

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет електроенерготехніки та автоматики

Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

«На правах рукопису»
УДК 621:313

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри

(підпис) Сергій КОВБАСА

“ ____ ” _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

**за освітньо-професійною програмою «Електромеханічні системи
автоматизації, електропривод та електромобільність»**

зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

на тему:

«Автоматизований електропривод верстату для лазерного гравірування»

Виконав (-ла): студент (-ка) 6 курсу, групи ЕП-21мп

Швець Володимир Сергійович
(прізвище, ім'я, по батькові)

Науковий керівник

доц., к.т.н. Віталій ТЕРЯЄВ
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я, по-батькові)

Консультант

(назва розділу) (посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я, по-батькові) (підпис)

Рецензент

доц. к.т.н. Гераскін Олександр Анатолійович
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ім'я, по-батькові)

(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент (-ка) _____

(підпис)

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Факультет електроенерготехніки та автоматики
Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма – «Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність»

ЗАТВЕРДЖУЮ
 Завідувач кафедри
 Сергій КОВБАСА
 (підпис)

«__» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту

Швець Володимир Сергійович _____
 (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації «Автоматизований електропривод верстату для лазерного гравірування»

науковий керівник дисертації Теряєв Віталій Іванович к.т.н доцент _____,
 (прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «__» _____ 20__ р. № _____

2. Строк подання студентом дисертації 10.01.2024 _____

3. Об'єкт дослідження Автоматизований електропривод верстату для лазерного гравірування

4. Вихідні дані: Передаточне число редуктора 1; Крок гвинта 0.001 м; Швидкість швидкого ходу 10 м/хв; Максимальна швидкість робочої подачі 4 м/хв; Мінімальна швидкість робочої подачі 0.1 м/хв; ККД коробки подачі 1; ККД гвинтової пари 0.9; Маса рухомого вузлу верстату 4.4 кг; Коефіцієнт тертя в напрямних 0.03; Діаметр ходового гвинта 0.008 м; Довжина гвинта 0.2 м; Час розгону до V_{bx} 0.1 с; Тривалість вмикання 100%

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: 1. Аналітичний огляд в області сучасних верстатів для лазерної обробки металів. 2. Розрахунок потужності електродвигуна та вибір силового обладнання 3. Розробка структурної схеми. Синтез системи керування електроприводом 4. Дослідження статичних і динамічних характеристик електропривода 5. Старт-проект. Економічне обґрунтування технічних рішень

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: 1. Загальний вид установки; 2. Схема електрична принципова; 3. Кінематична схема; 4. Схема підключень; 5. Конструкція шафи керування; 6. Результати моделювання

7. Орієнтовний перелік публікацій: стаття на тему: Автоматизований електропривод верстата для лазерного гравірування. Міжнародний науково-технічний журнал "Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики". Київ, 2023, 6 с.

8. Консультанти розділів дисертації

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

9. Дата видачі завдання 3 жовтня 2023 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання	Примітки
1	Вступ(актуальність, предмет, об'єкт, методи дослідження, новизна, практична цінність) Аналітичний огляд в області сучасних верстатів для лазерної обробки металів: - приклади сучасних верстатів для лазерної обробки (ілюстрації, системи приводу, короткі тех. х-ки); - принципи побудови пристроїв для лазерної різки та гравірування; - опис конкретної технологічної установки (загальний вид, кінематична схема, функц. схема існуючого ЕП); - постановка задачі модернізації, розробка вимог до електроприводу, систем керування та автоматизації	15.10.2023	
2	Розрахунок потужності електроприводу, вибір електродвигуна, пристрою керування та засобів автоматизації	31.10.2023	
3	Розробка структурної схеми, синтез системи автоматичного керування (математична модель електроприводу, розрахунок параметрів складових електроприводу, структурно-параметричний синтез системи)	25.11.2023	
4	Підготовка матеріалів статті по темі ДП	15.11.2023	
5	Дослідження і аналіз статичних і динамічних характеристик електропривода	30.11.2023	
6	Проектування системи керування електропривода (вкл. системи електропостачання, захисту та автоматизації)	15.12.2023	
7	Розробка схем: електричної принципової, підключень (з'єднань), систем автоматизації електропривода	20.12.2023	
8	Стартап-проект. Економічне обґрунтування технічних рішень	20.12.2023	
9	Висновки. Список використаних джерел	31.12.2023	
10	Оформлення пояснювальної записки, графічної частини проекту, підготовка презентації і доповіді	10.01.2024	

Студент


(підпис)

Володимир ШВЕЦЬ

Науковий керівник дисертації


(підпис)

Віталій ТЕРЯЄВ

**Пояснювальна записка
до магістерської дисертації**

на тему: Автоматизований електропривод верстату для лазерного
гравірування_____

Київ – 2024 р.

РЕФЕРАТ

Дипломний проект виконаний на 93 сторінках та вміщує 25 рисунків, 3 таблиці і 6 плакатів А1.

У даному дипломному проєкті представлено аналітичний огляд існуючих верстатів для лазерного гравірування. Складено вимоги до електроприводу та системи автоматизації. Розрахований потрібний момент електродвигуна та за результатами розрахунків обрано кроковий двигун. Описано математичну модель крокового електропривода, розроблена схема керування двофазним двигуном. Проведено моделювання динамічних режимів електропривода в середовищі MATLAB. Графіки перехідних процесів, отримані методом моделювання, підтверджують працездатність і високу якість електроприводу.

ГРАВІРУВАННЯ, ЛАЗЕРНЕ, ВЕРСТАТ, ЕЛЕКТРОПРИВОД,
КРОКОВИЙ, РОЗРОБКА, МАТЕМАТИЧНА, МОДЕЛЬ, АВТОМАТИЗАЦІЯ,
ДВОФАЗНИЙ, ДИНАМІКА

					141.0015.015.МД			
					Автоматизований електропривод верстату для лазерного гравірування Реферат	Лім	Лист	Листів
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		Т		
Розроб.		Швець В.С.	<i>В.Швець</i>				5	93
Перевір.								
Керівник		Геряев В.І.	<i>В.Геряев</i>			КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. АЕМС-ЕП Гр. ЕП – 21мп		
Н. контр.								
Ватверд.		Ковбаса С.М.						

ABSTRACT

The diploma project consists of 93 pages and includes 25 illustrations, 3 tables, and 6 A1 posters.

This diploma project presents an analytical overview of existing machines for laser engraving. Requirements for the electric drive and automation system are compiled. The required torque of the electric motor is calculated, and a stepper motor is selected based on the calculation results. A mathematical model of the stepper motor drive is described, and a control scheme for the two-phase motor is developed. Dynamic modes of the electric drive are simulated using MATLAB. Transition process graphs obtained through modeling confirm the functionality and high quality of the electric drive.

ENGRAVING, LASER, MACHINE, ELECTRIC DRIVE, STEPPER,
DEVELOPMENT, MATHEMATICAL MODEL, AUTOMATION, TWO-PHASE,
DYNAMICS

					141.0015.015.МД						
					Автоматизований електропривод верстату для лазерного гравірування Реферат						
					<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 10%; text-align: center;"><i>Лім</i></td> <td style="width: 10%; text-align: center;"><i>Лист</i></td> <td style="width: 10%; text-align: center;"><i>Листів</i></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Т</td> <td style="text-align: center;">5</td> <td style="text-align: center;">93</td> </tr> </table>	<i>Лім</i>	<i>Лист</i>	<i>Листів</i>	Т	5	93
<i>Лім</i>	<i>Лист</i>	<i>Листів</i>									
Т	5	93									
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Швець В.С.									
Перевір.											
											
Керівник		Теряев В.І.									
Н. контр.											
Затверд.		Ковбаса С.М.									
					КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. АЕМС-ЕП Гр. ЕП – 21мп						

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД.....	12
1.1 Верстати та устаткування для лазерної обробки металу.....	12
1.1.1 Класифікація металорізальних верстатів.....	13
1.1.2 Види лазерної обробки.....	18
1.2 Опис металообробного верстату для лазерного гравірування.....	23
1.2.1 Формування вимог до електроприводу та систем автоматизації.....	29
Висновки до розділу.....	33
2. РОЗРАХУНОК ПОТУЖНОСТІ ЕЛЕКТРОДВИГУНА ТА ВИБІР СИЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ.....	34
2.1 Вибір двигуна.....	34
Висновки до розділу.....	38
3. РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ. СИНТЕЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ.....	39
3.1 Математична модель крокового двигуна	39
3.1.1 Розрахунок параметрів математичної моделі.....	41
3.2 Схема керування двофазним кроковим двигуном	45
3.2.1 Види драйверів для крокових двигунів.....	49
3.2.2 Сигнали керування кроковими двигунами.....	50
3.2.3 Схеми управління кроковими двигунами на основі закінчених блочних елементів	51
3.2.4 Аналіз варіантів реалізації силової частини пристрою управління кроковим приводом	52
3.2.5 Схема блоку керування кроковим приводом.....	57
3.2.6 Схеми управління кроковим двигуном.....	58
Висновки до розділу.....	62
4. ДОСЛІДЖЕННЯ І АНАЛІЗ СТАТИЧНИХ І ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОПРИВОДУ	63

4.1 Модель крокового електродвигуна.....	63
4.2 Моделювання характеристик в середовищі MATLAB.....	67
Висновки до розділу.....	71
5. СПЕЦЧАСТИНА. РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ ЧПК.....	72
5.1 Загальний опис системи ЧПК.....	72
5.2 Програмування обробки на верстаті з ЧПК.....	75
Висновки до розділу.....	76
6. СТАРТАП-ПРОЕКТ. ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ.....	77
6.1 Основні характеристики та переваги.....	77
6.2 Ринок та метацільова аудиторія	78
6.3 Екологічна ініціатива.....	79
6.4 Бізнес-план.....	80
Висновки до розділу.....	81
ВИСНОВКИ.....	82
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	83
ДОДАТОК А. Графічна частина магістерської дисертації.....	87

ВСТУП

Гравірування – це один з найефективніших способів естетичного оформлення будь-якого предмету та надання йому ексклюзивного та дорогого вигляду. Такий давній вид мистецтва і зараз користується попитом. Але не варто думати, що він обмежується нанесенням напису на кільце або годинник. Гравірування впливає на значно більші сфери. Їм прикрашають меблі, дорогоцінні прикраси, предмети декору, вироби зі шкіри, ножі та замки, і навіть чохла для телефонів. І це тільки невеликий перелік того, з чим можна працювати гравірувальним приладом.

Найбільш розповсюдженим гравірувальним приладом є гравірувальний верстат, який може відрізнитись один від одного за типом різального елемента, вартістю, конструкцією та функціональними можливостями.

Існує багато компаній-виробників, які виготовляють дані верстати (Vector, Router, Mirtels, Almaz, та ін.) з різноманітною технічною конфігурацією та широким діапазоном цін. Можна зробити висновок, що гравірувальні верстати користуються високою популярністю серед споживачів.

Можливість створювати безредукторний електропривод для гравірувального верстату дає значну перевагу перед більшістю конкурентів. Такий верстат зможе споживати менше енергії, при цьому маючи спрощену конструкцію. Для успіху на ринку такий верстат входить у нішу звичайних недороговартісних верстатів, що дасть змогу мати переваги при залученні покупців.

Отже, аналізуючи вищесказане, існує ніша на ринку, яку можна заповнювати за допомогою виготовлення більш функціонального верстату за розумну ціну.

Актуальність теми. Гравірувальні верстати користуються великою популярністю серед виробників. Адже виготовлення виробів з унікальними дизайнами позитивно сприймається покупцями. Споживачі готові платити більшу ціну за товар, якщо на ньому буде гравірування з оригінальним виразом чи зображенням.

Розповсюдженість різноманітних компаній, що надають послуги по гравіруванню показує, що виготовлення таких верстатів достатньо прибуткове в наш час.

Для успішної конкуренції на ринку, необхідно виготовляти та запроваджувати більш функціональні прилади за доступну ціну.

Отже, створення безредукторного електропривода для гравірувального верстату являється достатньо актуальною розробкою.

Мета дослідження полягає в удосконаленні існуючих конструкцій гравірувальних верстатів та пропозиції технічного рішення для виготовлення безредукторного електроприводу верстату.

Задачі дослідження, що будуть вирішені в дисертації, полягають у наступному:

1. Аналіз конструкцій гравірувальних верстатів, до якого входять огляд особливостей процесу різання та гравірування, використовуваний інструмент, огляд існуючих гравірувальних верстатів, основні характеристики, для яких потрібно розробити систему автоматизації та електропривод, що буде відповідати заданим характеристикам;
2. Розрахунок моменту на основі вихідних даних для вибору відповідного крокового двигуна;
3. Розробка структурної схеми системи автоматичного керування для крокового двигуна.
4. Вибір контролера, що найкраще забезпечує роботу крокового електропривода. Покращення точності роботи системи, запобігаючи зайвим витратам кроків.
5. Проведення моделювання установки з метою аналізу статичних та динамічних характеристик, щоб переконатися в можливості системи виконувати поставлені задачі.

6. Розробка програми на G-кодах для систем числового програмного керування (ЧПК), щоб продемонструвати можливість виконання завдань для роботи крокового електропривода.
7. Техніко-економічне обґрунтування прийнятих технічних рішень.

Об'єктом дослідження магістерської дисертації являється електропривод гравірувального верстата для лазерного гравірування.

Предметом дослідження являється проектування безредукторного електроприводу гравірувального верстату та моделювання динамічних та статичних характеристик верстату.

Практичною новизною дисертації являється проектування безредукторного електроприводу верстату для лазерного гравірування.

Апробація роботи. Виконано проектний розрахунок технічного рішення безредукторного електроприводу верстату для лазерного гравірування, що може використовуватись при розробці решти компонентів верстату.

Опублікована стаття: Теряєв В.І., Швець В.С. Автоматизований електропривод верстата для лазерного гравірування. *Міжнародний науково-технічний журнал "Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики"*. Київ, 2023. – 6 с.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

1.1 Верстати та устаткування для лазерної обробки металу

Епоха лазерів розпочалася у другій половині XX століття. Квантовий генератор, відомий як лазер, був винайдений у цей період. Це дивовижний оптичний прилад, який створює монохроматичне та когерентне світло. Лазер генерує фотони з однаковою енергією, напрямом руху та поляризацією, формуючи вузьконаправлений світловий промінь високої потужності.

Його унікальні властивості включають високу потужність випромінювання – до 110 Вт/см^2 в безперервному режимі і до 1020 Вт/см^2 в імпульсному) лазер став високоефективним інструментом, що дозволяє миттєво нагрівати (пропалювати) матеріал на обробленій ділянці залишається стійким до теплової деформації, оскільки його обробка відбувається локально за допомогою лазера. Крім того, лазерний промінь легко регулюється і може ефективно інтегруватися в будь-які автоматизовані системи [1, 2, 4].

Завдяки цим перевагам лазерні техніки широко використовуються у всіх сферах науки та виробництва, зокрема в металообробці. З 70-х років XX століття лазери успішно використовують для зварювання, різання, наплавлення, маркування та гартування металів. За останніми статистичними даними, світова промисловість вже використовує приблизно 40 000 лазерних комплексів загальною вартістю до \$1,5 млрд доларів.

Одночасно лазерні технології стали пріоритетними в галузях зв'язку та обробки інформації, оптоелектроніці, біології і медицині, системах вимірювань та наукових дослідженнях.

Активне впровадження лазерів у всі сфери сучасної цивілізації пояснюється тим, що ця технологія є високорозвиненою і визначає загальний рівень технологічного розвитку. В майбутньому можна очікувати на розповсюдження застосування лазерних технологій (лазерна обробка матеріалів), фотохімії, мікро-

та нанотехнологіях, телекомунікаційних технологіях, оптичній обробці та обробці інформації, медичній техніці, та екологічному моніторингу [1].



Рисунок 1.1 – Зовнішній вигляд лазерної установки

1.1.1 Класифікація металорізальних верстатів

Твердотільні лазери на люмінісцентних твердих середовищах. В ролі активаторів зачасту використовують іони рідкоземельних елементів та іони заліза. Процес накачування, що відбувається у твердотільних лазерах, особливо у напівпровідникових, реалізується за трирівневою та чотирирівневою схемою. Новітні лазери на твердотільній основі мають можливість працювати в імпульсному режимі, неперервному та квазібезперервному режимах (рис. 1.2).

Довжина хвилі випромінювання залежить від активного йона і її можна налаштувати у досить широких межах (наприклад, від 700 до 1000 нм для насиченого Ti^{3+} сапфіру).

Різновидами твердотільного лазера є волоконний і напівпровідниковий лазер. Найпершим твердотілим лазером і одночасно першим працюючим лазером в світі був випромінювач на рубіні, накачування якого здійснювалася випромінюванням імпульсної газорозрядної лампи [2].

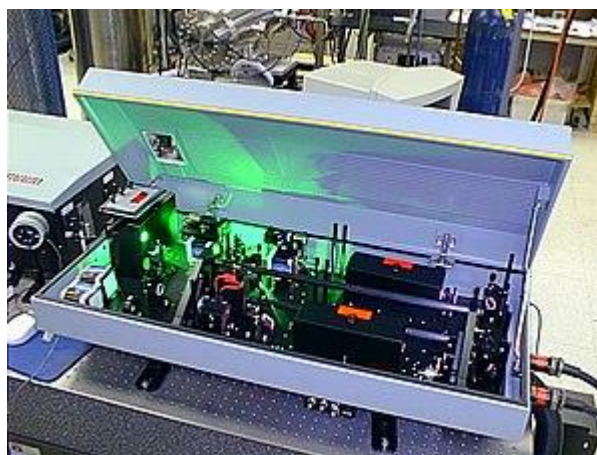


Рисунок 1.2 – Nd:YAG Твердотільний лазер

В даному Nd:YAG твердотільному лазері генерування відбувається на довжині хвилі 1064 нм. Такі лазери можуть працювати як у безперервному, так і в імпульсному режимі. Імпульсні режими відрізняються характером генерування лазерного випромінювання. У вільному генеруванні тривалість імпульсу зазвичай дорівнює часу життя верхнього лазерного рівня (близько 250 мкс і залежить від концентрації неодиму), імпульс є набором пучків з тривалістю до сотень наносекунд.

Використовуються такі лазери для обробки матеріалів – при зварюванні матеріалів пучок імпульсного лазера переноситься на робочу поверхню через оптичне волокно 0.5-2 мм діаметром із потужністю ≤ 2 кВт.

Напівпровідникові лазери. Лазери на основі напівпровідників, формально включаючи їх до категорії твердих тіл, зазвичай виділяють окремо через використання іншого механізму накачування. У цих лазерах інжекція надмірних носіїв заряду через р-п перехід або гетероперехід, електричний пробій у сильному полі або бомбардування швидкими електронами використовується для накачування. Квантові переходи відбуваються між дозволеними енергетичними зонами, а не між дискретними рівнями енергії.

