

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

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА

### Розробка плотера для різання плівки

Галузь знань 13 Механічна інженерія  
Спеціальність 133 Галузеве машинобудування

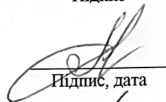
Шифр БРМА 24.00.00.000 ПЗ

Виконав студент  
4 курсу групи РМ-20-1

  
Підпис

Тирчик І.Л.  
Ініціали, прізвище

Керівник

  
Підпис, дата

д.т.н., проф. Поліщук О.С.  
Ініціали, прізвище

Нормоконтролер

  
Підпис, дата

д.т.н., проф. Поліщук О.С.  
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:  
Зав. кафедри МАЕЕС

  
Підпис, дата

д.т.н., проф. Поліщук О.С.  
Ініціали, прізвище

21 06 2024 р.

Хмельницький 2024

# ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури  
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем  
Освітній рівень бакалавр  
Галузь знань 13 Механічна інженерія  
Спеціальність 131 «Галузеве машинобудування»  
Освітня програма Робототехнічні та мехатронні системи галузі

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МАЕЕС

21.06.2024

## ЗАВДАННЯ НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

**Тирчик Ілля Леонідович**

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи **Розробка плотера для різання плівки**  
керівник роботи **Поліщук О.С., д.т.н, професор**

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

Затверджено наказом ректора університету від 15.02.2024 р. № 8

2. Строк подання студентом роботи на кафедру 21.06.2024

3. Вихідні дані до роботи: **технічні характеристики роботів-плотерів-аналогів**

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

**1 Огляд та аналіз існуючих конструкцій ріжучих плотерів**

**2 Розробка конструкції ріжучого плотера**

**3 Розрахунки, що підтверджують працездатність ріжучого плотера**

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

Аркуш 1. Ріжучий плотер. Док. оглядовий (A1). Аркуш 2. Плата

драйвера. Документ ілюстраційний (A2) + Ріжучий плотер. Схема

підєжнання (A2). Аркуш 3 Ріжучий плотер. Документ ілюстраційний

(A2) + Ріжучий плотер. Схема структурна (A2). Аркуш 4. Ріжучий

плотер. Схема електрична принципова (A1). Аркуш 5. Ріжучий плотер.

Габаритне креслення (A1).


6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

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

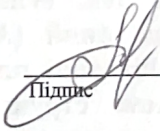
7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1 Огляд та аналіз існуючих конструкцій ріжучих плотерів	20.05.24р.	
2 Розробка конструкції ріжучого плотера	08.06.24р.	
3 Розрахунки, що підтверджують працездатність ріжучого плотера	14.06.24р.	
4 Оформлення пояснювальної записки і графічного матеріалу	20.06.24р.	

Студент \_\_\_\_\_  
 Підпис 

Шурчик І.А.  
 Ініціали, прізвище

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
 Підпис 

О.С. Поаліза  
 Ініціали, прізвище

# АНОТАЦІЯ

до бакалаврської кваліфікаційної роботи студента  
спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»

1. Прізвище, ім'я та по батькові **Тирчик Ілля Леонідович**

---

2. Тема бакалаврської роботи  
**Розробка плотера для різання плівки**

---

---

3. Прізвище, ініціали, вчена ступінь та звання опонента Миша В.В., к.т.н.

---

4. Об'єм магістерської роботи: креслень 5 арк., сторінок записки 68

5. Основні розділи розрахунково-пояснювальної записки:

**1 Огляд та аналіз існуючих конструкцій ріжучих плотерів**

**2 Розробка конструкції ріжучого плотера**

**3 Розрахунки, що підтверджують працездатність ріжучого плотера**

**Висновки**

**Перелік джерел посилання**

---

---

---

Підпис студента

" 21 " 06 20 24 р.

## РІШЕННЯ ЕК:

Протокол 3 від " 28 " 06 20 24 р.

Оцінка проекту ЕК

добре / С

Рекомендації ЕК

-

---

---

Особливі відмітки

-

Технічний секретар

Буряк Л.В.






" 28 " 06 20 24 р.

# ЗМІСТ

стор.

Вступ		6
1	Огляд та аналіз існуючих конструкцій ріжучих плотерів	8
1.1	Загальні відомості про ріжучий плотер	8
1.2	Огляд і аналіз приводів для ріжучого плотера	15
1.3	Огляд існуючих ріжучих плотерів	21
1.4	Висновки до першого розділу	26
2	Розробка конструкції ріжучого плотера	27
2.1	Розробка варіантів конструкцій та прийняття рішення принципу його побудови	27
2.2	Обґрунтування щодо вибору щодо вибору побудови приладу	34
2.3	Розробка структурної схеми	36
2.4	Вузол керування	38
2.5	Розробка вузла контролера	40
2.6	Розробка вузлів драйверів осей X і Y	42
2.7	Розробка вузла транзисторного ключа	43
2.8	Вузол навантаження, вісь X і вісь Y	43
2.9	Вузол навантаження, вісь Z	43
2.10	Побудова та принцип дії схеми принципової електричної ріжучого плотера	43
2.11	Розробка схеми під'єднання ріжучого плотера та вимог щодо технічного обслуговування та ремонту	45
2.12	Висновки до другого розділу	48
3	Розрахунки, що підтверджують працездатність ріжучого плотера	50
3.1	Розрахунок руху каретки ріжучого плотера	50
3.2	Розрахунок системи валиків ріжучого плотера	54

БРМА 24.00.00.000 ПЗ

Зм.	Арк.	Надокум.	Підпис	Дата
Виконав		Гирчик		
Перевір.		Поліщук		
Н.контр.				
Затвер.		Поліщук		

Розробка плотера для  
різання плівки

Літера	Аркуш	Аркушів
б	4	68

ХНУ гр. РМ-20-1

3.3	Розрахунок крокового електродвигуна	57
3.4	Висновки до третього розділу	62
	Висновки	64
	Перелік джерел посилання	66

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
						5
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

## ВСТУП

Ріжучі плотери є важливими інструментами в сучасній індустрії, забезпечуючи високу точність та ефективність різання матеріалів. Зокрема, плотери для різання плівки користуються широкою популярністю в різних галузях, від рекламної до текстильної індустрії. Розробка нових моделей ріжучих плотерів відкриває значні перспективи для вдосконалення технологічних процесів, підвищення продуктивності та якості кінцевої продукції.

Сучасні ріжучі плотери оснащуються передовими технологіями, що забезпечують високу точність різання. Використання лазерних або оптичних систем позиціонування дозволяє досягати мінімальних відхилень від заданих параметрів, що особливо важливо при різанні тонких плівкових матеріалів. Автоматизація процесів, включаючи налаштування параметрів різання та автоматичне завантаження матеріалу, значно знижує ризик помилок і підвищує продуктивність.

Впровадження інтелектуальних систем керування в ріжучі плотери забезпечує новий рівень зручності та ефективності. Завдяки використанню програмного забезпечення з можливістю інтеграції з комп'ютерними дизайнами, користувачі можуть легко завантажувати та редагувати макети для різання. Сучасні плотери підтримують широкий спектр форматів файлів, що дозволяє використовувати їх у різних галузях промисловості. Дистанційне керування та моніторинг процесів забезпечують додатковий контроль та оптимізацію роботи обладнання.

Нові моделі ріжучих плотерів розробляються з урахуванням вимог енергоефективності та екологічної безпеки. Використання сучасних двигунів та систем управління дозволяє знизити споживання енергії, що сприяє зменшенню витрат на експлуатацію та зменшенню викидів шкідливих речовин. Крім того, застосування екологічно безпечних матеріалів для виготовлення плотерів відповідає сучасним стандартам охорони навколишнього середовища.

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
						6
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Перспективи розвитку ріжучих плотерів включають розширення їх функціональних можливостей. Сучасні пристрої можуть поєднувати функції різання, нанесення малюнків та написів, а також тиснення. Такі універсальні рішення дозволяють значно підвищити продуктивність і якість робіт, знижуючи при цьому витрати на додаткове обладнання. Розробка нових інструментів та насадок для плотерів дозволяє працювати з різноманітними матеріалами, включаючи папір, картон, вінілові плівки, тканини та інші [1].

Розробка нових моделей ріжучих плотерів, зокрема для різання плівки, є перспективним напрямом у сучасній індустрії. Висока точність, автоматизація, інтелектуальні системи керування, енергоефективність та екологічність, розширення функціональних можливостей, а також увага до дизайну та ергономіки створюють передумови для подальшого вдосконалення цих приладів. Впровадження інновацій у цій сфері сприятиме підвищенню ефективності виробничих процесів, якості продукції та зручності використання обладнання.

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
						7
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

# 1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ КОНСТРУКЦІЙ РІЖУЧИХ ПЛОТЕРІВ

## 1.1 Загальні відомості про ріжучий плотер

Плотер - це пристрій, призначений для виведення даних у графічній формі на папір, плівку, шкіру та інші листові матеріали у вигляді електронних векторних зображень [2].

Плотери поділяються на такі категорії залежно від способу подачі листового матеріалу:

- планшетні плотери фіксують листи форматів А3 і А2 за допомогою пишучого вузла та електростатичного способу. Вони малюють на аркуші, переміщуючись у двох координатах;

- барабанні плотери працюють з носієм, який кріпиться на обертовому барабані;

- фрикційні плотери використовують фрикційні ролики для переміщення носія. Ці плотери, при однакових розмірах креслення, мають менші габарити порівняно з барабанними плотерами.

- рулонні (роликові) плотери мають креслярську головку, яка переміщається в одному напрямку, а носій одночасно переміщається перпендикулярно до траєкторії головки. Рулонні плотери дозволяють малювати зображення на рулонах з великими форматами, такими як А1 та А0.

За способом виведення інформації плотери поділяються на:

- струменеві;
- електростатичні;
- плотери прямого виведення зображення;
- пір'яні;
- лазерні;
- олівцево-пір'яні;

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
						8
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

- ріжучі.

Струменеві плотери набули широкого поширення завдяки технології, розробленій компанією Canon, яка створює реактивну бульбашку – спрямоване розпилення чорнила на папір за допомогою сотень дрібних форсунок одноразової друкарської головки. Кожна форсунка має свій мікроскопічний нагрівальний елемент, терморезистор, який нагрівається під впливом електричного імпульсу за 7-10 мкс. Чорнило закипає, утворюючи бульбашку, яка виштовхує краплю чорнила з форсунки. Після закінчення імпульсу терморезистор швидко охолоджується, і бульбашка зникає. Друкарські головки можуть бути кольоровими і містити відповідну кількість груп форсунок [3].

Струменевий плотер показаний на рисунку 1.1.



Рисунок 1.1 – Струменевий плотер

Струменева технологія має ряд переваг, серед яких простота реалізації, висока роздільна здатність, низьке енергоспоживання і відносно висока швидкість друку, а також можливість друку на великих форматах паперу, до A0 включно. Однак, обмеженням є невисока швидкість виведення графічної інформації і вицвітання отриманого кольорового зображення з часом без спеціальних заходів щодо збереження, таких як ламінування або використання спеціального паперу.

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

БРМА24.00.00.000ПЗ

Арк.

9

Електростатичні плотери працюють на основі технології створення прихованого електричного зображення на поверхні спеціального електростатичного паперу. Робоча поверхня цього паперу покрита тонким шаром діелектрика, а основа просочена гідрофільними солями для забезпечення необхідної вологості і електропровідності. Коли папір проходить через вузол проявлення з рідким намагніченим тонером, частки тонера осідають на заряджених ділянках паперу. Повна колірна гамма виходить за чотири цикли створення прихованого зображення і проходження носія через чотири проявляючі вузли з відповідними тонерами. Електростатичний плотер зображений на рисунку 1.2.



Рисунок 1.2 – Електростатичний плотер

Основними недоліками електростатичних плотерів є необхідність підтримки стабільної температури і вологості в приміщенні, ретельне обслуговування і висока вартість.

У плотерах прямого виведення зображення створюється на спеціальному термопапері, просоченому теплочутливою речовиною, за допомогою мініатюрних нагрівачів по всій довжині плотера. Термопапір, що подається з рулону, змінює колір в місцях нагріву. Зображення виходить високоякісним з роздільною здатністю до 800 dpi, але лише монохромним.

Враховуючи високу надійність плотерів прямого виведення, продуктивність, яка може досягати 50 листів формату A0 на день, і низькі

експлуатаційні витрати, їх використовують у великих проектних організаціях для виведення перевірочних копій.

Плотери на основі термопередачі – між термонагрівачами і папером або прозорою плівкою розміщується тонка стрічка з пігментним шаром на восковій основі, товщиною 5-10 мкм.

Під час виведення інформації паперовий лист з накладеною на нього стрічкою проходить під друкарською голівкою, яка складається з тисяч дрібних нагрівальних елементів. Віск у місцях нагріву розплавляється, і пігмент залишається на папері. За один прохід наноситься один колір, а все зображення формується за чотири проходи.

Така технологія друку є досить дорогою, оскільки для кожного листа кольорового зображення витрачається в чотири рази більше фарбувальної стрічки, ніж на лист монохромного.

Лазерні (світлодіодні) плотери – використовують електрографічну технологію, яка базується на фізичних процесах внутрішнього фотоефекту в світлочутливих напівпровідникових шарах матеріалів, що містять селен, та силовій дії електростатичного поля.

Принцип роботи лазерного принтера полягає в наступному: на алюмінієвий фотобарабан, покритий світлочутливим шаром, наноситься негативний статичний заряд. Потім промінь лазера проходить по фотобарабану, і в тих місцях, де потрібно надрукувати зображення, знімає частину заряду. Після цього на фотобарабан наноситься тонер (сухе чорнило, що складається із суміші смол, полімерів, металевої стружки, вугільного пилу та інших компонентів), який також має негативний заряд, і тому прилипають до барабана в тих місцях, де лазер зняв заряд. Далі барабан прокочується по паперу (який має позитивний заряд) і залишає на ньому весь тонер, після чого папір потрапляє в піч, де під впливом високої температури тонер міцно закріплюється на папері.

Лазерний плотер оказаний на рисунку 1.3.

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
						11
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 1.2 – Лазерний плотер.

LED-плотери стають усе більш популярними, хоча їх вартість порівнянна з монохромними електростатичними плотерами. Лазерні та LED-плотери характеризуються високою швидкістю (лист формату A1 виводиться менш ніж за півхвилини), мають вбудований мережевий адаптер і використовують як витратний матеріал звичайний папір. Іноді передбачається поява кольорових лазерних плотерів, але наразі це занадто дорога технологія.

Пір'яні плотери – це електромеханічні пристрої векторного типу, які традиційно виводять графічні зображення з різних векторних програм. Вони створюють зображення за допомогою елементів, відомих як пір'я, які відрізняються видом рідкого барвника. Пишучі елементи можуть бути одноразовими або багаторазовими (з можливістю перезарядки). Перо кріпиться в утримувачі пишучого вузла, який має одну або дві ступені свободи переміщення [5]. Пір'яний плотер зображений на рисунку 1.3.



Рисунок 1.3 – Пір'яний плотер

Відмітною особливістю пір'яних плотерів є висока якість зображення та гарна передача кольорів при використанні кольорових пишучих елементів. Однак, швидкість виведення інформації у пір'яних плотерах залишається невисокою, навіть при використанні швидкої механіки та оптимізації процедури малювання. Також існує проблема підбору пари носій-чорнило.

