

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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

Розробка пристрою з електромагнітним приводом для перфорування деталей

Назва теми

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

Шифр, назва

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Шифр, назва

Освітня програма «Електропобутова техніка»

Шифр МРМА 23.00.00.000 ПЗ

Виконав студент 2 курсу
група ЕТм-22-1


Підпис

Король В.А.
Ініціали, прізвище

Керівник


Підпис, дата

проф. Білий Л.А.
Ініціали, прізвище

Нормоконтролер


Підпис, дата

доц. Тимошук О.Т.
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:

Зав. кафедри МАЕЕС


Підпис, дата

проф. Поліщук О.С.
Ініціали, прізвище

24 12 2023 р.

Хмельницький 2023

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту і архітектури
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем
Освітній рівень магістр
Галузь знань 14 «Електрична інженерія»
Шифр і назва
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
Шифр і назва
Спеціалізація _____
Освітня програма «Електропобутова техніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри МАЕЕС
д.т.н., проф. Поліщук О.С.
_____ 2023р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Король Валентин Андрійович
Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи Розробка пристрою з електромагнітним приводом для перфорування деталей

керівник роботи д.т.н., проф. Білий Леонід Адамович
Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом ректора університету від 15 08 2023 р. № 30

2. Строк подання студентом роботи на кафедру _____
3. Вихідні дані до роботи Технічні характеристики гаражних воріт аналогів.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
Вступ. 1. Огляд та аналіз існуючих технологічних та технічних рішень з тематики магістерської роботи. 2. Розробка пристрою з електромагнітним приводом для перфорування деталей. 3. Розробка мікроконтролерної системи керування електроприводом пристрою для виконання операції перфорування. 4. Висновки. Перелік джерел посилання.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень) Аркуш 1. Кроковий двигун. Документ оглядовий (A1). Аркуш 2. Пристрій для перфорування. Схема структурна (A2). Аркуш 3. Плата керування. Документ ілюстраційний (A1). Аркуш 4. Драйвер крокового двигуна. Схема електрична (A2)+Схема підключення. Документ ілюстраційний (A2). Аркуш 5. Пристрій живлення та керування. Схема електрична (A1). Аркуш 6. Лінійний електромагнітний двигун. Вид загальний (A1). Аркуш 7. Пристрій для перфорування. Документ ілюстраційний (A1). Аркуш 8. Програма керування. Документ ілюстраційний (A1).

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

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

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1. Огляд та аналіз існуючих технологічних та технічних рішень з тематики магістерської роботи	до 30.10.22р.	
2. Розробка пристрою з електромагнітним приводом для перфорування деталей	до 09.11.22р.	
3. Розробка мікроконтролерної системи керування електроприводом пристрою для виконання операції перфорування	до 18.11.22р.	
4. Оформлення пояснювальної записки і графічного матеріалу	до 12.12.22р.	

Студент


Підпис

В.А. Король
Ініціали, прізвище

Керівник роботи


Підпис

Л.А. Білий
Ініціали, прізвище

АНОТАЦІЯ

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

1. Прізвище, ім'я та по батькові _____

Король Валентин Андрійович

2. Тема магістерської роботи Розробка пристрою з електромагнітним приводом для перфорування деталей

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

4. Об'єм магістерської роботи: креслень 8 арк., сторінок записки 76

5. При виконанні технологічних операцій, таких як вирубання та перфорування деталей, неправильний вибір параметрів різального інструмента та матеріалу вирубної плити може привести до зниження ефективності роботи інструментів, збільшення споживання енергії та навантаження на обладнання. Також це може негативно вплинути на якість виконання роботи, прискорити знос інструментів та збільшити витрати на матеріали та енергію, пов'язані з обслуговуванням і виготовленням нових компонентів, а також знизити продуктивність праці. Низька якість перфорування може погіршити зовнішній вигляд продукції і вимагати додаткових технологічних процесів. Оптимізація енергоспоживання при виконанні технологічних операцій, таких як перфорування деталей, за допомогою нових типів приводів та вибору оптимальних технологічних режимів, є актуальною задачею, що має інтерес для багатьох промислових галузей. Для удосконалення існуючих систем перфорації деталей для збільшення ефективності їх роботи, включаючи продуктивність та якість виробів, в магістерській роботі досягнуто за допомогою впровадження енергоефективних електромагнітних приводів, системи керування ними та робочими інструментами. В розрахунково-пояснювальній записці наведено всі необхідні розрахунки, а також розділи, що відповідають встановленим вимогам. В першому розділі проведено огляд та аналіз існуючих технічних та технологічних рішень з тематики магістерської роботи, а саме крокових двигунів та систем керування ними. В другому здійснюється розробка пристрою для виконання операції перфорування. В третьому розділі здійснюється розробка мікроконтролерної системи керування електроприводом пристрою.

Підпис студента _____

"26" 12 2023 р.

РІШЕННЯ ЕК:

Протокол 153 від "29" 12 20__ р.

Оцінка проекту ЕК _____

Рекомендації ЕК _____

Особливі відмітки _____






Технічний секретар _____

"29" 12 2023 р.

ЗМІСТ

	стор.
Вступ.....	6
1 Огляд та аналіз існуючих технологічних та технічних рішень з тематики магістерської роботи.....	8
1.1 Загальні відомості про операцію перфорування.....	8
1.2 Структура автоматизованого електропривода.....	9
1.3 Класифікація електроприводів.....	10
1.4 Загальні відомості про крокові двигуни.....	18
1.5 Основні види схем керування кроковими двигунами.....	29
1.6 Огляд програмного забезпечення для управління устаткування з числовим програмним забезпеченням.....	34
1.7 Висновки до першого розділу.....	39
2 Розробка пристрою з електромагнітним приводом для перфорування деталей.....	40
2.1 Структурна схема установки.....	41
2.2 Двохкоординатна система переміщення деталей.....	43
2.3 Розробка конструкції ЛЕМД.....	44
2.4 Розрахунок пружини лінійного електромагнітного двигуна.....	45
2.5 Загальний вигляд розробленої конструкції ЛЕМД.....	52
2.6 Виготовлення пробійників для виконання операції перфорування деталей.....	53
2.7 Висновки до другого розділу.....	54
3 Розробка мікроконтролерної системи керування електроприводом пристрою для виконання операції перфорування.....	55

МРМА23.00.00.000ПЗ

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
		Король			Розробка пристрою з електромагнітним приводом для перфорування деталей		
		Білий					
							
		Тимошук					
		Поліщук					
					Літ.	Арк.	Аркушів
						4	76
					ХНУ зр.ЕТМ-22-1		

3.1	Вибір крокового двигуна для двохкоординатної системи переміщення деталей.....	55
3.2	Вибір драйвера крокового двигуна.....	57
3.3	Вибір контролера управління кроковими двигунами.....	62
3.4	Пристрій живлення драйверів крокових двигунів.....	64
3.5	Розробка пристрою живлення та управління роботою ЛЕМД.....	66
3.6	Розробка програмного забезпечення керування роботою пристрою з двохкоординатною системою переміщення.....	69
3.7	Загальний вигляд установки з двохкоординатною системою переміщення та мікроконтролерною системою керування.....	70
3.8	Висновки до третього розділу.....	71
	Висновки.....	72
	Перелік джерел посилання.....	73
	Додатки.....	

					<i>МРМА23.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

ВСТУП

Енергетичний фактор відіграє ключову роль у формуванні економічного ландшафту України на сучасному етапі. З цієї причини, енергозбереження у всіх галузях стає критично важливою частиною економічного росту країни. Потреба в економії енергоресурсів набуває особливої актуальності у контексті розширення виробничих масштабів та покращення якості продукції, базуючись на застосуванні новітніх технік та технологій.

При виконанні технологічних операцій, таких як вирубка та перфорування деталей, неправильний вибір параметрів різального інструмента та матеріалу вирубної плити може привести до зниження ефективності роботи інструментів, збільшення споживання енергії та навантаження на обладнання. Також це може негативно вплинути на якість виконання роботи, прискорити знос інструментів та збільшити витрати на матеріали та енергію, пов'язані з обслуговуванням і виготовленням нових компонентів, а також знизити продуктивність праці. Низька якість перфорування може погіршити зовнішній вигляд продукції і вимагати додаткових технологічних процесів.

Оптимізація енергоспоживання при виконанні технологічних операцій, таких як перфорування деталей, за допомогою нових типів приводів та вибору оптимальних технологічних режимів, є актуальною задачею, що має інтерес для багатьох промислових галузей.

Метою даної роботи є удосконалення існуючих систем перфорації деталей для збільшення ефективності їх роботи, включаючи продуктивність та якість виробів, що може бути досягнуто за допомогою впровадження енергоефективних електромагнітних приводів, системи керування ними та робочими інструментами.

Розроблений пристрій може бути використаний на підприємствах галузевого машинобудування і легкої промисловості та у навчальному процесі на кафедрі машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем та інших Хмельницького національного університету.

					<i>МРМА23.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Результати розробки були представлені на науковій студентській конференції кафедри машин та апаратів, електромеханічних та енергетичних систем у 2023 році. На основі них було підготовлено тези у Збірник наукових праць «Технічна творчість» №7, 2023р. (додаток Б).

					MPMA23.00.00.000ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ТА ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ З ТЕМАТИКИ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ

1.1 Загальні відомості про операцію перфорування

Перфорування верху взуття різних матеріалів з використанням змінних матриць проводиться для декоративного оформлення та підвищення вентиляції літнього взуття. Ця операція схожа на процес вирубки деталей, оскільки обидва процеси включають створення малих отворів на рівній відстані один від одного, аналогічно до діаметру пробивання.

У легкій промисловості, зокрема у швейній та взуттєвій галузях, технологія пробивання отворів часто використовується для монтажу металевої фурнітури, як, наприклад, у виробництві ременів у шкіряно-галантерейній промисловості. Ця процедура близька до операцій вирубування та перфорування деталей у взуттєвому та швейному виробництвах.

Процеси вирубування, перфорування та пробивання отворів на пресовому обладнанні є складними і залежать від багатьох факторів, особливо при динамічному навантаженні.

У швейній, взуттєвій та шкіряно-галантерейній промисловості пробивання отворів часто виконується для установки металевої фурнітури, наприклад, в ременях або деталях устілкового вузла. Для цього використовується те саме обладнання, що і для встановлення фурнітури, яке буде детальніше описано далі.

Технологія перфорування на пресах полягає у наступному: заготовку 1 (див. рисунок 1.1) розміщують на верхній частині 2 перфораційної матриці 3, яка потім вручну подається у робочу зону преса [1].

					<i>MPMA23.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

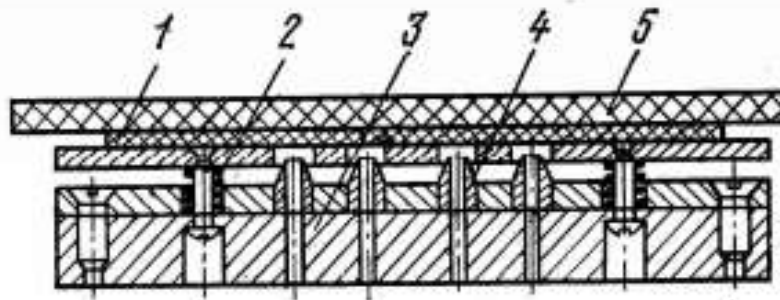
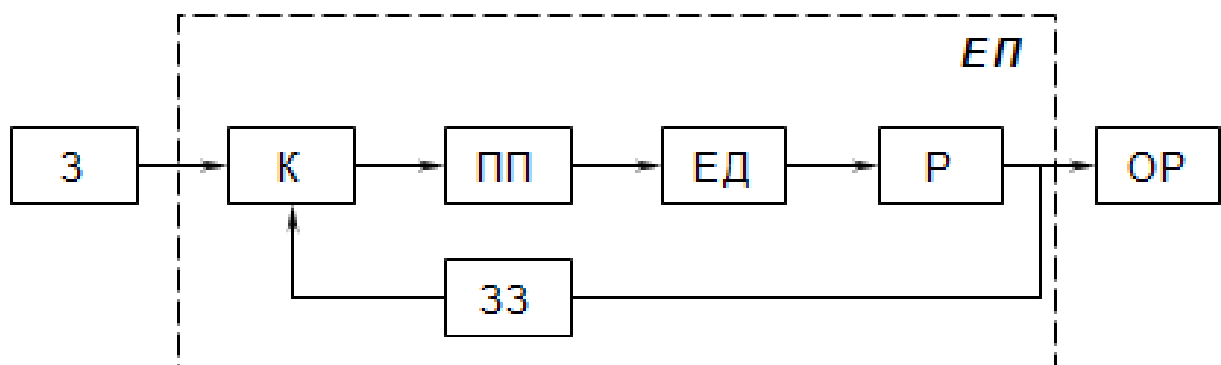


Рисунок 1.1 – Схема перфорування деталей верху взуття

Під час роботи преса, коли каретка з матрицею піднімається до максимального положення у траверсі просічки 4, відбувається пробивання отворів у матеріалі, який розміщений у матриці. Щоб забезпечити акуратний зріз та запобігти пошкодженню просічок, на заготівлю верху 1 кладуть додатковий захисний шар з картону або пластику 5. Після завершення процесу пробивання отворів, каретку з матрицею опускають, а оброблену деталь виймають, висунувши каретку з матриці.

1.2 Структура автоматизованого електропривода

Структура електроприводу приведена на рисунку 1.2.



З – задавач; К – керувач; ПП – підсилювач-перетворювач; ЕД – електродигунний пристрій; Р – редуктор; ЗЗ – зворотній зв’язок;
ОР – об’єкт регулювання.

Рисунок 1.2 - Структура електропривода

					МРМА23.00.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

Електропривод (ЕП) є комплексною електромеханічною системою, яка включає в себе електродвигунні, перетворювальні, передавальні та управлінські пристрої, які використовуються для активації та керування рухом допоміжних механізмів у робочих машинах.

Електродвигунний пристрій (ЕД) призначений для перетворення електричної енергії в механічну, забезпечуючи тим самим механічну взаємодію з об'єктом регулювання.

Перетворювач функціонує як пристрій, який змінює тип, частоту струму (напруги) та якість електричної енергії. Через його здатність підсилювати сигнал, він часто називається підсилювачем-перетворювачем (ПП) або просто підсилювачем.

Передавальний пристрій, такий як редуктор (Р), відповідає за передачу механічної енергії від електродвигуна до виконавчого механізму робочої машини, забезпечуючи узгодження типу та швидкості їх руху.

Керувач (К) слугує для управління перетворювачем, електродвигунним та передавальним пристроями, порівнюючи вхідну інформацію від задавача (З) та інформацію про стан системи, яка поступає через ланцюг зворотного зв'язку (ЗЗ).

Об'єкт регулювання (ОР) є цільовим елементом, на який направлено механічну дію електроприводу.

1.3 Класифікація електроприводів

Електроприводи (ЕП) класифікуються за різними критеріями (див. рисунок 1.3), включаючи:

- вид струму: - ЕП постійного струму з використанням електродвигунів постійного струму і ЕП змінного струму з електродвигунами змінного струму.
- структуру: розімкнуті системи (без зворотного зв'язку), замкнуті та комбіновані системи.
- тип перетворювача потужності: транзисторні (транзисторні підсилювачі як

					<i>МРМА23.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

перетворювачі), тиристорні (тиристорні пристрої), електромашинні (електромашинні підсилювачі), система "керуючий випрямляч – двигун" (КВ-Д) (регульований випрямляч або регульований випрямляч і інвертор), система "генератор-двигун" (Г-Д) (електромашинний перетворювач).

- тип передачі: редукторні (з включеним редуктором), без редуктора, електрогідравлічні (з електрогідравлічним пристроєм) і з електромагнітною порошковою муфтою (ЕПМ), яка виконує функції передачі.

- характер зміни параметрів: нерегульовані ЕП (параметри змінюються від впливу ззовні) і регульовані ЕП (параметри змінюються лише під впливом керувального пристрою).

Найбільш складним є автоматизований ЕП, який відрізняється наявністю автоматичного регулювання параметрів. Автоматизовані ЕП побудовані на засадах замкнутого контуру регулювання, де порівнюються зовнішні дані від задавального пристрою з інформацією про регульований параметр. Класифікація ЕП в даній роботі зосереджена на автоматизованих ЕП.

У регулюванні визначають ЕП зі стабілізованим параметром (для підтримки заданого параметру), програмно-керовані ЕП та слідкувальні ЕП. ЕП зі стабілізованим параметром використовується для утримання певного параметра на заданому рівні (див. рисунок 1.4). Наприклад, для контролю рівня освітлення в приміщенні можна використовувати ЕП, показаний на рисунку 3,а, де штори в об'єкті регулювання виконують регулювальну функцію. Керувальний пристрій містить мостову схему з фоторезистором R_{ϕ} для вимірювання реального освітлення і реостатом R_{Σ} для задання бажаного рівня освітлення.