Цей, найбільш поширений вид лазерів у побуті, знаходить застосування в спектроскопії, системах накачування інших лазерів та в медицині. Ключовим елементом кожного твердотільного лазера є діодна система накачування, що перетворює електричну енергію в оптичну. Використання вихідного випромінювання лазерного діода безпосередньо для обробки матеріалів може спростити лазерну систему з погляду вартості і розмірів.

У простих діодних лазерах, відомих як одиночні випромінювачі, випромінювання генерується в невеликому об'ємі та виходить через мікроскопічний випромінюючий майданчик. Такі діоди використовуються у CD/DVD-програвачах, телекомунікаціях та для накачування малопотужних твердотільних лазерів. Для отримання більшої потужності можна об'єднувати діоди у двовимірні матриці або стопки. У таких конфігураціях вихідне випромінювання може бути реструктуроване і сфокусоване традиційною оптикою або за допомогою світлопровода або пучка світлопроводів [3].

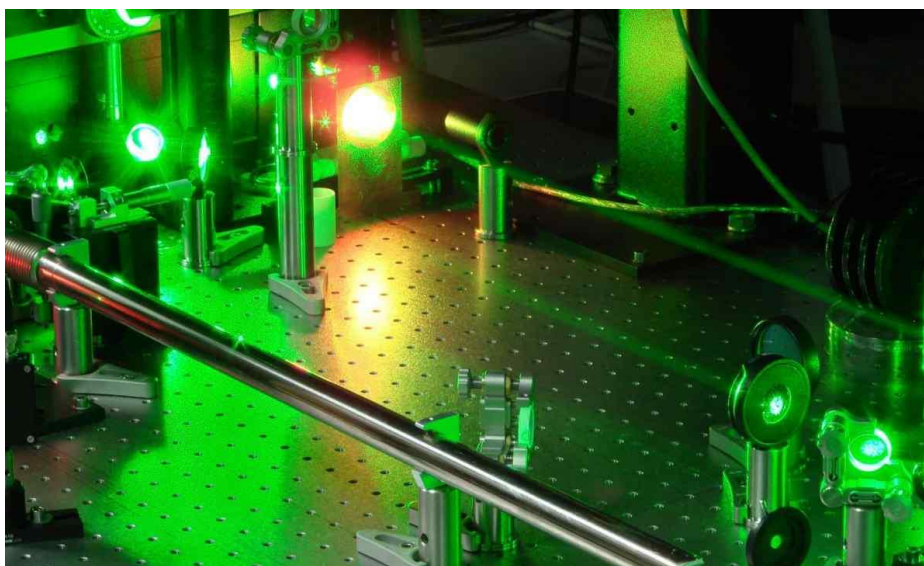


Рисунок 1.3 – Напівпровідниковий лазер

Волоконні лазери. При повністю волоконній реалізації такий лазер називається цільноволоконним, при комбінованому використанні волоконних і інших елементів в конструкції лазера він називається волоконно-дискретним або

гібридним. Волоконні лазери застосовуються в промисловості для різання металів і маркування продукції, зварюванні і мікрообробці металів, лініях волоконно-оптичного зв'язку. Їх основними перевагами є висока оптична якість випромінювання, невеликі габарити і можливість вбудовування в волоконні лінії.

Існує велика різноманітність конструкцій волоконних лазерів, обумовлена специфікою їх застосування. Для їх виготовлення широко застосовуються як резонатори типу Фабрі - Перо, так і кільцеві резонатори.

У волоконних лазерах існує ряд певних відмінностей та особливостей:

- волоконні лазери пропонують унікальний ресурс для нових випромінювачів, здатних працювати більше 100 тисяч годин і продовжувати свій ресурс при порівняно невеликих витратах, майже без експлуатаційних витрат;

- мінімізація часу та витрат на підготовку приміщень і введення в експлуатацію;

- волоконні лазери проявляють універсальність як джерело лазерного випромінювання, володіючи "чистою променевою" енергією. Вони не обмежені технологічними характеристиками, що дозволяє їх переналаштовувати для виконання різних технологічних процесів при диверсифікації виробництва або зміні технологій;

- є можливість збільшення потужності. Лазер може бути придбаний з конструктивним запасом, наприклад, на потужність 700 Вт при поставці, і пізніше просто доукомплектований блоками накачування для збільшення потужності до 2400 Вт, практично не змінюючи виробничу систему;

- можливість створення багатоцільових і багатофункціональних технологічних ділянок на основі волоконних лазерів для максимізації завантаження лазерного джерела.

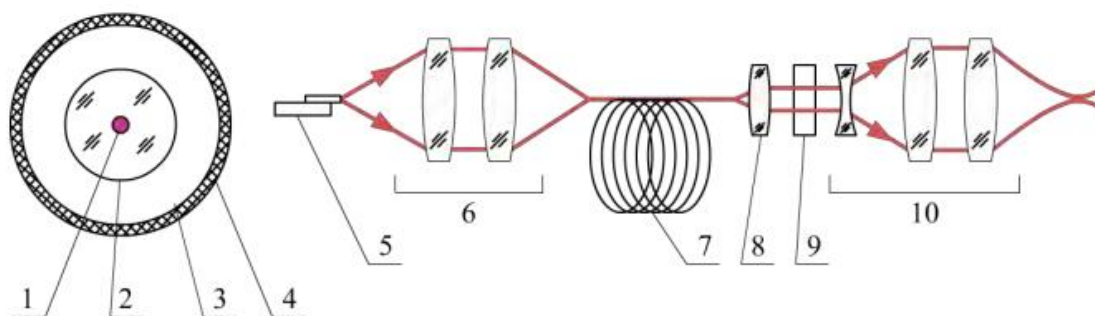


Рисунок 1.4 – Схема роботи волоконного лазера: 1 – серцевина волокна з іонами рідкісноземельних металів; 2 – кварцове волокно ($\varnothing$ 400-600 мкм); 3 – полімерна оболонка; 4 – зовнішнє захисне покриття; 5 – діоди накачування; 6 – оптична система накачування; 7 – оптоволокну; 8 – коліматор; 9 – модулятор; 10 – фокусуюча система

Лазерне випромінювання створюється шляхом збудження атомів активних домішок основного компонента волоконного лазера. Основний компонент виготовлений у вигляді тонкого волокна, що називається активним елементом, для ефективного охолодження. Процес генерації лазерного випромінювання стає можливим завдяки використанню активного середовища, яке збуджується між дзеркалами резонатора. Ці дзеркала представлені областями того ж волокна, але зі зміненими властивостями. Заохочення атомів активних домішок (накачування) здійснюється шляхом опромінення активного елемента світлодіодами великої потужності, кожен з яких спрямований до активного елемента за допомогою компактного юстирувального вузла та припаяного волокна.

Оскільки площа поперечного перерізу активного елемента волоконного лазера дуже мала, щільність потужності світлової енергії величезна, що може призводити до старіння матеріалу. Також з часом зменшується світловіддача діодів накачування. Тому сучасні волоконні лазери оснащуються системами стабілізації потужності.

Сфери використання:

- будівництво автомобілів, судів, повітряного транспорту, включаючи ракети;

- виготовлення морських та залізничних вагонів, контейнерів для транспортування;
- виробництво ювелірних виробів, а також гравіювання поверхонь (точність волоконного лазера дозволяє впоратися із такими тонкими роботами);
- виробництво металевих конструкцій для будівництва житлових, офісних та комерційних об'єктів, а також для створення металевих рекламних конструкцій;
- робота в оборонно-промисловому комплексі.

1.1.2 Види лазерної обробки

Лазерне різання металів. Використання лазерного різання металів здійснюється для прецизійного вирізання та обробки деталей, які через свою крихкість, низьку жорсткість, велику твердість або складність не можуть бути оброблені іншими методами. Цей підхід особливо ефективний при виготовленні штучних складних деталей, оскільки розмір партії оброблюваних деталей майже не впливає на собівартість одиниці продукції.

Зазвичай, обладнання для лазерного різання металів має схему "координатного столу", де лазерна головка, керована комп'ютером верстата, рухається над поверхнею оброблюваної деталі. На сьогоднішній день верстати для лазерного різання металу досягли високого технологічного рівня, що забезпечує подібну продуктивність та якість різання на всіх підприємствах.

Для різних матеріалів використовуються різні режими лазерного різання, включаючи різні інтенсивності випромінювання, тиск та склад різального газу. Таким чином, існують різні види лазерного різання, такі як лазерно-кисневе, кисневе різання з підтримкою лазерного променя (LASOX), лазерне різання в інертному газі, лазерне випарювання (сублімаційне різання) та лазерне терморозколювання крихких матеріалів (скло).

Лазерне різання матеріалів може бути виконане в імпульсному або безперервному режимі. У випадку імпульсного різання безперервність досягається

шляхом накладання послідовних отворів. Цей метод використовує імпульсні лазери на алюмо-ітрієвому гранаті або лазери на вуглекислому газі. Імпульсна обробка забезпечує мінімальне прогрівання матеріалу.

Лазери безперервної дії на вуглекислому газі, з потужністю від кількох кіловат до сотень кіловат, використовуються для газолазерного різання. У цьому методі лазерний промінь впливає на матеріал через струмінь газу. Тип газу обирається в залежності від виду оброблюваного матеріалу. Для обробки дерева, фанери, пластиків, паперу, картону та текстильних матеріалів використовується повітря або інертний газ для охолодження та запобігання загорянню.

У випадку різання металів, скла та кераміки, струмінь газу викидає розплавлений матеріал з області опромінення. Це призводить до отримання поверхонь з меншою шорсткістю і високою точністю різання. Для різання заліза, маловуглецевих сталей та титану використовується струмінь кисню, що дозволяє значно підвищити швидкість різання через екзотермічну реакцію окиснення металу.

Лазерне зварювання. Лазерне зварювання зараз використовується в різних галузях, охоплюючи близько 11% твердотільних і CO₂-лазерів, які інтегровані у зварювальні системи. Застосування цієї технології розпочинається з мікрозварювання для виробництва стоматологічних і хірургічних інструментів і завершується зварюванням кузовів в автомобільному виробництві. Крім того, лазерне зварювання широко використовується на вагонобудівних заводах, виробниках сільськогосподарського, холодильного та хімічного обладнання, виробників професійного кухонного і ресторанного обладнання, меблів і в рекламно-виробничих компаніях.

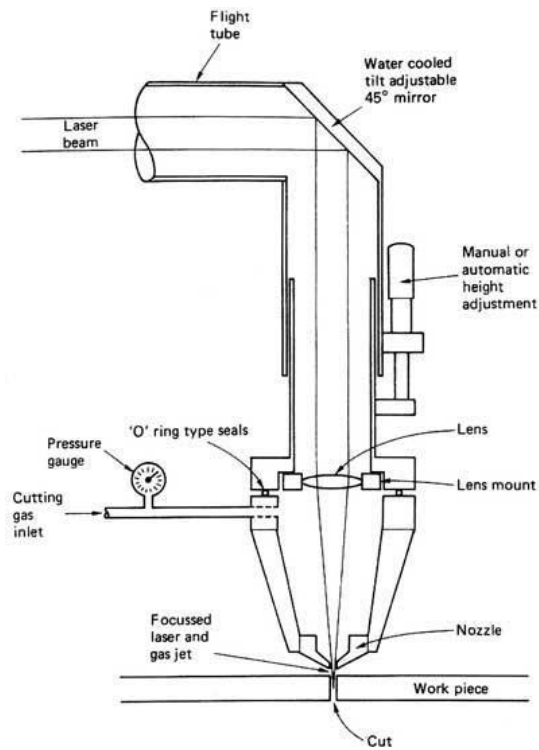


Рисунок 1.5 – Функціональна схема лазерного різачка

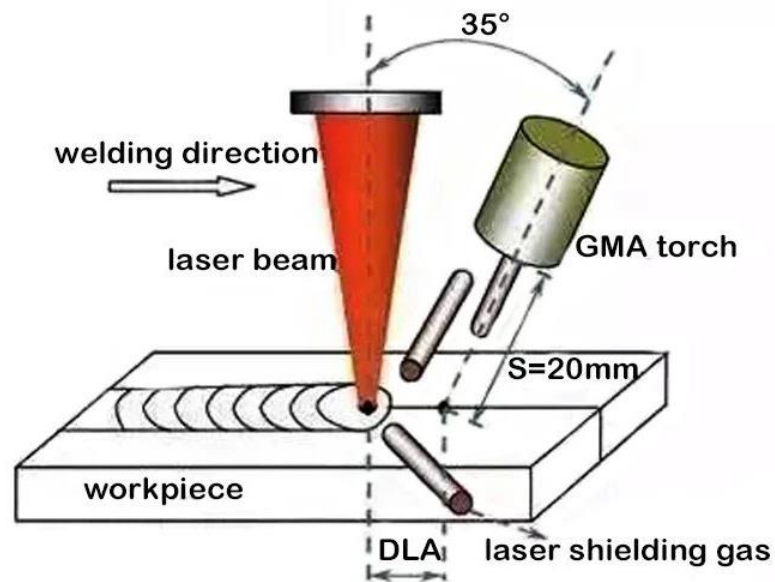


Рисунок 1.6 – Процес лазерного зварювання

Переваги лазерного зварювання:

- висока точність: світлова пляма може досягати мікронного рівня, час обробки можна контролювати за допомогою програми, і точність набагато вища, ніж у традиційного процесу пайки;
- обробка без олова: процес пайки може бути завершений без прямого контакту олова з поверхнею, і немає напруги, викликані контактною пайкою олова;
- можна проводити мікрозварювання. Після фокусування лазерний промінь може отримати дуже маленьку пляму і його можна точно розташувати. Може застосовуватися для складання та зварювання мікро- та дрібних заготовок, що випускаються у великих кількостях;
- мала робоча зона: місцеве опалення, невелика зона впливу тепла;
- безпека робочого процесу: під час обробки немає електростатичної загрози;
- робочий процес чистий і економічний: в процесі обробки немає відходів;
- проста експлуатація та обслуговування: лазерна пайка проста в експлуатації, а обслуговування лазерної головки зручне;
- термін служби: тривалий та стабільна продуктивність;
- можна зварювати важкодоступні частини та здійснювати безконтактне зварювання на великі відстані, що має велику гнучкість [4].

Лазерне гравірування. Цей сегмент ринку приносить майже 15% від загального доходу лазерних систем. На даний момент це найбільш розвинений і зрілий ринок, оскільки лазерні маркери відповідають вимогам кінцевих користувачів за зручністю та безпекою використання, гарантійними зобов'язаннями виробників і післягарантійною підтримкою, а також мають передові технології та програмне забезпечення.

Лазерно-гравірувальні верстати можуть бути як настільного, так і стаціонарного типу, і вони мають різні розміри робочих столів - від півметра до півтора-двох метрів і більше. Ці верстати розраховані на встановлення в

спеціальних приміщеннях і призначені для постійної роботи в умовах виробництва. Кожен верстат має міцний корпус для стійкості та гасіння вібрацій, що можуть виникати під час роботи. Основне призначення таких моделей - лазерне різання матеріалів, розкрій (включаючи широкоформатний розкрій) та високоякісне гравірування поверхонь заготовок.

Лазерні верстати використовують різні конструктивні рішення для підвищення продуктивності та якості обробки. Наприклад, паралельна установка двох лазерних трубок для одночасної обробки двох заготовок або розміщення лазерної трубки на рухомому порталі для уникнення втрат потужності променя.

Усі лазерні верстати для різання та гравірування, незалежно від режиму роботи, типу лазера та призначення, обладнані автоматизованою системою керування і мають схожу структурну схему, яку можна побачити на рисунку 1.7.

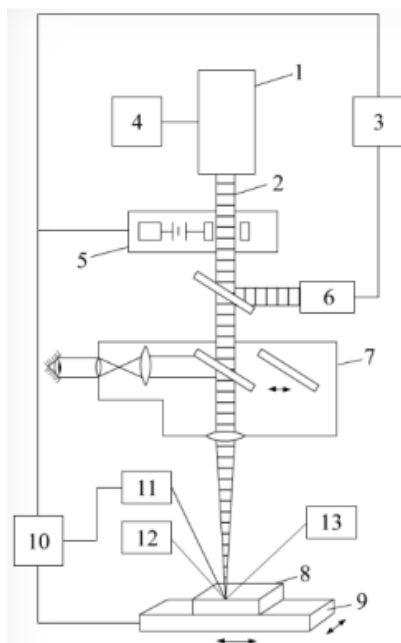


Рисунок 1.7 – Узагальнена схема верстату лазерного гравірування з автоматизованою системою керування

Оптична система 7 формує лазерне випромінювання 2 від випромінювача 1 і, через пристрій дозування енергії 5, створює світловий пучок із конкретними характеристиками. Цей пучок направляється на об'єкт обробки. Оптична система 7 також дозволяє візуально контролювати положення об'єкта, стежити за процесом обробки і оцінювати результати. Об'єкт обробки фіксується на двокоординатному столі за допомогою пристрою 9, який керується блоком автоматизованої системи керування 10.

Блок керування взаємодіє із системою контролю випромінювання 6 та системою вимірювальних перетворювачів для контролю параметрів технологічного процесу 11. Ці системи отримують інформацію та висилають команди для управління джерелом живлення випромінювача 3 і дозуючої системи 5. У деяких технологічних процесах, таких як газо-лазерна різка чи лазерно-іскрова обробка, установка може доповнюватися пристроєм подачі технологічного середовища 13 та додатковими джерелами енергії 12 (механічної, електромагнітної і т. д.).

Вимірювальні перетворювачі параметрів технологічного процесу 11 контролюють температуру зони обробки, стан поверхні, яскравість світіння плазмового факела і передають сигнали керуючому пристрою для зміни параметрів випромінювання або припинення операції.

1.2 Опис металообробного верстату для лазерного гравірування

В якості прототипу для модернізації було взято верстат з ЧПК для лазерного гравірування типу ADL1325. Було обрану дану модель, так як вона має низьку вартість в базовій комплектації, при цьому маючи великий потенціал для подальшої модернізації. На рис. 1 зображено загальний вид верстату ADL1325 [5].



Рисунок 1.8 – Металообробний верстат з ЧПК для лазерного гравірування
ADL1325

Універсальний лазерно-гравіювальний верстат з ЧПК ADL1325 призначений для високоточної лазерної обробки різних матеріалів. Простий у використанні та має широкий функціонал. Застосовується у легкій промисловості, у рекламному та меблевому виробництві та для виготовлення сувенірної продукції. Швидкий монтаж та компактні розміри дозволяють розмістити верстат у невеликому приміщенні та негайно розпочати роботу. Посадкові місця під напрямні фрезеруються за одну установку.