Олівцево-пір'яні плотери є різновидом пір'яних плотерів, але відрізняються можливістю встановлення спеціалізованого вузла з цанговим механізмом для використання звичайних олівцевих грифелів. Цей механізм забезпечує постійне зусилля натиску грифеля на папір і його автоматичну подачу при сточуванні. Завдяки цьому не потрібно постійно стежити за процесом виведення інформації, як при використанні пір'яних плотерів, у яких може засмічуватися канал витікання барвника.

Переваги олівцево-пір'яних плотерів:

- барвник олівцевих грифелів не висихає, і олівець пише при будь-якій швидкості;

- олівець дозволяє малювати на будь-яких паперових носіях, включаючи не дуже високої якості; при цьому зображення виходять якісними, дають хороші відбитки при копіюванні, і в той же час їх можна коригувати гумкою;

- грифелі легко купити, що значно економить на витратних матеріалах.

Олівцево-пір'яний плотер зображений на рисунку 1.4.

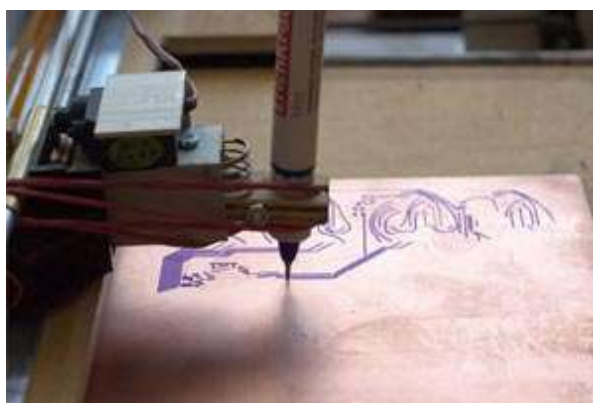


Рисунок 1.4 – Олівцевий плотер

Ріжучий плотер є різновидом пір'яних плотерів, але замість пишучого вузла має різальний. Основний інструмент – невеликий гостро заточений поворотний ніж.

Ріжучий плотер використовується для виконання таких завдань [6]:

- створення інформаційних наклейок, стікерів, кольорових колажів та аплікацій;
- оформлення та декорування вітрин;
- оформлення мобільних виставкових та інформаційних стендів (POS);
- оформлення торгових точок;
- оформлення офісних та інформаційних табличок;
- реклама на транспорті;
- оформлення рекламних вивісок;
- створення навігаційних наклейок на підлогу для торгових центрів та виставкових павільйонів;
- оформлення та декорування стін, стель та меблів.

Ріжучий плотер представлений на рисунку 1.5



Рисунок 1.5 – Ріжучий плотер

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

БРМА24.00.00.000ПЗ

Арк.

14

## 1.2 Огляд і аналіз приводів для ріжучого плотера

### 1.2.1 Огляд існуючих приводів для ЧПК пристроїв

Оскільки ріжучий плотер є пристроєм з числовим програмним керуванням (ЧПК), то в якості приводу використовуються електродвигуни, здатні точно змінювати кут повороту ротора. Найпоширенішими з таких пристроїв на даний час є крокові двигуни та сервоприводи [7].

Сервопривод – це система на базі електродвигуна, що працює від імпульсів змінної тривалості, які генерує контролер на основі інформації, заданої управляючим сигналом, і зворотного зв'язку електродвигуна.

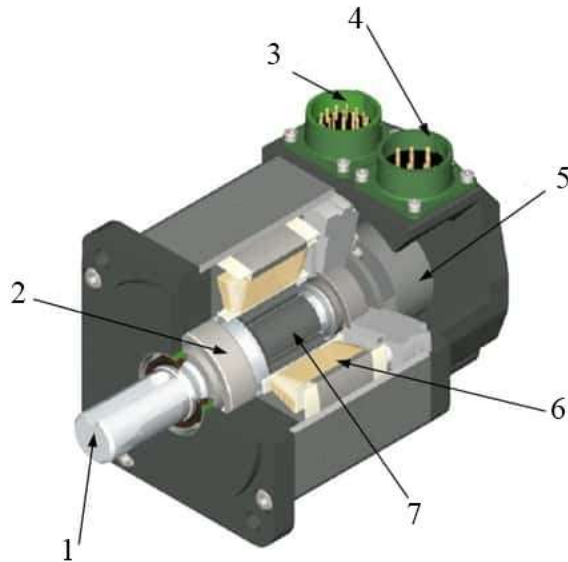
Робота типового сервоприводу складається з кількох циклічних етапів:

1. Сервопривод отримує на вхід управління певне значення зовнішнього керуючого параметра, на яке він налаштований. Найчастіше використовується параметр кута повороту вала.

2. Блок управління ("сервопідсилювач" або частотний перетворювач) порівнює це значення зі значенням на датчику зворотного зв'язку (енкодер) або з математичною моделлю (алгоритм обчислень, зашитий в пам'ять частотного перетворювача).

3. На основі результату порівняння "сервопідсилювач" або частотний перетворювач змінює параметри роботи електроприводу і створює певну коригуючу дію для сервомотора (або серію дій), наприклад: поворот валу, прискорення або уповільнення, так, щоб значення з датчика зворотного зв'язку стало якомога ближче до значення зовнішнього керуючого параметра (керуючі параметри задаються оператором сервоприводу).

Конструкція сервоприводу показана на рисунку 1.6.



1 – вал; 2 – підшипники; 3 – силовий роз’єм; 4 – роз’єм датчика зворотного зв’язку; 5 – датчик положення ротора; 6 – обмотка статора двигуна; 7 – постійні магніти.

Рисунок 1.6 – Конструкція сервопривода:

Відмінними рисами сервоприводу є такі характеристики:

- регулювання швидкості і моменту;
- діапазон регулювання швидкості більше 1:1000;
- точність закріплення позиції по валу мотора;
- висока точність підтримки певної швидкості на валу мотора, до 0,01%;
- малі габарити і маса.

Однак, незважаючи на свою точність позиціонування, сервоприводи використовуються лише як допоміжні засоби у ЧПК пристроях, оскільки вони мають такі недоліки:

- необхідність у додатковому елементі - датчику;
- проблема фіксації: зазвичай вирішується постійним пригальмовуванням вала електродвигуна, що веде до втрат енергії, або застосування черв'ячних або гвинтових передач, що ускладнює конструкцію;
- складний блок управління і логіка його роботи, потрібна обробка результатів датчика і вибір управляючого сигналу;

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

БРМА24.00.00.000ПЗ

Арк.

16

- сервоприводи, як правило, є відносно дорогими порівняно з іншими видами електродвигунів.

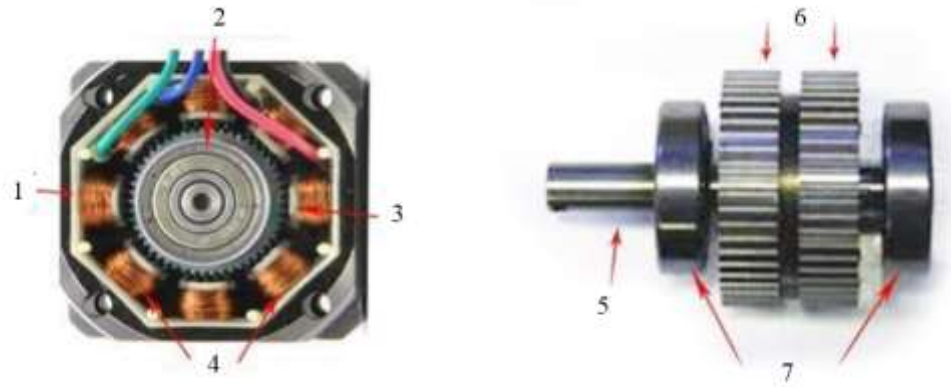
Кроковий двигун – це електромеханічний пристрій, завданням якого є перетворення електричних імпульсів у поворот вала електродвигуна на певний кут, тобто перетворення електричних імпульсів у дискретні механічні переміщення. Зовні кроковий двигун майже не відрізняється від двигунів інших типів. Однак крокові двигуни мають деякі унікальні властивості, які роблять їх виключно зручними або навіть незамінними в деяких застосуваннях [9]. Зовнішній вигляд крокового електродвигуна зображено на рисунку 1.7.



Рисунок 1.7 – Зовнішній вигляд крокового електродвигуна

Крокові двигуни належать до класу безколекторних двигунів постійного струму. Як і інші безколекторні двигуни, вони відрізняються високою надійністю та тривалим терміном служби, що дозволяє використовувати їх у найрізноманітніших пристроях масового і спеціалізованого призначення. У порівнянні зі звичайними двигунами постійного струму, для роботи крокового електродвигуна потрібно використовувати складніші схеми підключення і керування, які повинні контролювати всі виводи обмоток під час роботи двигуна.

Будова крокового двигуна показана на рисунку 1.8.



- 1 – корпус двигуна; 2,7 – підшипники; 3 – полюс обмоток статора;  
 4 – обмотки статора двигуна; 5 – магнітний вал;  
 6 – полюси ротора двигуна.

Рисунок 1.8 – Будова крокового двигуна:

Однією з головних переваг крокових двигунів є можливість здійснювати точне позиціонування і регулювання швидкості без датчика зворотного зв'язку. Це важливо, оскільки такі датчики можуть коштувати значно більше самого двигуна. Проте цей підхід підходить лише для систем, які працюють при малому прискоренні і з відносно стабільним навантаженням, що відповідає вимогам роботи плотера.

У той же час системи зі зворотним зв'язком, такі як сервоприводи, здатні працювати з великими прискореннями і навіть при змінному характері навантаження. Якщо навантаження на кроковий двигун перевищує його момент, інформація про положення ротора втрачається, і система вимагає базування за допомогою кінцевого вимикача або іншого датчика. Системи зі зворотним зв'язком не мають цього недоліку.

При проектуванні конкретних систем постає вибір між сервомотором і кроковим двигуном. Коли потрібно високоточне позиціонування та точне управління швидкістю, а необхідний момент і швидкість не виходять за допустимі межі, кроковий двигун є найбільш економічним рішенням. Для підвищення моменту може бути використаний знижувальний редуктор, як і для звичайних електродвигунів. Однак для крокових двигунів редуктор не завжди

підходить. На відміну від колекторних двигунів, у яких момент зростає зі збільшенням швидкості, кроковий двигун має найбільший момент на низьких швидкостях. Крокові двигуни мають значно меншу максимальну швидкість порівняно з колекторними двигунами, що обмежує максимальне передавальне число  $i$ , відповідно, збільшення моменту за допомогою редуктора [10].

До переваг експлуатації крокового двигуна можна віднести:

- відрізняється високою надійністю через відсутність щіток струмоприймачів, на відміну від колекторних двигунів;
- точне позиціонування – похибка становить 3-5% від встановленого кроку і не накопичується від кроку до кроку;
- забезпечує високу швидкість старту, реверсу, зупинки;
- кут повороту крокових електродвигунів відповідає числу поданих електричних сигналів, причому після зупинки обертання зберігається повний момент і фіксація;
- для позиціонування кроковому двигуну не потрібен зворотний зв'язок;
- може видавати низькі обороти для безпосередньо підведеної навантаження без додаткових редукторів.

До недоліків крокових електродвигунів можна віднести:

- кількість споживаної електроенергії не залежить від наявності або відсутності навантаження;
- існує ймовірність втрати контролю через відсутність зворотного зв'язку;
- може виникати резонансний ефект і прослизання крокового двигуна;
- складнощі управління через особливості схеми.

Враховуючи переваги і недоліки сервоприводів та крокових двигунів, було вирішено використовувати у подальшій розробці плотера саме крокові двигуни.

### 1.2.3 Типи крокових двигунів

Існують три основні типи крокових двигунів:

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
						19
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

- двигуни зі змінним магнітним опором;
- двигуни з постійними магнітами;
- гібридні двигуни.

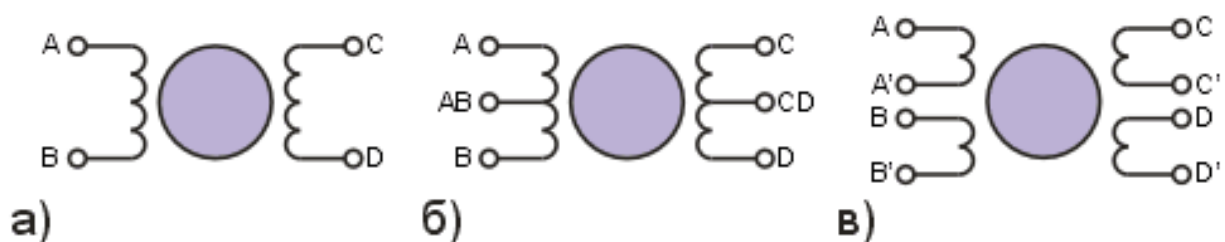
Тип двигуна можна визначити за конфігурацією обмоток. Двигуни зі змінним магнітним опором зазвичай мають три (рідше чотири) обмотки з одним загальним виводом. Двигуни з постійними магнітами найчастіше мають дві незалежні обмотки, які можуть мати виводи від середини. Іноді двигуни з постійними магнітами мають чотири роздільні обмотки.

У кроковому двигуні крутний момент створюється магнітними потоками статора і ротора, які відповідним чином орієнтовані один щодо одного. Статор виготовлений з матеріалу з високою магнітною проникністю і має кілька полюсів. Полюси є як на статорі, так і на роторі [11].

Залежно від конфігурації обмоток двигуни поділяються на:

- біполярні – мають чотири виходи і містять дві обмотки;
- одно полярні (уніполярні) – мають шість виходів і містять дві обмотки, причому кожна обмотка має відвід з середини;
- чотири обмоткові – мають чотири незалежні обмотки, конструктивно є одно полярними, але їхні обмотки розділені.

Схеми конфігурації обмоток зображені на рисунку 1.9.



- а – кроковий біполярний двигун; б – кроковий одно полюсний двигун;  
в – кроковий чотирьох обмотковий двигун.

Рисунок 1.9 – Варіанти конфігурації обмоток крокового двигуна:

Біполярний двигун має одну обмотку в кожній фазі, яка для зміни напрямку магнітного поля повинна переполюсовуватися драйвером. Для такого типу двигуна потрібен мостовий драйвер або напів мостовий драйвер з двох полярним живленням. Всього біполярний двигун має дві обмотки і, відповідно, чотири виводи.

Одно полярний двигун також має одну обмотку в кожній фазі, але вивід зроблений посередині обмотки. Це дозволяє змінювати напрямок магнітного поля, створюваного обмоткою, перемиканням половинок обмотки, що значно спрощує схему драйвера. Драйвер повинен мати лише 4 прості ключі. Таким чином, в однополярному двигуні використовується інший спосіб зміни напрямку магнітного поля, ніж у біполярному. Середні виводи обмоток можуть бути об'єднані всередині двигуна, і такий двигун може мати 5 або 6 виводів. Іноді одно полярні двигуни мають роздільні 4 обмотки, через що їх помилково називають 4-фазними двигунами. Кожна обмотка має окремі виводи, тому у них 8 виводів. При відповідному поєднанні обмоток такий двигун можна використовувати як одно полярний або як біполярний. Одно полярний двигун з двома обмотками і виводами теж можна використовувати в біполярному режимі, якщо середні виводи залишити непідключеними. У будь-якому випадку струм обмоток слід вибирати так, щоб не перевищити максимальну потужність.

Якщо порівнювати біполярні та одно полярні двигуни, то біполярні мають вищу питому потужність. При однакових розмірах біполярні двигуни забезпечують більший момент.