Калібрування мостової схеми виконується через вимірювання струму гальванометра, підключеного до діагоналі для вимірювань. Коли рівень освітлення відповідає заданому, струм через гальванометр не проходить. Відхилення рівня освітлення від заданого призводить до проходження струму через гальванометр, викликаючи обертання його рамки. Це обертання передається на важіль потенціометра, перетворюючи кутовий рух рамки в електричний

					<i>МРМА23.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

сигнал. Цей сигнал, після підсилення, активізує електродвигун, який через редуктор регулює відкриття або закриття шторок діафрагми залежно від зміни рівня освітлення.



Рисунок 1.3 - Класифікація електропривода

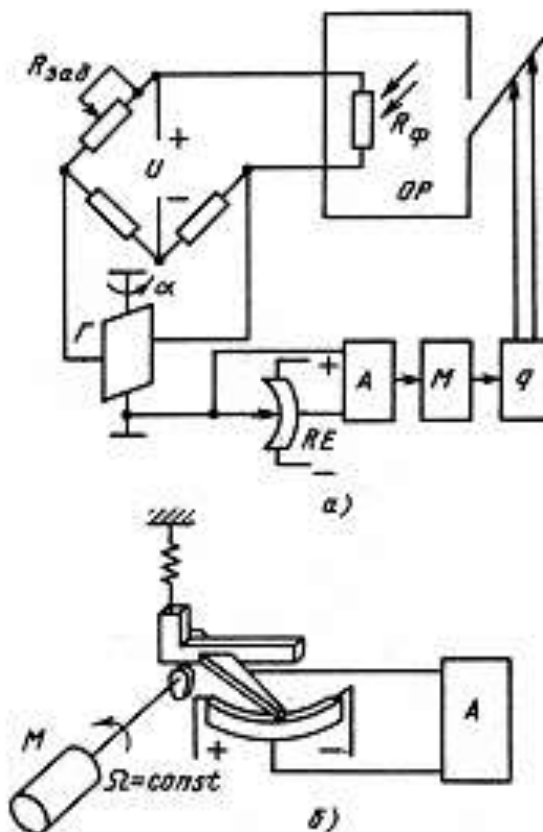


Рисунок 1.4 - ЕП зі стабілізованим параметром

Програмно-керований ЕП використовується для модифікації певних параметрів за визначеною програмою. Наприклад, привід копіювально-фрезерного верстата задається профілем шаблону, що відповідає формі готової деталі. Шаблон переміщується горизонтально, піднімаючи щуп. Це переміщення перетворюється на електричний сигнал і порівнюється з сигналом, який інформує про положення фрези. Розбіжності коригуються за допомогою електромеханічного перетворювача, який регулює розподільник, забезпечуючи рух поршня в гідроциліндрі, який у свою чергу переміщує фрезу у вертикальному напрямку по заготівлі для усунення неузгодженості.

					МРМА23.00.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

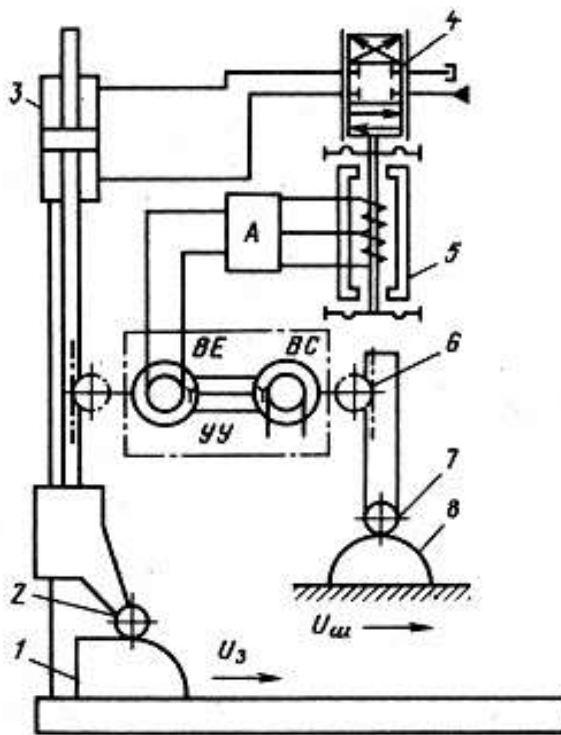


Рисунок 1.5 - Програмно-керований ЕП

Для забезпечення коректного технологічного процесу обробки важливим є синхронізація руху шаблону та заготовки у горизонтальному напрямку, тобто вирівнювання їхніх швидкостей.

Оскільки фреза слідує за рухом щупа, заготовка перетворюється на деталь згідно з заданою формою, допуск якої визначається точністю електроприводу та шаблону. Виготовлення нового шаблону для зміни типу оброблюваних деталей є складним процесом. Заміна шаблону програмою, записаною на перфорованій чи магнітній стрічці, привела до розвитку верстатів з числовим програмним керуванням (ЧПК). Верстати з ЧПК стали популярними у металообробній промисловості, дозволяючи виготовляти складні деталі з високою точністю та продуктивністю.

Слідкувальний електропривод (СП) реагує на зміни вихідного параметру відповідно до мінливого керуючого сигналу. Схема СП, яка керує положенням супорта верстата, показана на рисунку 1.6. Основна задача СП - забезпечити взаємодію обертання двох валів, які механічно не зв'язані. Вхідний вал, що

					МРМА23.00.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

керується задавачем на пульті керування, називається задавальним, а його рух - керуючим. Вихідний вал, що імітує рух задавача і зв'язаний з робочою частиною верстата, називається виконуючим або слідкувальним. Різниця кутових положень між задавальним і виконуючим валами створює керуючий сигнал за допомогою вимірювача розузгодження на обертових трансформаторах. Один з трансформаторів (давач) з'єднаний з задавальним валом, а інший (приймач) - з виконавчим валом.

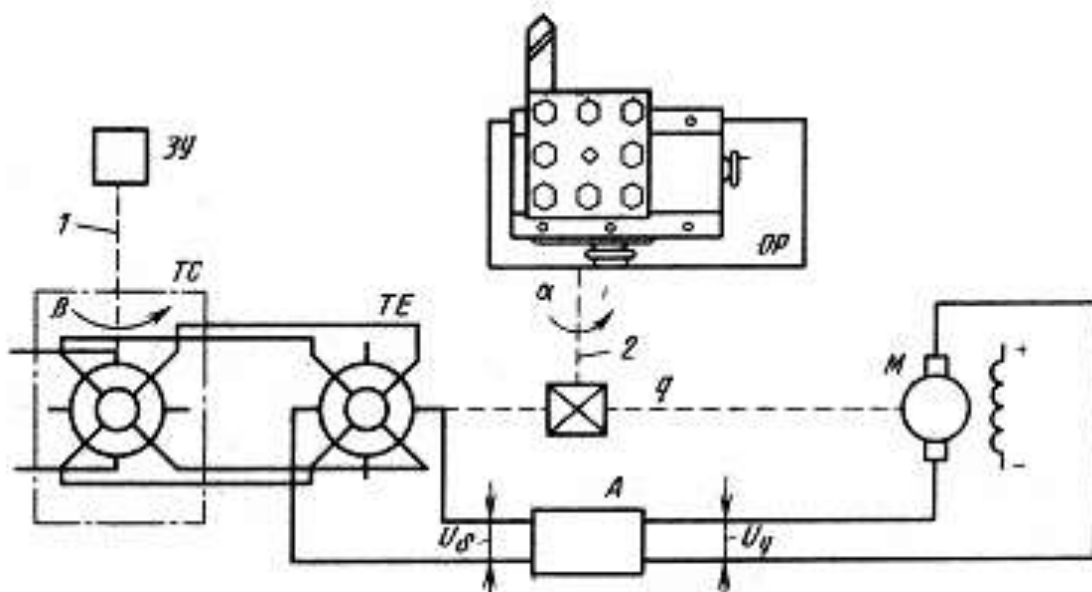


Рисунок 1.6 - Функціональна схема СП

Напруга розбіжності, знята з обертового трансформатора-приймача, яка є пропорційною до різниці кутів, подається на вхід підсилювача, а згодом передається на виконавчий двигун. Цей двигун, через редуктор, переміщує супорт верстата та водночас обертовий трансформатор-приймач у напрямку до зниження розбіжності. Коли супорт досягає заданого положення, напруга розбіжності стає рівною нулю, що зупиняє двигун.

Електроприводи поділяються на ті, що мають безперервне управління, та ті, що використовують дискретне управління.

Електроприводи з безперервним управлінням характеризуються

					<i>МРМА23.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

неперервним створенням і передачею управлінського сигналу, а також регулюванням швидкості обертання електродвигуна за допомогою регулювання напруги, поданої від джерела живлення.

Для зменшення впливу навантаження і зниження помилок у електроприводах використовують дискретні елементи, як-от підпружинена падаюча дужка. Дужка з'єднана з рушієм потенціометра і контактує з обертовим кулачком, що дозволяє імпульсно формувати керуючий сигнал, який періодично передається на підсилювач. Це призводить до дискретної природи керуючого сигналу та зміни швидкості обертання електродвигуна через періодичне включення та відключення від джерела струму.

Приводи з дискретним управлінням формують і передають управлінський сигнал у певні моменти часу. Імпульсні електроприводи створюють періодичну послідовність імпульсів, релейні - імпульси зі змінною шириною, а цифрові - управлінський сигнал у цифровій формі.

Залежно від способу управління, електроприводи можуть забезпечувати як безперервний, так і дискретний рух вихідного валу. Наприклад, за високої частоти імпульсів, рух валу буде безперервним через інерцію електродвигуна. Використання крокового двигуна дозволяє обертати вал на точно визначені кути.

Класифікація електроприводів включає розділ на лінійні та нелінійні типи, заснований на математичному представленні руху приводу та його диференціальному рівнянні. Лінійні елементи електроприводів визначаються безперервною лінійною залежністю між вхідним та вихідним сигналами:

$$X_{\text{вих}} = kX_{\text{вх}},$$

де k – постійна величина, називається передаточним коефіцієнтом. Лінійна статична характеристика має вид прямої, що проходить через початок координат під кутом $\alpha = \arctg k$ (див. рисунок 1.7, а).

В той же час, більшість елементів електроприводів мають нелінійні характеристики. Ці нелінійності можуть впливати на стабільність і якість роботи електроприводів. Але якщо відхилення статичних характеристик є незначними і

					<i>МРМА23.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

не впливають на загальну поведінку приводу, то в обмеженому діапазоні змін вхідного сигналу можна замінити фактичну криву на її дотичну або січну (див. рисунок 1.7, б).

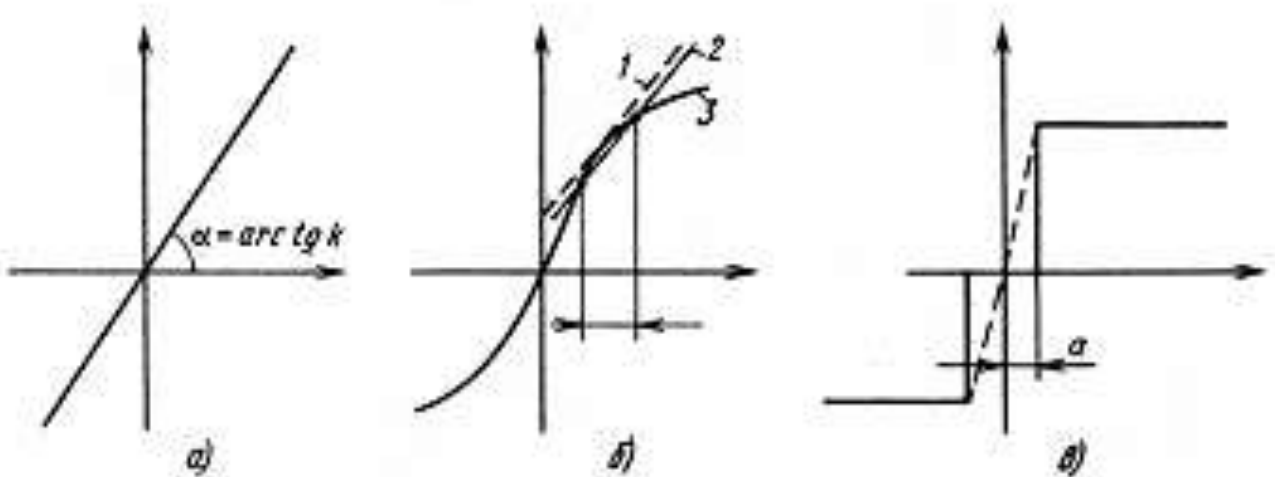


Рисунок 1.7 - Статичні характеристики елементів

Лінеаризація характеристик може бути застосована, якщо описуюче їх рівняння $X_{вих} = kX_{вх}$ дійсне протягом всього періоду регулювання, характеристика є неперервною і вільною від різких перепадів. Однак, не всі характеристики піддаються лінеаризації без втрати ключових властивостей елемента. Наприклад, характеристика з зоною нечутливості, як на рисунку б,в, не підлягає лінеаризації, і такий елемент вважається значно нелінійним. Основними джерелами значних нелінійностей в електроприводах є тертя у сполученнях, зазори у редукторах, обмеження сигналів на вході чи виході тощо.

Лінійними називаються електроприводи, які складаються з лінійних або лінеаризованих елементів, і рух таких електроприводів описується лінійними диференціальними рівняннями з постійними коефіцієнтами.

Електропривод, що містить хоча б один нелінійний елемент, класифікується як нелінійний, і до нього не можуть бути застосовані лінійні методи розрахунку.

					<i>МРМА23.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

1.4 Загальні відомості про крокові двигуни

Крокові двигуни належать до категорії безколекторних двигунів постійного струму і відрізняються високою надійністю та тривалим терміном служби, що робить їх ідеальними для використання в індустріальних умовах. У порівнянні з традиційними двигунами постійного струму, крокові двигуни вимагають більш складних керувальних систем для комутації обмоток [12]. Вартість крокових двигунів є вищою, що робить їх менш вигідними для застосувань, де не потрібно точного позиціонування. Однак крокові двигуни мають перевагу у здійсненні точного позиціонування і регулюванні швидкості без потреби у датчиках зворотного зв'язку, що може значно здешевити систему. Проте, це актуально тільки для систем з малим прискоренням і стабільним навантаженням. Системи із зворотним зв'язком здатні ефективно працювати з великими прискореннями і змінними навантаженнями. Важливо врахувати, що при перевантаженні крокового двигуна інформація про стан ротора може бути втрачена, і в такому випадку система потребуватиме перекалібрування.

У разі проектування систем, де необхідно обирати між сервомотором і кроковим двигуном, кроковий двигун є оптимальним рішенням для задач, що вимагають точного позиціонування і керування швидкістю в межах визначених моменту та швидкості. Хоча редуктор може бути використаний для збільшення моменту, для крокових двигунів це не завжди є ефективним рішенням.

На відміну від колекторних двигунів, де момент збільшується зі зростанням швидкості, крокові двигуни характеризуються вищим моментом на низьких обертах. Оскільки максимальна швидкість крокових двигунів значно нижча, ніж у колекторних, це обмежує максимальний передавальний коефіцієнт і можливість підвищення моменту за допомогою редуктора. Крокові двигуни з вбудованими редукторами існують, але не є поширеними. Люфт, притаманний редукторам, також є фактором, що обмежує їхнє використання. Часто розробники використовують крокові двигуни для завдань, де вони не є обов'язковими,

					<i>МРМА23.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

уникаючи розробки редуктора. Колекторні двигуни, натомість, мають вищу специфічну потужність, низьку вартість, простішу схему управління і можуть забезпечити аналогічний діапазон швидкостей і вищий момент у поєднанні з одноступінчатим черв'ячним редуктором. Колекторні двигуни широко використовуються у військовій техніці, побутовій техніці, автомобілях та промисловому обладнанні. Проте, крокові двигуни також мають свої унікальні сфери застосування.

Крокові двигуни бувають наступних типів:

1. Двигуни зі змінним магнітним опором;
2. Двигуни з постійними магнітами;
3. Гібридні двигуни.

Тип двигуна можна визначити за відчуттями під час обертання вала: у двигунах з постійними магнітами або гібридних двигунів при обертанні вала відчувається змінний опір, а у двигунів зі змінним магнітним опором вал обертається вільно. Гібридні двигуни є удосконаленням двигунів з постійними магнітами і управляються аналогічним чином. Також тип двигуна можна визначити за конфігурацією обмоток: двигуни зі змінним магнітним опором мають три або чотири обмотки з одним загальним висновком, тоді як двигуни з постійними магнітами мають дві незалежні обмотки, іноді з відводами від середини. У крокових двигунах крутний момент створюється взаємодією магнітних потоків статора і ротора.

Статор крокового двигуна виготовлений із матеріалу з високою магнітною проникністю і містить кілька полюсів. Полюс є частиною намагніченого тіла, де магнітне поле найбільш концентроване. Як статор, так і ротор мають полюси. Для зниження втрат від вихрових струмів, магнітопроводи статора виготовлені з окремих пластин, схоже на конструкцію трансформатора. Обертний момент двигуна прямо пропорційний величині магнітного поля, яка, у свою чергу, залежить від сили струму в обмотці і кількості її витків.