В табл. 1.1 наведено технічні характеристики обраного верстату.

На рисунку 1.9 зображено кінематичну схему верстату для лазерного гравірування [6]. На рис. 1.10 показано спрощену кінематичну схему електроприводу.

Таблиця 1.1 – Технічні характеристики верстату

Основні технічні характеристики		
Назва	Значення	Одиниці виміру
Зона обробки	2500x1350	мм
Потужність лазерної трубки	130	Вт
Тип лазера		CO2
Точність позиціонування	0.02	мм
Швидкість гравіювання	0-500	мм/с
Швидкість різки	0-400	мм/с
Тип охолодження		Чиллер CW 5200
Товщина ріжучого матеріалу	≤ 25	мм
Номінальне живлення	220	В
Споживана потужність	≤ 3	кВт
Робоча температура	15-35	°C
Маса	650	кг

Виконаємо опис електромеханічної частини верстату:

Електромеханічна частина складається з ряду ключових компонентів, які працюють спільно для досягнення точності та ефективності гравіювання. Нижче приведено загальний опис електромеханічної частини гравірувального верстату:

1. Механічна конструкція:
 - стійка (рама) – жорстка конструкція, яка утримує всі інші елементи верстату та надає стабільність під час роботи.
 - столик – платформа, на якій розташовуються вироби для гравіювання.
2. Інструменти обробки:
 - лазер – спеціальний інструмент для видалення матеріалу під час гравіювання.
 - холдер для лазера – утримує лазер та забезпечує його стійкість під час роботи.
3. Механізми переміщення:

- система лінійних направляючих – дозволяє точне переміщення шпинделя та інструментів по основним осям координат.

- кульково-гвинтові механізми – забезпечують точне позиціонування шпинделя та столика.

4. Керування інструментом:

- числовий контролер (CNC) – комп'ютеризована система, яка керує рухами шпинделя та інструментів на основі введених програм.

- сенсорні панелі або інтерфейси – дозволяють оператору налаштовувати параметри та контролювати процес гравірування.

5. Система охолодження:

- Охолодження шпинделя – забезпечує подачу охолоджувальної рідини або повітря для підтримання оптимальної температури під час роботи.

6. Електрична система:

- живлення – постачання електроенергії для всіх електричних компонентів верстату.

- електричні механізми – мотори та датчики, які відповідають за переміщення та контроль лазерної голівки.

Ці компоненти спільно дозволяють гравірувальному верстату виконувати точні та складні операції гравірування на різних матеріалах, таких як метал, дерево чи пластик.

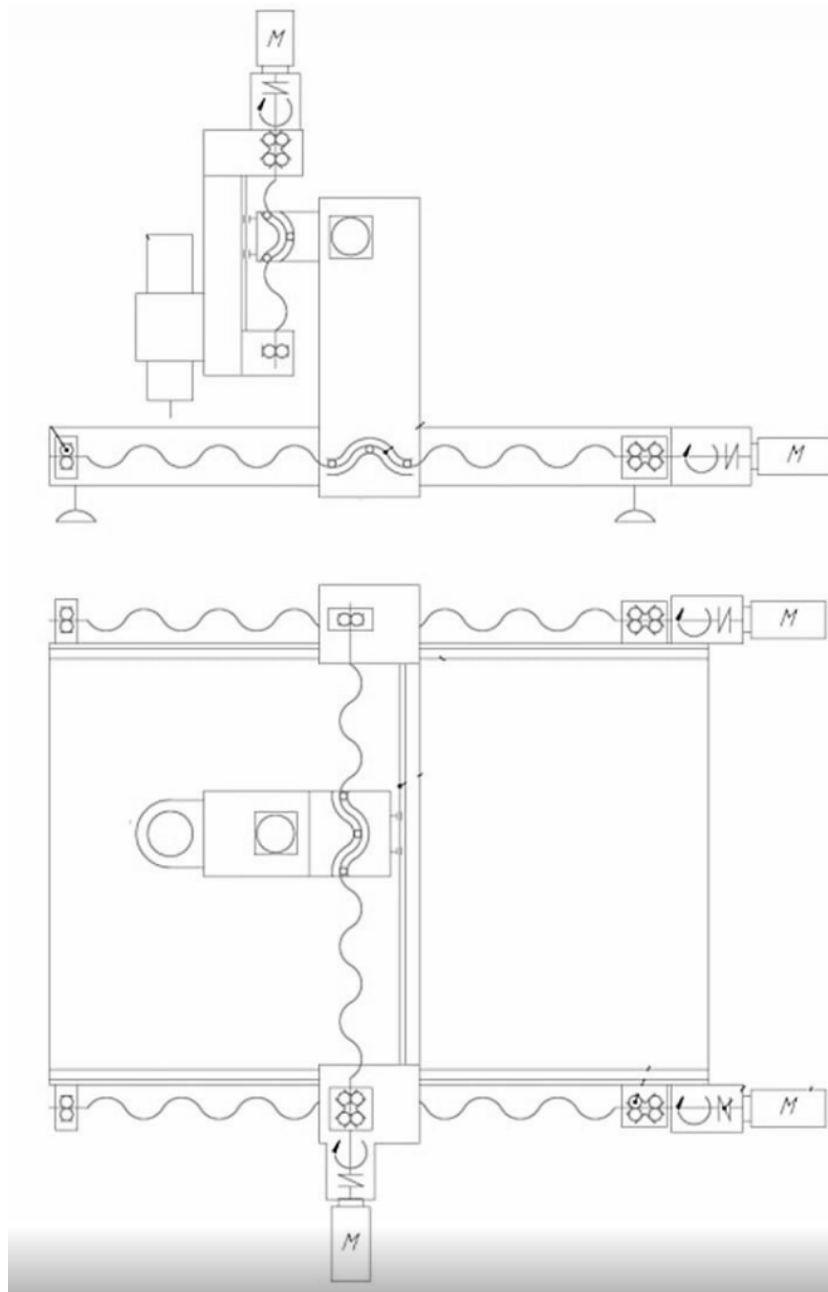


Рисунок 1.9 – Кінематична схема верстату для лазерного гравірування

Виконаємо опис кінематичної схеми верстату:

Кінематична схема гравірувального верстату дозволяє передати рухи від основного приводу до лазерної голівки. Нижче подано загальний опис кінематичної схеми гравірувального верстату:

1. В даному верстаті використовується електропривод з кроковим двигуном.

2. Редуктор використовується для зменшення обертової швидкості електродвигуна та одночасно збільшення обертового моменту. В модернізованому електроприводу верстату використовується безредукторний привод.
3. Лінійні напрямні та гвинтові механізми використовуються для переміщення осей верстату вздовж основних координат. Це дозволяє рухати лазерну голівку в просторі та визначати точне положення на робочій поверхні.
4. Платформа, на який кріпиться лазерна голівка для виконання гравірування. Вона рухається вздовж лінійних направляючих за допомогою механічних передач ходовий гвинт-гайка кочення.
5. Холдер для лазерної голівки – інструмент утримується в спеціальному холдері. Цей холдер зазвичай прикріплений до шпинделя та може бути обертовим або статичним, залежно від конструкції верстату.
6. Система керування – наприклад, числовий контролер (CNC), призначена для введення програм та керування рухами верстату. Вона отримує вхідні дані та керує всіма рухами елементів верстату.

Ця кінематична схема дозволяє гравірувальному верстату ефективно виконувати гравірування на різних матеріалах з високою точністю та швидкістю.

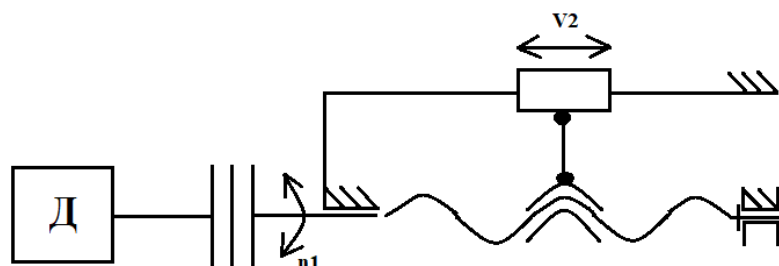


Рисунок 1.10 – Спрощена кінематична схема електроприводу

Обраний верстат може виконувати операції різки, гравірування, перфорації та маркування з такими матеріалами :

- метали (алюміній, мідь, нержавіюча сталь, і тд.);
- дерево, хдф, фанера;
- тканина (шкіра, джинс, хутро);
- пластик (поліпропілен, акрил, абс-пластик, поліетилен);
- скло;
- паперові матеріали;

Також, ADL 1325 широко використовується в сферах малого та середнього бізнесу. Асортимент товарів, що можна виготовити за допомогою даного верстату, практично необмежений:

- створення подарунків та декору (кухонні прилади, декоративні предмети інтер'єру, канцелярські товари, унікальні прикраси, подарункові упаковки, набори для творчості, дерев'яні пазли, рухомі конструктори);
- виготовлення продукції для реклами (таблиці, вивіски, зображення логотипів та позначення товарів);
- столярні вироби (меблі створені з модульних частин, полиці, стільники з фігурною обробкою, частини для унікальних дизайнерських проєктів);
- виготовлення ювелірних виробів (створення воскових моделей прикрас).

1.3 Формування вимог до системи автоматичного керування лазерного верстату

Основні функції електроприводу і систем автоматизації. Автоматизація верстатів для лазерної обробки вже досягла значного прогресу, і тепер лазерна обробка матеріалів може бути розглянута в контексті декількох стандартних пунктів. Ці пункти включають в себе вибір відповідної програми автоматизованої системи керування (АСК), перевірку робочого обладнання та його роботи.

Процес лазерної обробки характеризується рядом ключових показників, таких як неперервна робота, потужність лазерної головки, інтенсивність випромінювання, оптичні властивості лінзи, продуктивність та точність лазерного верстата.

Ефективність лазерного верстату під час гравірування та різання залежить від показників робочого ходу та потужності лазерного випромінювача, що обмежує технологічні параметри обробки матеріалу. Також важливо враховувати швидкість холостого ходу, так як її величина обмежена технічними параметрами верстата, але при цьому має великий вплив на продуктивність верстату. Швидкість холостого ходу без обробки матеріалу може бути в 5-10 разів вищою номінальної робочої і при належному налаштуванні це дозволяє зменшити час виробництва на 30-60%. [7].

Виконаємо короткий опис системи крокового електроприводу, який використовується для точного керування рухом або позицією об'єкта. Він може працювати в режимі відпрацювання кроків або неперервного обертання. Кожен крок відповідає фіксованому кутовому переміщенню. Нижче наведено загальний опис призначення елементів крокового електроприводу:

- кроковий електродвигун. Включає ротор і статор. Ротор складається з постійних магнітів або феромагнітних сердечників і обертається під впливом керуючої дії. Статор – це стаціонарна частина, яка містить котушки. Електричні сигнали подаються на ці котушки, створюючи магнітне поле, яке зміщує ротор на фіксовану кількість кроків;

- контролер крокового двигуна - електронна схема (драйвер), яка отримує сигнали від мікроконтролера або комп'ютера і генерує необхідні електричні сигнали для котушок статора; мікрокроковий драйвер – деякі крокові електроприводи можуть працювати в режимі мікрокроків, розділяючи один крок на більшу кількість кроків. Це дозволяє досягти більшої точності руху та зменшення вібрації;

- інтерфейс керування. Включає керуючий блок (мікроконтролер або комп'ютер) і генерує команди для крокового контролера, визначаючи напрямок руху, кількість кроків та інші параметри;

- виконавчий механізм - механізм, який приводиться в дію кроковим двигуном і використовується для переміщення каретки, лазерної голівки або іншого об'єкта.

Кроковий електропривод широко використовується в різних пристроях, таких як 3D-принтери, CNC-верстати, принтери, роботи та інші автоматизовані системи, де потрібне точне керування рухом.

Завданнями управління електроприводами є: здійснення пуску, регулювання швидкості, гальмування, реверсування робочої машини, підтримка її режиму роботи відповідно до вимог технологічного процесу, управління положенням робочого органу машини. При цьому повинні бути забезпечені найбільша продуктивність машини або механізму, найменші капітальні витрати і витрата електроенергії.

Технічні вимоги. Огляд обраних інформаційних джерел дає змогу сформулювати вимоги до системи автоматичного керування положення робочого органу лазерного верстату ADL 1325.

Електропривод призначений для роботи в наступних умовах:

- при температурі навколишнього повітря: для електродвигуна від 5 до 40°C, для перетворювача від 5 до 45°C;
- при допустимій максимальній вологості повітря 80% при 30 °C;
- в невибухонебезпечному навколишньому середовищі, яке не містить агресивних газів і пар в концентраціях, що руйнують метали та ізоляцію;
- в закритих стаціонарних приміщеннях при відсутності прямого впливу сонячної радіації.

Показники якості перехідного процесу:

- відсутність перерегулювання (монотонність перехідної функції);

- час перехідного процесу – не більше 0.01 с;
- перерегулювання відсутнє $\sigma = 0$;
- добротність за швидкістю відносно завдання $k\gamma \geq 400$ 1/с;
- смуга пропускання частот ≥ 80 Гц;
- привод повинен забезпечувати широкий діапазон регулювання швидкості $D=10000$, який визначається відношенням максимальної та мінімальної швидкостей робочої подачі;
- показник точності при відпрацювання лінійного завдання: добротність по швидкості $K_{\omega} \geq 60$, 1/с [8];

Система керування з такими вимогами має бути високоефективною та добре налаштованою для задоволення вказаних характеристик:

1. Алгоритми керування повинні забезпечити точне регулювання і швидкий відгук системи.
2. Відсутність перерегулювання (монотонність перехідної функції) забезпечується системою керування, яка повинна бути налаштована таким чином, щоб уникати перерегулювання під час перехідного процесу. Це налаштування досягається шляхом оптимізації параметрів регулятора та системи в цілому.

До систем автоматичного керування пред'являються також наступні вимоги: забезпечення режимів роботи, необхідних для здійснення технологічного процесу машиною або механізмом, простота системи управління, надійність системи управління, економічність системи управління, обумовлена вартістю апаратури, витратами енергії, а також надійністю, гнучкість і зручність управління, зручність монтажу, експлуатації та ремонту систем управління. За необхідності пред'являються додаткові вимоги: вибухобезпечність, іскро безпека, безшумність, стійкість до вібрації, значним прискоренням і пр.

Основні вимоги до електроприводів і систем керування верстатами визначаються технологією обробки, конструктивними можливостями верстату і ріжучого інструменту.

Основними технологічними вимогами є забезпечення:

- найширшого круга технологічних режимів обробки з використанням сучасного лазерного обладнання;
- максимальної продуктивності; привод подачі повинен мати високу швидкість швидкого ходу і високу швидкодію при розгоні – гальмуванні і при скиданні – набиранні навантаження.

Висновки до розділу

1. У даному розділі був проведений аналітичний огляд металообробних верстатів для лазерної різки і гравірування. Розглянуто також види лазерної обробки та їх застосування, що дозволило скласти та узагальнити вимоги до систем електроприводу.

2. За результатами розгляду металообробного верстату для лазерного гравірування, обраного в якості прототипу, була показана актуальність його модернізації з метою використання в різних галузях та при роботі з різноманітними матеріалами.

3. Сформульовані вимоги, яким повинні відповідати електропривод і система автоматизації. Це дає змогу здійснити їх проектування і допоможе підвищити продуктивність, безпеку, та спростити управління верстатом.

2 РОЗРАХУНОК ПОТУЖНОСТІ ЕЛЕКТРОДВИГУНА ТА ВИБІР СИЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ

2.1 Вибір електродвигуна

Після аналізу літератури, було прийнято рішення для реалізації даного проекту обрати електропривод з кроковим двигуном.

Переваги крокових двигунів:

- точність позиціонування: крокові двигуни дозволяють виконувати дуже точне позиціонування і керування. Кожен кроковий крок відповідає певному фіксованому кутовому зміщенню, що дозволяє легко досягати високої точності при гравіруванні.

- без датчиків положення: крокові двигуни не вимагають використання додаткових датчиків положення для визначення місця і руху інструмента. Це спрощує процес управління і зменшує витрати на додаткове обладнання.

- висока стійкість до перевантажень: крокові двигуни зазвичай мають високий крутний момент, що дозволяє їм витримувати перенавантаження і працювати в умовах, де інші типи двигунів можуть втратити позицію.

Вихідні дані для проектування електроприводу подачі верстату для лазерного гравірування представлені у табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Вихідні данні

Параметр	Позначення	Значення
Передаточне число редуктора	i_p	1
Крок гвинта, м	t_r	0.001
Швидкість швидкого ходу, м/хв	$V_{бх}$	10
Максимальна швидкість робочої подачі, м\хв	$V_{роб\ max}$	4
Мінімальна швидкість робочої подачі, м\хв	$V_{роб\ min}$	0.1
ККД коробки подач	η_1	1
ККД гвинтової пари	η_2	0.9
Маса рухомого вузлу верстату, кг	$m_{вуз}$	4.4
Коефіцієнт тертя в напрямних	$f_{тр}$	0.03
Діаметр гвинта, м	$D_{гв}$	0.008
Довжина гвинта, м	$l_{гв}$	0.2
Час розгону до $V_{бх}$, с	$t_{пп}$	0.1
Тривалість включення	ТВ	100

Проведемо базові розрахунки електроприводу [9].