### 1.3 Огляд існуючих ріжучих плотерів

#### 1.3.1 Огляд ріжучого плотера «Roland Stika 8»

Ріжучий плотер «Roland Stika 8» дозволяє вирізати зображення з різних матеріалів, які відрізняються щільністю, фактурою і кольоровою гамою,

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
						21
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

створювати деталі для рекламних вивісок, наклейки, заготовки та багато інших елементів. Ріжучий плотер «Roland Stika 8» зображений на рисунку 1.10 та на аркуші [БРМА 24.00.00.000 ДО1].



Рисунок 1.10 – Ріжучий плотер «Roland Stika 8»

Ріжучий плотер «Roland Stika 8» має наступні технічні характеристики:

- максимальна область нарізки, що складає 160x1000 мм;
- розміри 340x205x115 мм;
- інтерфейс - USB;
- потужність: 20 Вт;
- швидкість різання від 12 до 40 мм/с.

### 1.3.2 Огляд ріжучого плотера «RZCAM 0906/1209»

Він застосовується для виготовлення одягу та взуття, сумок і валіз, у автомобільній промисловості та автотюнінгу, в композитній галузі, упаковці та поліграфії, електроніці та декоруванні [14]. Ріжучий плотер типу «RZCAM 0906/1209» наведений на рисунку 1.11 та на аркуші [БРМА 24.00.00.000 ДО].



Рисунок 1.11 - Ріжучий плотер «RZCAM 0906/1209»

Особливістю є наявність каретки для двох інструментів. Завдячуючи подвійній каретці можна одночасно встановлювати ніж і ручку для маркування, що дасть можливість різати і маркувати картон, папір та інші м'які матеріали товщиною до 2 мм, застосовуючи стандартні ножі, є можливість різати і продавлювати матеріал при виготовленні упаковки.

Технічні характеристики:

- розміри – 1420x1100x940мм;
- максимальна область нарізання – 900x600мм;
- потужність – 1,1 (кВт);
- інтерфейс – USB;
- швидкість різання – від 12 до 40мм/с.

### 1.3.3 Огляд ріжучого плотера «GCC Expert 52 LX»

Барабанний ріжучий плотер «GCC Expert 52 LX» призначений для комерційного використання, зокрема для виготовлення малюнків на футболках із термо трансферної плівки, або створення вінілових наклейок [15].

Ріжучий плотер «GCC Expert 52 LX» показаний на рисунку 1.12 та на аркуші [БРМА 24.00.00.000 ДО1].

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

БРМА24.00.00.000ПЗ

Арк.

23



Рисунок 1.12 – Ріжучий плотер «GCC Expert 52 LX»

Основними особливостями цього плотера є:

- наявність подвійного порту підключення через інтерфейс USB, що забезпечує швидшу передачу даних між комп'ютером і плотером;
- можливість відстежувати до трьох метрів матеріалу, що допомагає зберегти якість різання та зменшити витрати плівки;
- зручний інтерфейс керування в програмі, яка поставляється з пристроєм, та інтуїтивно зрозуміла панель керування, що містить десять клавіш і шість індикаторів.

Технічні характеристики:

- розміри – 1600x350x450мм;
- максимальна область нарізання – 3000x1470мм;
- потужність – 500 (Вт);
- максимальна швидкість різання – 400 мм/с;
- інтерфейс – два порти USB.

#### 1.3.4 Огляд планшетного ріжучого плотера «GCC i-Craft»

Плотер «GCC i-Craft» належить до сегменту компактних і доступних моделей ріжучих плотерів. Він призначений для малого бізнесу, різання

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		24

термотрансферного паперу і плівки, виробництва сувенірів, товарів для творчості, а також для використання в школах та офісах [16].

Інтуїтивно зрозумілий інтерфейс і різноманітність готових шаблонів дозволяють виконувати найрізноманітніші завдання, включаючи скрапбукінг, виготовлення листівок і наклейок.

Ріжучий плотер оснащений оптичним датчиком ААС II, який автоматично визначає мітки і забезпечує точне різання по контуру.

Максимальний тиск при різанні складає  $250 \text{ г/см}^2$ , що дозволяє обробляти різноманітні щільні матеріали, такі як картон, термотрансферний папір і магнітний вініл.

Ріжучий плотер «GCC i-Craft» зображений на рисунку 1.13 та на аркуші [БРМА 24.00.00.000 ДО1].



Рисунок 1.13 – Ріжучий плотер «GCC i-Craft»

Цей плотер має автоматичне налаштування ножа, що значно скорочує час налаштування перед вирізанням.

Технічні характеристики:

- інтерфейс – порт USB і порт для SD карт;
- максимальна область нарізання –  $1000 \times 330 \text{ мм}$ ;
- розміри –  $400 \times 300 \times 200 \text{ мм}$ ;
- потужність –  $200 \text{ Вт}$ ;
- максимальна швидкість різання –  $300 \text{ мм/с}$ .

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

БРМА24.00.00.000ПЗ

Арк.

25

#### 1.4 Висновки до першого розділу

У першому пункті першого розділу було проаналізовано основні види плотерів за способом виводу інформації, такі як струменеві, електростатичні, плотери прямого виведення зображення, лазерні, пір'яні, олівцево-пір'яні та ріжучі плотери. Описано принципи роботи кожного виду плотера, їхні галузі застосування, а також переваги та недоліки.

Також було розглянуто категорії плотерів за способом подачі листового матеріалу, до яких належать планшетні, барабанні, фрикційні та рулонні (роликові) плотери.

У другому пункті було описано основні види приводів для ЧПК пристроїв, зокрема сервоприводи і крокові електродвигуни. Було досліджено будову цих пристроїв, їхні переваги і недоліки, а також проаналізовано доцільність використання кожного з приводів у подальшій розробці ріжучого плотера. Найбільш підходящим приводом для подальшої розробки виявився кроковий електричний двигун.

Був проведений аналіз різних способів управління кроковим двигуном, таких як повно кроковий режим з включеною одною фазою, повно кроковий режим з включеними двома фазами, напів кроковий режим і мікро кроковий режим.

У третьому пункті було описано існуючі комерційні ріжучі плотери, такі як «Roland Stika 8» та «RZCAM 0906/1209».

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
						26
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

## 2 РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ РІЖУЧОГО ПЛОТЕРА

### 2.1 Розробка варіантів конструкцій та прийняття рішення принципу його побудови

Розробка варіантів конструкції ріжучого плотера буде проводитися в програмному середовищі SOLIDWORKS.

Перед початком розробки варіантів конструкції слід визначити основні вимоги до пристрою. Ріжучий плотер повинен виготовлятися відповідно до вимог ГОСТ, технічного завдання (ТЗ), технічних умов (ТУ) і комплекту конструкторської документації.

Принципи розробки пристрою повинні забезпечувати:

- а) взаємозамінність змінних однойменних складових частин;
- б) простоту ремонту.

Конструкція плотера повинна забезпечувати:

- а) доступ до всіх елементів і вузлів, що вимагають регулювання або заміни під час експлуатації.
- б) зручність експлуатації;
- в) можливість ремонту;

Структура блоків і їхнє конструктивне виконання повинні забезпечувати об'єднання складових частин в єдиний базовий конструктив.

Електрична міцність ізоляції між струмоведучими ланками, а також між струмо ведучими ланцюгами і корпусом в нормальних кліматичних умовах експлуатації повинна забезпечувати відсутність пробоїв і поверхневих перекриттів ізоляції.

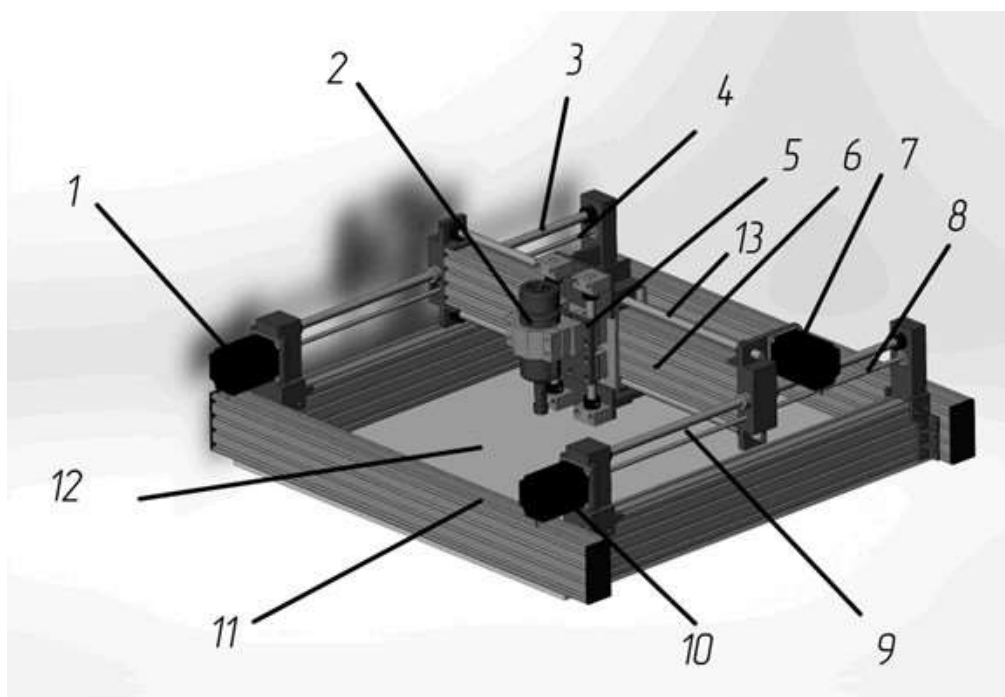
По стійкості до впливу температури і вологості навколишнього середовища ріжучий плотер повинен відповідати кліматичному виконанню категорії розміщення УХЛ 4.2 згідно з ГОСТ 15150-69.

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
						27
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Для антикорозійного захисту поверхонь деталей та складальних одиниць слід використовувати гальванічні та лакофарбові покриття.

### 2.1.1 Розробка першого варіанту конструкції приладу

3D модель побудови першого варіанту конструкції приладу наведена на рисунку 2.1.



1, 10, – крокові електричні двигуни для руху по осі X; 2 – електричний двигун із кріпленням для свердл; 3, 9 – направляючі для руху по вісі X; 4, 8 – гвинтові передачі для руху по вісі X; 5 – каретка зі змінним положенням по вісі Z; 6 – каркас на який кріпиться каретка; 7 – кроковий електричний двигун для руху по вісі Y; 11 – каркас на який кріпляться інші деталі; 12 – робоча поверхня; 13 – направляюча по вісі Y

Рисунок 2.1 – 3D модель конструкції запропонованого першого варіанту ріжучого плотера:

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

БРМА24.00.00.000ПЗ

Арк.  
28

Цей варіант належить до планшетних плотерів і приводиться в рух за допомогою чотирьох крокових електричних двигунів. Два з них через гвинтові передачі переміщують каретку по вісі X, а по одному кроковому електричному двигуну встановлено для руху по вісях Y і Z. Плавність руху забезпечується завдяки застосуванню гвинтових передач.

Завдяки електричному двигуну з можливістю кріплення свердел, цей варіант є універсальним і може застосовуватися не тільки для різання паперу і наклейок.

Перевагами запропонованого першого варіанту конструкції є:

- жорсткість конструкції;
- можливість використання як ЧПК фрезерного верстату.

До недоліків запропонованого першого варіанту конструкції можна віднести:

- низька точність при різанні тонких листових матеріалів;
- громіздкість конструкції;
- обмежена робоча область.

### 2.1.2 Розробка другого варіанту конструкції приладу

Другий варіант ЧПК плотера так як і перший варіант відноситься до планшетних плотерів. Пристрій приводиться в рух по осі X двома кроковими електродвигунами і гвинтовими передачами, і по одному кроковому двигуну і гвинтовій передачі по осі Y і Z.

У даному варіанті до каретки кріпиться флюгерний ніж, який і забезпечує поріз паперу і наклейок різних форм.

Перевагами першого варіанту конструкції являються:

- полегшена конструкція;
- використання при вирізанні листових матеріалів спеціалізованих ножів та лез;

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
						29
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

- відносно висока різки.

До недоліків першого варіанту конструкції можна віднести:

- громіздкість конструкції;
- обмежена робоча область.

3D модель побудови другого варіанту конструкції приладу зображена на рисунку 2.2.

Другий варіант ЧПК плотера, як і перший, належить до планшетних плотерів. Пристрій приводиться в рух по вісі X двома кроковими електричними двигунами з гвинтовими передачами, а по вісях Y і Z – по одному кроковому двигуну і гвинтовій передачі.

У цьому варіанті до каретки кріпиться флюгерний ніж, який забезпечує різання паперу і наклейок різних форм.

Перевагами другого варіанту конструкції є:

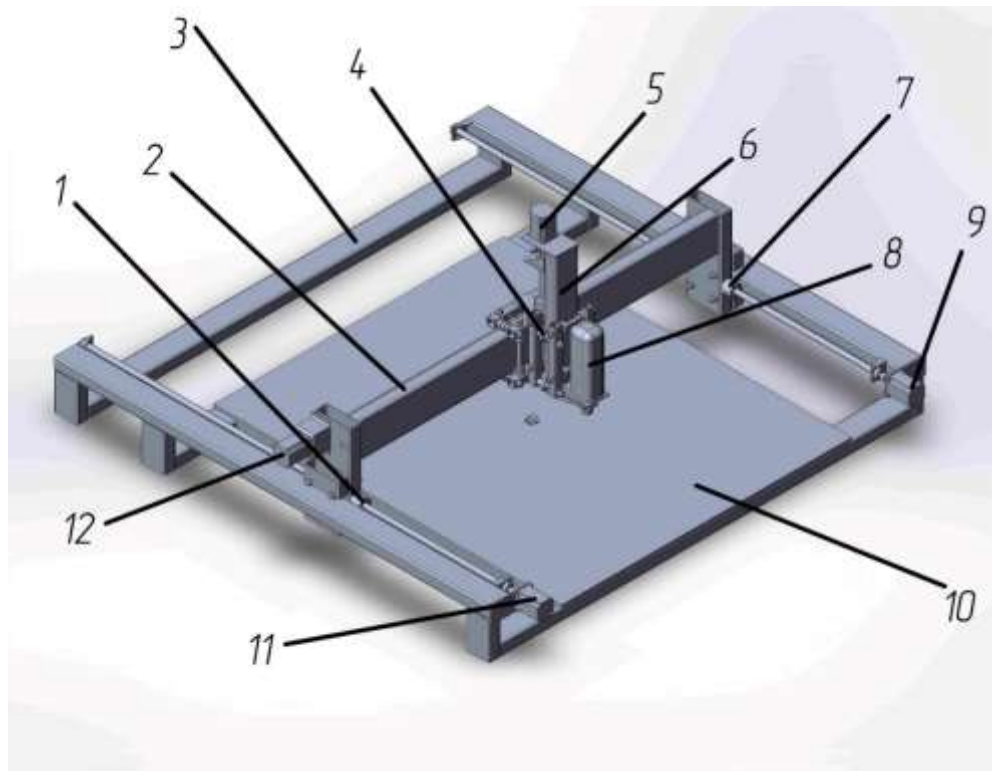
- відносно висока швидкість різання;
- полегшена конструкція;
- використання спеціалізованих ножів і лез для різання листових матеріалів.

До недоліків другого варіанту конструкції можна віднести:

- обмежена робоча область;
- громіздкість конструкції.