					<i>МРМА23.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

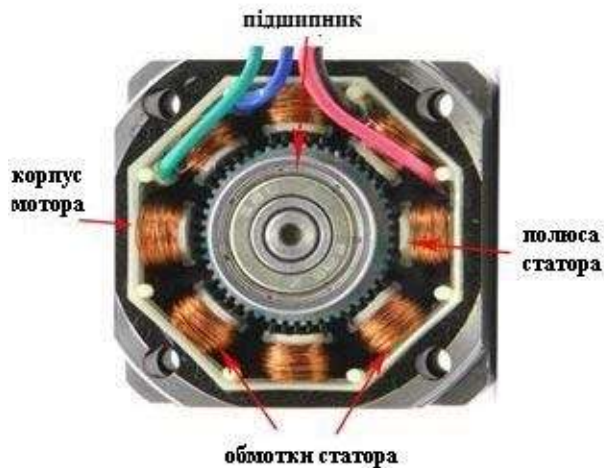
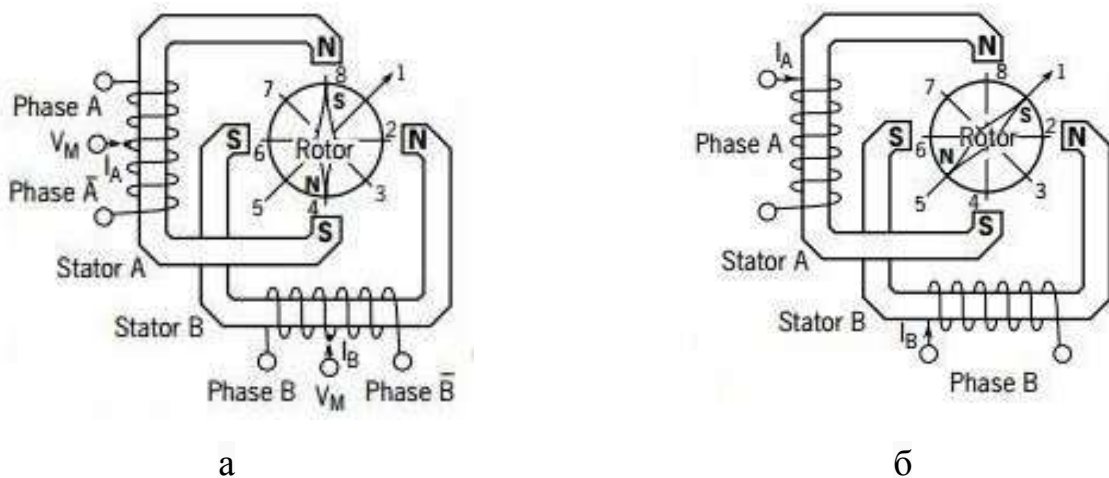


Рисунок 1.8 – Кроковий двигун

Таким чином, момент залежить від параметрів обмоток. Коли обмотка крокового двигуна підключена до джерела живлення, ротор займає певне положення і залишається в ньому до того моменту, поки зовнішній момент не перевищить певне значення, відоме як момент утримання. Після цього ротор обернеться і спробує зайняти одне з можливих стабільних положень.

Крокові двигуни бувають двох типів: уніполярні та біполярні. На основному рівні обидва типи функціонують однаково, оскільки електромагніти активуються по черзі, змушуючи обертатися центральний вал двигуна (рисунок 1.9, лист [MPMA23.00.00.000ДО]).



а-уніполярний; б-біполярний

Рисунок 1.9 - Типи крокових двигунів:

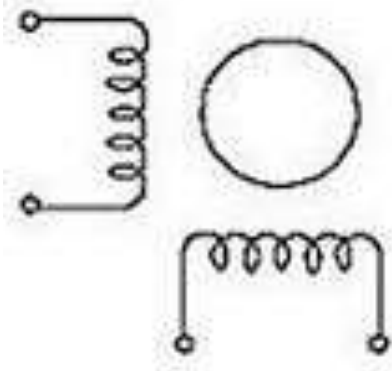
Основна відмінність між уніполярними та біполярними кроковими двигунами полягає у рівнях напруги, з якими вони працюють. Уніполярні двигуни функціонують лише за допомогою позитивної напруги, отже, висока та низька напруги для їх котушок становлять, наприклад, 5В та 0В. У свою чергу, біполярні двигуни використовують як позитивну, так і негативну полярності, тому їх висока та низька напруги можуть бути, скажімо, 2,5В та -2,5В.

Фізична відмінність між цими типами полягає в тому, що уніполярні двигуни потребують додаткового проводу посередині кожної котушки для забезпечення проходження струму від одного кінця до іншого. Це дозволяє створювати дві полярності магнітного поля, імітуючи біполярні напруги. Біполярні двигуни мають більший крутний момент, оскільки струм проходить через всю котушку, створюючи сильніше магнітне поле, а уніполярні використовують лише половину довжини котушки через додатковий провід, маючи таким чином менший крутний момент.

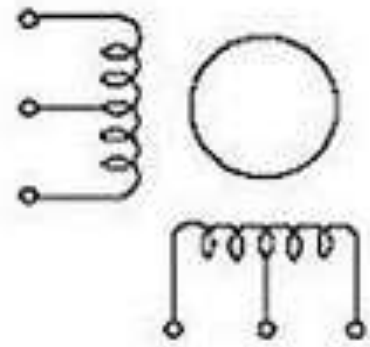
Крокові двигуни можуть мати різну кількість проводів, зазвичай 4, 5, 6 або 8. Конфігурації з 4, 5 та 6 проводами дозволяють використовувати як уніполярні, так і біполярні двигуни, залежно від того, чи використовується центральний провід. Конфігурація з 8 проводами є найбільш універсальною, оскільки дозволяє працювати як в уніполярному, так і в біполярному режимах (рисунок 1.10, лист [МРМА.23.00.00.000ДО]).

Є чотири основні типи кроків, які можна використовувати з кроковими двигунами, і всі чотири типи сумісні з будь-яким уніполярним або біполярним кроковим двигуном (рисунок 1.11, лист [МРМА.23.00.00.000ДО]).

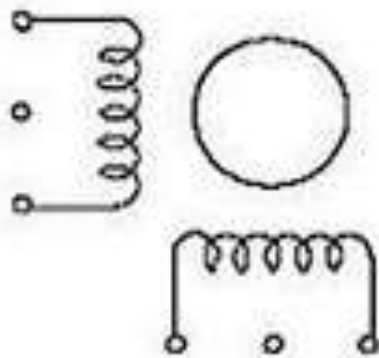
					<i>МРМА23.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



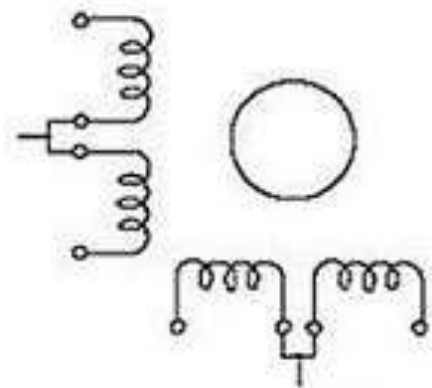
а



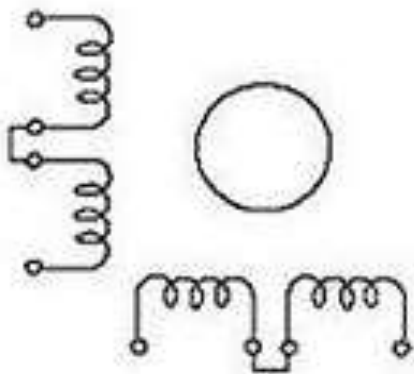
б



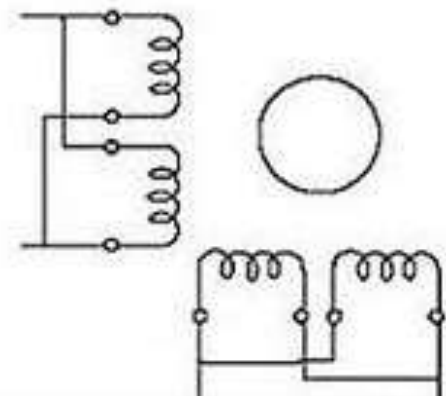
в



г



д



е

а – 4 виводи (біполярне); б – 6-виводів (уніполярне); в-6-виводів (біполярне послідовне); г - 8-виводів (уніполярне); д - 8-виводів (біполярне (послідовне));
 е - 8-виводів (біполярне (паралельне))

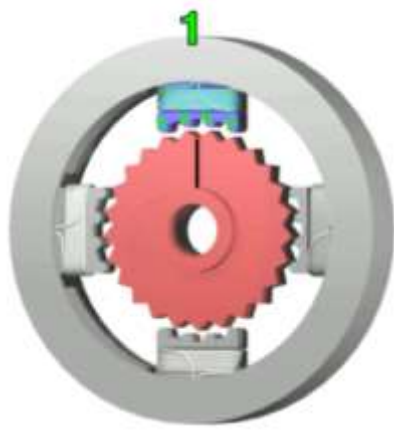
Рисунок 1.10 – Схема підключення крокового двигуна:

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

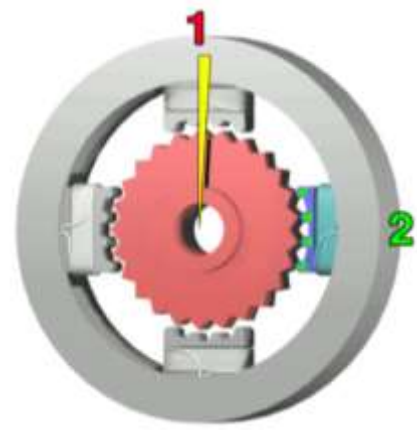
МРМА23.00.00.000ПЗ

Арк.

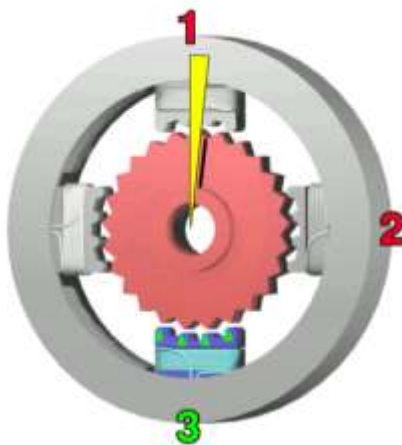
22



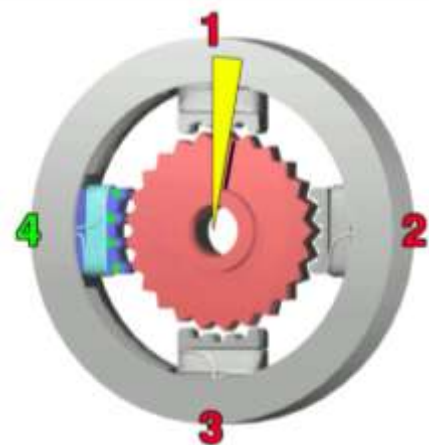
а



б



в



г

а-перший; б-другий; в-третій; г-четвертий

Рисунок 1.11 – Основні кроки крокового двигуна:

Одиночні кроки: Це базовий тип кроку в крокових двигунах, при якому активується лише одна котушка, що тримає двигун у фіксованому положенні, як зображено на рисунку 1.11. Цей метод використання однієї котушки є найменш потужним з усіх варіантів.

Подвійні кроки: У цьому методі одночасно активуються дві котушки. Наприклад, замість активації лише котушки №1, активуються котушки №1 та №2 одночасно. Це збільшує енергоспоживання (майже вдвічі), але забезпечує більшу потужність порівняно з одиночними кроками (на 25%).

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

МРМА23.00.00.000ПЗ

Арк.

23

Змінні кроки: Цей метод поєднує в собі одиночні та подвійні кроки, чергуючи між ними. Він надає трохи більшу потужність, ніж одиночні кроки, і збільшує енергоспоживання приблизно на 50%. Важливою особливістю цього типу є здатність двигуна робити вдвічі більше кроків, забезпечуючи плавні переходи між кроками.

Мікрокроки: Цей метод використовує поєднання одиночних кроків з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ) для плавного переходу між кроками. Це повільніше, ніж одиночні кроки, але забезпечує вищу точність. Рекомендується використовувати 8 мікрокроків, що збільшує кількість кроків двигуна в 8 разів.

Біполярне підключення: Якщо потрібно обертати двигун на низьких швидкостях, найкраще підходить біполярне підключення. Електричні параметри двигуна в цьому режимі відповідають даним, наведеним у каталозі. При біполярному підключенні необхідно знизити струм, що подається на обмотки двигуна в $\sqrt{2}$ рази. Наприклад, якщо номінальний робочий струм двигуна становить 2 А, то при послідовному підключенні обмоток потрібний струм становить 1,4 А, тобто в 1,4 рази менше. Це обумовлено збільшенням опору при послідовному з'єднанні обмоток удвічі (2R).

Потужність, що споживається при уніполярному включенні:

$$P_{\text{сп}} = I_{\text{уніполяр}}^2 \cdot R. \quad (1.1)$$

При послідовному включенні обмоток потужність, що споживається стає:

$$P_{\text{сп}} = 2I_{\text{біполяр}}^2 \cdot R \quad (1.2)$$

Потужність, що споживається не залежить від типу підключення, тому:

$$I_{\text{уніполяр}}^2 \cdot R = 2I_{\text{біполяр}}^2 \cdot R, \quad (1.3)$$

					<i>MPMA23.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Звідки

$$I_{\text{біполяр.}} = I_{\text{уніполяр.}}/\sqrt{2}, \quad (1.4)$$

тобто

$$I_{\text{біполяр.}} = 0,707I_{\text{уніполяр.}} \quad (1.5)$$

Оскільки крутний момент крокового двигуна залежить від величини магнітного поля, створюваного обмотками статора, він збільшується пропорційно кількості витків обмотки та зменшується зі зниженням струму, що проходить через обмотки. Враховуючи, що струм у обмотках знижується в $\sqrt{2}$ рази, але кількість витків у обмотці зростає вдвічі при послідовному підключенні, крутний момент двигуна фактично збільшується в $\sqrt{2}$ рази.

Тоді:

$$T_{\text{біполяр.}} = 1,4T_{\text{уніполяр.}} \quad (1.6)$$

Для підключення 8-вивідного крокового двигуна, який має чотири обмотки, до класичного біполярного драйвера існує три можливі варіанти: уніполярне, послідовне або паралельне підключення обмоток. Для обертання двигуна на середніх швидкостях варто використовувати лише дві з чотирьох обмоток. Це особливо ефективно для роботи двигуна на низьких швидкостях. При такому типі підключення слід зменшити струм, що подається на обмотки двигуна на $\sqrt{2}$ рази. Наприклад, якщо номінальний робочий струм двигуна становить 2 А, то при послідовному підключенні обмоток потрібний струм складатиме 1,4 А, тобто на 1,4 рази менше. Це легко зрозуміти, адже номінальний робочий струм, зазначений у каталозі, вирахований з урахуванням опору однієї обмотки (R), і коли обмотки підключаються послідовно, опір об'єднаної обмотки зростає удвічі (2R).

Потужність при уніполярному включенні:

					<i>MPMA23.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$P=I_{\text{уніполяр.}}^2 R \quad (1.7)$$

При послідовному включенні обмоток споживана потужність стає:

$$P=2I_{\text{послед.}}^2 R \quad (1.8)$$

Потужність не залежить від типу підключення, тому:

$$I_{\text{уніполяр.}}^2 R = 2I_{\text{послед.}}^2 R, \quad (1.9)$$

звідки:

$$I_{\text{послед.}} = I_{\text{уніполяр.}} / \sqrt{2}, \quad (1.10)$$

тобто:

$$I_{\text{послед.}} = 0,707I_{\text{уніполяр.}} \quad (1.11)$$

Оскільки крутний момент двигуна залежить від сили магнітного поля, генерованого обмотками статора, він збільшується зі зростанням кількості витків обмотки і зменшується при зниженні струму, що проходить через обмотки. Враховуючи, що струм було зменшено в $\sqrt{2}$ рази, а кількість витків обмотки збільшилася вдвічі, це призводить до збільшення крутного моменту також в $\sqrt{2}$ рази.

Тоді:

$$T_{\text{послед.}} = 1,4T_{\text{уніполяр.}} \quad (1.12)$$

Використання паралельного підключення обмоток є найбільш ефективним для досягнення високих швидкостей двигуна. У цьому випадку необхідно

					<i>MPMA23.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

збільшити струм, що подається на обмотки, в $\sqrt{2}$ рази. Наприклад, якщо стандартний робочий струм двигуна становить 2А, то при паралельному підключенні обмоток потрібний струм буде 2,8 А, що в 1,4 рази більше.