Швидкість для передачі гвинт-гайка:

- максимальна

$$n_{дв} = \frac{v_{max} i_p}{t_r} = \frac{10 \cdot 1}{0,001} = 10000 \text{ об/хв}, \quad (2.1)$$

- робоча

-

$$n_{дв} = \frac{v_{роб} i_p}{t_r} = \frac{4 \cdot 1}{0,001} = 4000 \text{ об/хв}, \quad (2.2)$$

- мінімальна

$$n_{\partial\theta} = \frac{v_{\min} i_p}{t_z} = \frac{0,1 \cdot 1}{0,001} = 100 \text{ об/хв}, \quad (2.3)$$

Крок двигуна при безредукторному виконанні привода дорівнює:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi \cdot \Delta l}{t_z} = \frac{2\pi \cdot 5 \cdot 10^{-6}}{0,001} = 0,0314 \text{ рад} \approx 1,8 \text{ град} \quad (2.4)$$

Наступним кроком потрібно визначити моменти інерції. Приведений до валу двигуна момент інерції поступально виконавчого елемента лазерної установки:

$$J'_{\text{мех}} = m_{\text{виз}} \left(\frac{t_z}{2\pi} \right)^2 \frac{1}{i_p} = 4,4 \left(\frac{0,001}{2\pi} \right)^2 = 1,11 \cdot 10^{-7} \text{ кг/м}^2, \quad (2.4)$$

Приведений момент інерції ходового гвинта до валу двигуна:

$$J'_b = \frac{\pi D_{\text{сп}}^4 l_b \gamma}{32 i_p^2} = \frac{3,14 \cdot (0,008)^4 \cdot 0,3 \cdot 7,8 \cdot 10^3}{32} = 9,4 \cdot 10^{-7} \text{ кг/м}^2, \quad (2.5)$$

Приведений до валу двигуна сумарний момент інерції механічної системи приводу:

$$J'_\Sigma = J'_{\text{мех}} + J'_b = 1,11 \cdot 10^{-7} + 9,4 \cdot 10^{-7} = 10,51 \cdot 10^{-7} \text{ кг/м}^2, \quad (2.6)$$

Визначимо момент сили тертя в напрямних:

$$M_{\text{мп}} = \frac{m_{\text{виз}} \cdot g \cdot f_{\text{мп}} \cdot t_z}{2 i_p \eta_1 \eta_2} = \frac{4,4 \cdot 9,8 \cdot 0,03 \cdot 0,001}{2 \cdot 0,9} = 0,71 \cdot 10^{-3} \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad (2.7)$$

Додатковий момент на валу двигуна від повної або неповної частини сили для вертикальних осей:

$$M_G = \frac{m_{\text{виз}} \cdot g \cdot t_z}{2 \pi i_p \eta_2} = \frac{4,4 \cdot 9,8 \cdot 0,001}{2 \cdot 0,9 \cdot 3,14} = 7,6 \cdot 10^{-3} \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad (2.8)$$

Сумарний статичний момент:

$$M_{cm} = M_{mp} + M_G = 0,71 \cdot 10^{-3} + 7,6 \cdot 10^{-3} = 8,31 \cdot 10^{-3} \text{ Н·м}, \quad (2.9)$$

Динамічний момент двигуна:

$$M_{дин} = \frac{0,2i_p}{V_{ex} t_e} (J_{\Sigma}' + J_{os}) = \frac{0,2}{0,1 \cdot 0,002} (10,51 \cdot 10^{-7} + 70 \cdot 10^{-7}) =$$

$$= 16,1 \cdot 10^{-3} \text{ Н·м}, \quad (2.10)$$

Сумарний момент валу двигуна з коефіцієнтом запасу ($k_3=1.5$):

$$M_{\Sigma} = k_3 (M_{cm} + M_{дин}) = 1,8 (8,31 \cdot 10^{-3} + 16,1 \cdot 10^{-3}) =$$

$$= 43,93 \cdot 10^{-3} \text{ Н·м}, \quad (2.11)$$

За даними розрахунками було обрано кроковий двигун NEMA17HS2408 [10].

В таблиці 2.2 наведено характеристики обраного крокового двигуна.

Таблиця 2.2 – Характеристики крокового двигуна NEMA17HS2408

Параметр	Одиниці вимірювання	Значення
Крок гвинта	град	1.8
Довжина	мм	28
Номінальний струм	А	0.6
Номінальний опір	Ом	8
Індуктивність	мГн	10
Момент утримання	Н·м	0.12
Момент кручення	Н·м	0.016
Вага	г	150

Загальний вигляд двигуна представлений на рис. 2.1

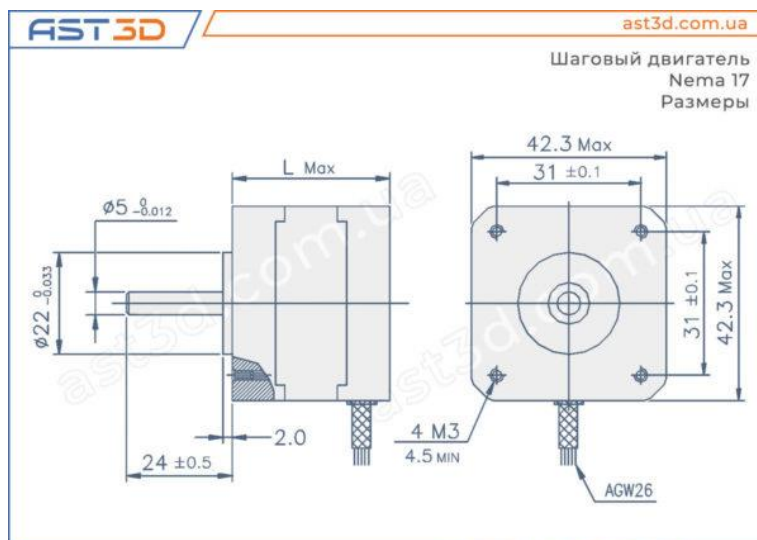


Рисунок 2.1 – Двигун NEMA17HS2408

Висновки до розділу

1. В результаті аналізу технічних і технологічних вимог до електроприводу верстату для лазерного гравірування встановлено, що в якості виконуючого елемента найбільш прийнятним є використання гібридного крокового двигуна.

2. Як видно з опису принципу роботи лазерного гравірувального верстату та результатів розрахунку параметрів електроприводу позиціонування лазерної голівки, мета модернізації верстату для лазерного гравірування, яка полягає у відмові від використання редуктора, є технічно реалізованою.

3. Виходячі з умов експлуатації обрано конкретний кроковий двигун, що дає можливість провести моделювання і розробити схему керування електроприводом.

3 РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ. СИНТЕЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

3.1 Математична модель крокового двигуна

Для усіх видів крокових двигунів за допомогою електронного комутатора генеруються імпульси напруги, які подаються на обмотки керування, розташовані на статорі двигуна. Кожен імпульс при цьому забезпечує обертання ротора на певний кут, залежно від конструкції крокового двигуна.

Для створення правил управління розглянемо кроковий двигун із зубчастим передавальним механізмом на валу двигуна. За допомогою цього механізму обертовий рух ротора двигуна перетворюється в поступальний рух механізмів подачі верстату (в кінцевому підсумку - його лазерної головки).

Під впливом одного імпульсу на кроковий двигун із розташованою на валу його ротора шестернею радіусом R , одиночний кутовий крок обертання ротора перетворюється в поступальний рух шестерні на відстань, еквівалентну:

$$L_{ш} = \Delta\alpha \cdot R \quad (3.1)$$

де $\Delta\alpha$ – крок повороту ротора КД при подачі одиничного імпульсу;

$L_{ш}$ – величина лінійного кроку шестерні при одному і тому ж імпульсі на КД.

Так як в кроковому двигуні оберти виконуються в дискретні моменти часу, то математичний опис положення можна зобразити наступним виразом:

$$\varphi_{k+1} = \varphi_k + n_k \cdot \Delta\alpha \quad (3.2)$$

де φ_k – кутове положення ротора крокового двигуна в момент часу k ;

n_k – кількість керуючих імпульсів, які подаються на кроковий двигун в проміжку часу від k до $k+1$;

φ_{k+1} – кутове положення ротора крокового двигуна в момент часу $k+1$ [11].

3.1.1 Побудова математичної моделі

Розглянемо двофазний кроковий двигун з активним неявним полюсом (рис 3.1):

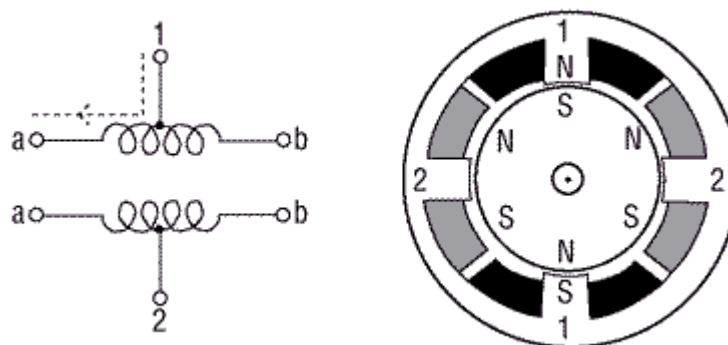


Рисунок 3.1 – Структурна схема двофазного крокового двигуна

Обмотку крокового двигуна на схемі заміщення зображують послідовним з'єднанням індуктивності і резистора. Окрім того, при обертанні ротора в обмотках виникає ЕРС. Тож, еквівалентна схема заміщення обмотки КД виглядає наступним чином (рис. 3.2) [12].

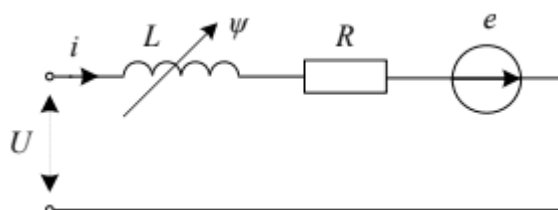


Рисунок 3.2 – Схема заміщення обмотки крокового двигуна

Візьмемо в якості початкового відліку кута положення, при якому вісь полюсу ротора співпадає з віссю першої фази. При цьому $L_1 = L_2 = L$; $R_1 = R_2 = R$; $U_1 = U_2 = U$;

Для опису динамічних режимів роботи крокового двигуна необхідно скласти рівняння електричної рівноваги для напруги контурів струму, рівняння моментів,

які впливають на ротор і також рівняння електромеханічного перетворення енергії. Тоді, виходячі із законів Кірхгофа для заданої схеми заміщення, запишемо рівняння електричної рівноваги напруг і ЕРС обмоток статора КД:

$$\begin{cases} U = R \cdot I_1 + L \cdot \frac{dI_1}{dt} + M_{12} \cdot \frac{dI_2}{dt} - E_1 \\ U = R \cdot I_2 + L \cdot \frac{dI_2}{dt} + M_{12} \cdot \frac{dI_1}{dt} - E_2 \end{cases}, \quad (3.3)$$

де U – напруга фаз; R – активний опір фаз;

I_1, I_2 , – точки фаз 1 і 2 відповідно;

M_{12} – взаємна індуктивність обмоток фаз;

E_1, E_2 – наведені ЕРС в котушках фаз 1 і 2, відповідно.

Наведена ЕРС в котушці фази 1 вираховується наступним чином:

$$E_1 = \omega \cdot p \cdot \psi_m \sin(p \cdot \theta), \quad (3.4)$$

де $\omega = d\theta / dt$ – кутова швидкість обертання ротора;

p – число зубців ротора;

ψ_m – максимальне потокозчіплення;

θ – положення ротора.

Аналогічним чином виглядає рівняння для фази 2:

$$E_2 = \omega \cdot p \cdot \psi_m \sin(p \cdot \theta - \lambda), \quad (3.5)$$

де λ – кут зміщення фаз.

Так як розглядається двофазний гібридний кроковий двигун, то $\lambda = \pi / 2$. Тобто, взаємною індуктивністю між фазами можна знехтувати.

Виходячи з наведених вище рівнянь, можна скласти рівняння електричного балансу:

$$\begin{cases} U = R \cdot I_1 + L \cdot \frac{dI_1}{dt} - \frac{d\theta}{dt} \cdot p \cdot \psi_m \sin(p\theta) \\ U = R \cdot I_2 + L \cdot \frac{dI_2}{dt} + \frac{d\theta}{dt} \cdot p \cdot \psi_m \cos(p\theta) \end{cases}, \quad (3.6)$$

Електромагнітний момент, створюваний обмотками фаз статора, можна визначити наступним виразом:

$$M_{em} = -\psi_m \cdot I_1 \cdot \sin(p\theta) + \psi_m \cdot I_2 \cdot \cos(p\theta). \quad (3.7)$$

Для визначення потокозчиплення можна використовувати рівняння руху ротора і паспортні данні машини: момент утримання і номінальний струм обмоток. Нехай, ротор знаходиться у стані спокою, а момент утримання – це максимальний момент, при похибці рівній кроку. Тоді:

$$\psi_m = \frac{M_{ном}}{pI_{ном}\sqrt{2}}. \quad (3.8)$$

Рівняння моментів, діючих на ротор:

$$\frac{J_\Sigma}{p} \cdot \frac{d^2\theta}{dt^2} + D \cdot \frac{d\theta}{dt} = M_{em} - M_H, \quad (3.9)$$

де $J_\Sigma = J_r + J_n$ – сумарний момент інерції ротора двигуна і навантаження, приведений до валу ротора;

D – коефіцієнт в'язкого тертя;

M_H – момент опору навантаження [13].

Тоді система рівнянь математичної моделі крокового електроприводу в динамічному режимі може бути записана наступним чином [14]:

$$\begin{cases} U = R \cdot I_1 + L \cdot \frac{dI_1}{dt} - \frac{d\theta}{dt} \cdot p \cdot \psi_m \sin(p\theta) \\ U = R \cdot I_2 + L \cdot \frac{dI_2}{dt} - \frac{d\theta}{dt} \cdot p \cdot \psi_m \cos(p\theta) \\ \frac{J_\Sigma}{p} \cdot \frac{d^2\theta}{dt^2} + D \cdot \frac{d\theta}{dt} = -\psi_m \cdot I_1 \cdot \sin(p\theta) + \psi_m \cdot I_2 \cdot \cos(p\theta) - M_H \\ \omega = \frac{d\theta}{dt} \end{cases}, \quad (3.10)$$

Дані рівняння є нелінійними диференційними рівняннями. Для полегшення вирішення, їх потрібно лінеаризувати або використати числові методи розрахунку.

Якщо по обмотках обох фаз протікає постійний струм I_0 , то положення рівноваги досягається при $\theta = \lambda / 2$. Відхилення від положення рівноваги

позначається як δ . Воно являється функцією часу t і при аналізуванні є малою величиною. Коли ротор повертається або коливається, струм в обох обмотках відхиляється від установленого значення i_1 і i_2 відповідно.

Припустимо, що:

$$\theta = \frac{\lambda}{2} + \delta, \omega = \omega_0 + \varepsilon, I_1 = I_0 + i_1, I_2 = I_0 + i_2, \quad (3.11)$$

Тоді отримаємо:

$$\begin{cases} U = R \cdot I_0 + R \cdot i_1 + L \cdot \frac{di_1}{dt} - \frac{d\delta}{dt} \cdot p \cdot \psi_m \sin\left(\frac{p\lambda}{2}\right) \\ U = R \cdot I_0 + R \cdot i_2 + L \cdot \frac{di_2}{dt} + \frac{d\delta}{dt} \cdot p \cdot \psi_m \cos\left(\frac{p\lambda}{2}\right) \\ \frac{J_\Sigma}{p} \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} + D \cdot \frac{d\delta}{dt} = -\psi_m \cdot I_1 \cdot \left(\sin\left(\frac{p\lambda}{2}\right) + \cos\left(\frac{p\lambda}{2}\right) p\delta\right) - \\ - \psi_m \cdot I_2 \cdot \left(p\delta \cdot \sin\left(\frac{p\lambda}{2}\right) + \cos\left(\frac{p\lambda}{2}\right)\right) - M_H \\ \varepsilon = \frac{d\delta}{dt} \end{cases} \quad (3.12)$$

Для спрощення систему (3.12) можна зобразити у вигляді, характерному для рівнянь, описуючих систему в просторі станів. Потрібно ввести змінні станів: $x_1 = i_1$, $x_2 = i_2$, $x_3 = \varepsilon$, $x_4 = \delta$. Тоді система рівнянь виглядатиме наступним чином:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\frac{R}{L} x_1 + \frac{K_1}{U - R \cdot I_0} x_3 + \frac{U - R \cdot I_0}{L} \\ \dot{x}_2 = -\frac{R}{L} x_2 + \frac{K_1}{U - R \cdot I_0} x_3 + \frac{U - R \cdot I_0}{L} \\ \dot{x}_3 = -\frac{K_4 p}{J_\Sigma} x_1 + \frac{K_4 p}{J_\Sigma} x_2 - \frac{D p}{J_\Sigma} x_3 - \frac{K_3 p}{J_\Sigma} x_4 \\ \dot{x}_4 = x_3 \end{cases}, \quad (3.13)$$

або має векторно-матричну форму:

$$\begin{cases} \dot{X} = A \dot{X} + B U \\ Y = C \dot{X} \end{cases} \quad (3.14)$$

де $X = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T$ – вектор змінних станів;

$Y = [M_H \ 0 \ 0 \ 0]^T$ – вектор збуджувальної дії;

$U = [0 \ 0 \ U \ U]^T$ вектор вхідних сигналів.

3.2 Схема керування двофазним кроковим двигуном

На рис. 3.3 зображено схему підключень обраного крокового двигуна NEMA17HS2408 [15].

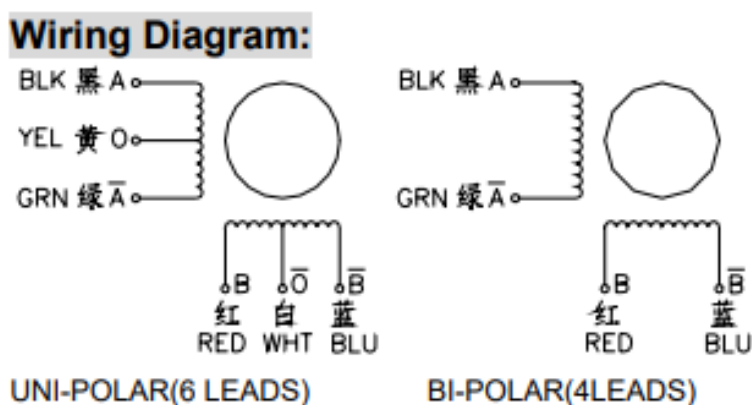


Рисунок 3.3 – Схема підключень крокового двигуна

Для з'єднання 6-жильного крокового двигуна з драйвером можна обрати одне із двох підключень:

- уніполярне;
- біполярне послідовне підключення обмоток двигуна.

Уніполярне підключення обмоток крокового двигуна представлено на рисунку 3.4.

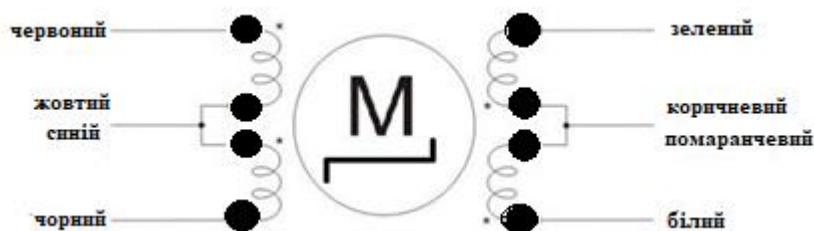


Рисунок 3.4 – Уніполярне підключення обмоток крокового двигуна

Цей спосіб підключення проявляє найкращу ефективність при середніх швидкостях у діапазоні робочих значень.