3D модель запропонованого другого варіанту конструкції приладу зображена на рисунку 2.2.

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
						30
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		



1, 7 – гвинтові передачі по вісях X; 2 – каркас на який кріпиться каретка; 3 – головний каркас, на який кріпиться решта деталей, 4 – каретка; 5 – кроковий електродвигун для руху по вісі Z; 6 – направляюча для флюгерного ножа; 8 – флюгерний ніж; 9,11 – крокові електричні двигуни для руху по осі X, 10 – робоча поверхня; 12 – кроковий електричний двигун для руху по вісі Y

Рисунок 2.2 – 3D модель конструкції запропонованого другого варіанту ріжучого плотера:

### 2.1.3 Розробка третього варіанту конструкції приладу

Третій варіант конструкції ріжучого плотера належить до роликкових плотерів, що дозволяє зменшити габарити пристрою при збереженні тієї ж робочої зони.

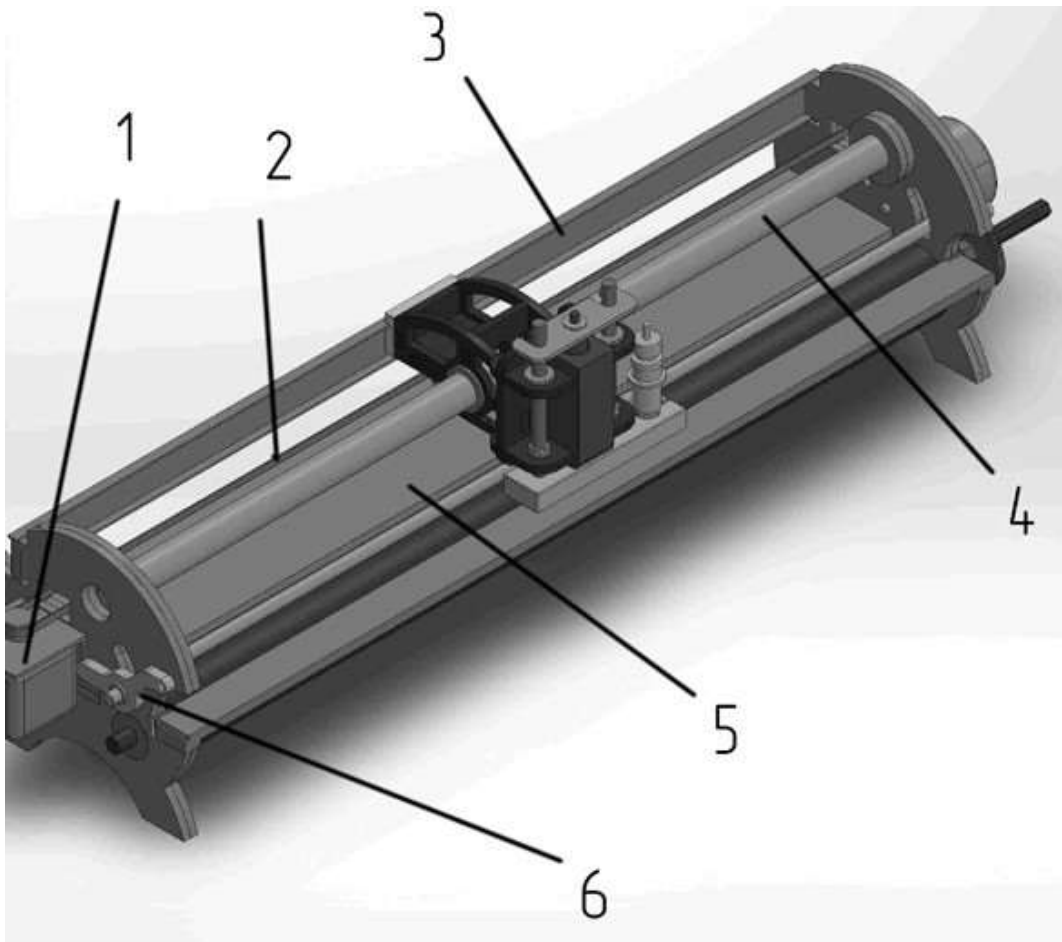
Ізометричний вид зліва 3D моделі конструкції третього варіанту ріжучого плотера показано на рисунку 2.3 та на аркуші [БРМА 24.00.00.000 ДІ].

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

БРМА24.00.00.000ПЗ

Арк.

31



1 – кроковий електричний двигун; 2 – клинопасова передача; 3 – швелер;  
4 – вал по якому рухається каретка; 5 – каркас; 6 – притискач

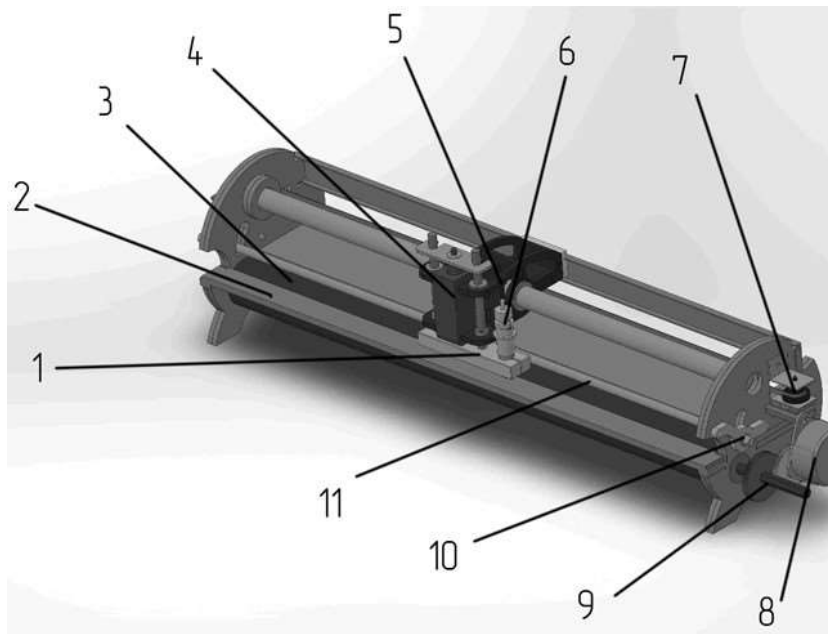
Рисунок 2.3 – 3D модель конструкції запропонованого третього варіанту  
ріжучого плотера, ізометричний вид зліва:

Ізометричний вид справа 3D моделі запропонованої конструкції третього  
варіанту ріжучого плотера показано на рисунку 2.4 та на аркуші  
[БРМА24.00.00.000ДІ].

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

БРМА24.00.00.000ПЗ

Арк.  
32



1 – рухома площадка до якої кріпиться флюгерний ніж 6; 2 – робоча поверхня; 3 – робочий вал, що приводить в рух плівку або папір по вісі X; 4 – соленоїд; 5 – каретка; 7 – шестерня, до якої кріпиться клинопасова передача; 8 – кроковий електричний двигун, який приводе в рух через прямозубі шестерні 9 вал 3; 10 – притискач яким регулюється притискання плівки або паперу за допомогою притискного вала 11 до вала 3.

Рисунок 2.4 – 3D модель запропонованої конструкції третього варіанту ріжучого плотера, ізометричний вид справа:

Вид спереду 3D моделі запропонованої конструкції третього варіанту ріжучого плотера представлено на рисунку 2.5 та на аркуші [БРМА24.00.00.000 ДІ].

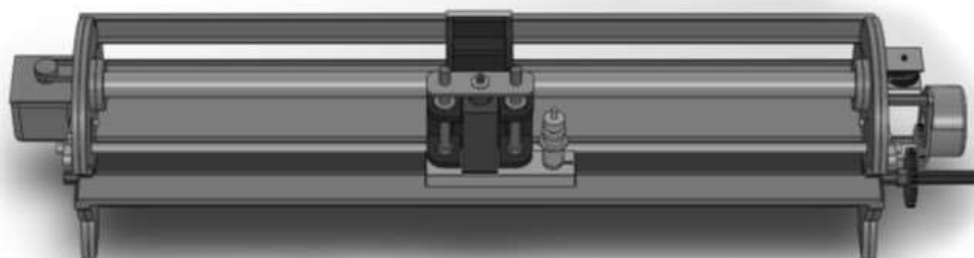


Рисунок 2.5 – 3D модель запропонованої конструкції третього варіанту ріжучого плотера, вид спереду

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

Цей варіант конструкції відрізняється відсутністю обмеження по осі X, оскільки листовий матеріал рухається між ведучим і веденим валиками. Використовуються лише два крокові двигуни, а за рух по осі Z відповідає соленоїд. В якості робочого органу використовується флюгерний ніж, що забезпечує відносну простоту конструкції та надійність.

До недоліків можна віднести можливість проковзування плівки або паперу по робочому валу, якщо притискачі не відрегульовані і недостатнє зчеплення з робочим валом.

## 2.2 Обґрунтування щодо вибору щодо вибору побудови приладу

Враховавши переваги та недоліки всіх розглянутих варіантів 3D моделей, можна зробити наступні висновки:

1. Перша модель є найфункціональнішою, проте має громіздку конструкцію і для різання паперу або плівки потребує дуже тонких свердел, які не забезпечують бажаної якості різання цих матеріалів.

2. Друга модель відрізняється полегшеною конструкцією і використанням флюгерного ножа як робочого органу, що забезпечує якісне різання тонких матеріалів. Однак, робоча поверхня обмежена, і як у попередній моделі, використовуються 4 крокові електричні двигуни, що ускладнює конструкцію.

3. Третя модель відрізняється від попередніх тим, що використовує лише два крокові електродвигуни. Для руху по осі Z застосовується соленоїд, який можна точно відрегулювати для різання на певну глибину. Крім того, ця модель практично не має обмежень руху по осі X.

Враховуючи вищесказане, було прийнято рішення проектувати і розробляти ріжучий плотер за третім варіантом, який повністю задовольняє технічне завдання.

Габаритне креслення ріжучого плотера показано на аркуші [БРМА24.00.00.000ГК].

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
						34
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

## 2.3 Розробка структурної схеми

Перед тим, як розпочати розробку електричної принципової схеми, для зручності необхідно скласти структурну схему пристрою на основі обраної моделі. Структурну схему показано на рисунку 2.6 та на аркуші [БРМА24.00.00.000 Е1].

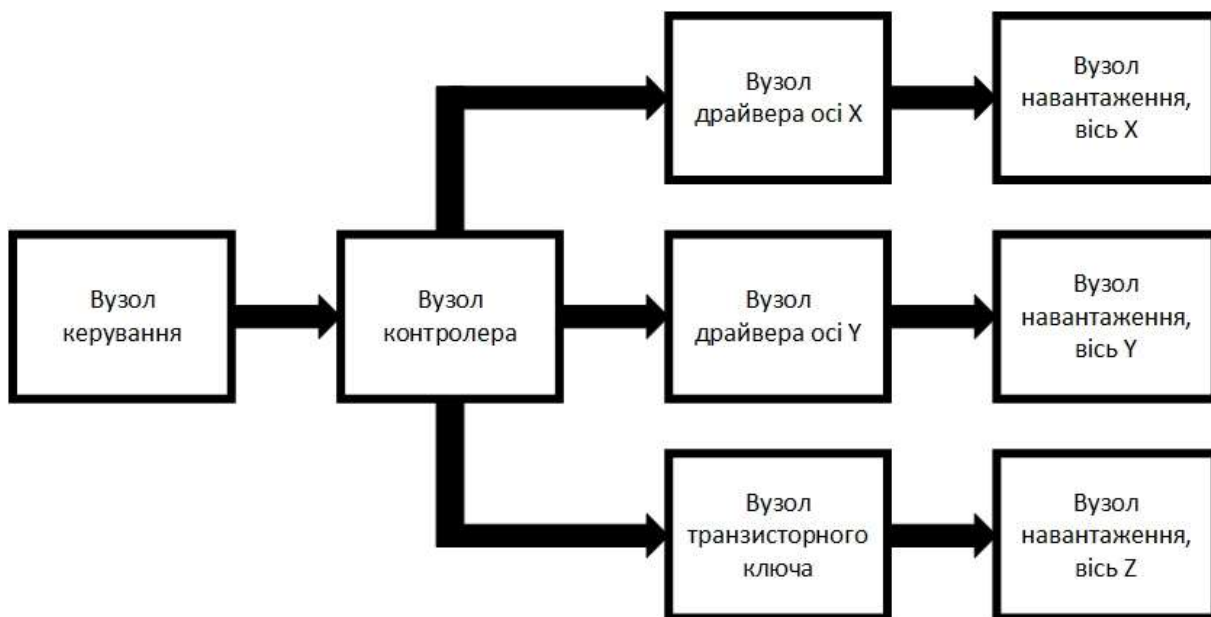


Рисунок 2.6 – Структурна схема вибраної моделі

Дана схема складається з наступних вузлів:

- вузол транзисторного ключа;
- вузол контролера;
- вузол керування;
- вузол драйвера осі X;
- вузол драйвера осі Y;
- вузол навантаження, ось X;
- вузол навантаження, ось Y;
- вузол навантаження, ось Z;

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

БРМА24.00.00.000ПЗ

Арк.

35

Для правильного функціонування схеми необхідно точно дотримуватися алгоритму побудови і зв'язків між вузлами. Тому потрібно детально розглянути кожен вузол окремо.

## 2.4 Вузол керування

Вузлом керування є персональний комп'ютер, який за допомогою спеціального програмного забезпечення обробляє графічні рисунки та символи у цифровий код (G-код). Ця інформація передається через інтерфейс USB до комутаційної плати (контролера), де і обробляється цей сигнал.

В якості програмного забезпечення буде використовуватися програмний комплекс «Mach3» від компанії «Artsoft».

Інтерфейс програми «Mach3» показаний на рисунку 2.7.

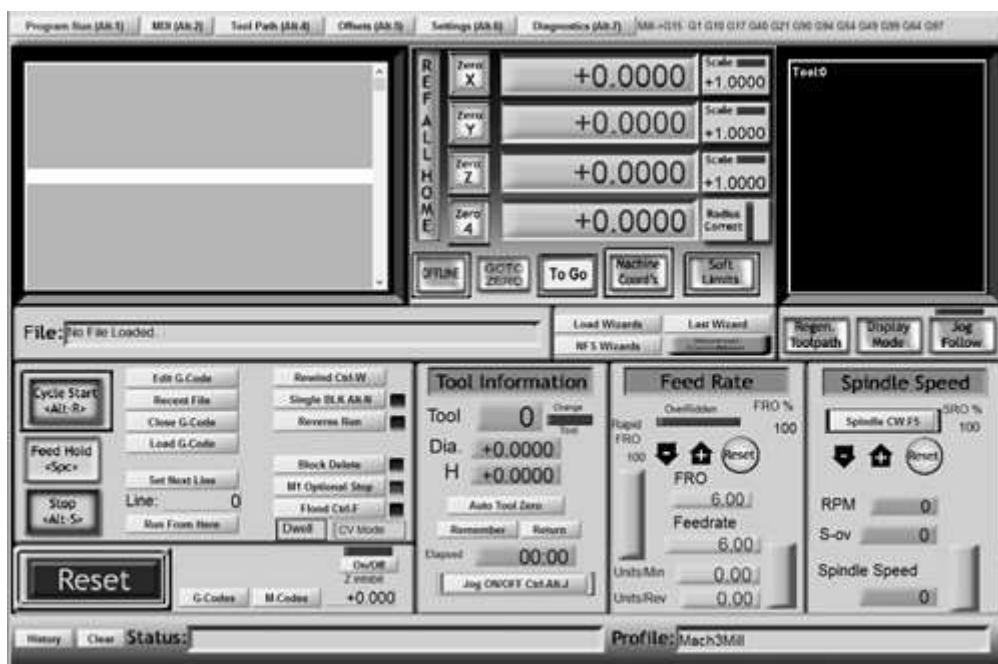


Рисунок 2.7 – Інтерфейс програмного комплексу «Mach3»

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

БРМА24.00.00.000ПЗ

Арк.