Це пояснюється наступним чином: номінальний робочий струм, вказаний в специфікаціях, базується на опорі однієї обмотки (R, вказане в специфікаціях). Коли обмотки підключаються паралельно, загальний опір комбінованої обмотки знижується вдвічі ($0,5R$), що потребує збільшення струму для забезпечення необхідної потужності:

$$P = I_{\text{уніполяр.}}^2 R. \quad (1.13)$$

При паралельному включенні обмоток потужність, що поживається дорівнює:

$$P = 0,5 I_{\text{біполяр.}}^2 R. \quad (1.14)$$

Потужність не залежить від типу підключення, звідси

$$I_{\text{уніполяр.}}^2 R = 0,5 I_{\text{біполяр.}}^2 R. \quad (1.15)$$

Звідки:

$$I_{\text{біполяр.}} = I_{\text{уніполяр.}} / \sqrt{2}. \quad (1.16)$$

Тобто:

$$I_{\text{біполяр.}} = 1,4 I_{\text{уніполяр.}} \quad (1.17)$$

Так як крутний момент двигуна прямо пропорційний величині магнітного поля, створюваного обмотками статора, то він зростає зі збільшенням числа витків обмотки і убуває із зменшенням величини струму, що пропускається через

					<i>MPMA23.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

обмотки. Але так як струм збільшився в $\sqrt{2}$ раз, а число витків обмотки збільшилася в 2 рази, то крутний момент зросте в $\sqrt{2}$ раз (рисунок 1.12).

Тоді:

$$T_{\text{біполяр.}} = 1,4T_{\text{уніполяр.}} \quad (1.18)$$

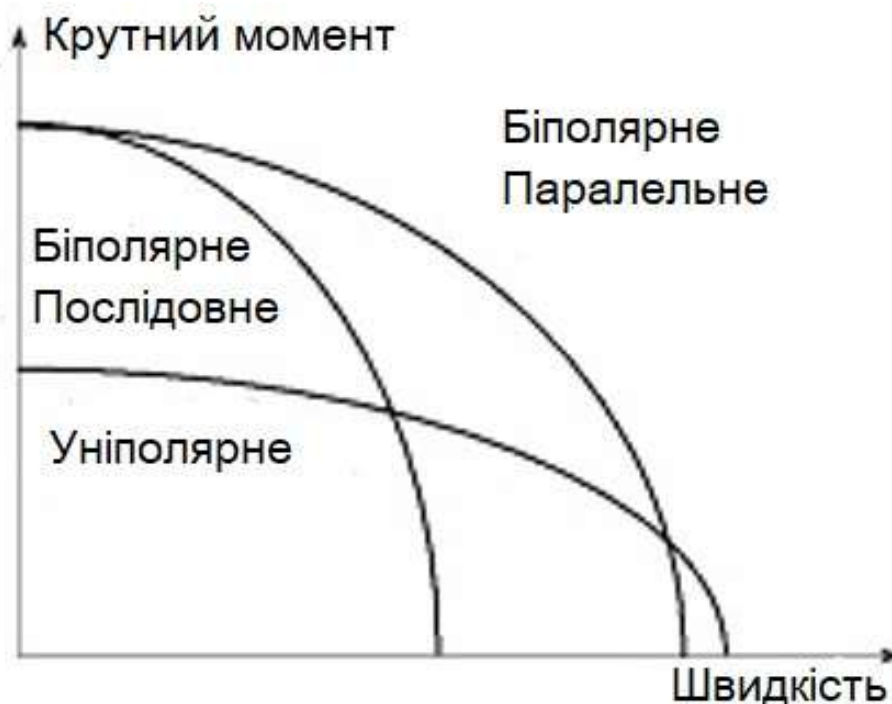


Рисунок 1.12 - Графік залежності швидкості від крутного моменту крокового двигуна

Під час вибору крокового двигуна, однією з ключових характеристик, на яку слід звертати увагу, є його швидкісні властивості, тобто залежність моменту на валу від швидкості обертання. Цю характеристику можна оцінити, знаючи значення опору (R) та індуктивності (L) обмоток обраного двигуна. Важливим є співвідношення R/L : чим вище це співвідношення, тим швидше наростає струм у обмотках, дозволяючи досягти вищих швидкостей обертання без значного падіння моменту. Це пов'язано з тим, що індуктивність у еквівалентній схемі створює протидію змінам струму у ланцюзі, уповільнюючи його зростання і зменшення при розмиканні ланцюга. Струм не може миттєво досягти номінальної величини, тому момент двигуна також наростає поступово. При збільшенні

					<i>МРМА23.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

швидкості обертання збільшується швидкість комутації обмоток, а час підключення напруги до обмотки зменшується. На критичній швидкості струм у обмотці ще не встигає досягти свого номінального значення до моменту відключення напруги, що призводить до зниження моменту і може спричинити пропускання кроків двигуном.

1.5 Основні види схем керування кроковими двигунами

Однією з ключових викликів у використанні крокових двигунів (КД) є розробка ефективних систем керування, які можуть бути як із зворотним зв'язком по положенню ротора, так і без нього.

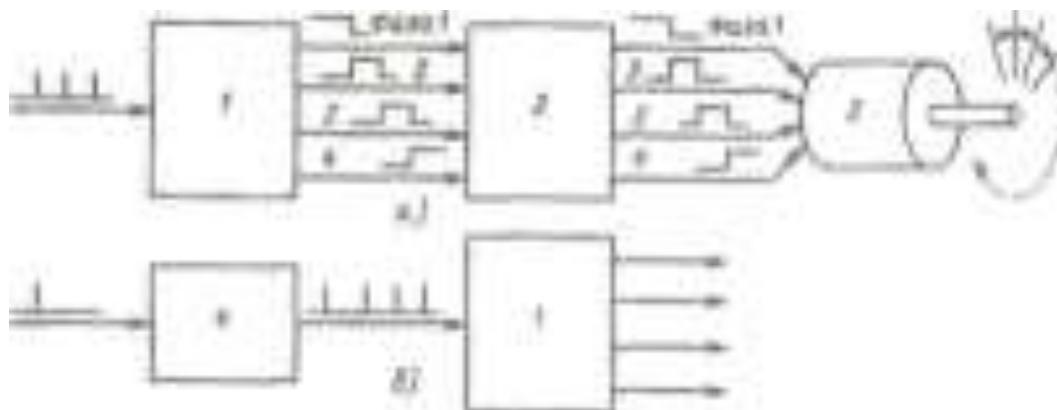
На рисунку 1.13 представлена проста схема системи керування для КД. Для зрозумілості, ця система поділена на дві частини: сам КД, який у даному прикладі є чотирифазним, та частина системи керування, що включає логічний блок і двигун [1].

Система працює таким чином, що сигнал керування, який надходить у логічний блок, ініціює подачу управлінського сигналу до комутатора, забезпечуючи таким чином переміщення ротора двигуна на один крок. Напрямок обертання визначається логічним станом на вході: високий рівень (H) для обертання за годинниковою стрілкою та низький рівень (L) для обертання проти годинникової стрілки. У деяких системах використовуються логічні блоки, що видають вихідний сигнал незалежно від обраного напрямку обертання. Схема на рисунку 1.13, а демонструє весь механізм керування, де один інкремент руху відповідає одному кроку двигуна.

Коли в схемі присутні два або більше кроків, перед логічним блоком слід розмістити додатковий компонент для створення необхідної послідовності вхідних імпульсів. Цей компонент відомий як вхідний контролер (див. рисунок 1.13, б). У більш складних схемах роль вхідного контролера можуть виконувати

					<i>МРМА23.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

мікропроцесори, здатні генерувати послідовності імпульсів для регулювання швидкості руху.



1 - логічний блок; 2 - комутатор; 3 – електричний двигун; 4 – вхідний контролер

Рисунок 1.13 - Схема системи керування КД:

Нижче наведено приклад застосування мікропроцесора у схемі управління без використання зворотного зв'язку. Логічний блок це схема, яка контролює порядок збудження обмоток у відповідь на вхідні імпульси. Зазвичай логічний блок складається з регістру зсуву та логічних елементів, таких як AND-І, OR - АБО та ін. Сучасні регістри зсуву зазвичай виконані на базі універсальних схем. Однак можна спеціально розробити логічний блок, використовуючи відповідну інтегральну схему, яка включає в себе тригер з логічним входом, активованим зворотним фронтом сигналу управління (тригери JK - FF), і логічні елементи. Базові функції схем і тригерів представлені на рисунку 1.14.

Тригер JK - FF забезпечує функцію, визначену таблицею істинності, і активується, коли на вхід подається сигнал Н. Якщо на вхід подається сигнал L, на виході Q буде сигнал L, а на Q - Н. Таким чином, замість складання логічного блоку з набору окремих інтегральних мікросхем можна застосувати універсальні логічні блоки, розроблені для КД [1].


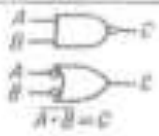


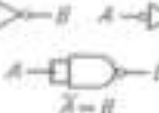
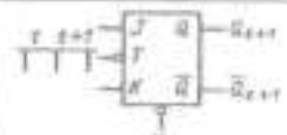
I		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Вхід</th> <th>Вихід</th> </tr> <tr> <th>A</th> <th>B</th> <th>C</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> </tbody> </table>	Вхід		Вихід	A	B	C	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0								
Вхід		Вихід																										
A	B	C																										
1	1	1																										
1	0	0																										
0	1	0																										
0	0	0																										
HI - I		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Вхід</th> <th>Вихід</th> </tr> <tr> <th>A</th> <th>B</th> <th>C</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr> </tbody> </table>	Вхід		Вихід	A	B	C	1	1	0	1	0	1	0	1	1	0	0	1								
Вхід		Вихід																										
A	B	C																										
1	1	0																										
1	0	1																										
0	1	1																										
0	0	1																										
ABO		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Вхід</th> <th>Вихід</th> </tr> <tr> <th>A</th> <th>B</th> <th>C</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> </tbody> </table>	Вхід		Вихід	A	B	C	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0								
Вхід		Вихід																										
A	B	C																										
1	1	1																										
1	0	1																										
0	1	1																										
0	0	0																										
HI - ABO		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Вхід</th> <th>Вихід</th> </tr> <tr> <th>A</th> <th>B</th> <th>C</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr> </tbody> </table>	Вхід		Вихід	A	B	C	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1								
Вхід		Вихід																										
A	B	C																										
1	1	0																										
1	0	0																										
0	1	0																										
0	0	1																										
III		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Вхід</th> <th>Вихід</th> </tr> <tr> <th>A</th> <th>B</th> <th>C</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> </tbody> </table>	Вхід		Вихід	A	B	C	1	1	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0								
Вхід		Вихід																										
A	B	C																										
1	1	0																										
1	0	1																										
0	1	1																										
0	0	0																										
Тригер JK - FF		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Вхід</th> <th colspan="2">Вихід</th> <th rowspan="2">Обзначення та позначення</th> </tr> <tr> <th>J</th> <th>K</th> <th>Q_{t+1}</th> <th>Q-bar_{t+1}</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>1</td><td>Q_t</td><td>Q_t</td><td rowspan="4">Обзначення та позначення</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>Q_t</td><td>Q_t</td></tr> </tbody> </table>	Вхід		Вихід		Обзначення та позначення	J	K	Q_{t+1}	Q-bar_{t+1}	1	1	Q _t	Q _t	Обзначення та позначення	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	Q _t	Q _t
Вхід		Вихід		Обзначення та позначення																								
J	K	Q_{t+1}	Q-bar_{t+1}																									
1	1	Q _t	Q _t	Обзначення та позначення																								
1	0	1	0																									
0	1	0	1																									
0	0	Q _t	Q _t																									

Рисунок 1.14- Логічні блоки та їх функції

У системі керування кроковим електроприводом, представленій на рисунку 1.15, використовується комбінація логічного блоку з інвертором. Вихідний сигнал з логічного блоку подається на вхід силового інвертора (комутатора), який контролює активацію обмоток двигуна КД.

У даній схемі комутатор К сполучається з підсилювачем потужності, представленим у вигляді релейних підсилювачів П1 – П3. Ці підсилювачі відповідають за включення та відключення обмоток крокового двигуна.

Припустимо, що тригери Т2 і Т3 перебувають у стані з високим рівнем («1»), а тригер Т1 – у стані з низьким рівнем («0»). В такому випадку активований релейний підсилювач П1, і струм тече через обмотку першої фази двигуна. Цей стан готує ячейки И21, И41 та И51 для прийому імпульсів з входу I, а ячейки И22, И32 та И62 – з входу II.

Коли імпульси надходять на вхід I, перший імпульс через ячейку И41 встановлює тригер Т2 у стан «0», підтверджує стан «0» для тригера Т1 через ячейку И21 та стан «1» для тригера Т3 через ячейку И51. Таким чином, після проходження першого імпульсу, під струмом будуть фази 1 і 2. Другий імпульс, проходячи через ячейки И11, И41 і И51, перемикає тригер Т1 у стан «1», підтверджує стан «0» для тригера Т2 та стан «1» для тригера Т3.

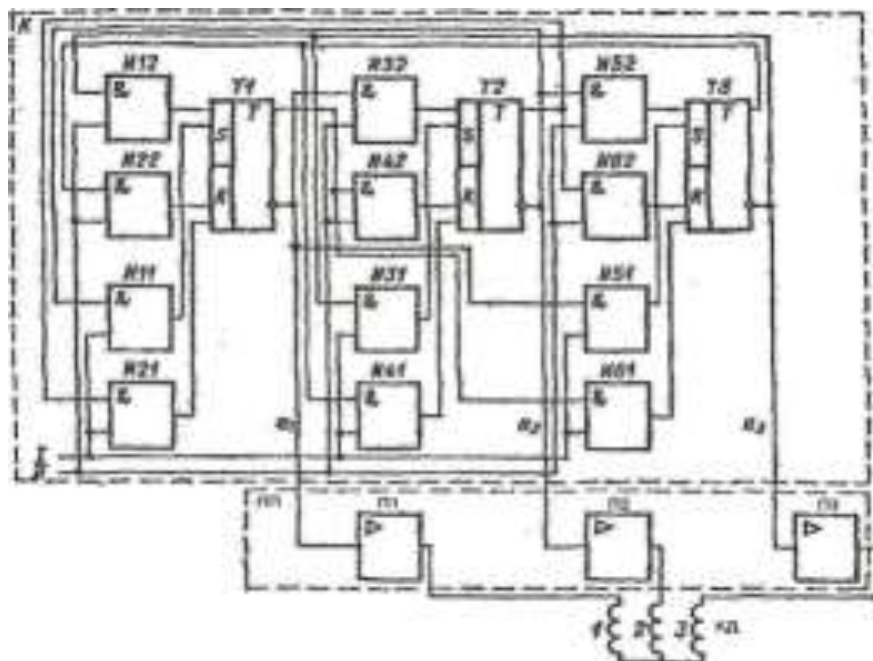


Рисунок 1.15 - Схема управління кроковим електроприводом

Після надходження другого імпульсу, фаза 1 відключається від струму, залишаючи фазу 2 під напругою. Шість імпульсів, поданих на вхід I, визначають послідовність комутації струмів у фазах наступним чином: 1-1,2-2-2,3-3-3,1 [4]. В той же час, імпульси, що надходять на вхід II, впливають на тригери через другу групу схем збігів И12, И22, И32, И42, И52, И62, забезпечуючи зворотну послідовність комутації: 1-1,3-3-3,2-2-2,1.

Зв'язок між відтворюючою і програмно-задаючою частинами позиційної системи ЧПУ з кроковим двигуном показаний на функціональній схемі рисунку 1.16. Числова програма П вводиться в лічильник Лч через пристрій введення

(ПВ). Після завершення введення цифрових даних і формування команди на пуск у прямому (В) або зворотному (Н) напрямку активізується схема збігу І1, і імпульси від генератора ГТІ надходять через ячейки І2 і І3 на розподільник імпульсів (РІ) і одночасно на вхід віднімання лічильника Лч. Коли кількість кроків, заданих програмою, виконана, лічильник обнуляється, і на виході схеми АБО - НІ з'являється логічна одиниця. Тригер Т переходить у стан «0», припиняючи подальше надходження імпульсів до лічильника та схеми управління кроковим двигуном. Швидкість крокового двигуна може бути встановлена та змінена протягом циклу позиціонування за допомогою блоку завдання швидкості, який є керованим дільником частоти (на схемі не зображено).