Електричні параметри двигуна, такі як струм обмотки, опір обмотки, статичний крутний момент, індуктивність обмоток і інші характеристики, у цьому випадку відповідають їхнім номінальним значенням. Біполярне послідовне підключення представлено на рисунку 3.5.

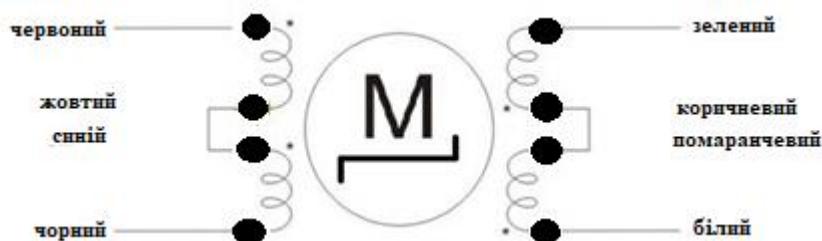


Рисунок 3.5 – Біполярне послідовне підключення обмоток крокового двигуна

Ця конфігурація обмоток демонструє найкращу ефективність при низьких швидкостях. У випадку біполярного послідовного підключення потрібно зменшити струм, який проходить через обмотки двигуна в $\sqrt{2}$ разів.

Номінальний робочий струм обмотки, залежить від опору обмотки R . При послідовному з'єднанні обмоток опір об'єднаної обмотки збільшується вдвічі - $2R$.

Споживана потужність при уніполярному включенні:

$$P_{пу} = I_{уніполяр}^2 \times R \quad (3.15)$$

де P - потужність, яку споживає кроковий двигун при уніполярній конфігурації обмоток; I - струм, що протікає через обмотку крокового двигуна в уніполярній конфігурації обмоток; R - опір обмотки крокового двигуна в уніполярній конфігурації обмоток.

При біполярному включенні:

$$P_{\text{споживана}} = I_{\text{біполяр}}^2 \times 2R \quad (3.16)$$

де P - споживана потужність крокового двигуна при біполярній послідовній конфігурації обмоток; I - струм в обмотці крокового двигуна з біполярною конфігурацією обмоток; R - опір обмотки крокового двигуна в біполярній послідовній конфігурації обмоток. Споживана потужність не залежить від типу підключення, тому

$$P_{\text{пу}} = P_{\text{споживана}} = I_{\text{уніполяр}}^2 \times R = I_{\text{біполяр}}^2 \times 2R \quad (3.17)$$

Звідки

$$I_{\text{біполяр}} = \frac{I_{\text{уніполяр}}}{\sqrt{2}} \quad (3.18)$$

Оскільки крутний момент двигуна прямо залежить від магнітного поля, що створюється обмотками статора, його збільшення спостерігається при зростанні числа витків обмотки та збільшенні струму, який проходить через неї. Проте, через зменшення струму в $\sqrt{2}$ рази, та збільшення числа витків в 2 рази, крутний момент зросте в $\sqrt{2}$ рази. Відношення моментів двигуна при біполярній послідовній та уніполярній конфігураціях обмоток виглядає наступним чином:

$$M_{\text{біполяр}} = 1.4M_{\text{уніполяр}} \quad (3.19)$$

де $M_{\text{біполяр}}$ - момент, що створюється на валу крокового двигуна з біполярної послідовної конфігурації обмоток, а $M_{\text{уніполяр}}$ - момент, який створюється на валу крокового двигуна при уніполярній конфігурації обмоток.

Біполярне паралельне підключення представлено на рисунку 1.6.

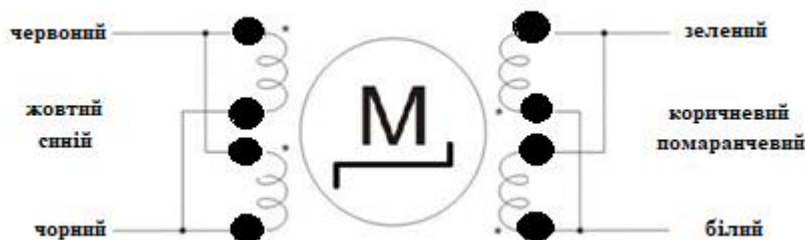


Рисунок 3.6 – Біполярне паралельне підключення обмоток крокового двигуна

Найбільш ефективним для високих швидкостей є використання паралельного підключення обмоток. При біполярному паралельному типі підключення потрібно збільшити струм, що подається на обмотки двигуна в $\sqrt{2}$ рази.

Наприклад, якщо номінальний робочий струм двигуна складає 2 А, то при паралельному включенні обмоток необхідний струм становить 2.8 А, тобто в 1,4 рази більше. Це зумовлено тим, що номінальний робочий струм розрахований на опір однієї обмотки, і при паралельному підключенні обмоток опір об'єднаної обмотки зменшується вдвічі ($0,5 R$). При паралельному включенні обмоток споживана потужність стає:

$$P_{\text{споживана}} = 0.5 I_{\text{біполяр}}^2 \times R \quad (3.20)$$

де $P_{\text{споживана}}$ - потужність що споживається кроковим двигуном з біполярної паралельної конфігурації обмоток, I - струм в обмотці крокового двигуна з біполярної паралельної конфігурації обмоток.

Споживана потужність не залежить від типу підключення, тому

$$P_{\text{споживана}} = P_{\text{пу}} = I_{\text{уніполяр}}^2 \times R = 0.5 I_{\text{біполяр}}^2 \times R \quad (3.21)$$

Звідки

$$I_{\text{біполяр}} = I_{\text{уніполяр}} \times \sqrt{2} \quad (3.22)$$

Так як крутний момент двигуна пропорційний величині магнітного поля, що створюється обмотками статора, він збільшується при збільшенні числа витків обмотки і зменшується при зменшенні струму, що пропускається через обмотки.

Однак з урахуванням збільшення струму в $\sqrt{2}$ рази та збільшення числа витків обмотки у 2 рази, крутний момент зросте в $\sqrt{2}$ разів.

$$M_{\text{біполяр}} = 1.4M_{\text{уніполяр}} \quad (3.23)$$

де $M_{\text{біполяр}}$ - момент, створюваний на валу крокового двигуна з біполярної послідовної конфігурації обмоток, а $M_{\text{уніполяр}}$ - момент, створюваний на валу крокового двигуна при уніполярної конфігурації обмоток.

2.2.1 Види драйверів для крокових двигунів

Основними завданнями управління кроковим двигуном є підтримка заданого рівня струму в його обмотках і подача певних комбінацій сигналів у визначений час. Для керування кроковими двигунами можна використовувати драйвери різних типів:

1. Драйвер постійної напруги: Цей тип драйвера використовує постійну напругу, що подається на обмотки крокового двигуна. Недоліками є низька швидкість роботи, а величина опору обмоток впливає на струм.
2. Дворівневий драйвер: струм в обмотках формується в два етапи - спочатку висока напруга, а потім він підтримується малою напругою. Такий підхід дозволяє зменшити нагрівання двигуна, але не підтримує мікро-кроковий режим управління.
3. Драйвер із підтримкою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ): найбільш функціональні драйвери, які формують струм у обмотках за допомогою повної напруги з модуляцією ширини імпульсів. Вони забезпечують плавний хід та підвищену точність позиціонування, підтримуючи мікро-кроковий режим. Ці драйвери також дозволяють регулювати напругу на обмотках програмно або за допомогою зовнішніх пристроїв, таких як потенціометр чи DIP-перемикач.

Драйвери крокових двигунів з підтримкою широтно-імпульсної модуляції вважаються найбільш функціональними. Вони регулюють струм в обмотках крокового двигуна, подаючи високу напругу, яка обробляється широтно-імпульсною модуляцією. При досягненні струмом заданого значення, напругу на обмотках можна відключати за допомогою таких методів:

1. Регулювання за допомогою потенціометра.
2. Відсікання напруги за допомогою DIP-перемикача.
3. Програмне відсікання за допомогою відповідного програмного забезпечення.

Цей тип драйверів має високу функціональність та зазвичай підтримує мікро-кроковий режим управління, що поліпшує плавність ходу та забезпечує підвищену точність позиціонування [16].

3.2.2 Сигнали керування кроковими двигунами

При управлінні кроковими двигунами використовують спеціальні сигнали, серед яких можна виділити такі:

1. Enable: відповідає за увімкнення або вимкнення драйвера крокового двигуна. При вимкненому драйвері відбувається знеструмлення обмоток крокового двигуна. Сигнал Enable є потенційним.
2. Dir: цей сигнал визначає напрямок обертання ротора крокового двигуна. Наприклад, при подачі сигналу він може обертатися за годинниковою стрілкою, а при відключенні – проти годинникової стрілки. Зміну напрямку можна реалізувати як програмно, так і зміною порядку підключення обмоток крокового двигуна. Сигнал Dir також є потенційним.
3. Step: Основний тактовий сигнал. Його одиночний імпульс викликає переміщення ротора крокового двигуна на певний кут, заданий драйвером.

Зазвичай використовуються значення, такі як $1/1$, $1/2$, $1/4$, $1/8$, $1/10$, $1/16$ тощо.

Драйвери крокових двигунів, крім основних функцій, часто мають додаткові можливості, такі як контроль перевантажень по струму та контроль вхідної напруги. Вибір драйвера крокового двигуна рекомендується проводити, враховуючи завдання, тип двигуна, метод управління та необхідні функції [17].

3.2.3 Схеми управління кроковим двигуном на основі закінчених блочних елементів

Система керування кроковим двигуном є статичним пристроєм, що перетворює частоту і генерує систему імпульсів напруги форми, відмінної від синусоїди.

Перетворювач для безперервного сигналу імпульсів напруги використовується у випадках, коли вихідна інформація подається у вигляді безперервно змінюваної величини. Функціональний пристрій для формування імпульсів перетворює вхідні імпульси довільної форми у прямокутні імпульси з необхідною тривалістю. Параметри сформованих імпульсів визначаються схемою розподілу імпульсів. Розподільник імпульсів перетворює унітарний код в m -фазну систему прямокутних імпульсів напруги. Ця система складається з однотипних каналів і через підсилювач потужності подається на обмотки крокового двигуна. Ключові елементи підсилювача потужності працюють в режимі перемикачів. Регулятор напруги, керований вхідними сигналами, формує необхідні напруги на фазах крокового двигуна.

Логічна частина схеми керування кроковим двигуном може бути реалізована різними методами:

1. Окремі логічні елементи: У цьому випадку використовуються окремі логічні елементи для створення схеми управління. Однак при такому

підході часто потрібні додаткові драйвери для ефективного управління кроковим двигуном, і реалізація мікро-крокового режиму може бути складною.

2. Окремі блоки обробки сигналів: в цьому випадку управління кроковим двигуном здійснюється через окремі блоки обробки сигналів, які потім інтегруються з іншими елементами системи. При розробці такої системи слід враховувати функції, які підтримує мікроконтролер і забезпечувати його взаємодію з іншими компонентами управління.
3. Логічні контролери: в даному випадку управління кроковим двигуном виконується за допомогою логічних контролерів і сам мікроконтролер виконує функції перетворювача вхідних сигналів, формувача імпульсів, генератора імпульсів та обчислювального пристрою. Для управління кроковим двигуном з біполярною конфігурацією обмоток можуть бути необхідні додаткові драйвери для врахування особливостей транзисторів.

Враховуючи перелічені особливості, використання мікроконтролера як для обробки, так і для формування сигналів, може бути більш зручним рішенням, спрощуючи схему та полегшуючи взаємодію елементів системи.

3.2.4 Аналіз варіантів реалізації силової частини пристрою управління кроковим приводом

При аналізі схем управління кроковим двигуном у всіх типах драйверів можна виділити ключові компоненти, що включають логічну та силову частини. Незалежно від конфігурації обмоток крокового двигуна і кількості виводів, будь-який пристрій управління кроковим двигуном повинен включати перетворювач вхідних сигналів верхнього рівня для їх ідентифікації та подальшої обробки. Логічна частина пристрою також відповідає за генерацію вихідних сигналів для управління силовою частиною. Ці сигнали призначені для створення і утримання

струму в обмотках крокового двигуна, необхідного для обертання ротора на заданий кут.

Серед основних сигналів важливі такі:

1. Почергова подача напруги;
2. Одночасна подача напруги;
3. ШІМ-сигнал.

У всіх схемах існує силова частина, яка використовується для керування біполярними двигунами із можливістю реалізації мікро-кроку та реверсу за допомогою Н-мосту для кожної обмотки двигуна. У загальному випадку, Н-міст має схему, яка представлена на рисунку 3.7.

На зазначеному рисунку, елементи під номерами 1, 2, 3 та 4 є ключами, якими регулюється струм в обмотках крокового двигуна. Керування цими ключами здійснюється відповідними драйверами, і, як правило, в якості ключів використовуються транзистори

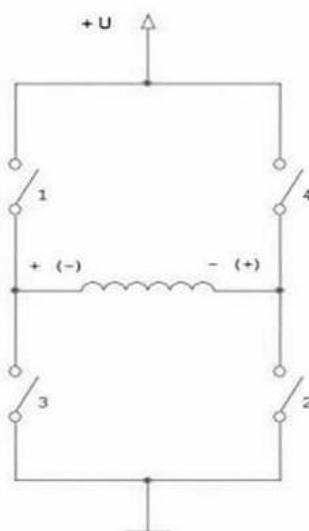


Рисунок 3.7 – Схема підключення обмотки біполярного крокової двигуна з можливістю перемикання полюсів

Для крокових двигунів невеликої та середньої потужності більш практичним є використання транзисторів із структурою МОП. Зразок такого моста наведено на рисунку 3.8:

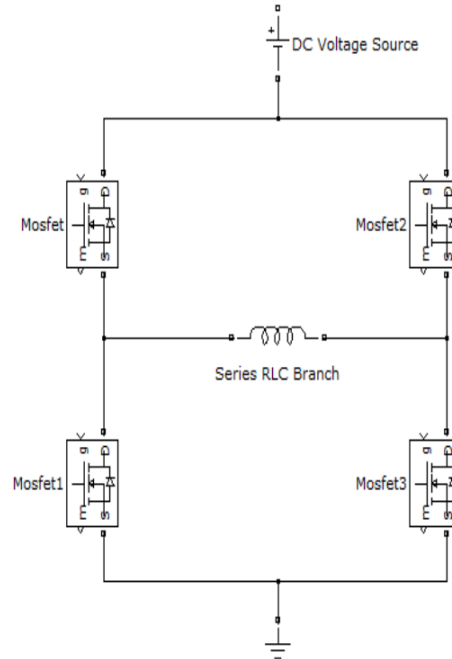


Рисунок 3.8 – Схема підключення обмотки біполярного крокової двигуна з можливістю перемикавання полюсів на основі транзисторів MOSFET

Для потужних крокових двигунів рекомендовано використовувати IGBT транзистори в якості ключів. У такому випадку схема силової частини для однієї обмотки крокового двигуна матиме такий вигляд, як показано на рисунку 3.9.

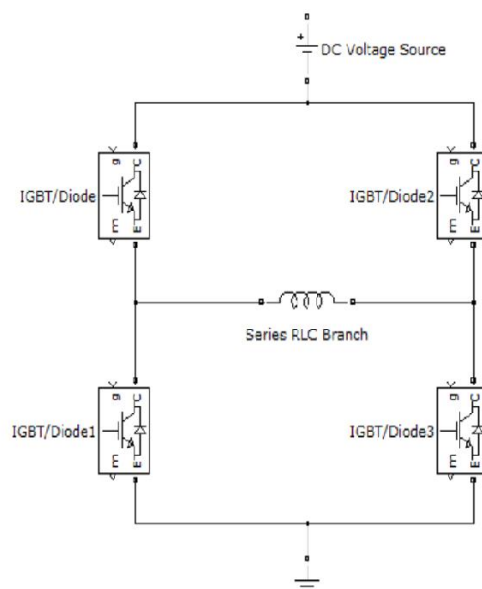


Рисунок 3.9 – Схема підключення обмотки біполярного крокової двигуна з можливістю перемикавання полюсів на основі транзисторів IGBT

Для управління уніполярним кроковим двигуном використовується система подачі струму на кожну з половин обмотки. У загальному випадку, схема управління кроковим двигуном може бути представлена, як показано на рисунку 3.10:

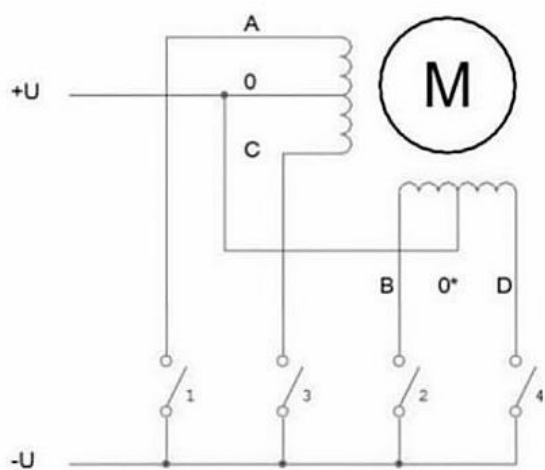


Рисунок 3.10 – Схема підключення ключів обмотки уніполярного крокового двигуна

На рисунку 3.10 позначені ключі під номерами 1, 2, 3 і 4, які відповідають за регулювання струму в обмотках крокового двигуна. Для крокових двигунів великої потужності використовуються IGBT транзистори як ключі. В такому випадку схема набуває вигляду, як показано на рисунку 3.11.

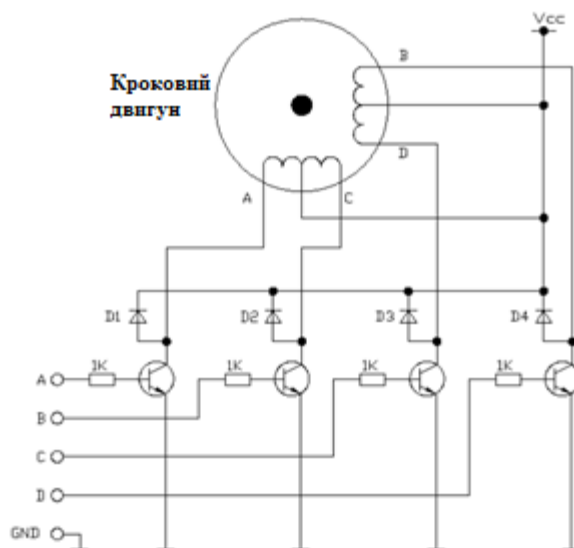


Рисунок 3.11 – Схема підключення ключів обмотки уніполярного крокового двигуна на основі транзисторів IGBT

Для крокових двигунів невеликої та середньої потужності рекомендовано використовувати транзистори з МОП-структурою. Один з можливих варіантів реалізації такого моста показано на рисунку 3.12.