36

Вікно налаштувань програмного комплексу «Mach3» для роботи з ріжучим плотером наведено на рисунку 2.8.

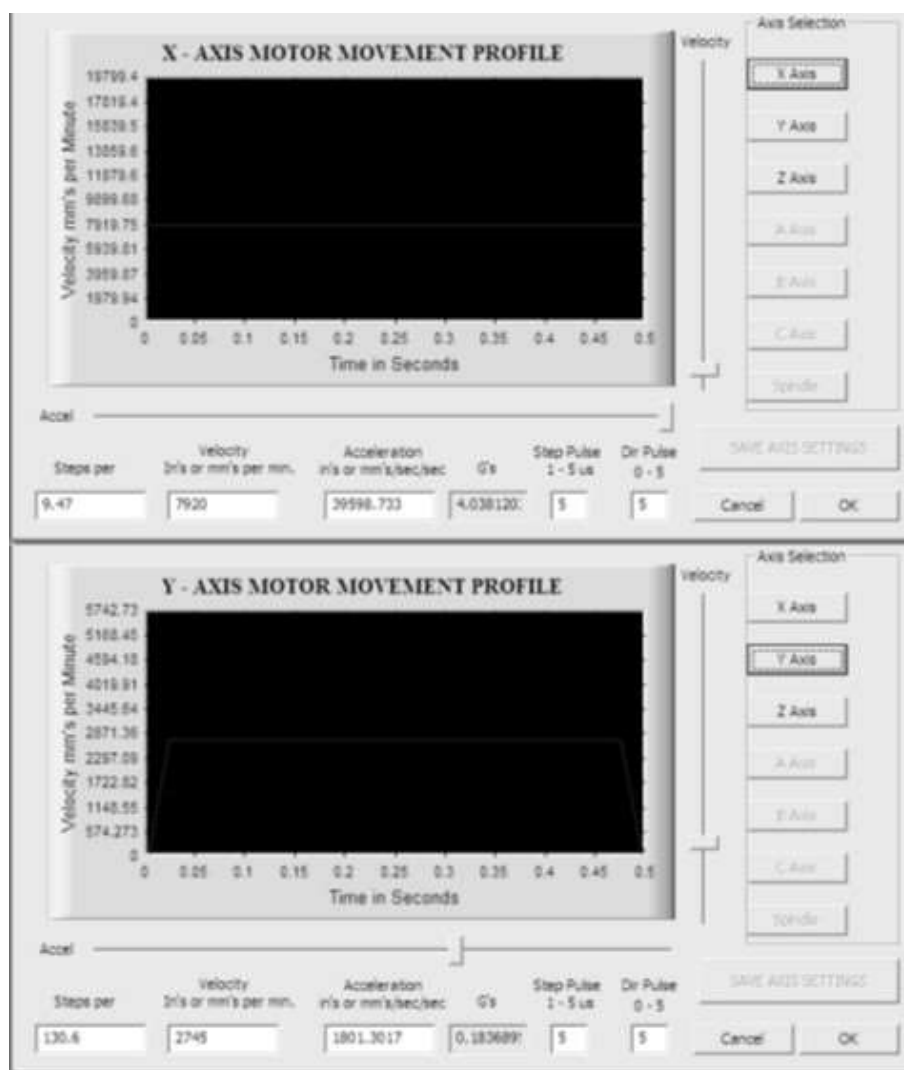


Рисунок 2.8 – Вікно налаштувань програмного комплексу «Mach3»

Функції та характеристики «Mach3»:

- перетворення стандартного ПК у повнофункціональну станцію управління 6-осьовим верстатом з ЧПУ;
- імпорт файлів формату DXF, BMP, JPG і HPGL за допомогою вбудованої програми LazyCam;
- управління частотою обертання шпинделя;
- графічна візуалізація G-кодів;

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

БРМА24.00.00.000ПЗ

Арк.

37

- відеоспостереження за ходом обробки;
- повністю налаштовуваний інтерфейс;
- створення користувацьких M-кодів і макросів на основі VB-скриптів;
- генерування G-кодів у програмі «LazyCam» або «Wizard»;
- багаторівневе релейне регулювання;
- застосування ручних генераторів імпульсів (MPG);
- сумісність з сенсорним дисплеєм;
- повноекранний інтерфейс.

## 2.5 Розробка вузла контролера

Вибір мікроконтролера є одним із найважливіших рішень, від яких залежить успіх або невдача проєкту. При виборі мікроконтролера необхідно врахувати й оцінити велику кількість факторів. Основна мета – обрати найдешевший мікроконтролер (щоб знизити загальну вартість системи), але водночас задовольнити специфікації системи, тобто вимоги щодо продуктивності, надійності, умов застосування тощо. Загальна вартість системи включає все: інженерні дослідження і розробку, виробництво, гарантійний ремонт, подальше вдосконалення, обслуговування, сумісність, простоту в користуванні тощо.

Контролер призначений для приймання та обробки G-коду від комп'ютера і передачі керуючого сигналу через драйвери до робочого органу пристрою.

Як контролер обирається комутаційна плата «BL-MACH-V1.1», яка має такі особливості [23]:

- управління п'ятьма драйверами крокових двигунів;
- висока продуктивність при низькій вартості;
- інтерфейс DB25 (LPT);
- 5 входів для управління кінцевиками, E-Stop та іншою периферією;

- сумісність з «МАСН3», «LinuxCNC» (EMC2) та іншими програмами для управління ЧПК системами;
- всі сигнали оптоізольовані для захисту ПК;
- можливість живлення від USB або від зовнішнього джерела живлення (БП рекомендується);
- широкий діапазон вхідної напруги: 12-24V;
- сумісність з усіма двофазними мікрокроковими драйверами на ринку;
- реле для увімкнення шпинделя або повітряного насоса, водяного насоса тощо;
- вихід 0-10В для аналогового управління оборотами шпинделя.

Цей контролер є лише інтерфейсною платою, без драйверів крокових двигунів. Використання можливе лише з зовнішніми мікрокроковими драйверами крокових двигунів. Зовнішній вигляд комутаційної плати «BL-MACH-V1.1» зображений на рисунку 2.9 та на аркуші [БРМА 24.00.00.000 ДО2].



Рисунок 3.9 – Зовнішній вигляд плати «BL-MACH-V1.1»

Схема комутаційної плати «BL-MACH-V1.1» показана на рисунку 2.10

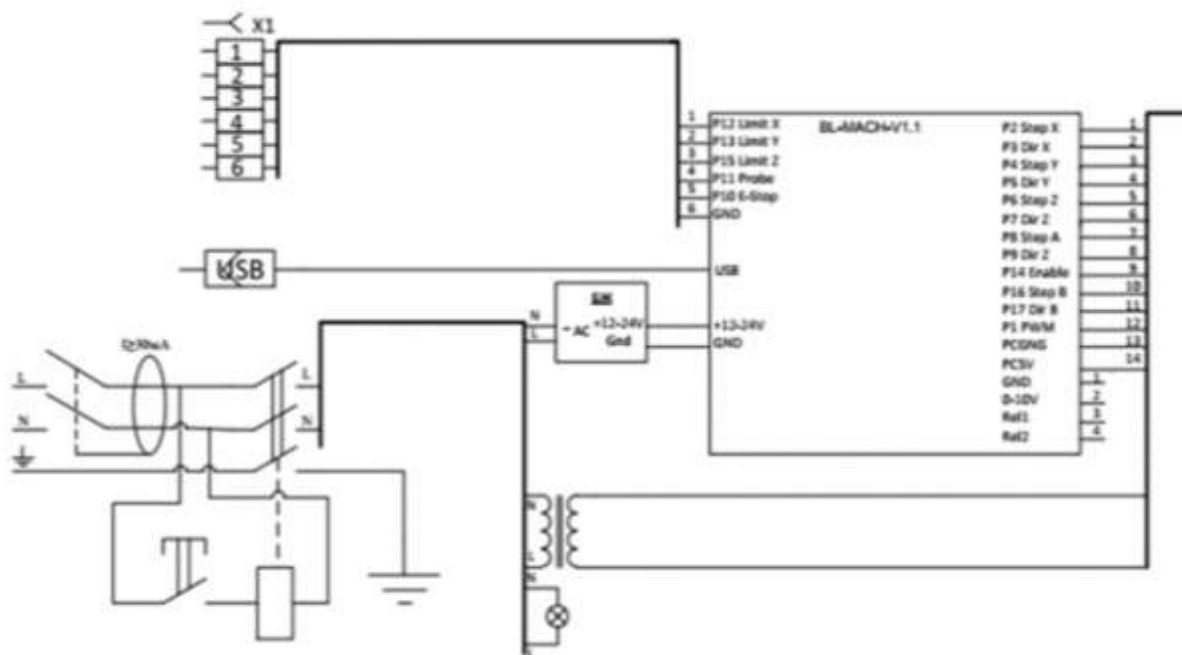


Рисунок 2.10 – Схема плати «BL-MACH-V1.1»

## 2.6 Розробка вузлів драйверів осей X і Y

Оскільки драйвери для осей X і Y ідентичні, розробку будемо проводити на прикладі драйвера для осі X.

Кроковий двигун потребує складної схеми управління, яка включає спеціальний електронний пристрій – драйвер крокового двигуна. Драйвер крокового двигуна отримує на вході логічні сигнали STEP / DIR, які зазвичай представлені високим і низьким рівнем опорної напруги 5 В. Відповідно до отриманих сигналів, драйвер змінює струм в обмотках двигуна, змушуючи вал повертатися в заданому напрямку на певний кут. Сигнали STEP / DIR генеруються ЧПК-контролером або персональним комп'ютером, на якому працює програма управління типу «Mach3» або «LinuxCNC».

Завдання драйвера – максимально ефективно змінювати струм в обмотках. Оскільки індуктивність обмоток і ротор гібридного крокового двигуна постійно впливають на цей процес, драйвери відрізняються один від одного своїми характеристиками і якістю отриманого руху. Струм, що протікає в

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

БРМА24.00.00.000ПЗ

Арк.

40

обмотках, визначає рух ротора: величина струму задає крутний момент, а його динаміка впливає на рівномірність руху тощо.

Розробку проведемо на основі драйвера управління двофазними кроковими двигунами «ТВ6560 V2», який виконаний на спеціалізованому чипі «Toshiba TV6560AHQ» з живленням від 10В до 35В постійної напруги. Він призначений для використання з двигунами типу NEMA17 - NEMA23 з максимальним струмом фази до 3А [24] і широко застосовується в ЧПК системах.

Драйвер ТВ6560 має такі виводи:

- SW+, SW-: позитивний і негативний виводи входу керування напрямком обертання;

- CLK+, CLK-: позитивний і негативний виводи входу тактового сигналу;

- +24D, GND: позитивний і негативний виводи підключення живлення;

- EN+, EN-: позитивний і негативний виводи входу дозволу роботи;

- A+, A-: виводи підключення I фазової обмотки двигуна;

- B+, B-: виводи підключення II фазової обмотки двигуна.

Зовнішній вигляд драйвера «ТВ6560 V2» наведений на рисунку 2.11 та на аркуші [БРМА 24.00.00.000 Д02].



Рисунок 2.11 – Зовнішній вигляд драйвера «ТВ6560 V2»

Електрична схема наведена на рисунку 2.12.

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

БРМА24.00.00.000ПЗ

Арк.

41

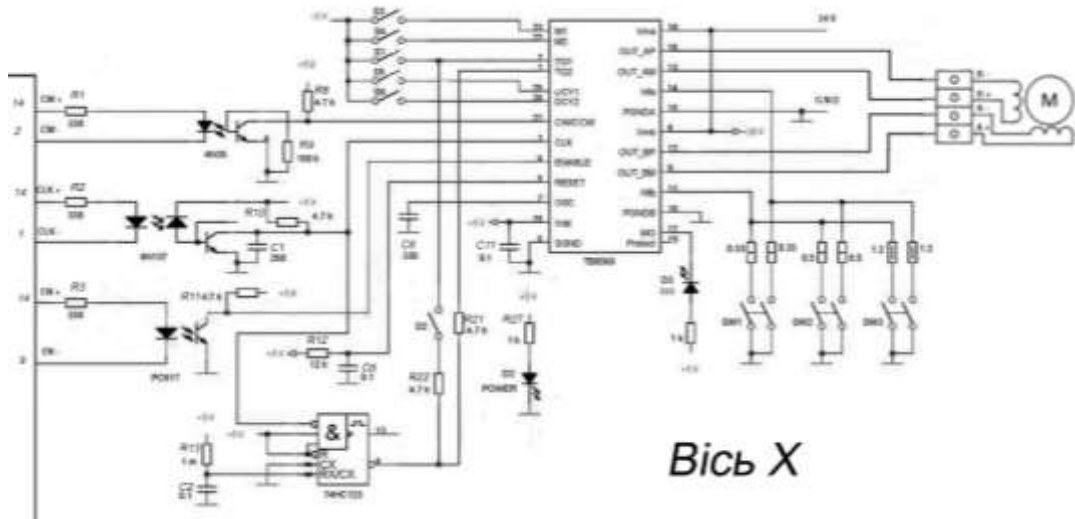


Рисунок 2.12 – Схема принципова електрична драйвера «ТВ6560 V2»

## 2.7 Розробка вузла транзисторного ключа

Вузол призначений для керування механізмом флюгерного ножа. На транзисторний ключ подається керуючий сигнал DIR від контролера, який після підсилення передається на силовий елемент – соленоїд.

Схема транзисторного ключа показана на рисунку 2.13.

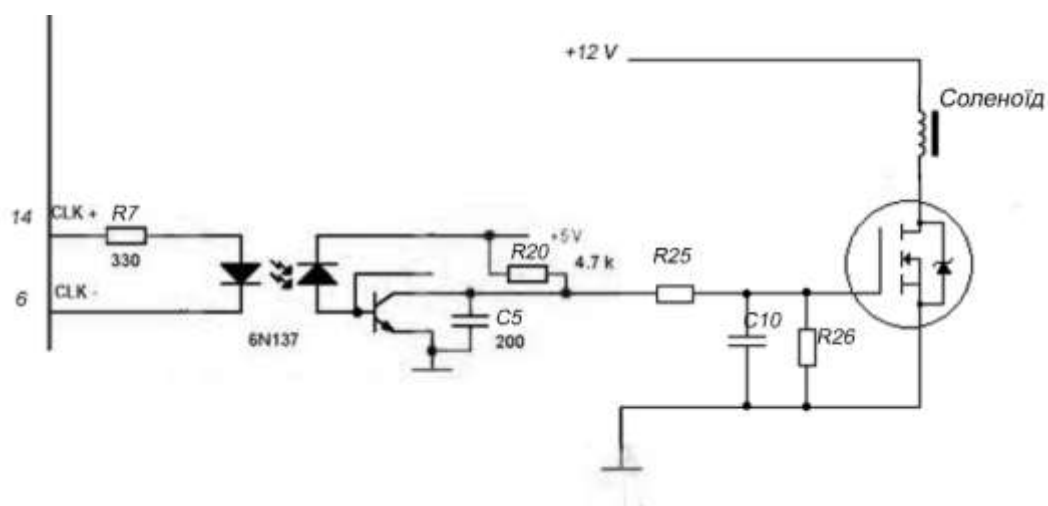


Рисунок 2.13 схема транзисторного ключа

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

БРМА24.00.00.000ПЗ

Арк.