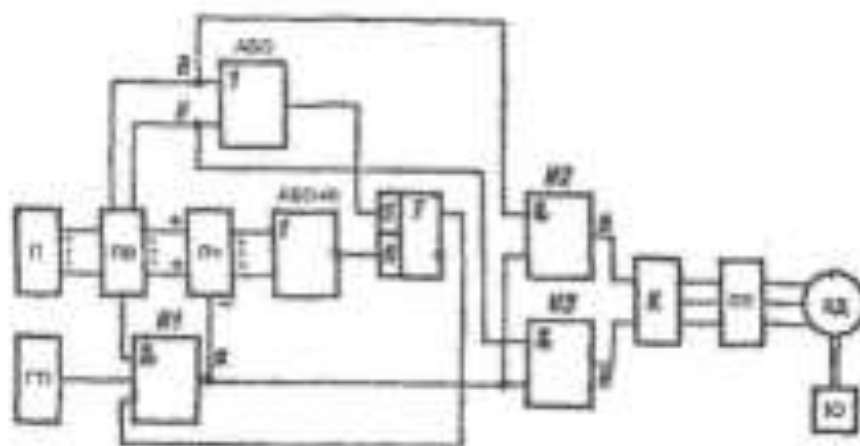


Рисунок 1.16 - Схема управління кроковим електроприводом із замкнутим принципом

Схема, подібна до розглянутої, може бути створена на основі замкнутого принципу. В такому випадку, рух виконавчого органу (ІО) контролюється імпульсним датчиком положення, а зниження рахунку в лічильнику відбувається через імпульси від датчика по каналу б (показано штриховими лініями на рисунку 1.15). В цьому варіанті, канал а від схеми І1 до лічильника вимикається. Однак, створення замкнутих систем ЧПУ з кроковими двигунами не завжди є

ефективним, оскільки покращені характеристики замкнених систем краще досягаються за допомогою регульованих двигунів безперервної дії.

Крокові двигуни мають меншу енергетичну ефективність порівняно з регульованими двигунами безперервної дії, тому їх використання при великих навантаженнях може бути неоправданим. До того ж, зі зростанням розмірів крокового двигуна зменшується допустима частота обертання, що призводить до збільшення кроку при заданій швидкості обертання, в результаті чого знижується якість обробки продукції [4].

1.6 Огляд програмного забезпечення для управління устаткуванням з числовим програмним забезпеченням

Mach3 - це програмне рішення для контролю ЧПУ машин, таких як фрезерні, гравірувальні, токарні станки, та інші. Воно використовується на комп'ютерах під управлінням Windows (див. рисунок 1.17).

Основні можливості та характеристики Mach3 включають:

- перетворення звичайного комп'ютера в контрольну станцію для 6-осьових ЧПУ машин;
- можливість імпорту DXF, BMP, JPG і HPGL файлів через вбудовану утиліту LazyCam;
- візуалізація G-кодів у графічному форматі;
- створення G-кодів у програмі LazyCam або через Wizard;
- налаштовуваний інтерфейс користувача;
- розробка власних M-кодів і макросів з використанням VB-скриптів;
- управління швидкістю обертання шпинделя;
- багаторівневе регулювання за допомогою реле;
- підтримка ручних генераторів імпульсів (MPG);
- можливість відеонагляду за процесом обробки;
- сумісність із сенсорними екранами;

					<i>MPMA23.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- інтерфейс користувача на повний екран.



Рисунок 1.17 – Вікно програми Mach3

Mach3 використовується для керування різними типами устаткування, включаючи:

1. Токарні станки;
2. Фрезерні станки;
3. Високошвидкісні деревообробні фрезерні станки;
4. Лазерні установки;
5. Плазмові різачки;
6. Гравірувальне обладнання.

Mach3 також включає вбудовані міні-програми, відомі як Wizard, що розширюють його функціональність, дозволяючи швидко виконувати стандартні операції обробки без використання складних CAD/CAM програм. Вони дозволяють виконувати різні операції, такі як зубонарізання, оцифрування, свердління, вибірка пазів, гравірування тексту, обробка стандартних контурів, поверхнева обробка та інші.

Mach4 є оновленою версією програмного забезпечення для ЧПУ управління. Ця версія, повністю нова у порівнянні з Mach3, підходить для різних типів верстатів, включаючи фрезерні, плазмові, лазерні, гравірувальні, токарні та інші.

Додаткові функції Mach4 включають:

- точнішу траєкторію руху інструментів;
- синхронізований рух у 6 координатних системах для складних деталей;
- ППЦ-технологію для багатокористувацької та віддаленої роботи;
- нову панель інструментів для перегляду та коригування траєкторії руху інструментів;
- удосконалення інтерфейсу з можливістю налаштування кнопок і індикаторів.



Рисунок 1.18 – Вікно програми Mach4

SigmaNEST є універсальним програмним забезпеченням САПР, яке фокусується на оптимізації процесів різання та штампування металів. Це комплексне рішення підтримує широкий спектр технологічного обладнання, включаючи плазмове, лазерне, газове, гідроабразивне різання, а також фрезерування, гільйотинне різання, штампування і гнуття труб та листового металу. Програма також ефективна для керування комбінованими машинами.

CutLeader - це багатоцільова програма CAD/CAM, яка часто використовується в ЧПУ системах для плазмового, лазерного, гідроабразивного, та газового різання. Це вважається однією з найефективніших програм у цих областях.

									Арк.
									36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	МРМА23.00.00.000ПЗ				

SheetCam - це САМ-програма, призначена для створення G-кодів для станків плазмового розкрою з ЧПУ. SheetCam ефективно працює з основними САМ-завданнями, включаючи фрезерування, гравіювання, лазерне, гідроабразивне та газокисневе різання. Програма містить необхідний набір функцій для професійного програмування обробки на станках ЧПУ (рисунок 1.19). SheetCam Standard є пакетом для створення управлінських програм G-кодів з простим та інтуїтивним інтерфейсом, здатним автоматично виявляти та повідомляти про помилки, що дозволяє користувачам швидко досягати високої якості результатів.

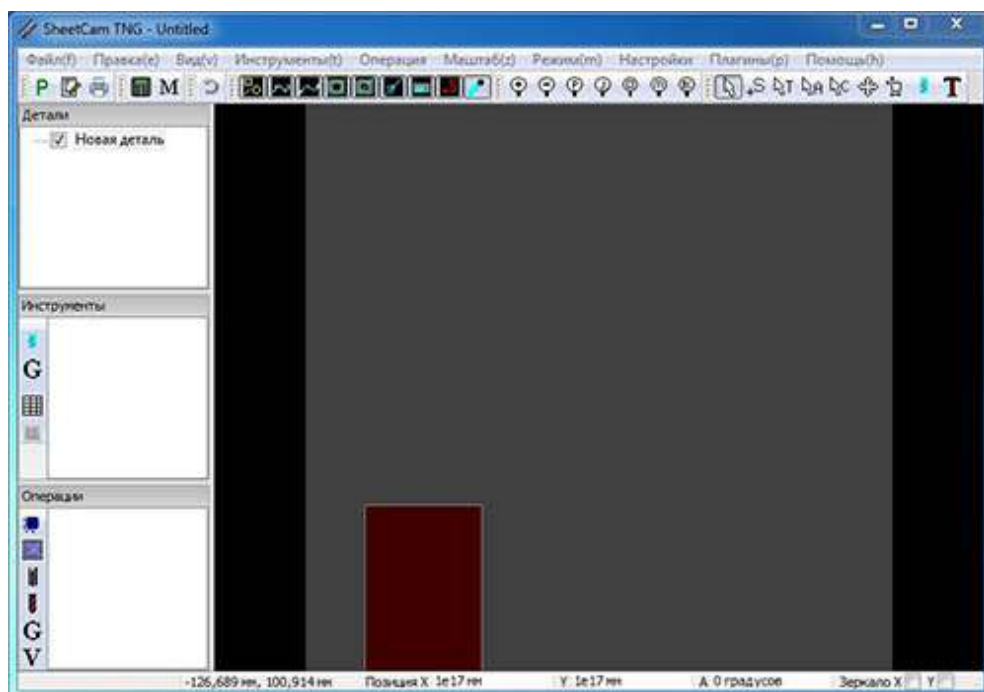


Рисунок 1.19 – Вікно програми SheetCam

SheetCam володіє широким набором функцій для 2.5D обробки деталей, що робить її зручною для проектування в різних сферах. Основні можливості SheetCam включають:

- імпорт даних у форматах DXF, HPGL та EMF;
- зчитування даних у форматі Excellon;
- налаштування параметрів станка і визначення точки абсолютного нуля;

					<i>MPMA23.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- введення параметрів деталі і визначення її нульової точки;
- візуалізація робочого простору станка і заготовки;
- розбивка малюнка на шари, якщо це не зроблено у CAD-системі;
- створення і редагування інструментальних таблиць;
- введення даних для зміни інструменту і команд керування;
- корекція траєкторії інструменту;
- оптимізація процесів плазмового різання;
- автоматичне розпізнавання і обробка островів у кишнях;
- автоматизоване свердління;
- різьбонарізання;
- вибір і використання різних інструментів;
- копіювання, дублювання, обертання, переміщення деталей для оптимізації розкрою;
- вирівнювання малюнків і ручна вставка G-кодів;
- 3D-візуалізація обробки;
- вибір постпроцесора для генерації УП;
- варіювання обробки за допомогою різних блоків;
- застосування DNC;
- збереження проектів для подальшого редагування.

BobCAD-CAM - це програмне забезпечення для CAD/CAM проектування та ЧПУ програмування, що мінімізує час програмування та обробки деталей. Воно підходить для роботи з різними типами машин, включаючи лазерні, плазмові та гідроабразивні, і включає:

- точне моделювання та розрахунок траєкторії інструменту;
- синхронізоване управління 6-осьовими системами координат;
- ПЦ-технологія для багатокористувацької та віддаленої роботи;
- розширені функції моделювання;
- Dynamic Machining Strategies™ для ефективного програмування.

					<i>MPMA23.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

SigmaNEST, CutLeader та SheetCam - це різні програми САПР/САМ, кожна з яких має свої унікальні можливості та застосування в області ЧПУ та обробки металів.



Рисунок 1.20 – Вікно програми BobCAD-CAM

1.7 Висновки до першого розділу

За результатами аналізу сучасних технологій та технічних розробок, було виявлено, що використання крокових двигунів як приводних елементів для механізмів, призначених для перфорування деталей, є перспективним рішенням.

					<i>MPMA23.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

2 РОЗРОБКА ПРИСТРОЮ З ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМ ПРИВОДОМ ДЛЯ ПЕРФОРУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ

2.1 Структурна схема установки

2.1.1 Загальні відомості про структурну схему

На етапі первинного проектування машини розробляється структурна схема, яка відображає загальний план будови обладнання, не уточнюючи окремих конструктивних деталей. Така схема візуально демонструє взаємодію між різними механізмами та системами управління, а також дає уявлення про розподіл енергії у машині [17].

Основою для створення структурної схеми служить технологічний план, який необхідно розробити до початку проектування. Важливо мати чітке розуміння процесу роботи машини і вибрати відповідні системи та інструменти для її механізації та автоматизації.

При розробці різних типів машин використовуються різні методи та інструменти для механізації та автоматизації як основних, так і допоміжних процесів. Застосовуються механічні, пневматичні, гідравлічні, електричні, електронні, напівпровідникові, акустичні, оптичні системи, а також їх комбінації.

Серед усіх систем, механічні є найпоширенішими. Основними механізмами механічних систем є важільно-шарнірні, важільно-кулачкові, прості та планетарні зубчаті передачі, пасові та ланцюгові передачі, які перетворюють обертальний рух двигуна в різні типи руху виконавчих органів. Однак, серед недоліків механічних систем є висока металоємність, значні динамічні навантаження та велика інерційність.

Системи механічного типу мають ряд обмежень, включаючи значну вагу конструкції, особливо при передачі руху на далекі відстані, великі динамічні

					<i>МРМА23.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

навантаження, а також високу інерційність механізмів, що може сповільнювати реакцію на зміни і обмежувати продуктивність машини.

У порівнянні з механічними, гідравлічні та пневматичні системи мають переваги, такі як швидке спрацювання, можливість передачі значних потужностей через невеликі трубопроводи, компактний і ефективний дизайн, стандартизацію компонентів, плавність руху робочих органів, простоту управління і регулювання швидкості, а також високу надійність і довговічність.

Однак, у гідравлічних і пневматичних системах також є свої недоліки, включаючи втрату точності у координації руху через витоки, зміну властивостей робочих рідин через температурні коливання, необхідність високої точності виготовлення окремих компонентів, потенційно шкідливий вплив робочих рідин на продукти і зниження ефективності через втрати робочих рідин.

Електричні системи відрізняються компактним дизайном, здатністю передавати енергію на значні відстані та ефективністю перетворення електроенергії в інші форми енергії. Проте, їхнім недоліком є менша надійність електричних з'єднань. Електронні та напівпровідникові системи, маючи обмежену потужність, зазвичай використовуються в автоматизації технологічних процесів. Оптичні системи знаходять застосування як у механізації (наприклад, лазерне різання), так і в автоматизації процесів.

Структура машин і обладнання варіюється від періодичної (циклічної) до безперервної дії. Машини з постійним рухом робочих органів мають пряме чи опосередковане з'єднання двигуна з робочими органами. Машини з циклічним рухом характеризуються операціями, що повторюються за певним циклом.

Структурні схеми апаратів бувають двох видів:

- нерухомі
- рухомі, залежно від наявності механічного обладнання.

Розробка структурної схеми машини зумовлена:

- вимогами технологічного процесу,

					<i>МРМА23.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- продуктивністю,
- габаритними розмірами
- та іншими факторами.

Цей процес включає вибір механізмів, тип двигуна, схему управління тощо. На структурних схемах використовуються умовні позначення для відображення обладнання, управління, робочих органів, ключових функціональних елементів, потоків інформації та іншого. Кожен вузол чи механізм позначається спеціальними символами (літерами або цифрами).

2.1.2 Структурна схема машини

Перед тим як приступити до створення мікроконтролерної системи управління електроприводом для обладнання перфорування, розглянемо конструкцію машини, оснащеної двовимірною координатною системою переміщення для виконання перфорування деталей, зокрема її структурну схему. Ця структурна схема зображена на рисунку 2.1 (лист [МРМА23.00.00.000С1]).

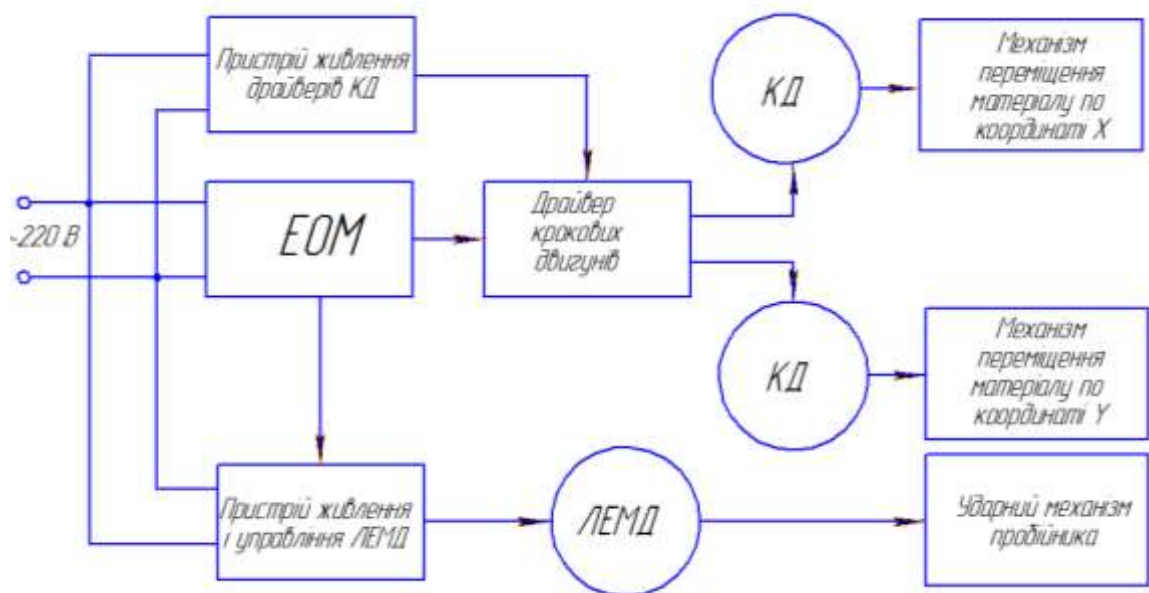


Рисунок 2.1 – Структурна схема машини з двох координатним переміщення для перфорування деталей

Структурна схема машини включає в себе наступні елементи: систему для переміщення деталей, що складається з двох механізмів для переміщення вздовж координат X і Y ; два крокові двигуни; драйвер для крокових двигунів; блок живлення для драйверів крокових двигунів; лінійний електромагнітний двигун (ЛЕМД) з ударним механізмом; блок живлення та управління лінійним електромагнітним двигуном; електронно-обчислювальний пристрій (ЕОМ).

2.2 Двохкоординатна система переміщення деталей

Механізм переміщення деталей по координатах X та Y .

В механізмі переміщення деталей за координатами X та Y застосовано гвинти, підшипники та було виготовлено спеціальні деталі із закріпленими гайками. Основні елементи такої системи наведено на рисунку 2.2, 2.3.



