/HP_Journal/HP_Journal_1969-09.pdf

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Адк.
						71
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТОК А

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						72
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		