42

## 2.8 Вузол навантаження, вісь X і вісь Y

Вузол навантаження включає пристрій, який керується розробленою схемою. У цьому випадку в якості навантаження виступає кроковий електродвигун.

Для вісей X і Y використовуються два однакових крокових електродвигуни «Nema17» типу 17HS4401.

## 2.9 Вузол навантаження, вісь Z

Вузол навантаження включає пристрій, який керується розробленою схемою. У даному випадку в якості навантаження застосовується соленоїд типу ZYE1-0530.

## 2.10 Побудова та принцип дії схеми принципової електричної ріжучого плотера

Схема принципова електрична ріжучого плотера наведена на рисунку 2.14 та на аркуші [БРМА 24.00.00.000 ЕЗ].

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
						43
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

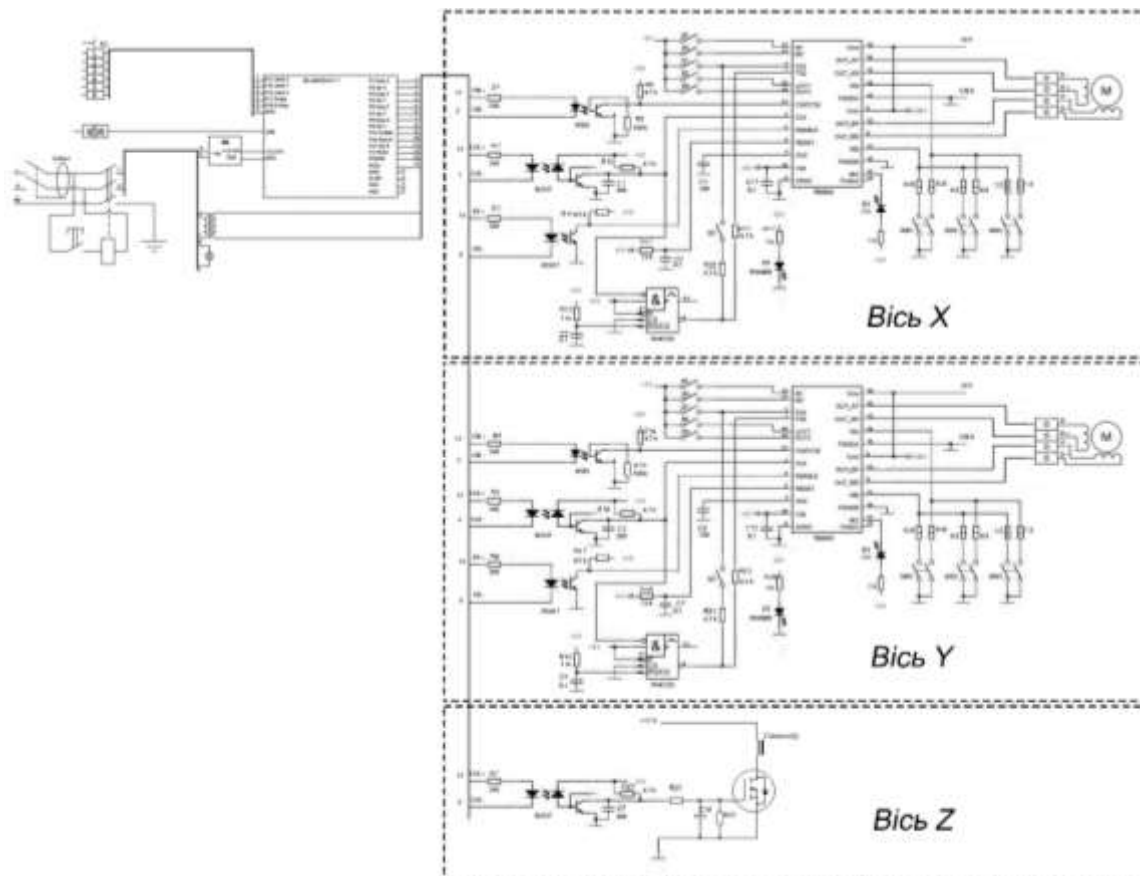


Рисунок 2.14 – Схема принципова електрична ріжучого плотера

Принцип роботи цієї схеми такий:

Спочатку на персональному комп'ютері формується G-код за допомогою програмного комплексу «Mach3». Потім цей код передається через інтерфейс USB до комутаційної плати «BL-MACH-V1.1». Контролер через різні виводи передає керуючі сигнали до драйверів. Виводи 14, 2, 1, 9 підключаються до драйвера осі X, виводи 14, 3, 4, 9 підключаються до драйвера вісі Y, виводи 14, 6 підключаються до транзисторного ключа.

Для вісі X керуючий сигнал передається через виводи контролера до виводів драйвера у такому порядку: 14 – CW+, 2 – CW-, 14 – CLK+, 1 – CLK-, 14 – EN+, 9 – EN-.

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

БРМА24.00.00.000ПЗ

Арк.

44

Потім сигнал передається через оптопари 4Т35, 6N137 і PC817 до мікроконтролера «ТВ6560», де завдяки ШІМ модуляції створюються сигнали, які управляють двома котушками крокового двигуна (В-, В+, А-, А+).

Вісь Y:

Принцип роботи аналогічний до роботи драйвера осі X, але виводи підключені таким чином: 14 – CW+, 3 – CW-, 14 – CLK+, 4 – CLK-, 14 – EN+, 9 – EN-.

Вісь Z:

Керуючий сигнал передається від контролера через виводи 14 і 6, проходить через оптопару 6N137 до транзисторного ключа, де він підсилюється до 12 В, після чого управляє роботою соленоїда.

2.11 Розробка схеми під'єднання ріжучого плотера та вимог щодо технічного обслуговування та ремонту

#### 2.11.1 Розробка схеми під'єднання ріжучого плотера

Комутаційна плата «BL-MACH-V1.1», отримавши керуючий сигнал через інтерфейс USB від комп'ютера, обробляє отриману інформацію і генерує нові сигнали управління для драйверів. У цій схемі драйвери «ТВ6560 V2» функціонують як силові ключі, які підсилюють сигнал з комутаційної плати завдяки підключенню до додаткового джерела живлення. Оскільки для роботи соленоїда також потрібна вища напруга, але немає потреби задіювати всі виводи драйвера «ТВ6560 V2», соленоїд підключається лише до оптопари драйвера і окремо до силового ключа на основі транзистора «IRF 540».

Схема під'єднання ріжучого плотера показана на рисунку 2.15 та на аркуші [БРМА 24.00.00.000 С2].

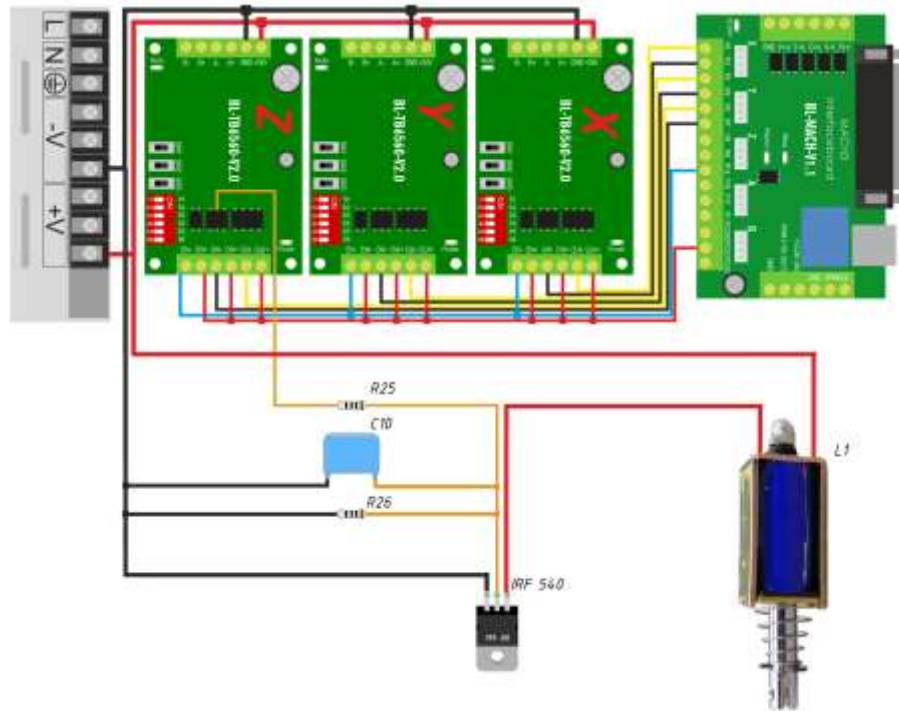


Рисунок 2.15 – Схема під'єднання ріжучого плотера

2.11.2 Умови експлуатації, вимоги до технічного обслуговування та ремонту

До технічного обслуговування та ремонту висуваються такі вимоги:

- ріжучий плотер повинен бути виконаний для кліматичного виконання УХЛ 4.2 згідно з ГОСТ 15150-69 і нормально функціонувати за наступних кліматичних умов:

- верхнє значення температури навколишнього середовища: +35°С;
- нижнє значення температури навколишнього середовища: +10°С;
- відносна вологість повітря при температурі +20°С: 60%.
- гранично допустимі умови експлуатації регулятора повинні відповідати:
  - відносна вологість повітря при температурі +25°С: 40%;
  - верхнє значення температури навколишнього середовища: +40°С;
  - нижнє значення температури навколишнього середовища: -10°С;
  - атмосферний тиск: 84...107 (630...800) кПа (мм.рт.ст).
- плотер повинен бути готовий до роботи відразу після монтажу;

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

БРМА24.00.00.000ПЗ

Арк.

46

- ремонт регулятора можна проводити безпосередньо на місці експлуатації.

Відповідно до ГОСТ 11478-88, апаратура залежно від умов експлуатації поділяється на 4 групи. Пристрій, що розробляється, відноситься до групи 1 (умови експлуатації – в лабораторних, капітальних житлових та інших подібних приміщеннях).

На апаратуру цієї групи діють наступні негативні чинники:

- різні механічні чинники при транспортуванні;
- синусоїдальні вібрації;
- підвищена вологість повітря;
- знижена і підвищена температура навколишнього середовища;
- вплив пилу.

### 2.11.3 Вимоги по експлуатації та монтажу

Існують слідуючі вимоги до експлуатації та монтажу:

- параметри ріжучого плотера повинні контролюватися стандартними вимірювальними приладами обслуговуючим персоналом середньої кваліфікації;
- вимоги до технологічності повинні відповідати ГОСТ 14.201-83;
- конструкція виробу повинна забезпечувати можливість виконання монтажних робіт з дотриманням вимог технічних умов на установку і паяння комплектуючих виробів;
- конструкція приладу повинна забезпечувати його збірку і монтаж при підготовці до експлуатації без використання спеціального устаткування, пристосувань і інструментів;
- конструкція виробу в цілому та окремих складних вузлів повинна забезпечувати збірку при виготовленні без створення і використання спеціального устаткування;

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
						47
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

-трудомісткість виготовлення пристрою не повинна перевищувати 4 години;

- при виготовленні плотера повинні застосовуватися стандартні методи і універсальні засоби вимірювань, серійне випробувальне устаткування. Допускається використання спеціально підготовленої камери або спеціального обладнання для проведення кліматичних перевірок під час технологічного прогону;

- конструкція блоку повинна відповідати вимогам ремонтпридатності згідно з Р50-84-88.

## 2.12 Висновки до другого розділу

У другому розділі, на основі аналізу першого і другого розділів, були розроблені три варіанти конструкції ріжучого плотера. Найдоцільнішим виявився третій варіант, який задовольняє всі вимоги до побудови пристрою.

Для створення принципової електричної схеми була розроблена структурна схема вибраної моделі, яка описує взаємозв'язок таких вузлів:

- вузол контролера;
- вузол керування;
- вузол драйвера осі X;
- вузол драйвера осі Y;
- вузол транзисторного ключа;
- вузол навантаження, вісь X;
- вузол навантаження, вісь Y;
- вузол навантаження, вісь Z.

Після розроблення схем для кожного з вузлів була побудована електрична принципова схема ріжучого плотера.

					<b>БРМА24.00.00.000ПЗ</b>	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		48

Також були розроблені вимоги щодо технічного обслуговування та ремонту пристрою, зокрема вимоги до експлуатації та монтажу ріжучого плотера.

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
						49
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

### 3 РОЗРАХУНКИ, ЩО ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ПРАЦЕЗДАТНІСТЬ РІЖУЧОГО ПЛОТЕРА

#### 3.1 Розрахунок руху каретки ріжучого плотера

##### 3.1.1 Фізична модель козлової (мостової) системи

Мостова частина ріжучого плотера контролює рух системи по вісі  $X$ , як наведено на рисунку 3.1. Система вміщує жорсткий лінійний слайд, який функціонує як доріжка для лінійної системи ковзання. Ріжуча каретка із флюгерним ножом кріпиться на лінійний слайд. Система приводиться в дію за допомогою серводвигуна постійного струму та пасових систем. Зубчастий пас керується сервоприводом постійного струму через зубчасту передачу і обертається за допомогою двох шківів.