Рисунок 2.2 – Гвинтова пара в зборі

					МРМА23.00.00.000ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



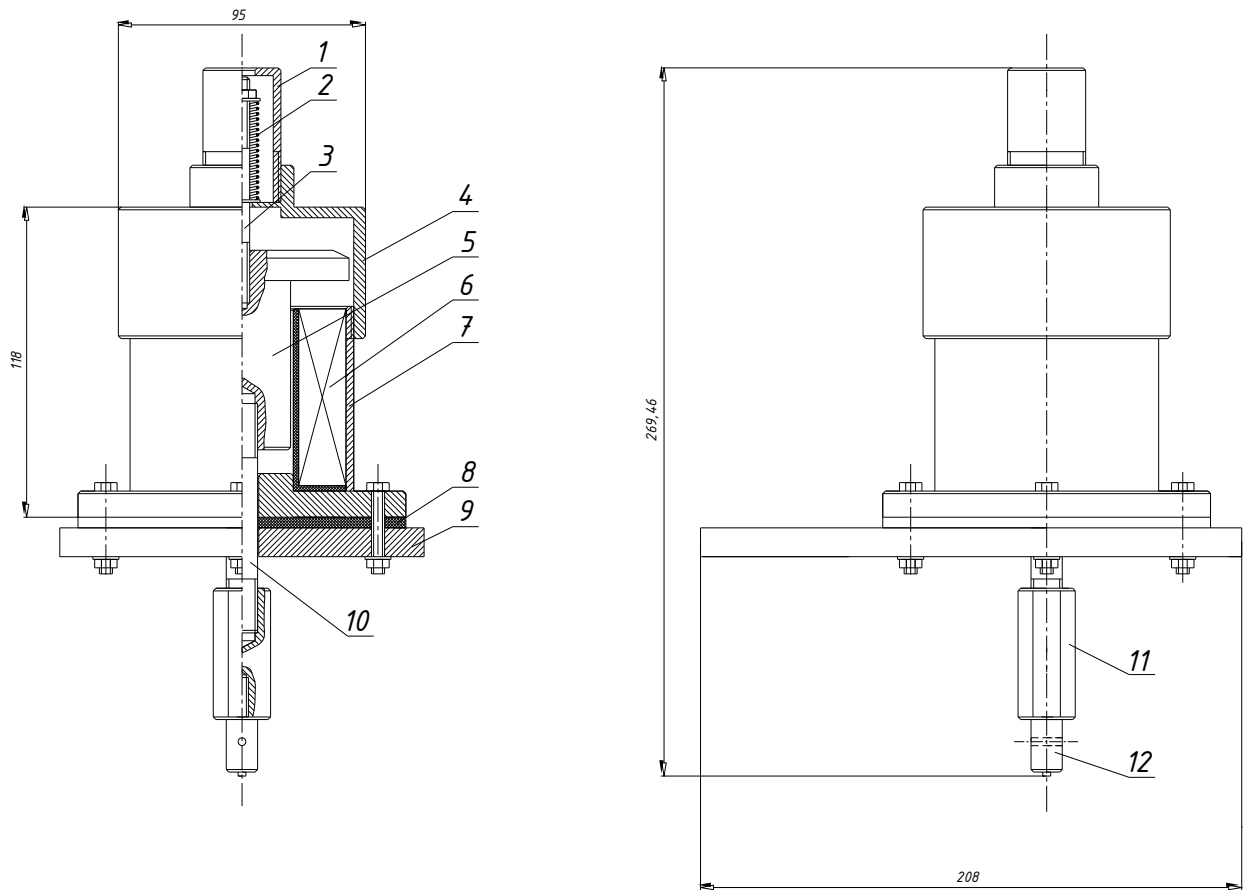
Рисунок 2.3 – Напрямна для переміщення ЛЕМД

2.3 Розробка конструкції ЛЕМД

Конструкція лінійного електромагнітного двигуна була розроблена для виконання функції приводу пробійника, призначеного для перфорації деталей верху взуття. Цей двигун монтується на станину розроблюваної машини та закріплюється на ній (рисунок 2.4 (лист [МРМА23.00.00.000В3])).

Робота електромагнітного двигуна полягає в наступному: коли до котушки 6 подається імпульс напруги з блоку живлення та управління, у котушці створюється електромагнітне поле, яке генерує електромагнітну силу. Ця сила втягує якір 5 з прикріпленим пробійником 12 усередину, здійснюючи при цьому стискання пружини 2. Коли пробійник досягає деталі взуття, відбувається її пробивання. Після припинення подачі напруги, рухома частина електромагнітного двигуна під впливом стиснутої пружини повертається у вихідне положення.

					<i>МРМА23.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44



1-кришка пружини; 2-пружин; 3-стержень верхній; 4-кришка; 5-якор; 6-катушка; 7-корпус; 8-прокладка; 9-плита верхня; 10-стержень нижній; 11-перехідник; 12-пробійник

Рисунок 2.4 - Лінійний електромагнітний двигун:

2.4 Розрахунок пружини лінійного електромагнітного двигуна

У однообмоточних лінійних електромагнітних двигунах (ЛЕМД), застосовуваних у приводах пресового устаткування, активний рух якоря та пов'язаного з ним інструменту здійснюється за допомогою електромагнітних сил. Ці сили генеруються, коли на обмотку двигуна подається імпульс напруги. Зворотний хід якоря до вихідного положення відбувається за рахунок циліндричної гвинтової поворотної пружини стиснення (див. рисунок 2.5).

					<i>МРМА23.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

Така конструкція породжує необхідність розробки методики розрахунку пружини, що забезпечує повернення рухомих частин ЛЕМД у встановлений час.

Для розрахунку та вибору зворотної пружини в однообмоточному ЛЕМД, який використовується як привід ударної машини, основними вихідними даними є: максимальна частота роботи n , маса рухомих частин двигуна та технологічного

Дано: $n = 90$ ход/хв.; $m = 0,82$ кг; $h = 15$ мм; $V_0 = 5,5$ м/с; $D = 9,63$ мм ≈ 10 мм.

Двигун встановлено вертикально.

1 Визначаємо час повертання якоря ЛЕМД:

$$T_B = (0,02 \dots 0,04)(60/n) \quad (2.1)$$

де n – частота ходів двигуна, $n = 40$;

$$t_B = 0,025 \cdot (60/40) = 0,017 \text{ с.}$$

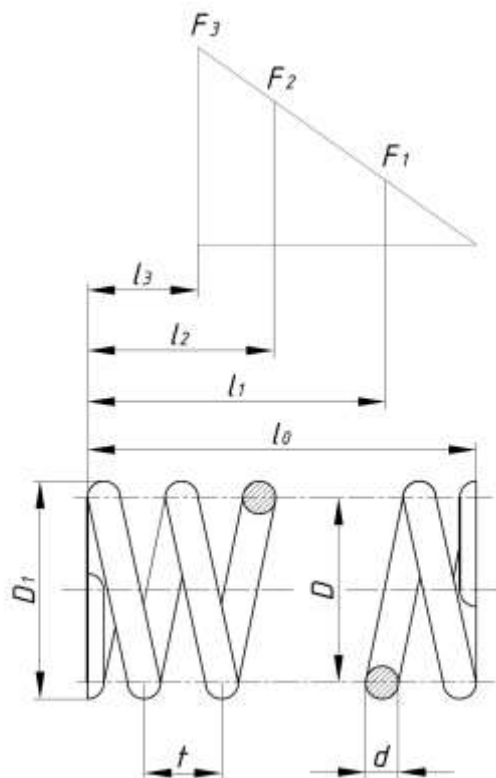


Рисунок 2.5 – Зворотна пружина електромагнітного пристрою

					<i>МРМА23.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

2 Задаємося величиною відносного інерційного зазору пружини стиснення [7]:

$$\delta=0,05\dots0,25$$

3 Розраховуємо силу пружини P_1 при попередній деформації, що викликається вагою рухомих частин:

$$P_1=mg\cos\alpha \quad (2.2)$$

де $m=0,82$ кг – маса рухомих частин лінійного електричного приводу;

α – кут нахилу двигуна до вертикалі;

g – прискорення вільного падіння.

Так як $\alpha=0$ в нашому випадку, то:

$$P_1=mg=0,82\cdot9,8=8,036 \text{ Н.}$$

4 Розраховуємо силу пружини при робочій деформації здійснюємо за формулою:

$$P_2 = (mh / t_g^2) + P_1, \quad (2.3)$$

де h – максимальне переміщення кінця пружини,

$$P_2 = \frac{0,82\cdot0,015}{0,017^2} + 8,036 = 50,6 \text{ Н.}$$

5 Розраховуємо при максимальній деформації для крайніх значень δ силу пружини [7]:

					<i>МРМА23.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\delta = 1 - \frac{P_1}{P_3}. \quad (2.4)$$

Звідки:

$$P_3 = \frac{P_2}{1 - \delta}, \quad (2.5)$$

$$P_3 = \frac{50,6}{1 - (0,05 \dots 0,25)} = 53,26 \dots 67,47 \text{ Н.}$$

Беручи до уваги заданий діаметр $D=10$ мм та необхідність досягнення максимальної критичної швидкості, для вибору пружини ми звертаємось до таблиці 14 [7]. Вибір падає на пружину №283 з наступними характеристиками: максимальна сила стиску $P_3=75$ Н; діаметр використаного дроту $d=1,2$ мм; зовнішній діаметр пружини $D=10$ мм; жорсткість одного витка $z_1=29,820$ Н/м; максимальний прогин одного витка $s_3=2,515$ мм.

6 Визначаємо при крученні максимальне дотичне напруження:

$$\tau_3 \approx 0,5\sigma_B, \quad (2.6)$$

де $\sigma_B=2350$ Н/мм²;

$$\tau_3 \approx 0,5 \cdot 2350 = 1175 \text{ Н/мм}^2.$$

7 Розраховуємо критичну швидкість за формулою:

$$V_{кр} = \frac{\tau_3 \left(1 - \frac{P_2}{P_3}\right)}{\sqrt{2G\rho}}, \quad (2.7)$$

					<i>МРМА23.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

де $G=7,85 \cdot 10^4$ кгс/мм² – модуль зсуву,
 $\rho=8 \cdot 10^3$ кг/м³ – густина матеріалу для пружинної сталі,

$$V_{кр} = \frac{1175 \cdot \left(1 - \frac{50,6}{67,47}\right)}{\sqrt{2 \cdot 7,85 \cdot 10^4 \cdot 8 \cdot 10^3 \cdot 10^{-3}}} = 8,3 \text{ м/с.}$$

Визначаємо відношення за співвідношенням:

$$\frac{V_0}{V_{кр}} = \frac{5,5}{8,3} = 0,66 < 1.$$

Отже, пружина працює без зіткнення витків, що сприяє збільшенню її витривалості.

8 Визначаємо жорсткість пружини за формулою:

$$z = (P_2 - P_1) / n, \quad (2.8)$$

$$z = \frac{(50,6 - 8,036)}{15} = 2,84 \text{ Н/мм.}$$

9 Визначаємо число витків пружини з виразу:

$$n_1 = \frac{z_1}{z}, \quad (2.9)$$

$$n_1 = \frac{29,82}{2,84} = 10,5.$$

					<i>МРМА23.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Приймаємо $n_1=11$.

10 Розраховуємо уточнене значення жорсткості із співвідношення:

$$z' = \frac{z_1}{n_1}, \quad (2.10)$$

$$z' = \frac{29,82}{11} = 2,71 \text{ Н/мм.}$$

11 Розраховуємо повне число витків пружини за виразом:

$$n_1 = n + n_2, \quad (2.11)$$

де n_2 – число неробочих витків, $n_2=1,5$ [7].

$$n_1 = 10,5 + 1,5 = 12.$$

12 Розраховуємо діаметр пружини:

$$D_0 = D - d, \quad (2.12)$$

$$D_0 = 10 - 1,2 = 8,8 \text{ мм.}$$

13 Визначаємо попередню робочу та максимальну деформацію за виразом:

					<i>МРМА23.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

$$F_1 = \frac{P_1}{z}, \quad (2.13)$$

$$F_2 = \frac{P_2}{z}, \quad (2.14)$$

$$F_3 = \frac{P_3}{z}, \quad (2.15)$$

$$F_1 = \frac{8,036}{2,71} = 2,97 \text{ мм},$$

$$F_2 = \frac{50,6}{2,71} = 18,7 \text{ мм},$$

$$F_3 = \frac{67,47}{2,71} = 24,9 \text{ мм}.$$

14 Визначаємо висоту пружини у вільному стані H_0 , висоту пружини при попередній, робочій і максимальній деформації H_1 , H_2 , H_3 :

$$H_0 = H_3 + F_3, \quad (2.16)$$

$$H_1 = H_0 - F_1, \quad (2.17)$$

$$H_2 = H_0 - F_2, \quad (2.18)$$

$$H_3 = (n_1 + 1 - n_3)d, \quad (2.19)$$

					<i>MPMA23.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

де $n_3=1,5$ – число зашліфованих витків [7].

Тоді:

$$H_3 = (12 + 1 - 1,5) \cdot 1,2 = 13,8 \text{ мм},$$

$$H_0 = 13,8 + 24,9 = 38,7 \text{ мм},$$

$$H_2 = 38,7 - 18,7 = 20 \text{ мм},$$

$$H_1 = 38,7 - 2,97 = 35,73 \text{ мм}.$$

15 Визначаємо крок пружини із формули:

$$t_{II} = f_3 + d, \tag{2.20}$$

$$t_{II} = 2,515 + 1,2 = 3,715 \text{ мм}.$$

2.5 Загальний вигляд розробленої конструкції ЛЕМД

Відповідно до зроблених розрахунків всіх деталей двигуна, було здійснено його виготовлення. Всі деталі були зроблені із сталі 45.

Загальний вигляд отриманого ЛЕМД приведено на рисунку 2.6.

					<i>MPMA23.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52



Рисунок 2.6 – Фото розробленого лінійного електромагнітного двигуна

2.6 Виготовлення пробійників для виконання операції перфорування деталей

Для здійснення процесу перфорування деталей можна застосувати круглі пробійники і вирубну плиту. Пробійники, з ріжучими краями замкнутого контуру, можуть мати діаметри 2, 3, 4, 5, 6, 8 мм і виготовляються з сталі У7А. Вони характеризуються оптимальним кутом загострення 25° та відсутністю притуплення. Ці пробійники зображені на рисунку 2.7.

Вирубна плита, в свою чергу, виготовляється з полівінілхлориду, що є стандартним матеріалом для виготовлення вирубних плит, які застосовуються на електрогідравлічних пресах.

					<i>MPMA23.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53



Рисунок 2.7 - Пробійники для перфорування отворів у деталях

2.7 Висновки до другого розділу

У цьому розділі представлено обладнання з двовимірною системою переміщення, яка призначена для перфорування деталей. Докладно описано структурну схему цієї установки та її двохвимірну систему переміщення. В рамках розробки установки було сконструйовано лінійний електромагнітний двигун, для якого також був проведений розрахунок зворотної пружини. Окрім того, в розділі описані пробійники як робочі інструменти, що застосовуються для процесу перфорування деталей.

					MPMA23.00.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

3 РОЗРОБКА МІКРОКОНТРОЛЕРНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ПРИСТРОЮ ДЛЯ ВИКОНАННЯ ОПЕРАЦІЇ ПЕРФОРУВАННЯ

3.1 Вибір крокового двигуна для двохкоординатної системи переміщення деталей

3.1.1 Опис крокового двигуна двохкоординатної системи

Для двохкоординатної системи було обрано крокові двигуни з силою утримання 4 кг [13].

Технічні характеристики крокового двигуна NEMA17HS4401:

- сила утримання 40 Н*см;
- 1,8 градусів/крок;
- опір фази 1,5 Ом;
- струм 1,7 А;
- висота мотору 40 мм;
- індуктивність фази 2,8 мГ;
- діаметр валу 5 мм.

Загальний вигляд крокового двигуна NEMA17HS4401 показано на рисунку 3.1.



Рисунок 3.1 - Загальний вигляд крокового електричного двигуна NEMA17HS4401

					<i>МРМА23.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

Габаритне креслення крокового двигуна наведено на рисунку 3.2.

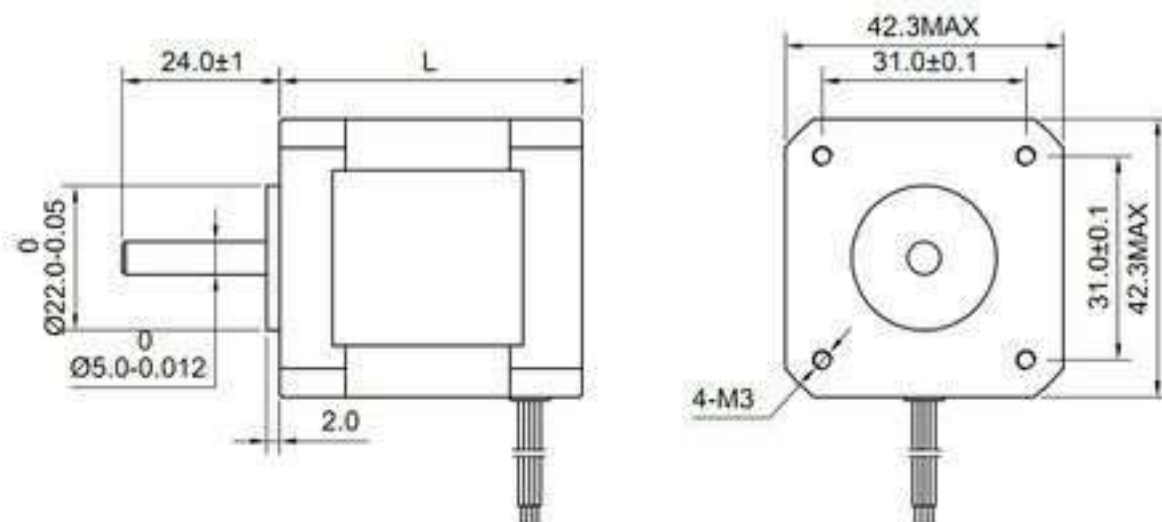


Рисунок 3.2 - Габаритне креслення крокового електричного двигуна NEMA17HS4401

Електрична схема підключення обмоток двигуна приведена на рисунку 3.2.