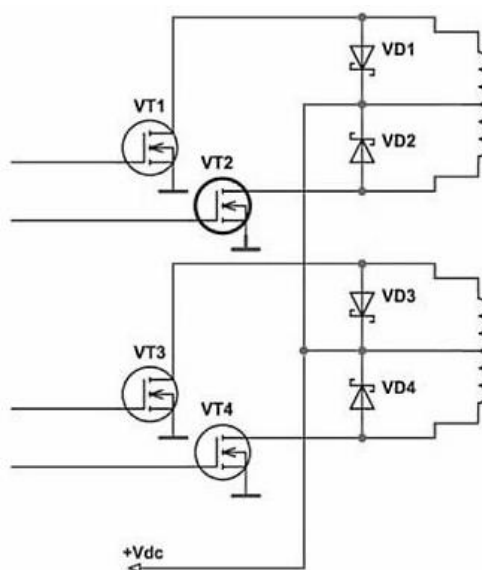


Рисунок 3.12 – Схема підключення ключів обмотки уніполярного крокового двигуна на основі транзисторів MOSFET

Також у більшості мікросхем присутні захисти по струму і температурі. Слід зазначити, що багато мікросхем є комбінованими, складаючись з готових блоків управління, інтегральних мікросхем і логічних елементів. Зі зростанням вимог до точності та дроблення кроку збільшується кількість необхідних компонентів і підвищується рівень складності реалізації мікросхеми.

Перевагою схем управління кроковим двигуном на основі дискретних елементів є їхня простота реалізації. Однак недоліком цього типу схем є необхідність додаткового контролера і обмежена функціональність.

Схема управління кроковим двигуном на основі інтегральних елементів також потребує мікроконтролерів, але, на відміну від схем із дискретними елементами, вона є більш функціональною. Крім того, вона включає готові блоки управління.

Схема управління кроковим двигуном на основі закінчених блоків управління є досить функціональною. Вона об'єднує логічний і силовий блоки управління, потребує лише команд верхнього рівня і має простоту в реалізації, легкість

інженерного обслуговування та можливість швидкого ремонту. З іншого боку, ремонт може бути витратнішим.

3.2.5 Схема блоку керування кроковим приводом

При створенні схеми керування кроковим двигуном необхідно враховувати необхідний функціонал схеми та вимоги до управління. Для реалізації протоколу step/dir, який використовує два входи, кожен з яких пройшов аналого-цифрове перетворення, зазвичай використовують два сигнали: enable, який визначає, чи дозволено пристрою управління крокового двигуна працювати, і step/dir, що надає інформацію для керування кількістю кроків та їхнім напрямком. За вищезазначеними параметрами працює схема, представлена на рисунку 3.13:

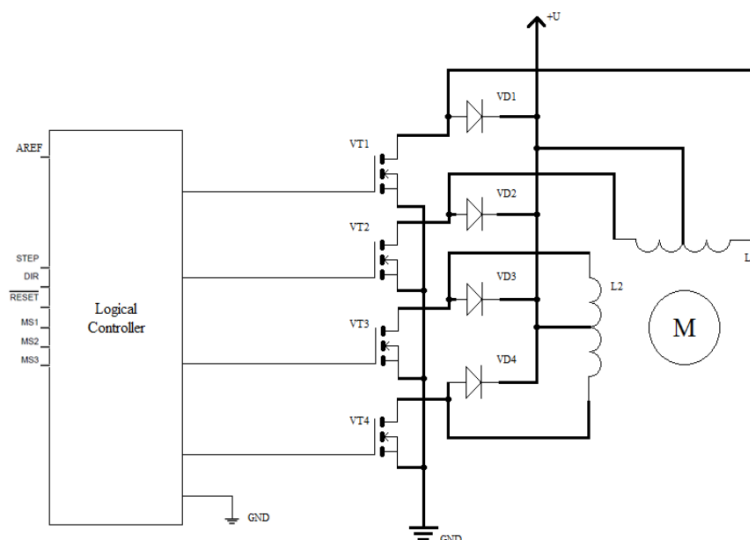


Рисунок 3.13 – Структурна схема блоку керування кроковим двигуном

Далі, вказані сигнали, разом із сигналами вибору режиму роботи крокового двигуна (MS1, MS2 і MS3), подаються на логічний контролер. Залежно від отриманого сигналу, контролер відправляє керуючий сигнал на транзистори, які виконують роль ключів.

Ці сигнали, разом із сигналами вибору режиму роботи крокового двигуна (MS1, MS2 і MS3), надходять на логічний контролер. Відповідно до сигналу, що надійшов, контролер генерує керуючий сигнал для транзисторів, які виступають у ролі ключів.

3.2.6 Схеми управління кроковим двигуном

На базі інтегральних елементів. Компанія "ALLEGRO" представляє драйвер A3972, який забезпечує мікрокроковий режим з можливістю дроблення кроку до 1/32. Розглянемо схему управління A3972, яка показана на рисунку 3.14 [18].

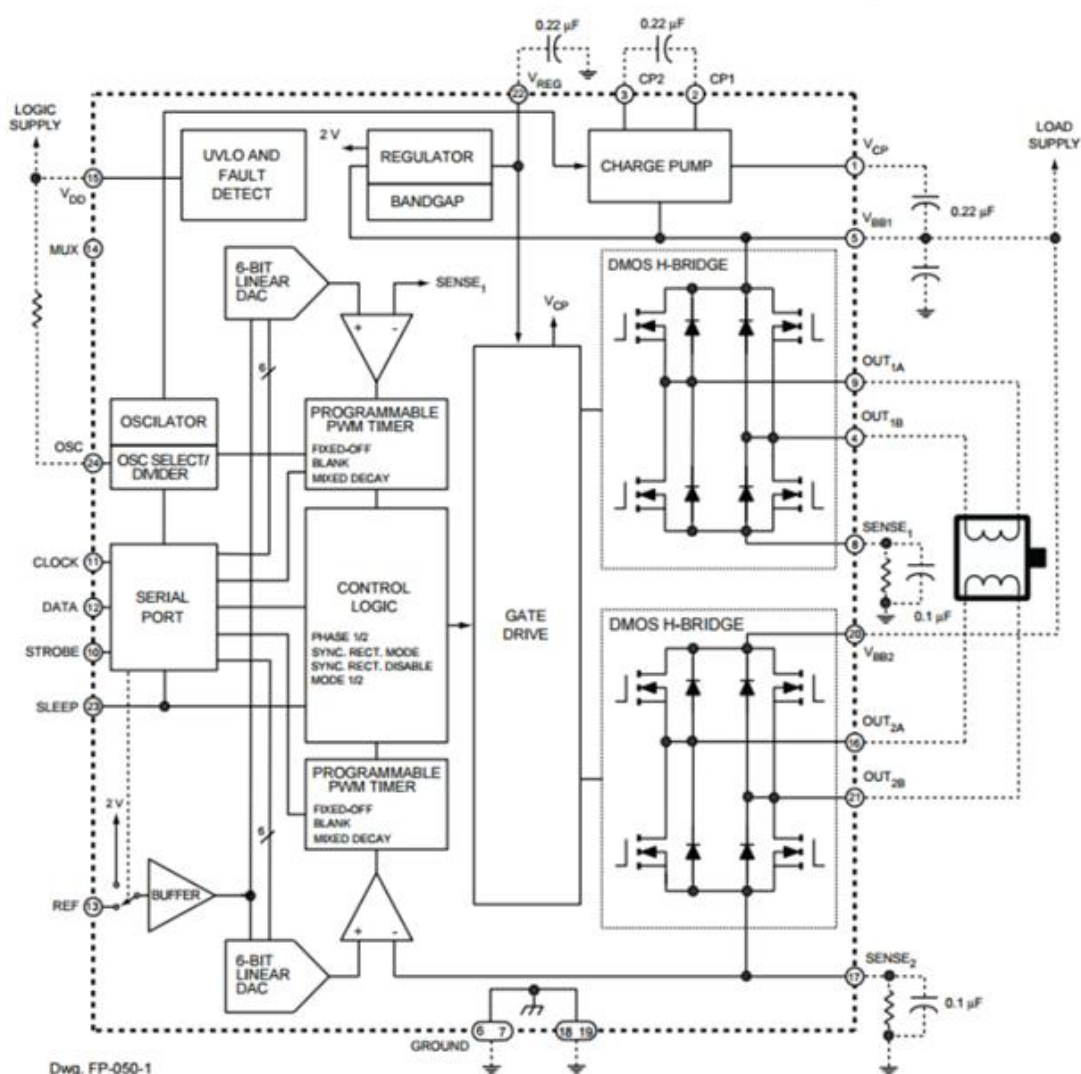


Рисунок 3.14 – Драйвер a3972

Як можна побачити на рисунку 3.14, цей драйвер складається як з готових блоків управління, так і з інтегральних мікросхем. Здатність до дроблення кроку реалізується за допомогою 6-бітних лінійних ЦАП. Ця мікросхема застосовується в крокових приводах невеликої потужності. У схемі передбачений захист від перегріву та низької напруги.

Щодо іншої схеми на основі закінчених блочних елементів, мікросхема DRV8825 на рисунку 3.15 надає інтегроване рішення для управління кроковими двигунами у принтерах, сканерах та іншому автоматизованому обладнанні. Цей пристрій включає два Н-мости і мікрокроковий індексатор, призначений для управління біполярним кроковим двигуном. Блок виведення містить потужні МОП-транзистори, з'єднані мостом, для керування обмотками двигуна [19].

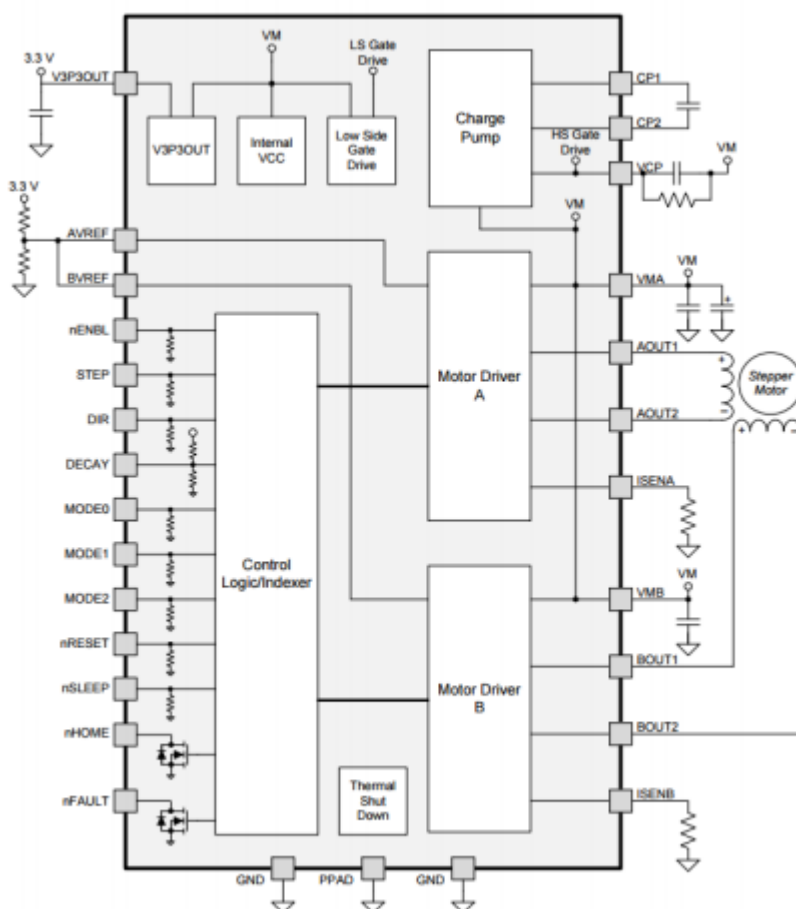


Рисунок 3.15 – Драйвер DRV8825

Цей драйвер також відповідає вимогам точності в 1/16 кроку. Він підтримує протокол STEP/DIR, що полегшує управління двигуном [20]. Драйвер для крокового двигуна, представлений на рисунку 3.16, складається з мікроконтролера, чотирьох драйверів ключів верхнього та нижнього рівнів і двох Н-мостів. Відмінною особливістю цієї схеми є використання мікроконтролера на основі ядра AVR.

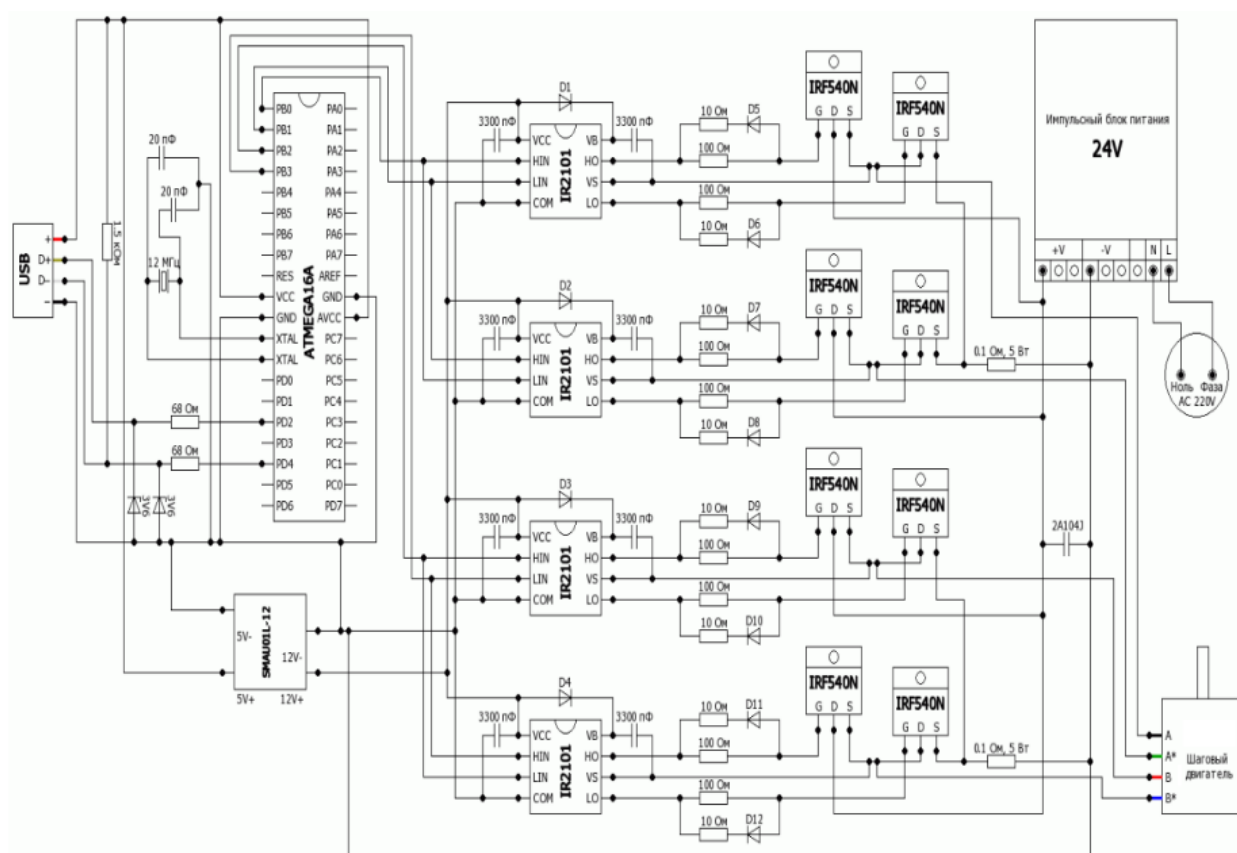


Рисунок 3.16 – Драйвер біполярного крокового двигуна

Ця схема може працювати в кроковому, пів-кроковому і мікро-кроковому режимах управління кроковим двигуном. Забезпечує високу точність до 1/16 кроку. Режим мікро-кроку встановлюється за допомогою коду, який прошивається в мікроконтролер за допомогою програматора і може бути змінений за потреби [21].

Розглянемо драйвер керування кроковим двигуном, представлений на малюнку 3.17. Цей драйвер складається з мікроконтролера від компанії "Microchip" - PIC16F628 та чотирьох ключів у вигляді MOSFET транзисторів. Важливо відзначити, що ця схема працює в кроковому та пів-кроковому режимах, але не підтримує режим мікро-кроку.

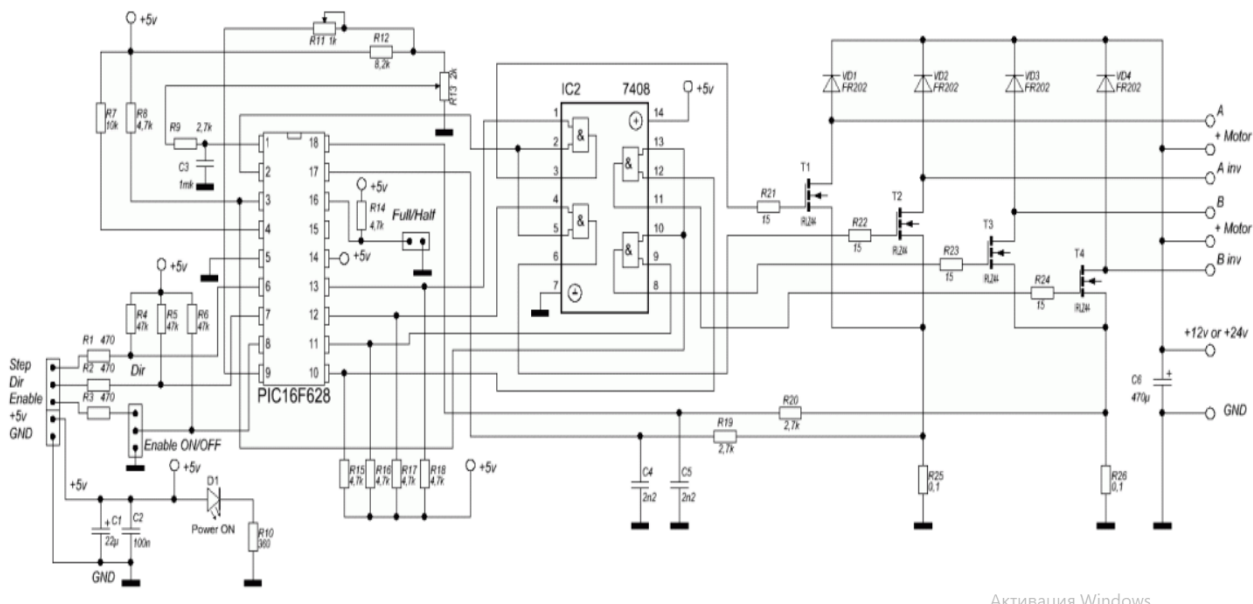


Рисунок 3.17 – Драйвер уніполярного крокового двигуна

Переходячи в мікро-кроковий режим, виконання підпрограми розпочинається безпосередньо по завершенню перевірки позиції двигуна. Під час цієї перевірки система, включаючи кроковий двигун, піддається аналізу. Контроль мікро-кроків та виявлення втрачених кроків відбуваються при переході в мікро-кроковий режим. У випадку втрати кроку, коли напруга на вході компаратора не відповідає еталонній, підпрограма видає команду на повторення кроку. Якщо мікро-крок виконується успішно відповідно до програми, виконується наступний крок. У разі повторних втрат кроку видається команда STOP. У кроковому та напів-кроковому режимах ця підпрограма не використовується.