На основі зазначеної системи, створюється фізична модель. Для того, щоб розробити фізичну систему були зроблені наступні припущення::

- паси безпеки нерозтягуються і є безмасовими. Це припущення робиться тому, що маса пасу (близько 4 г) відносно маси решти системи незначна. Пружність пасу повинна враховуватися в системах, що мають великі навантаження та високу швидкість [17]. На цю систему діють невеликі навантаження з низькою швидкістю;

- електричний двигун можна змодельовати за постійним моментом і струмом. Це робиться тому що, застосовується драйвер для керування двигуном;

- для представлення буде застосовано модель Коуломба і наявність в'язкого тертя в системі. Застосована фрикційна модель називається моделлю кулона і в'язкого тертя [18]. Це застосовується тому, що попередні дослідження показують, що більшість фрикційних ефектів використовують цей тип моделі;

- фрикційна система буде розглядатися як константа, визначена на електродвигуні. Це робиться тому, що параметри сили тертя дуже важко виміряти на рівні компонентів;

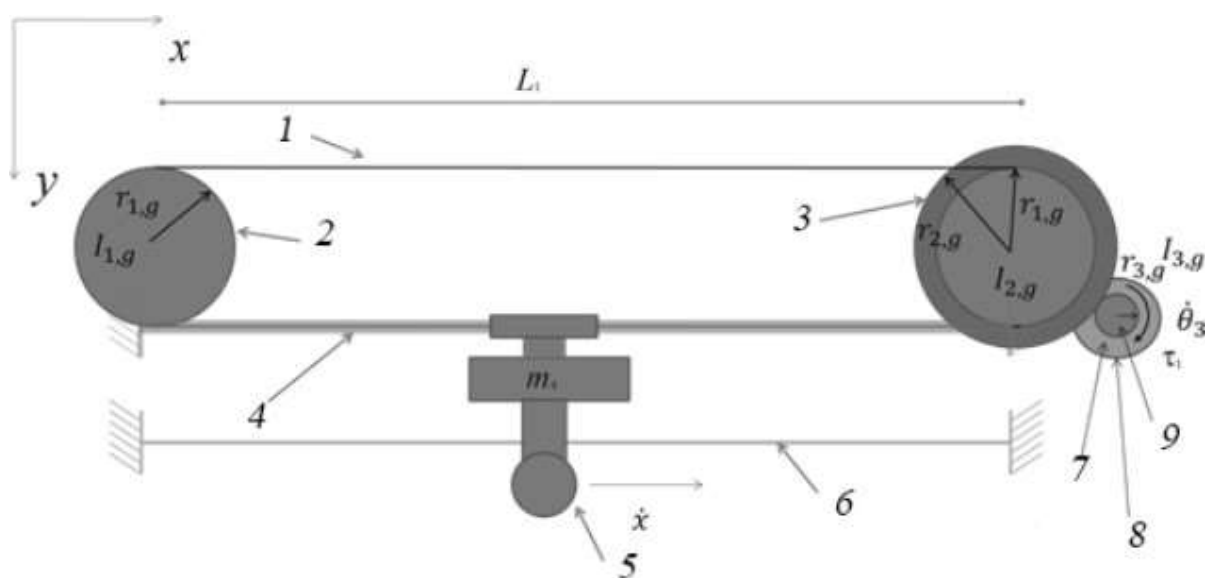
- у каретці немає зазору. Зворотнім зв'язком знехтувано, оскільки його наслідки настільки малі, як у порівнянні з іншими ефектами, що спостерігаються в системі. Типові моделі люфту - це геометричні моделі, що враховують зазор у з'єднаних шестернях. У роботі, здійсненій Шінгом [19], показано, що ефекти зворотного зв'язку дуже малі, порівняно з тертям та інерцією;

- лінійний слайд є жорстким, прямим і без шершавості. Лінійний слайд - це сталевий стержень, який дуже незначно деформується і точно підігнаний для пристрою;

- тертя флюгерного ножа, що взаємодіє із системою числового програмного керування, ігнорується;

- геометрія флюгерного ножа не впливає.

Ґрунтуючись на зазначених припущеннях, мостова система зображена як фізична модель, що наведена на рисунку 3.1.



- 1 – зубчастий пас; 2 – шків; 3 – шків із зубчастою передачею;  
4 – лінійний слайд; 5 – каретка; 6 - стабілізатор каретки; 7 – кроковий двигун; 8 – шестерня; 9 - редуктор

Рисунок 3.1 – Фізична модель козлової (мостової) системи:

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

БРМА24.00.00.000ПЗ

Арк.

51

Шківи моделюються як жорсткі та мають незмінний центр мас. Каретка моделюється як жорстке, ковзаюче тіло. Двигун моделюється як джерело крутного моменту. Лінійний слайд розглядається як абсолютно жорсткий.

### 3.1.2 Математична модель мостової системи

Математична модель виведена на основі фізичної моделі, яка наведена на рисунку 3.1. Рівняння отримано із застосуванням підходу Лагранжа, який спирається на формулювання, представлене Гінзбергом [20], і має наступний вигляд:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\delta L}{\delta \dot{q}_j} \right) - \frac{\delta L}{\delta q_j} = Q_j, j = 1, 2, \dots, N, \quad (3.1)$$

де:  $Q_j$  – узагальнене зусилля;  $q_j$  – узагальнені координати;  $\dot{q}_j$  – узагальнена швидкість.

Лагранжова система визначається із виразу:

$$L = T - V, \quad (3.2)$$

де  $T$  - система кінетичної енергії;

$V$  - система потенціальної енергії.

Для козлової системи узагальнені координата і узагальнена швидкість записуються у вигляді:

$$q_1 = \theta_3, g, \quad (3.3)$$

$$\dot{q}_1 = \theta_3', g. \quad (3.4)$$

Вони вибрані тому, що  $\theta_3$  є координатами козлового приводу. Для визначення Лагранжової системи визначається швидкості кожного з'єднання з умовою узагальненої швидкості від простої кінематики:

$$\dot{\theta}_{1,g} = \frac{r_{3,g}}{r_{2,g}} \dot{\theta}_{3,g}, \quad (3.5)$$

$$\dot{\theta}_{2,g} = \frac{r_{3,g}}{r_{2,g}} \dot{\theta}_{3,g}, \quad (3.6)$$

$$\dot{\theta}_{2,g} = \frac{r_{3,g}}{r_{2,g}} \dot{\theta}_{3,g}. \quad (3.7)$$

Для мостової системи, значення Лагранжа записується наступним чином:

$$L = \frac{I_{3,g}\theta_3^2}{2} + \frac{I_{1,g}r_{3,g}^2\theta_3^2}{2r_{2,g}^2} + \frac{I_{2,g}r_{3,g}^2\theta_3^2}{2r_{2,g}^2} + \frac{m_4r_{1,g}^2r_{3,g}^2\theta_3^2}{2r_{2,g}^2}. \quad (3.8)$$

Рівняння руху для мостової системи визначається із рівняння:

$$I_{3,g}\ddot{\theta}_{3,g} + \frac{I_{1,g}r_{3,g}^2\ddot{\theta}_{3,g}}{r_{2,g}^2} + \frac{I_{2,g}r_{3,g}^2\ddot{\theta}_{3,g}}{r_{2,g}^2} + \frac{m_4r_{1,g}^2r_{3,g}^2\ddot{\theta}_{3,g}}{r_{2,g}^2} + B_{gantry}\dot{\theta}_{3,g} + T_{friction} = \tau_1. \quad (3.9)$$

де:

$$T_{friction} \begin{cases} T_{fs} - \text{статичний кутовий фрикційний момент для} \\ \text{майбутнього руху } (\theta_{3,g}=0) \\ T_{fd} - \text{динамічний кутовий фрикційний момент для руху } (\theta_{3,g}\neq 0) \\ -T_{fs} < T_{friction} < T_{fs} \text{ для статичної рівноваги } (\theta_{3,g}=0) \end{cases}$$

Крутний момент електричного двигуна знаходиться за допомогою класичної моделі серводвигуна постійного струму:

$$\tau_1 = kt i_a, \quad (3.10)$$

де:  $kt$  – константа крутного моменту електричного двигуна;

іа – сила струму, яка використовується для роботи електродвигуна.

На основі цього рівняння сформовано рівняння еквівалентної інерції:

$$I_{equivalent} = I_{3,g} + \frac{I_{2,g}r_{3,g}^2}{r_{2,g}^2} + \frac{I_{1,g}r_{3,g}^2}{r_{2,g}^2} + \frac{m_4r_{1,g}^2r_{3,g}^2}{r_{2,g}^2}. \quad (3.11)$$

### 3.2 Розрахунок системи валиків ріжучого плотера

#### 3.2.1 Фізична модель системи валиків

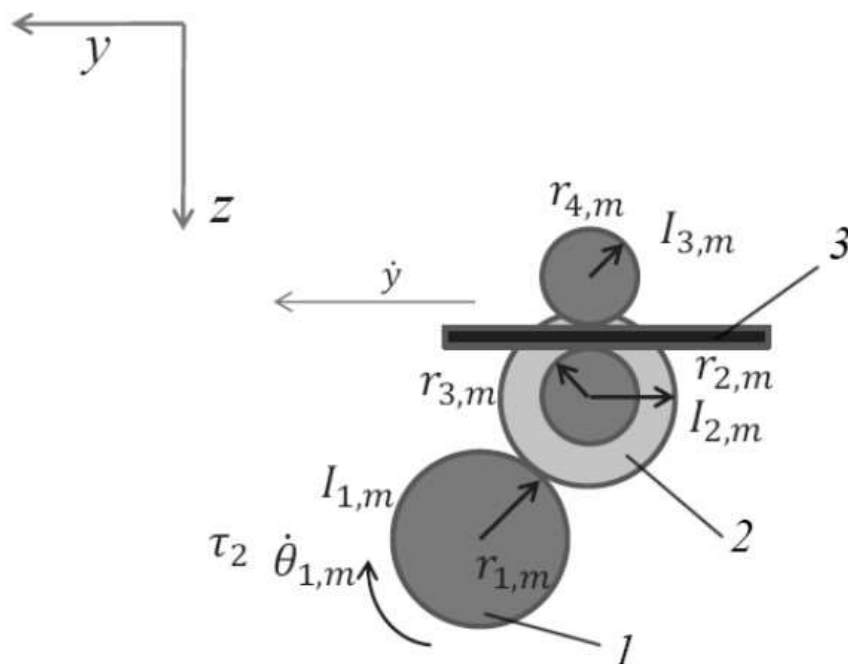
Валикова система плотера контролює рух матеріалу по осі Y. Ця система приводиться в дію за допомогою крокового мотора, який передає крутний момент через блок шестерень до нижнього (ведучого) валика. Приводний ролик кріпиться до рами плотера завдяки двом підшипникам. Верхній ролик використовується у якості направляючого валика, який затискає матеріал для різання із ведучим валиком.

На основі системи, наведеної вище, створюється фізична модель. Для того, щоб представити фізичну систему слід зробити певні припущення:

- відсутнє проковзування між ведучим і введеним валиками;
- електричний двигун має постійний крутний момент і працює номінальному режимі;
- для моделювання слід використовувати модель Кулона і в'язке (рідинне) тертя в системі;
- відсутність люфту у підшипниках і редукторі;
- відсутнє тертя валиків із зовнішнім середовищем.

Виходячи із зазначених припущень, система подачі матеріалу також може бути представлена у вигляді фізичної моделі. У цієї моделі зображений листовий матеріал, затиснутий між ведучим і введеним валиками.

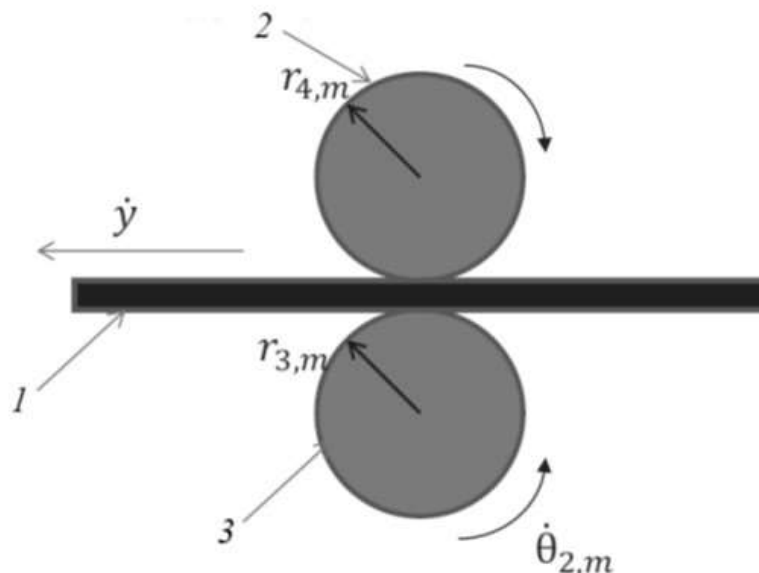
Фізична модель системи валиків наведена на рисунку 3.2 .



1 – ведуче колесо електричного двигуна; 2 – шестерня на осі валика; 3 – листовий матеріал

Рисунок 3.2 – Фізична модель валикової системи:

Механіка взаємодії листового матеріалу із роликками представлена на рисунку 3.3.



1 – листовий матеріал; 2 – ведений валик; 3 – ведучий валик

Рисунок 3.3 – Механіка взаємодії листового матеріалу із роликками:

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

БРМА24.00.00.000ПЗ

Арк.

55



$i_a$  – струм, що подається на електродвигун.

Виходячи з отриманого рівняння, може бути записане рівняння еквівалентної інерції:

$$I_{equivalent} = I_{1,m} + \frac{I_{2,m}r_{1,m}^2}{r_{3,m}^2} + \frac{I_{3,m}r_{1,m}^2r_{2,m}^2}{r_{3,m}^2r_{4,m}^2} \quad (3.19)$$

### 3.3 Розрахунок крокового електродвигуна

#### 3.3.1 Вихідні дані для розрахунку

Розрахунки проводилися на основі технічних характеристик крокового двигуна «NEMA 17HS4401». Цей електродвигун досить широко застосовується у проєктуванні ЧПК пристроїв [21], зокрема і у плотерах. Цей електричний двигун має такі технічні характеристики:

Вихідні дані для розрахунку: кут повороту за один крок: 1.8 °; висота мотора: 40 мм; діаметр вала: 5 мм; сила струму на обмотку: 1.7А; індуктивність обмотки: 2.8 мГн; опір обмотки: 1.5 Ом; інерція ротора: 54 г / см<sup>2</sup>; крутний момент спокою: 2.2 Н / см (0.22 кгс / м); крутний момент утримання: 40 Н / см (4.08 кгс.м); кількість проводів: 4; маса: 280 г.

#### 3.3.2 Аналіз основних параметрів крокового двигуна

При аналізі крокового двигуна «NEMA 17HS4401» був використаний програмний комплекс Matlab.

Щоб проаналізувати електромеханічні процеси у двофазному кроковому двигуні була використана структурна модель наведена на рисунку 3.4. Ротор цього двигуна є постійним магнітом, який має 2р магнітних полюсів [22]. Статор складається з ідентичних полюсів і обмоток, що розташовані через рівні інтервали  $\lambda$ .

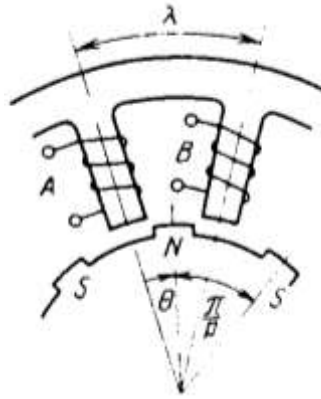


Рисунок 3.4 - Структурна модель крокового двигуна

Раптові стрибкоподібні зміни кутових положень складають основу усіх режимів роботи крокового двигуна і по суті є однією, але дуже важливою його особливістю. Виходячи з цього всі параметри, що підлягають вимірюванню, також змінюються відповідним чином. Це стає очевидним після розв'язку математичної моделі крокового двигуна, що представляє собою систему диференціальних нелінійних рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} J \frac{d^2 \theta}{dt^2} + D \frac{d\theta}{dt} + pn\Phi_m i_A \sin(p\theta) + pn\Phi_m i_B \sin(p(\theta - \lambda)) = 0, \\ V_{gA} - r \cdot i_a - L \cdot \frac{di_A}{dt} - M \frac{di_B}{dt} + \frac{d}{dt} [n\Phi_m \cos(p\theta)] = 0, \\ V_{gB} - r \cdot i_b - L \cdot \frac{di_B}{dt} - M \frac{di_A}{dt} + \frac{d}{dt} [n\Phi_m \cos(p \cdot (\theta - \lambda))] = 0, \\ M_{ем} = -nN_r \Phi_M \cdot [i_A \cdot \sin(N_r \cdot \theta) + i_B \cdot \cos(N_r \cdot \theta)], \end{array} \right. \quad (3.20)$$

де:  $V_{gA}$ ,  $V_{gB}$  – напруга живлення, відповідно фази А та В;

$M$  – взаємна індуктивність;

$L$  – власна індуктивність кожної фази;

$N_r$  – кількість зубців ротора;

$r$  – опір кола обмотки статора;

$D$  – коефіцієнт в'язкого тертя;

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

$J$  – момент інерції;

$\theta$  – кут повороту ротора КД відносно статора;

$n$  – кількість витків обмоток;

$p$  – число пар полюсів;

$\Phi_m$  – взаємодукція;

$i_A, i_B$  – струм в обмотках фаз, відповідно А та В;

$\lambda$  – крок зубців статора крокового двигуна.