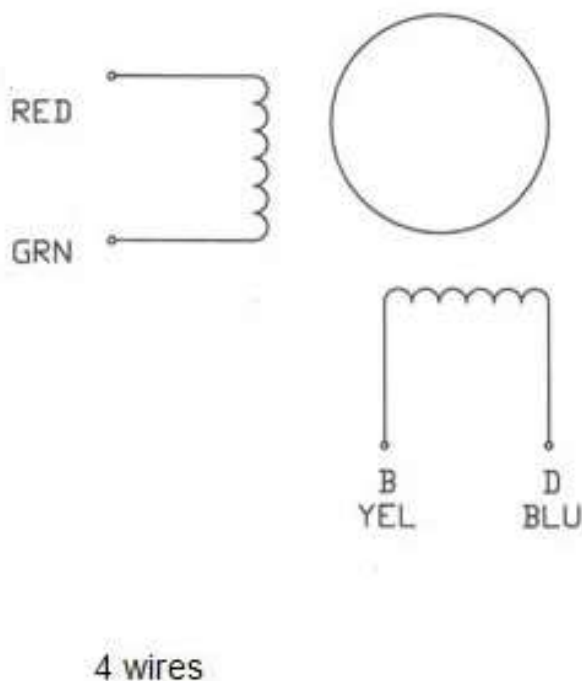


Рисунок 3.3 - Електрична схема підключення обмоток двигуна

Для забезпечення двох координатного переміщення робочого органу і столу вибрано 2 крокових електричних двигуна NEMA17HS4401 (рисунок 3.4).



Рисунок 3.4 – Вибрані електричні двигуни

3.2 Вибір драйвера крокового двигуна

3.2.1 Загальні відомості про драйвери крокових двигунів

Драйвер крокового двигуна представляє собою потужнісний модуль з вбудованим базовим інтерфейсом, заснованим на принципі "КРОК–НАПРЯМ". Цей пристрій виконує роль підсилювача потужності, перетворюючи електричні імпульси в рух вала двигуна, де кожен імпульс відповідає за здійснення одного кроку або мікрокроку.

Основні функції драйвера крокового двигуна включають:

Керування струмом в обмотках, змінюючи його величину та напрямок, що забезпечує надійну та стабільну роботу систем управління електроприводом.

Підтримання заданого рівня струму для оптимального функціонування.

					<i>МРМА23.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

Забезпечення швидкого наростання та спаду струму, що є ключовим для досягнення потрібних швидкісних параметрів двигуна, а також впливає на якість.

Активація та деактивація струму в обмотках двигуна та контроль напрямку його потоку. Таке регулювання дозволяє системам управління електроприводом функціонувати стабільно та ефективно.

Підтримання обраного рівня струму.

Забезпечення швидкого зростання та спаду струму, що важливо для досягнення оптимальних швидкісних характеристик двигуна, що в свою чергу покращує управління кроковим двигуном.

Драйвери крокових двигунів класифікуються за різними типами, що визначають потужність вала двигуна.

Технології виробництва крокових двигунів неперервно удосконалюються, щоб досягти максимального крутного моменту при мінімальних розмірах двигуна, покращити швидкісні можливості, збільшити ККД та точність. Одним із ключових аспектів вдосконалення є впровадження мікрокрокового режиму.

Контролери крокових двигунів, як правило, виготовляються на основі промислових мікроконтролерів і можуть бути як програмними, так і апаратними. Програмні контролери застосовуються у випадках з обмеженим колом завдань і є більш економічним варіантом порівняно з апаратними.

Контролери для крокових двигунів призначаються як для уніполярних двигунів, так і для інших типів. Вони можуть забезпечувати середній струм обмотки до 2,5 А. Контролер складається із силової частини (драйвер) та інтелектуальної частини, яка розширює можливості управління двигуном. Цей компонент має перевагу в передачі сигналів КРОК–НАПРЯМОК.

Переваги використання контролерів крокових двигунів включають:

1. Комп'ютерне управління: Різні моделі контролерів можуть підключатися до комп'ютера, дозволяючи налаштування та управління за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення.

					<i>МРМА23.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

2. Гнучкість використання: Контролери крокових двигунів можна багаторазово перепрограмувати, що дає можливість адаптувати їх до нових завдань або змін у виробничих процесах без необхідності придбання нового обладнання.

3. Широкий вибір моделей: Широкий асортимент контролерів від вітчизняних та зарубіжних виробників з різними функціями дозволяє підібрати обладнання, яке найкраще відповідає конкретним технологічним вимогам. Багато сучасних моделей включають програмований логічний контролер, що дозволяє використовувати пристрій в автономному режимі з вбудованою програмою для специфічних технологічних процесів.

Пристрої керування електроприводом з контролерами крокових двигунів виконують наступні основні функції:

1. Забезпечення високої точності переміщення, завдяки здатності до виконання до 20000 кроків за оберт, особливо у режимі мікрокроку. Це дозволяє точно контролювати положення вала двигуна.

2. Інтеграція з програмним забезпеченням, таким як Kcam і Mach, дозволяє управління електроприводом з комп'ютера.

3. Робота в різноманітних режимах, включаючи on-line (пряме управління з комп'ютера) і off-line (автономна робота з використанням програм, завантажених з зовнішніх пристроїв, наприклад, флеш-накопичувача), а також комбінований режим для гнучкої адаптації до різних виробничих завдань.

4. Блок управління кроковим двигуном, який забезпечує живлення двигуна, дроблення основного кутового кроку та комутацію фаз двигуна. Цей блок підтримує як ручне, так і автоматичне керування.

5. Можливість програмування та синхронізації з іншими пристроями, що надає додаткову гнучкість у використанні та інтеграції з різними виробничими процесами.

					<i>MPMA23.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

6. Підключення до комп'ютера через LPT- або СОМ-порти для отримання команд керування, а також можливість автономної роботи в автоматичному режимі без зовнішнього контролера.

7. Ручне керування, де швидкість і напрямок руху можуть регулюватися за допомогою потенціометра та датчика реверсу.

Керування кроковими двигунами варіюється залежно від конкретного типу двигуна, що використовується, і обраного методу управління. Основні методи керування електроприводами включають:

1. Одиночний імпульсний режим: Цей метод є одним з найпростіших способів управління кроковим двигуном. Він включає активацію лише однієї котушки за раз. Для виконання повного обороту ротора потрібно 48 імпульсів, де кожен імпульс зміщує ротор на 7,5 градусів.

2. Подвійний імпульсний режим: У цьому методі одночасно активуються дві сусідні котушки. Так само, як і в попередньому способі, для повного обороту ротора необхідно 48 імпульсів, проте кожен імпульс також рухає ротор на 7,5 градусів.

3. Комбінований імпульсний режим: Цей метод поєднує в собі особливості одиночних та подвійних імпульсних режимів. У цьому випадку для повного обороту ротора потрібно 96 імпульсів, де кожен імпульс забезпечує переміщення ротора на 3,75 градуса.

Вибір методу керування залежить від конкретних вимог до точності, швидкості та ефективності роботи крокового двигуна в різних умовах виробничого процесу.

3.2.2 Вибір драйвера крокових двигунів

Для управління кроковими двигунами обрано драйвер біполярного крокового двигуна, заснований на чіпі А4988 від компанії Allegro (рисунок 3.5). Цей драйвер має властивості обмеження струму, захисту від перевантаження

					<i>МРМА23.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

струмом та перегріву. Він підтримує п'ять різних налаштувань мікрокроків, включаючи можливість встановлення до 1/16 кроку. Драйвер ефективно працює при напрузі на двигуні від 8 до 35В, забезпечуючи пропускання струму до 1А на фазу без необхідності додаткового охолодження, або до 2А з активним охолодженням.



Рисунок 3.5 – Загальний вигляд крокового двигуна

Електрична схема драйвера крокового двигуна приведена на рисунку 3.6 (лист [MPMA23.00.00.000E2]).

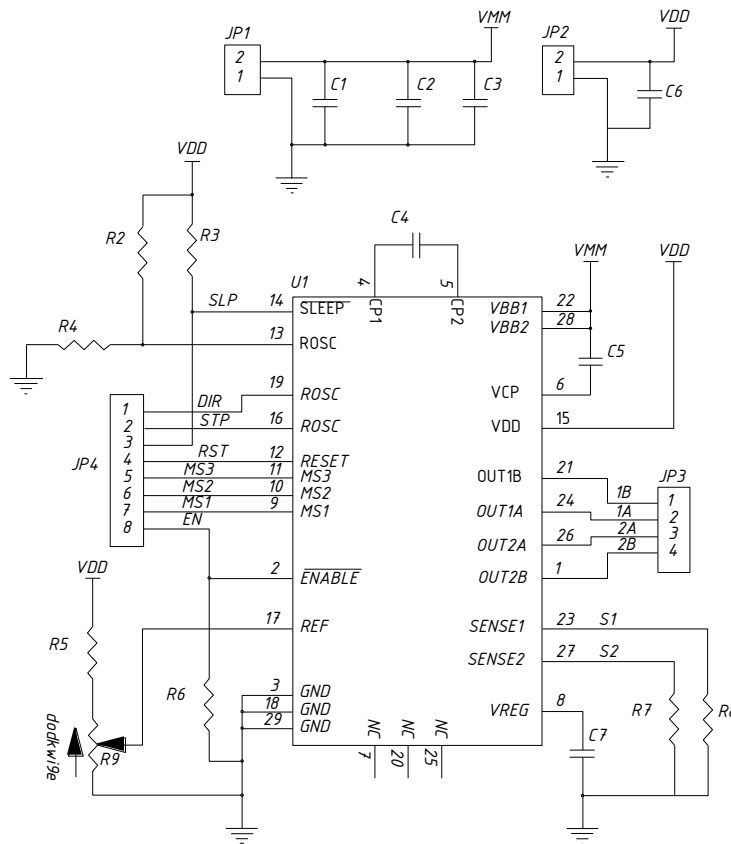


Рисунок 3.6 - Електрична схема драйвера крокового двигуна

					MPMA23.00.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

Підключення портів Arduino UNO показано на рисунку 3.8.

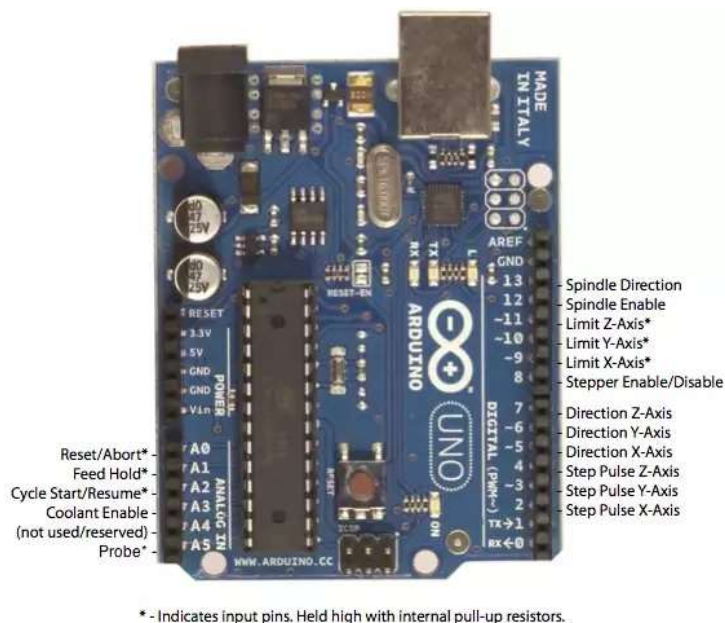


Рисунок 3.8 - Підключення портів плати Arduino UNO

На рисунку 3.9, 3.10 показано схеми підключення Arduino UNO (лист [MPMA23.00.00.000ДІ1], [MPMA23.00.00.000ДІ2]).

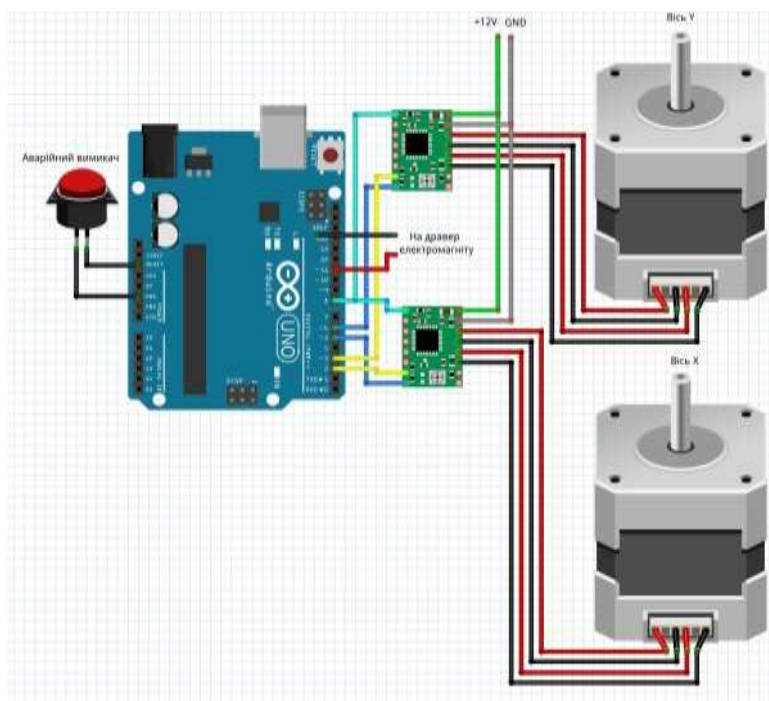


Рисунок 3.9 – Схема підключення контролера Arduino UNO

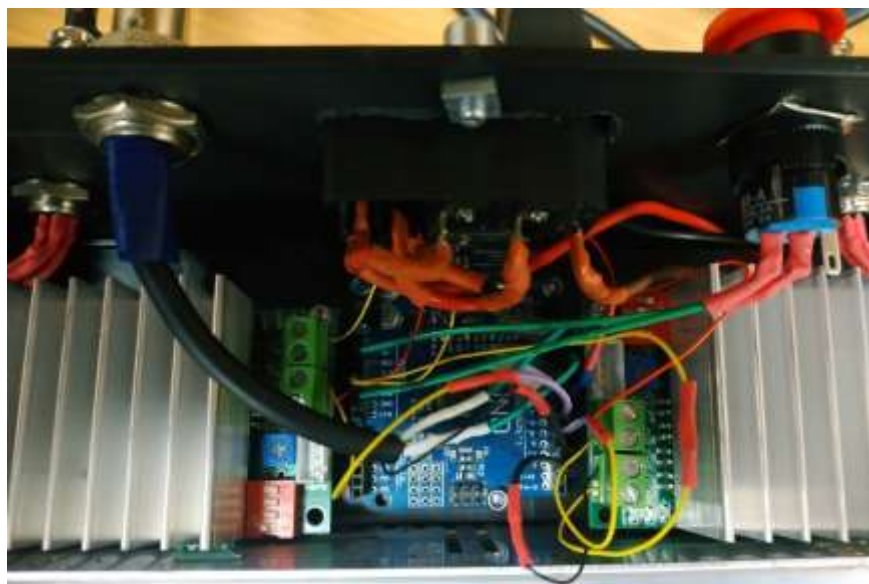


Рисунок 3.10 - Підключення контролера Arduino UNO

3.4 Пристрій живлення драйверів крокових двигунів

3.4.1 Загальні відомості про пристрої живлення

Блок живлення (БЖ) є важливим компонентом електричних систем, призначеним для створення потрібної напруги та струму для навантаження. Ці пристрої бувають різними: автономні та неавтономні, стабілізовані та нестабілізовані, з фільтрацією та без неї, а також з захистом або без нього. Є два основних типи блоків живлення: трансформаторні та імпульсні [15].

Трансформаторний БЖ складається з декількох елементів. Первинна обмотка понижувального трансформатора призначена для роботи з мережевою напругою. Далі йде випрямляч, який перетворює змінну напругу у постійну. Випрямляч може бути однопівперіодним (один діод) або двопівперіодним (діодний міст з чотирьох діодів). Існують також інші типи випрямлячів, наприклад, для подвоєння напруги. Після випрямляча стоїть фільтр, який вирівнює пульсації напруги, зазвичай він являє собою конденсатор великої ємності. В схемі можуть також бути інші компоненти, такі як фільтри для

					<i>МРМА23.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

видалення високочастотних перешкод, захист від короткого замикання, стабілізатори напруги та струму.