Цей метод вирішує проблему втрати кроків при роботі мікроконтролерної системи з кроковими двигунами, не вимагаючи використання дорогих датчиків положення [22].

Висновки до розділу

1. Розроблена структурна схема системи автоматичного керування та принципова електрична схема для крокового двигуна, яка базується на контролері PIC16F84. Для забезпечення стабільності струму використовується контролер ШІМ, програмно реалізований з використанням датчиків струму та компараторів.

2. Розроблена система автоматичного керування ефективно вирішує проблеми втрати кроків при використанні мікроконтролерної системи на крокових двигунах, забезпечуючи надійну та точну роботу без додаткових витрат.

4 ДОСЛІДЖЕННЯ І АНАЛІЗ СТАТИЧНИХ І ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОПРИВОДА

4.1 Модель крокового електроприводу

Комп'ютерне моделювання проектованої установки проводиться в середовищі математичного моделювання MATLAB, з використанням бібліотеки Simulink.

Дана модель крокового електроприводу побудована на основі використання гібридної двофазної моделі двигуна. Параметри двигуна взяті для обраного крокового двигуна NEMA17HS2408. Мостовий перетворювач («А» і «В») це H-міст, що складається з чотирьох Mosfet транзисторів. Мости живляться від напруги 28 В постійного струму і їх виходи забезпечують обмотки двигуна струмом збудження, що, в свою чергу, забезпечує роботу двигуна. Струми двигуна незалежно регулюються двома контролерами на основі гістерезису, які генерують сигнали для регулювання модулями MOSFET шляхом порівняння вимірних струмів з їх завданням. Пульсації в хвилеподібному струмі знаходяться під контролем гістерезисної смуги компараторів. Частота комутації є змінною і залежить від параметрів двигуна.

В даній моделі використовується однофазне збудження через свою простоту. Прямокутне завдання струму генерується з використанням поточної амплітуди і параметрів кроку частоти, зазначені в діалоговому вікні. Рух крокового приводу керується за допомогою STEP і DIR сигналів, отриманих від блоку Signal Builder. Сигнал STEP регулює кутові переміщення крокового двигуна: при одиничному сигналі відбувається східчастий крок повороту ротора, при нульовому – зупинка. Сигнал DIR гулює напрям переміщення ротора: 1 – пряме, 0 – зворотне. Операції керування крокового двигуна зображуються відповідними сигналами з блоку Scope. Моделювання здійснюється з використанням фіксованого кроку з часом вибірки $T_s = 1e-06$, що забезпечує прийнятну точність для ШІМ. На рис. 4.1 зображено імітаційну модель приводу крокового двигуна [23].

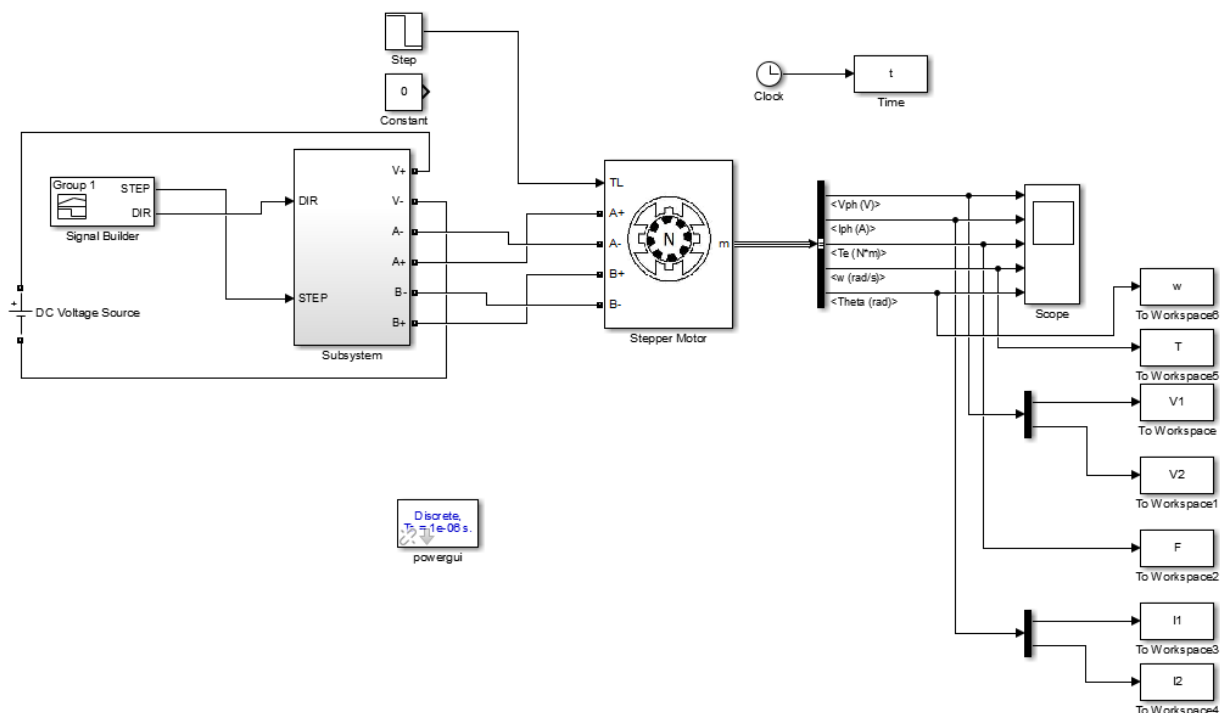


Рисунок 4.1 – Імітаційна модель крокового електроприводу

Блок крокового двигуна (БКД) реалізує загальну модель, що представляє два найпопулярніші типи крокових двигунів:

Крокові двигуни зі змінним магнітним опором, та крокові двигуни з постійним магнітом або гібридні крокові двигуни.

Модель крокового двигуна складається з електричного та механічного розділів. Електричний розділ представлений еквівалентною схемою, конфігурація якої залежить від типу двигуна. Еквівалентні схеми побудовані з припущенням, що магнітний ланцюг лінійний (без насичення), і можна знехтувати взаємною індуктивністю між фазами. Механічний розділ представлений моделлю просторового стану на основі моменту інерції та коефіцієнта в'язкого тертя.

Як видно з рисунку, вхідними параметрами є: фазна напруга (A+, B+, A-, B-) і момент навантаження – TL.

Вихідними параметрами для моделі двигуна є: фазний струм – $I_{ph}(A)$, фазна напруга – $V_{ph}(V)$, електромагнітний момент – $T_e(N \cdot m)$, швидкість двигуна – $w(rad/s)$, позиція двигуна – $\Theta(rad)$.

Для крокового двигуна з постійним магнітом (ПМ) або гібридного типу еквівалентна схема для однієї фази показана на рис. 4.2.

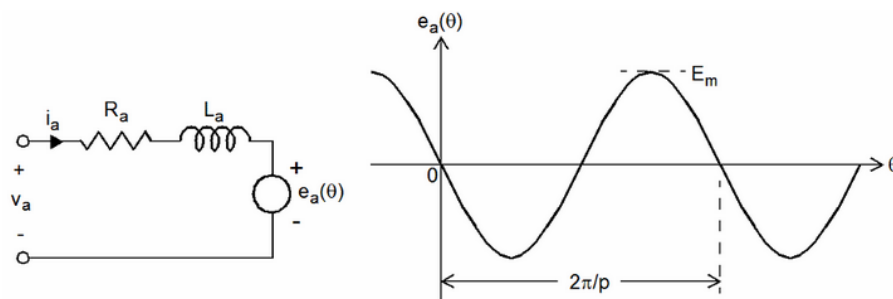


Рисунок 4.2 – Еквівалентна схема для крокового двигуна з постійним магнітом

Параметри крокового двигуна NEMA17HS2408 представлені на рис. 4.4.

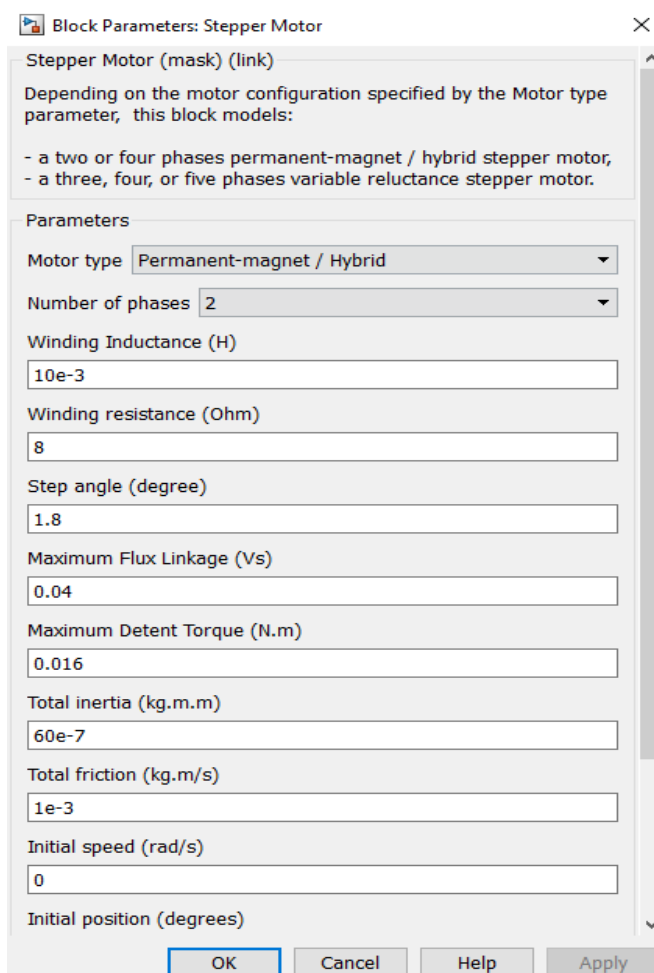


Рисунок 4.4 – Параметри крокового двигуна NEMA17HS2408

Електрична або керуюча частина складається з 3-х функціональних блоків: блок керування, гістерезисний компаратор і Mosfet перетворювач (рис. 4.5).

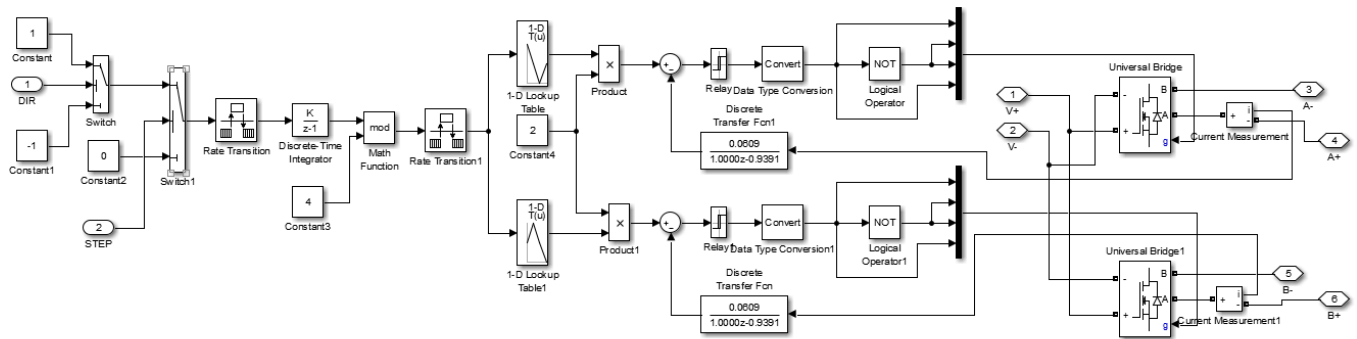


Рисунок 4.5 – Модель керуючої частини електроприводу

Робота двигуна контролюється двома сигналами STEP і DIR, що є вихідними сигналами з блоку Signal Builder, що було описано вище.

Наступним пунктом виконаємо моделювання статичних та динамічних характеристик.

4.2 Моделювання динамічних характеристик в середовищі MATLAB

Для процесу моделювання використовується наступна типова програма. З моменту часу 0 виконується запуск крокового електродвигуна на холостому ході в прямому напрямку. В момент часу 1с здійснюється накидання номінального навантаження і двигун продовжує рухатись в прямому напрямку. В період часу від 1,5с до 2с відбувається пауза. Після чого в момент часу 2с відбувається реверс двигуна і рух у зворотному напрямку до зупинки в моменту часу 3,5с (рис. 4.5 – рис. 4.10). Нижче приведені характеристики зміни сигналу завдання (рис 4.5), фазних струмів (рис. 4.6), крива електромагнітного моменту (рис. 4.7), швидкості обертання КД (рис. 4.8) і кутового положення (рис.4.9 – рис. 4.10) [24].