Одним з методів розв'язку наведеної системи є приведення нелінійних диференціальних рівнянь до лінійних рівнянь. Таким методом фактично виводиться лінеаризована математична модель крокового двигуна. Проте у цьому випадку стає неможливим знайти похибку і попередньо оцінити адекватність наведеної моделі. Тому необхідно розв'язати систему для двохфазного крокового двигуна типу М35SP-6 чисельними методами за допомогою сучасних комп'ютерних засобів, що забезпечують похибку не більшу  $10^{-5}$  % .

Особливу увагу варто звернути на кут повороту  $\theta$ , відповідно кутову швидкість  $\omega = d\theta / dt$  та обертовий момент  $M_{em}$ .

При лінеаризації системи було зроблено припущення, що  $L$  та  $M$  не залежать від  $\theta$ , а відхилення  $\delta\theta$  від положення рівноваги  $\lambda/2$  достатньо мале. В такому випадку струм в обох фазах змінюється на  $\delta i_a, \delta i_b$ . Таким чином припускається, що:

$$\theta = \frac{\lambda}{2} + \delta\theta, \quad (3.21)$$

$$\delta i_a = I_0 + \delta i_a, \quad (3.22)$$

$$\delta i_b = I_0 + \delta i_b. \quad (3.23)$$

де  $I_0$  – встановлене значення струму в обмотках двигуна.

Тоді з врахуванням цього, лінеаризована система матиме вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 J \frac{d^2 \delta \theta}{dt^2} + D \frac{d \delta \theta}{dt} + 2N_r^2 n \Phi_m I_0 \cos \left( \frac{N_r \lambda}{2} \right) + \\
 + N_r n \Phi_m \sin \left( \frac{N_r \lambda}{2} \right) (\delta i_a - \delta i_b) = 0, \\
 V_{gA} - r \cdot \delta i_a - L \cdot \frac{d \delta i_a}{dt} - M \frac{d \delta i_b}{dt} - \\
 - N_r n \Phi_m \sin \left( \frac{N_r \lambda}{2} \right) \frac{d \delta \theta}{dt} = 0, \\
 V_{gB} - r \cdot \delta i_b - L \cdot \frac{d \delta i_b}{dt} - M \frac{d \delta i_a}{dt} + \\
 + N_r n \Phi_m \sin \left( \frac{N_r \lambda}{2} \right) \frac{d \delta \theta}{dt} = 0, \\
 M_{em} = -n N_r \Phi_m \cdot [\delta i_a \cdot \sin(N_r \cdot \delta \theta) + \\
 + \delta i_b \cdot \cos(N_r \cdot \delta \theta)].
 \end{array} \right. \quad (3.24)$$

Розв'язками спрощеної системи лінійних диференціальних рівнянь є наступні аналітичні залежності:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \theta(s) = \frac{\left\{ s^2 + \left( \frac{r}{L_p} + \frac{D}{J} \right) \cdot s + \left( \frac{r D}{L_p J} + k_p \omega_{np}^2 \right) \right\} \cdot \theta_i}{s^3 + \left( \frac{r}{L_p} + \frac{D}{J} \right) \cdot s^2 + \left( \frac{r D}{L_p J} + \omega_{np}^2 (1 + k_p) \right) \cdot s + \left( \frac{r}{L_p} \right) \omega_{np}^2} \\
 I_A = -I_B = \frac{p \Phi_m n \sin \left( \frac{p \lambda}{2} \right) (s \theta - \theta_i)}{(r + L_p s)}; \\
 M_{em} = \frac{N_r n \Phi_m}{\sqrt{r^2 + \omega_{nd}^2 L^2}} \cdot V \sin \left\{ \rho + \arctg \left( \frac{r}{\omega_{nd} \cdot L} \right) \right\} - \frac{n^2 N_r \Phi_m^2 \omega_{nd} r}{r^2 + \omega_{nd}^2 L^2}.
 \end{array} \right. \quad (3.25)$$

де:  $\rho$  – кут моменту;

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата
-----	------	---------	--------	------

БРМА24.00.00.000ПЗ

Арк.

60

$v = \arctg\left(\frac{r}{\omega_{np} \cdot L}\right)$  – корегувальний коефіцієнт;

$L_p = L - M$  – коефіцієнт, який залежить від типу крокового двигуна;

$k_p = \frac{n\Phi_m \sin^2\left(\frac{p\lambda}{2}\right)}{L_p I_0 \cos\left(\frac{p\lambda}{2}\right)}$  – коефіцієнт, який також залежить від типу крокового

двигуна;

$\omega_{np}^2 = \frac{2p^2 \Phi_m n I_0 \cos\left(\frac{p\lambda}{2}\right)}{J}$  – коефіцієнт, залежний від типу крокового двигуна.

Для визначення відносної похибки лінеаризованої моделі крокового двигуна відносно нелінійної застосуємо наступну розрахункову формулу:

$$\delta_{\text{лін.моделі}}(t) = \frac{|\theta^{нл}(t) - \theta^l(t)|}{\theta^{нл}(t)} \cdot 100 \%, \quad (3.26)$$

де:  $\theta^{нл}(t)$  – кут повороту нелінійної моделі КД;

$\theta^l(t)$  – кут повороту лінеаризованої моделі.

Максимальне значення похибки лінеаризованої моделі для першого кутового положення рівне 12,5%, в подальшому зменшується по експоненціальному закону законом. Звідси можна судити про правдоподібність спрощеної моделі, та можливість її використання замість нелінійної моделі. Для опису фізичних процесів у чотирифазному кроковому двигуні було використано структурну модель.

### 3.3.3 Інтерпретація роботи електроприводу крокового електродвигуна за допомогою програмного середовища Matlab

Фази крокового двигуна подаються на два Н-моста MOSFET широтно-імпульсних перетворювачів, підключених до джерела напруги 28 В постійного струму.

Блок-схема гібридного двохфазного крокового двигуна наведена на рисунку 3.5.

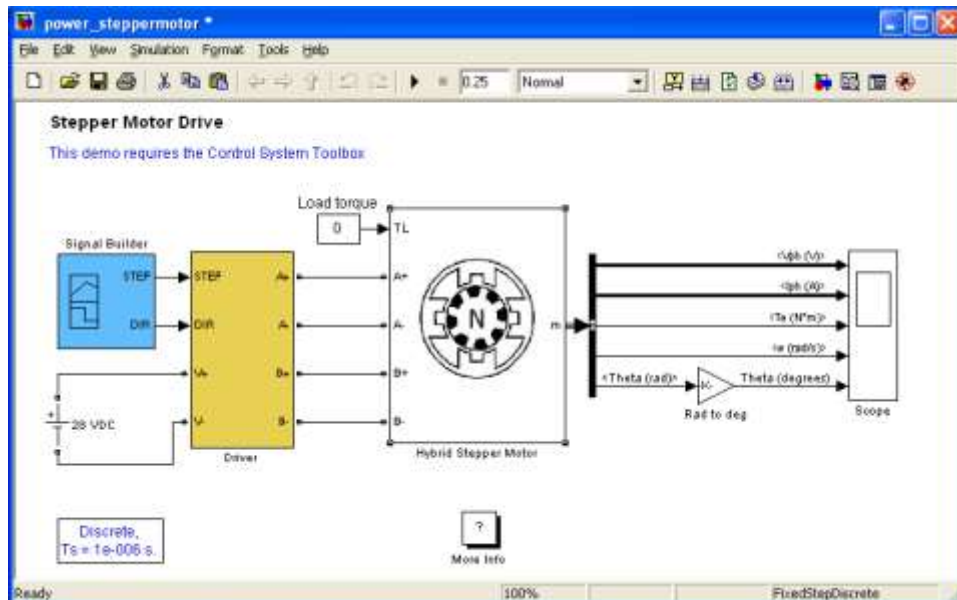


Рисунок 3.5 – Блок-схема гібридного двофазного крокового електродвигуна

### 3.4 Висновки до третього розділу

У першому пункті другого розділу було проведено розрахунок руху каретки ріжучого плотера. Побудована фізична модель мостової системи, на основі якої були зроблені подальші розрахунки козлової системи.

Для спрощення розрахунків, при побудові фізичної моделі, були здійснені припущення:

- паси безпеки нерозтягуються і безмасові;
- електричний двигун можна моделювати за постійними моментом і струм;
- для моделювання використано модель Коулomba і в'язкого тертя в системі;
- фрикційна система розглядалася як константа, яка була виміряна на двигуні;
- у каретці немає зазору;
- геометрія флюгерного ножа нехтується.

Завдяки проведеному аналітичному аналізу виведено рівняння руху для мостової системи та рівняння еквівалентної інерції.

У другому пункті розраховано систему валиків ріжучого плотера. Для побудови фізичної моделі здійснені такі припущення:

- проковзування між ведучим і введеним валиками відсутнє;
- двигун має постійний крутний момент і працює у номінальному режимі;
- для представлення використана модель Кулона і наявність в'язкого (рідинного) тертя в системі;
- люфт у підшипниках і редукторі відсутній;
- тертя валиків із зовнішнім середовищем відсутнє.

Завдячуючи фізичній моделі валикової системи аналітично досліджена механіка взаємодії листового матеріалу і валиків, а також виведено рівняння руху валикової системи і рівняння еквівалентної інерції.

У третьому пункті аналітично досліджена математична модель крокового двигуна, яку пролінеаризовано для виведення спрощеної системи лінійних диференціальних рівнянь.

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		63

## ВИСНОВОКИ

У першому розділі бакалаврської роботи проаналізовано існуючі конструкції ріжучих плотерів. Зокрема, було описано загальні відомості про плотери, наведено їх класифікацію за способом подачі листового матеріалу та за методом виведення інформації.

Також здійснено огляд та аналіз існуючих приводів для пристроїв, з числовим програмним керуванням таких як сервоприводи та крокові електродвигуни. Було розглянуто всі чотири схеми керування кроковим електричним двигуном.

Для полегшення подальшої розробки ріжучого пристрою проаналізовано існуючі ріжучі плотери, такі як: «Roland Stika 8», «RZCAM 0906/1209», «GCC Expert 52 LX», «GCC i-Craft».

У другому розділі було розроблено ріжучий плотер. Зокрема, було розроблено три варіанти конструкції ріжучого плотера, проте лише третій варіант задовольняв усі поставлені вимоги до пристрою.

Визначившись із конструкцією плотера, було складено структурну схему вузлів. На основі цієї схеми було розроблено електричну принципову схему ріжучого плотера.

У третьому розділі проведено розрахунки вузлів ріжучого плотера, таких як вузол мостової системи, вузол системи валиків та крокового електродвигуна.

При розрахунку мостової системи було розроблено фізичну модель вузла, на основі якої проводились подальші розрахунки, що дозволило скласти математичну модель руху каретки ріжучого плотера.

При розрахунку системи валиків було розроблено фізичну модель вузла, у якій було зображено сили, що діють на валики та на листовий матеріал. На основі цієї моделі проводились подальші розрахунки, що дозволило скласти математичну модель руху листового матеріалу між ведучим і веденим валиками.

При розрахунку крокового двигуна було складено математичну модель електропривода, з якої шляхом лінеаризації було виведено спрощену систему диференціальних рівнянь.

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
						65
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Числове програмне управління - основні характеристики [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://sitelab-15.dss-bi.com.ua/index.php/statti/4-chyslove-prohramne-upravlinnia-osnovni-kharakterystyky>.
2. Плотири [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://rozetka.com.ua/ua/printers-mfu/c80007/20933=plotteri/>
3. Технічні засоби автоматизації (Частина 2) / М.В. Лукінюк, В.П. Лисенко, В.Є. Лукін, А.М. Гладкий, С.А. Шворов, А.А. Руденський, А.А. Заверткін. - Ніжин: Видавець ПП Лисенко М.М., 2018. - 455 с.
4. Офісна техніка та обладнання [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.officetime.com.ua/ua/ofisnaja-tehnika-i-oborudovanie/>.
5. Технічні засоби [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://lib.iitta.gov.ua/667/2/Monograph-Vykov-Lapinski-rozd2-3.pdf>.
6. Графопобудовник. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%93%D1%80%D0%B0%D1%84%D0%BE%D0%BF%D0%BE%D0%B1%D1%83%D0%B4%D0%BE%D0%B2%D0%BD%D0%B8%D0%BA>
7. О. М. Воробйова, В. Д. Іванченко. Основи схемотехніки: підручник. – [2-е вид.]. – Одеса: Фенікс, 2009. – 388 с.
8. Босінзон М.А. Сучасні системи ЧПУ та їх експлуатація. Навчальний посібник – К.: Академія, 2018. – 340с.
9. Крокові двигуни [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://www.svaltera.ua/solutions/typical/automation\\_of\\_processes/6702.php](https://www.svaltera.ua/solutions/typical/automation_of_processes/6702.php)
10. Крокові двигуни [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://em.fea.kpi.ua/images/doc\\_stud/distsiplini/brem/BREM\\_Lekciya\\_10.pdf](https://em.fea.kpi.ua/images/doc_stud/distsiplini/brem/BREM_Lekciya_10.pdf).
11. Карпенко Б.К., Ларченко В.И., Прокофьев Ю.А. Крокові електродвигуни. – К.: Техніка, 1972. – 312с.

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
						66
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

12. Крокові двигуни [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://surl.li/uddkt>
13. Ріжучі плотери рулонного типу [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ploter.com.ua/category/rulonnye-rezhushchie-plottery>.
14. Плотери настольні [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ploter.com.ua/category/nastolnye-plottery>.
15. Ріжучі плотери планшетного типу [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ploter.com.ua/category/planshetnye-rezhushchie-plottery>.
16. Плотери для створення лекала [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ploter.com.ua/category/shirokoformatnie-chertejno-rejushie-plottery>.
17. A. Hase, K. Jezernek, B. Curk, and M. Terbus. Robust motion control of xy. table for laser cutting machine. IEEE, pages 1097–1102, 1998.
18. B. Armstrong-Helouvry, P. Dupont, and C. Canudas De Wit. A survey of models, analysis tools and compensation methods for the control of machines with friction. Automatica, 30(7):1083–1138, 1994.
19. T-K. Shing. Dynamics and Control of Geared Servomechanisms with Backlash and Friction Consideration. PhD thesis, University of Maryland, 1994.
20. J. Ginsberg. Engineering Dynamics. Cambridge University Press, New York, NY, 2008.
21. Лавріненко Ю.М., Марченко О.С., Савченко П.І. Електропривод. – К.: Вид-во Ліра-к, 2009. – 510с.
22. Моделювання електромеханічних систем. Математичне моделювання систем асинхронного електроприводу: навчальний посібник / О. І. Толочко. – К.: НТУУ «КПІ», 2016. – 150 с.
23. Плата контролера [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.olx.ua/uk/elektronika/aksessuary-i-komplektuyuschie/q-%D0%BF%D0%BB%D0%B0%D1%82%D0%B0->

%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BB%D0%BB%D0%B5%D1%80/.

24. Драйвер крокового двигуна ТВ6560 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://arduino kit.com.ua/ua/p1388667233-drajver-shagovogo-dvigatelya.html>

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		68

ДОДАТКИ

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
						69
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		