Імпульсні блоки живлення працюють за принципом перетворення мережевої напруги у високочастотну, використовуючи метод широтно-імпульсної модуляції. Це забезпечує їм високу ефективність.

Процес починається з перетворення мережевого струму (220 В, 50 Гц) в високочастотний (близько 60 кГц) за допомогою наступних компонентів:

Вхідний фільтр: Видаляє високочастотні перешкоди, створені під час роботи.

Випрямляч: Перетворює змінну напругу в постійну.

Електролітичний конденсатор: Вирівнює пульсації напруги.

Перетворювач напруги: Перетворює постійну напругу в високочастотну змінну.

Імпульсний трансформатор у перетворювачі забезпечує гальванічну розв'язку від мережі та зниження напруги до потрібних значень. Відрізняється від звичайних трансформаторів меншою кількістю витків і феритовим сердечником.

Напруга з трансформатора подається на вторинний випрямляч та високочастотний фільтр, який складається з електролітичних конденсаторів і індуктивностей для стабілізації напруги.

Імпульсний блок живлення споживає стільки енергії з мережі, скільки необхідно для заданого навантаження. Якщо споживана потужність навантаження перевищує потужність, на яку розрахований блок, він може вийти з ладу через перегрів. Тому важливою є наявність датчика вихідної потужності та захисної схеми, яка відключає блок у випадку перевищення максимальної потужності.

					<i>МРМА23.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

3.4.2 Опис пристрою живлення драйверів крокових двигунів

Для живлення драйверів крокових двигунів застосовано модифікований блок живлення з комп'ютера, адаптований до електричних вимог драйверів крокових двигунів. Ця переробка дозволила налаштувати блок живлення таким чином, щоб він відповідав специфічним потребам драйверів у енергопостачанні (див. рисунок 3.10).



Рисунок 3.10 – Загальний вигляд пристрою живлення драйверів крокових двигунів

3.5 Розробка пристрою живлення та управління роботою ЛЕМД

Було розроблено спеціальний пристрій для живлення і керування лінійним електромагнітним двигуном, електрична схема якого зображена на рисунку 3.13. Цей пристрій складається з силового тиристора VS1 і мікропроцесора DD1, який контролює логіку управління. Регулювання

					<i>МРМА23.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

потужності удару досягається за допомогою резистора R9, тоді як резистор R10 дозволяє налаштувати частоту ударів – від поодиноких ударів до 400 ударів на хвилину. Пристрій також оснащений системами захисту. Сила удару лінійного електромагнітного двигуна залежить від напруги в джерелі живлення постійного струму і можливості переміщення якоря, здатна досягати у десять разів вищих значень від статичної сили. Час реагування двигуна варіюється від 0,3 до 10 мілісекунд, залежно від прикладеної напруги.

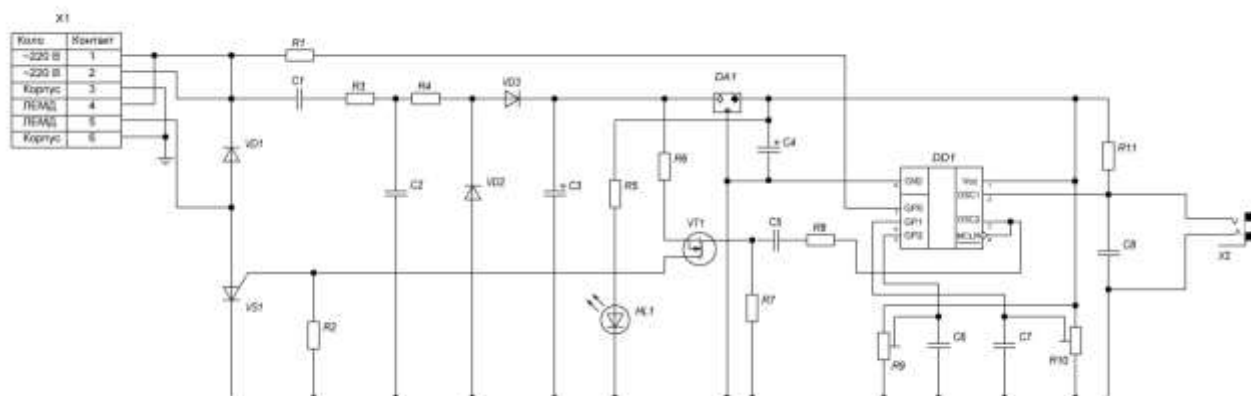


Рисунок 3.13 – Електрична схема пристрою живлення та управління ЛЕМД

До роз'єму X1 пристрою підключаються мережа 220 В змінного струму та лінійний електромагнітний двигун (ЛЕМД). Керування активацією двигуна відбувається через підключення педалі управління до роз'єму X2. При активації педалі, мікроконтролер DD1 отримує сигнал і відповідно до своєї програми відправляє команду на відкриття польового транзистора VT1, який у свою чергу керує тиристором VS1.

Для можливості програмного управління цим пристроєм потрібно ввести гальванічну розв'язку між пристроєм живлення та управління ЛЕМД та електронно-обчислювальною машиною (ЕОМ). З цією метою в схему включений оптрон U1 (зображення схеми на рисунку 3.14) (лист



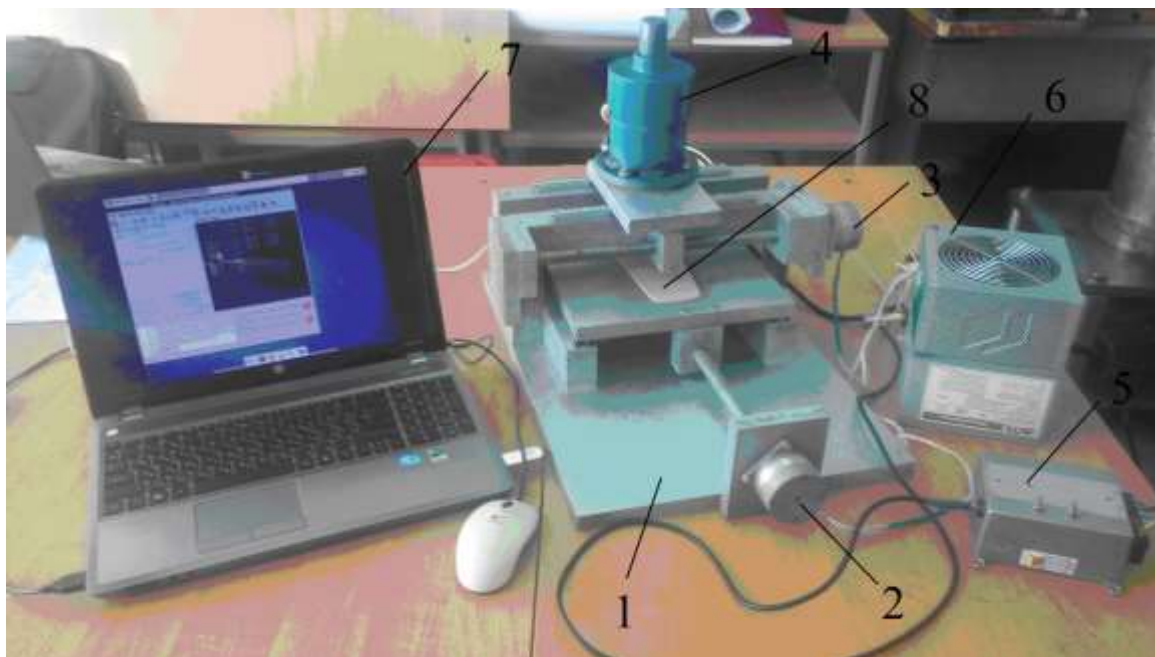
Рисунок 3.15 – Фото розробленого пристрою живлення та керування ЛЕМД

3.6 Розробка програмного забезпечення керування роботою установки з двохкоординатною системою переміщення

Програма для управління машиною з двовимірною системою переміщення була розроблена використовуючи програмне забезпечення GRbl (рисунок 3.16, лист [MPMA23.00.00.000ДІ5]).

Controller версії 3.6.1. Ця програма призначена для відправки G-коду на обладнання з ЧПУ (числовим програмним управлінням).

					MPMA23.00.00.000ПЗ	Арк.
						69
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



1 – рама; 2-система переміщення по координаті Y; 3-система переміщення по координаті X; 4- електромагнітний двигун; 5-пристрій живлення і керування ЛЕМД; 6-пристрій живлення драйверів крокових двигунів; 7-ЕОМ; 8-деталь

Рисунок 3.18 - Загальний вигляд установки з двох координатною системою переміщення для перфорації деталей

3.8 Висновки до третього розділу

Цей розділ охоплює процес створення мікроконтролерної системи управління для апарату з двовимірною системою переміщення, призначеного для перфорування деталей. В рамках цього проекту здійснюється підбір відповідних крокових двигунів, контролерів і драйверів для управління ними. Також розробляються блоки живлення для цих електричних компонентів. Крім того, створюється спеціалізоване програмне забезпечення, яке використовується для реалізації процесу перфорування деталей за допомогою цієї установки.

										Арк.
										71
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	МРМА23.00.00.000ПЗ					

ВИСНОВКИ

У першому розділі магістерської роботи виконано детальний огляд та аналіз сучасних технологічних і технічних рішень, що стосуються автоматизації процесів перфорації деталей. Описано основні аспекти процесу перфорування та представлено структуру та класифікацію автоматизованих електроприводів. Окрема увага приділяється кроковим двигунам, їхнім основним типам та схемам управління. Також розглянуто програмне забезпечення, яке застосовується для контролю обладнання з числовим програмним забезпеченням. На основі цього аналізу виявлено перспективність використання крокових двигунів для автоматичного перфорування деталей, визначено додаткові завдання для дослідження.

Другий розділ присвячено детальному опису машини з двовимірною системою переміщення для перфорування деталей. Описуються основні компоненти машини, включаючи робочий стіл, систему переміщення, лінійний електромагнітний двигун з ударним механізмом та системи керування і живлення.

Третій розділ зосереджений на розробці мікроконтролерної системи управління для виконання операції перфорування деталей з використанням двовимірної системи переміщення. В цьому контексті вибираються відповідні крокові двигуни, контролери та драйвери. Розробляються відповідні блоки живлення для електричних компонентів, а також створюється програмне забезпечення для управління цією установкою.

					<i>МРМА23.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		72

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Універсальний довідник взуттєвика: навч. посібник / В. П. Коновалова [та ін.]. – К. : Лібра, 2005. – 720 с.
2. Обладнання та верстати для виробництва, пошиття та ремонту взуття [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://ribeldi.com/prodazh_obladnannya_ta_verstativ
3. О.С. Поліщук, О.П. Бурмістенков, А.К. Кармаліта. Методи і засоби, що визначають використання пресового обладнання в легкій промисловості / Вісник Хмельницького національного університету. №3. '2013. С.215 – 225.
4. A press for cutting out shoe parts [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.atom-uk.com/>.
5. Macchine per calzature e pelletteria [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.sagitta.it/>.
6. Механічна технологія та устаткування швейних виробництв : лаборатор. практикум для студ. спец. «обладнання легкої промисловості та побутового обслуговування», «технологія швейних виробів». Ч. 2 / П. Г. Капустенський, Е. А. Манзюк, О. С. Поліщук, С. П. Лісевич. – Хмельницький : ХНУ, 2008. – 155 с.
7. О.С. Поліщук, Е.А. Манзюк. Колючо-ріжучі механічні операції в підготовчих процесах швейно-взуттєвих виробництв. Вісник Хмельницького національного університету. №4. '2013. – С.35-37.
8. Кармаліта А.К., Поліщук О.С., Прибега Д.В. Дослідження процесу вирубання деталей взуття в статичному режимі // Вісник Технологічного університету Поділля. – 2003. – № 6 Ч. 1, Т. 2. – С. 199 – 202.
9. Прибега Д. В. Удосконалення технології розкрюювання та перфорування верху взуття: дис. канд. техн. наук., Хмельницький ХНУ 2006.

					<i>МРМА23.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

10. Поліщук О.С. Електромеханічне пресове обладнання на підприємствах легкої промисловості: монографія / О.С. Поліщук. – Хмельницький: Видавництво PolyLux, 2018. – 285с.

11. Гурін В.А., Востріков В.П., Кузьмич Л.В. Основи промислових технологій і матеріалознавства: навч. Посібник. – Рівне: НУВГП, 2019. – 310с.

12. Поліщук О.С. Наукові основи проектування електромеханічного пресового обладнання легкої промисловості: дис... д- ра техн. наук: 05.05.10 / Київський національний ун-т технологій та дизайну. - К., 2019. – 372с.

13. Драйвери крокових двигунів [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://cnc-market.in.ua/category/2235239>.

14. Контролери і драйвери двигуна [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://gsm-komplekt.ua/ua/category/kontrollery-i-drajvery-dvigatelya/>.

15. Блок живлення [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://studopedia.org/3-168432.html>.

16. Крокові двигуни для ЧПУ та їх властивості [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://cnc-market.in.ua/tehnicheskie-danye/krokovy-dviguni>

17. Крокові двигуни [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://em.fea.kpi.ua/images/doc_stud/distsiplini/brem/BREM_Lekciya_10.pdf

18. Двигун кроковий / 4SHG-023A 39S / 2.3V / Japan [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://int.com.ua/index.php?route=product/product&product_id=2610

19. 3. Кармаліта А.К., Поліщук О.С. Визначення впливу швидкості вирубування на технологічне зусилля та на якість лінії різь. “Вісник технологічного університету Поділля” - Хмельницький: ТУП 1998 №1 Ч.1.- С.54-57.

20. Хоменко Л.М. Обладнання швейного виробництва: Навчально-методичний посібник . –Умань: ВПЦ «Візаві», 2011. -132 с.

21. Обладнання швейного виробництва [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://studfile.net/preview/2413363/page:3/>.

					<i>МРМА23.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		74

22. Кармаліта А.К., Поліщук О.С. Перспективи застосування електромагнітних приводів в легкій промисловості. “Вісник технологічного університету Поділля”-Хмельницький: ТУП 1997 №1 Ч.2.-С.131-133.

23. Поліщук О.С., Кармаліта А.К., Абрамов О.О., Нікітін О.О. Експериментальне визначення швидкості якоря електромагнітного преса. “Вісник технологічного університету Поділля”-Хмельницький: ТУП 1998 №4 Ч.2.-С.75-77.

24. Машины й устаткування для виробництва взуття [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://surl.li/ontim>

25. Формули фізики [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.matematika.com.ua/formuli-fiziki/>

26. Загальна електротехніка. Навчальний посібник [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://learn.ztu.edu.ua/pluginfile.php/32239/mod_resource/content/1/Matviichuk_AJ_Elektrotehnika_posibnik_2017.pdf

27. Електротехніка та основи електроніки [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://lib.imzo.gov.ua/pdruchniki-ta-navchaln-posbniki-dlya-zdobuvachv-profesyno-profesyno-tekhchno-osvti/pdruchnik-yelektrotekhnika-ta-osnovi-elektronki-gurzhy-am-meshchannov-sk-nelga-at-spvak-vm/>.

28. К.В. Трубіцин, К.К. Победаш. Промислова електроніка. Конспект лекцій. - К: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 228с.

29. Електротехніка та електроніка [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://web.kpi.kharkov.ua/ze/wp-content/uploads/sites/146/2022/02/Elektrotehnika_elektronika-_2021.pdf.

30. Будіщев М. С. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка. Підручник. - Львів: Афіша, 2001. - 424 с.

31. T. Kenjo, A. Sugawara, Stepping Motors and Their Microprocessor Controls, 2nd Edition, Oxford University Press, Oxford, 2003.

					<i>МРМА23.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		75

32. P. Acarnley, Stepping Motors - A guide to theory and practice, 4th Edition, The Institution of Electrical Engineers, London, 2002.

33. Поджаренко В.О., Кучерук В.Ю., Севастьянов В.М. Основи мікропроцесорної техніки. Навчальний посібник. - Вінниця: ВНТУ, 2006. - 226 с.

34. Карпенко Б.К., Ларченко В.І., Прокоф'єв Ю.А. Крокові електродвигуни.- К .: Техніка, 1972.

35. Deb A., Sarcar G., Sen S.K. Linearly pulse-width modulated block pulse functions and their application to linear SISO feedback control system identification // IEE Proc. – Control Theory Appl. – 1995. – 142, №1. – P.44-50.

36. Козловський А.В., Кухарчук В.В., Поджаренко В.О. Мікропроцесорні засоби вимірювання контролю обертового моменту: Монографія. - Вінниця: УНІВЕРСУМ, 2005. – 125 с.

					<i>МРМА23.00.00.000ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		76

Додатки

					МРМА23.00.00.000ПЗ	Арк.
						77
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		