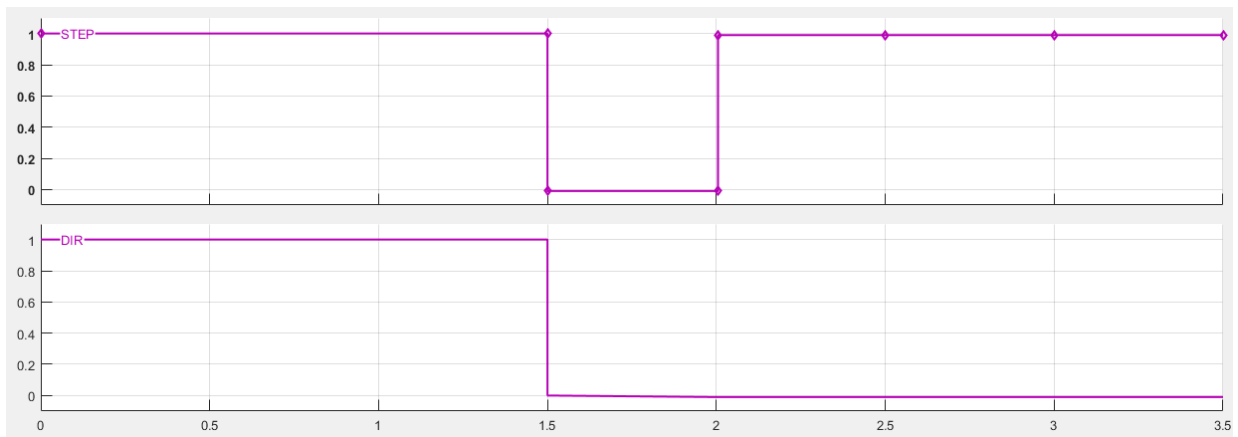


Рисунок 4.5 – Завдання керування електроприводом

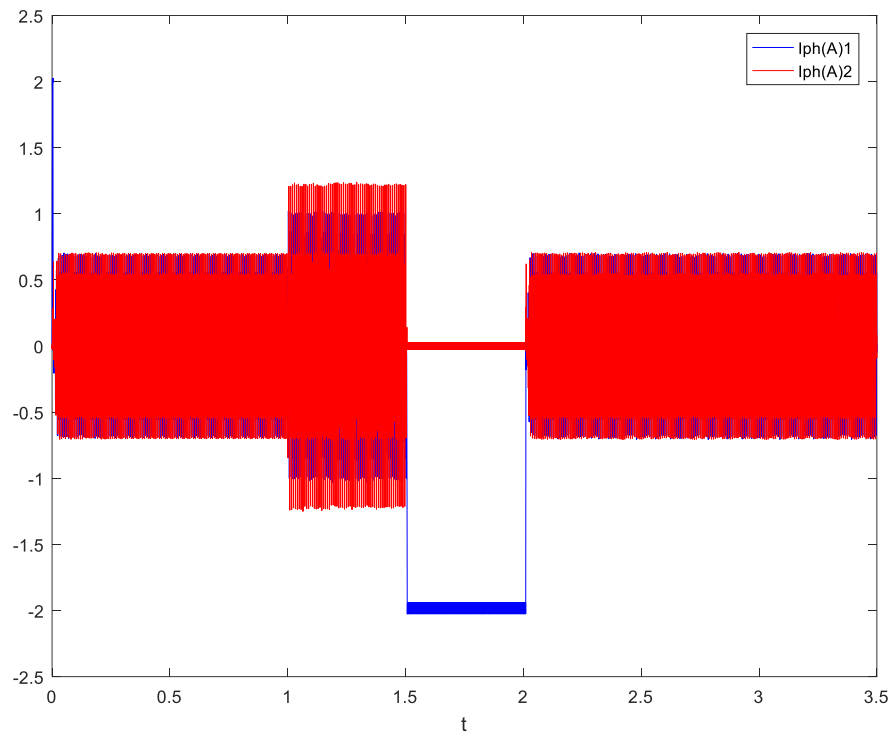


Рисунок 4.6 – Крива фазних струмів крокового електропривода

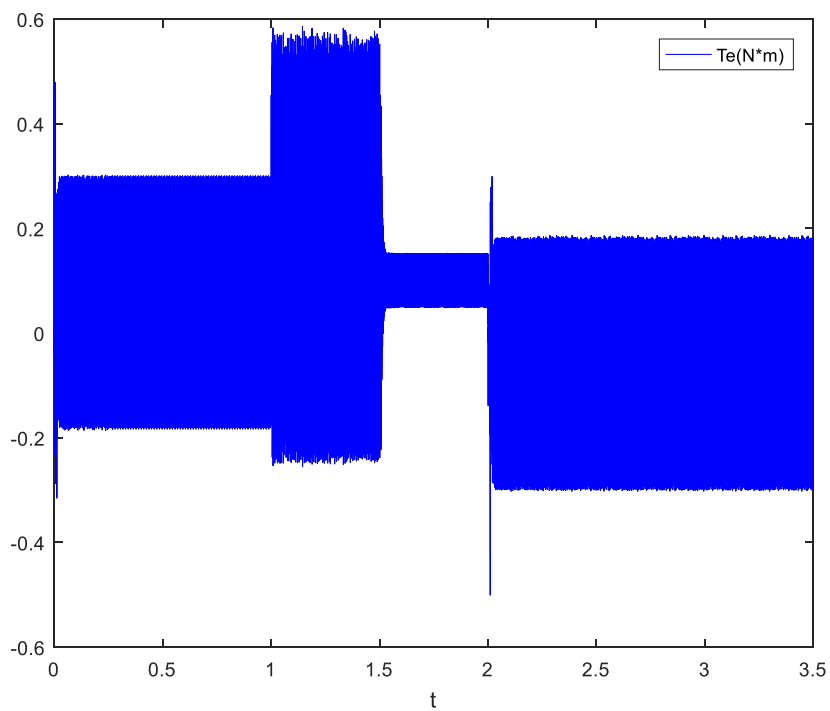


Рисунок 4.7 – Крива електромагнітного моменту крокового електроприводу

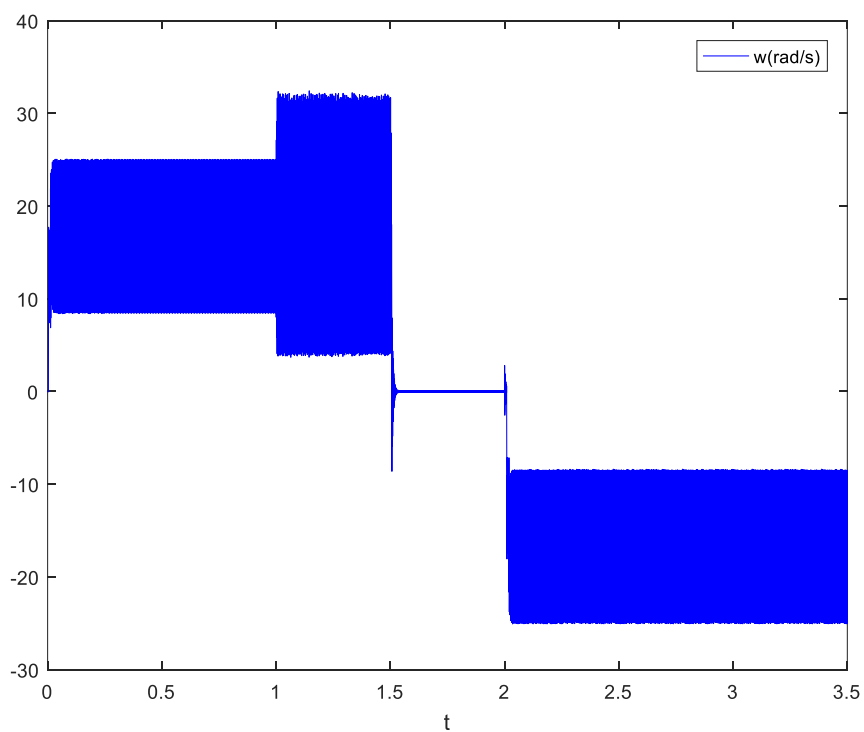


Рисунок 4.8 – Крива частоти обертання ротора крокового електроприводу

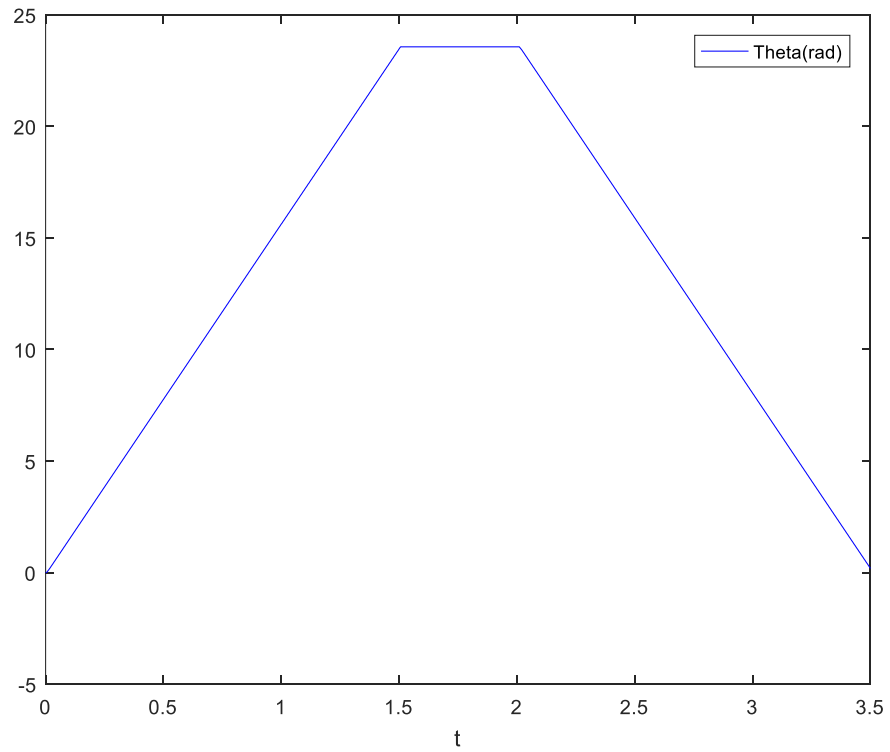


Рисунок 4.9 – Крива відпрацювання кутового положення

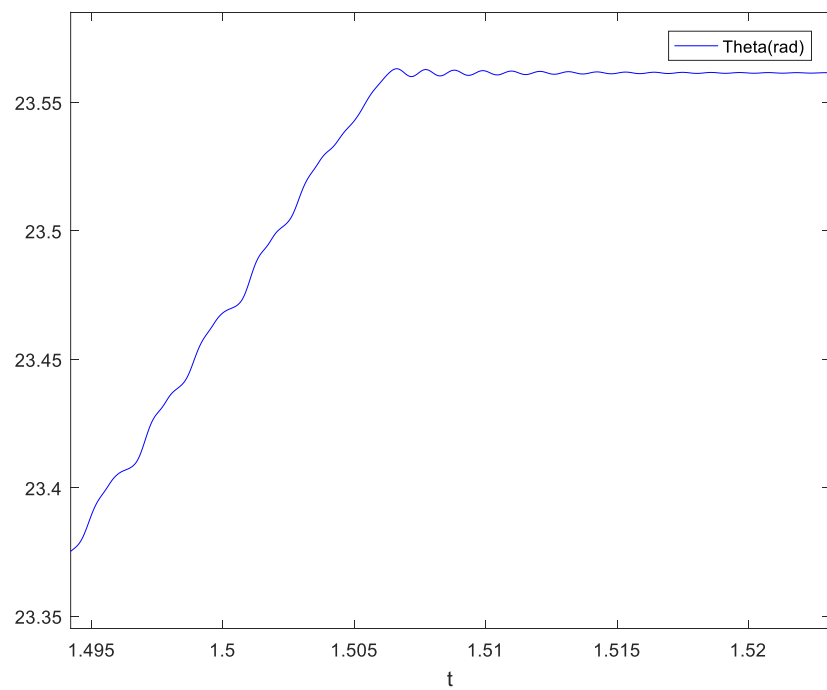


Рисунок 4.10 – Крива відпрацювання положення (у збільшеному масштабі)

Висновки до розділу

Результати моделювання крокового привода свідчать про його працездатність. Також можна відзначити, що за допомогою представленої імітаційної моделі крокового електропривода можна проводити дослідження відпрацювання будь-яких законів керування. Показники якості перехідних процесів задовільняють завданню на проектування.

5 СПЕЦЧАСТИНА. РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ ЧПК

5.1 Загальний опис систем ЧПК

Сучасні системи ЧПК, що позначаються як CNC (Computer numerical control), засновані на використанні мікропроцесора з оперативною пам'яттю та операційною системою.

Основна мова програмування, що описується в ISO6983 Міжнародного комітету стандартів, відома як "G-код", є найпоширенішою для програмування обладнання використовуваного в металообробці. Дана мова є стандартною для американських та європейських виробників обладнання з ЧПК і іноді отримує назву "ISO 7біт".

Підсистема керування верстатом із ЧПК виступає як центральна частина всієї системи.

Закриті системи керування мають власні алгоритми та цикли роботи, власну логіку, що забезпечує їхню високу надійність, оскільки всі компоненти проходять тестування на сумісність [25].

Системи ЧПК класифікують наступним чином:

1. Системи типу NC (Numerical control), які виконують адресацію команд, інтерполяцію проміжних координат та реалізацію типових циклів за жорстко заданими алгоритмами. Інформацію вводять у систему ЧПК з керуючою програмою окремими кадрами;
2. Системи типу CNC (Computer NC) з вбудованими однією або декількома мікропроцесорами та програмною реалізацією алгоритмів, які записуються в постійний запам'ятовуючий пристрій при виготовленні системи ЧПК. Ці системи дозволяють формувати типові цикли оброблювання для різних технологічних задач;

3. Система DNC (Direct NC), яка керує групою верстатів від однієї ЕОМ, який використовує загальну пам'ять, щоб зберігати програми і розподіляти їх за запитами різних верстатів. Ці системи використовують в гнучких виробничих системах для організації узгодженої роботи окремих технологічних об'єктів;
4. Інші [26].

На рис. 5.1 зображено функціональну схему верстата з ЧПК.

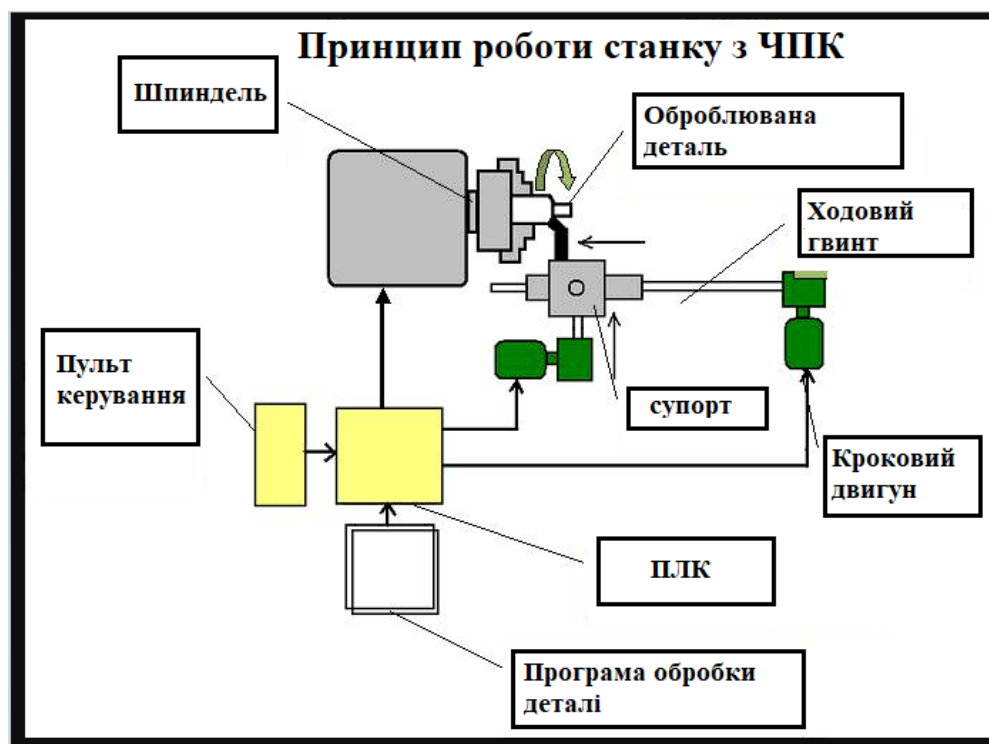


Рисунок 5.1 – Функціональна схема станку з ЧПК

Підсистема приводів включає різноманітні двигуни та гвинтові передачі. В конструкціях верстатів ЧПК використовують крокові двигуни та сервоприводи.

Система числового програмного керування (ЧПК) працює наступним чином. Спочатку програміст створює керуючу програму, в якій міститься закодована інформація про траєкторії, швидкості переміщення, частоту обертання шпинделя та інші дані, необхідні для виконання обробки матеріалу.

Підсистема керування читає цю програму, розшифровує її і розроблює профіль переміщення. Згідно з профілем, підсистема керування відправляє точно визначену кількість електричних імпульсів на відповідний двигун. Двигун відповідно обертає ходовий гвинт, переміщуючи виконавчий орган у необхідну координату.

Датчики зворотного зв'язку передають інформацію про фактичне положення виконавчого органу назад до підсистеми керування. Здійснюється порівняння фактичного і заданого положення. Якщо є відмінність, підсистема керування коригує кількість електричних імпульсів для двигуна.

Цей процес повторюється до тих пір, поки виконавчий орган не досягне необхідної позиції з високою точністю. Хоча може бути деяка похибка переміщення, система розраховує проміжні опорні точки за допомогою спеціального пристрою - інтерполятора.

Інтерполятор постійно підтримує функціональний зв'язок між опорними точками та оцінює відхилення від заданої траєкторії, намагаючись зменшити їх до мінімуму. Благодаря системі керування, верстати з ЧПК отримують розширені технологічні можливості при збереженні високої надійності. Для ефективної роботи використовуються вісі координат та система координат верстата. [27].

5.2 Програмування обробки на верстаті з ЧПК

При програмуванні найбільшу увагу приділяють написанню рядків керуючої програми, що безпосередньо відповідають за переміщення.

Запис керуючих програм виконують за допомогою стійки ЧПК верстата або використовуючи ПК з послідуочим надсиланням програми в стійку ЧПК [28].

Верстати з числовим програмним керуванням працюють у форматі G та M-кодів відповідаючим стандартам ISO.

Система ЧПК вимагає, щоб знак кінця кадру стояв в кінці кожного кадру керуючої програми, наприклад, (;) або (*).

Напишемо приклад керуючої програми для завдання промодельованого в 4-му пункті даної роботи:

G0; (запуск електродвигуна)

G1 X1 Y1 Z1 F100; (відпрацювання в прямому напрямку з накиданням навантаження)

G4 P500; (пауза, де P500 – 500 мілісекунд)

G0 X2 Y2 Z2; (реверс та рух в зворотному напрямку)

G1 X3 Y3 Z3 F150; (рух в прямому напрямку)

G0; (гальмування)

G0 X4 Y4 Z4; (реверс та рух в прямому напрямку)

Основним методом перевірки керуючої програми є візуальне відтворення обробки у вигляді промальовування траєкторії центру інструмента або повної імітації механічної обробки на верстаті з демонстрацією процесу видалення матеріалу. Цей вид перевірки відомий як "бекплот" (Backplot).

Бекплот дозволяє легко виявити помилки, які можуть бути непомітні при звичайному перегляді коду керуючої програми. Щоб уникнути будь-яких помилок перед виготовленням реальної деталі, зазвичай виконують пробний прогін або тестову перевірку прямо на верстаті.

Висновки до розділу

У даному розділі висвітлено ключові аспекти розробки програмного забезпечення для систем числового програмного керування (ЧПК) та програмування обробки на верстаті з ЧПК. Продемонстровано приклад розробки програми для виконання завдання для моделювання роботи приводу крокового електродвигуна. Розробка програмного забезпечення для систем ЧПК і

програмування обробки є важливими етапами в реалізації автоматизованих процесів металообробки з використанням числового програмного керування.

6 СТАРТАП-ПРОЕКТ. ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ

Безредукторний автоматизований електропривод верстата для лазерного гравірування – це стартап [29, 30], який спрямований на розробку та впровадження безредукторного автоматизованого електроприводу для верстатів, що використовують в лазерному гравіруванні. Даний проект поєднує в собі високу ефективність, точність та максимальну надійність в роботі.

6.1 Основні характеристики та переваги

Безредукторна технологія: використання прямого приводу, що виключає використання редукторів, забезпечує зниження витрат енергії, підвищену точність та надійність системи.

Висока швидкість та точність: забезпечується швидкий та точний рух верстата, що робить його ідеальним для високоточних робіт з лазерним гравіруванням. Відсутність редукторів дозволяє ефективніше передавати потужність, зменшуючи втрати енергії і підвищуючи продуктивність верстата. Безредукторний привод дозволяє досягти великої швидкості переміщення, що важливо для ефективного виконання завдань лазерного гравірування.

Автоматизоване управління: інтеграція із системами числового програмного керування (ЧПК) дозволяє автоматизовано керувати процесом гравірування, зменшуючи людське втручання.

6.2 Ринок та метацільова аудиторія

Лазерний верстат з прямим приводом передбачає використання автоматизованого електроприводу як окремого продукту, а також можливість вбудовування його в існуючі верстати. Також пропонується технічна підтримка та послуги оновлення програмного забезпечення для оптимальної роботи системи.

Маркетинг та продажі:

1. Цифрова реклама – запуск цифрових компаній на соціальних мережах та платформах для залучення уваги покупців;
2. Участь у виставках – активна участь у виставках та заходах, пов'язаних з лазерним гравіруванням, для представлення продукту перед фахівцями та потенційними клієнтами.

Розробка та технічна підтримка:

1. Постійне вдосконалення – високотехнологічна лабораторія для досліджень та розробок нових функцій, що дозволить продукту лишатись на передовому ринку;
2. Цілодобова технічна підтримка – технічна підтримка для клієнтів, забезпечуючи їм високий рівень обслуговування та вирішення будь-яких технічних питань;
3. Безредукторний привод може бути успішно використаний в різних галузях, від промислового виробництва до гравірування на замовлення, що розширює цільову аудиторію.

Відсутність редукторів спрощує конструкцію та зменшує ймовірність поломок, що впливає на витрати на технічне обслуговування. Також простота конструкції безредукторного приводу дозволяє оптимізувати процеси виробництва, зменшуючи витрати на матеріали та робочу силу.

Фінанси та інвестиції:

1. Інвестиції у виробництво – залучення фінансування для масового виробництва та покращення якості продукції;

2. Партнерство з виробниками – встановлення стратегічно партнерства із виробниками верстатів для спільного впровадження нових технологій.

6.3 Екологічна ініціатива

1. Споживання зеленої енергії:

- стандарти зеленого виробництва: зобов'язання використовувати екологічну чисту енергію для виробництва продукції, зменшуючи вплив на навколишнє середовище.

2. Утилізація та переробка:

- вторинна переробка та утилізація: розробка програми утилізації та переробки витратних матеріалів, щоб максимально зменшити відходи та сприяти відновленню ресурсів.

3. Зменшення впливу на довкілля:

- використання технології без використання редуктору сприяє зменшенню енергетичних втрат та екологічного впливу приводу.

4. Оптимізація енергоспоживання:

- розробка та впровадження систем для енергозберігання та оптимізації споживання електроенергії і зменшення втрат.

5. Довговічність та модульність:

- довговічні матеріали та конструкція: створення продукту, який має тривалу службу та не потребує частого оновлення.

- модульна конструкція: розробка верстату, який можна легко модернізувати та оновлювати окремими модулями, замість повного заміщення усього обладнання.

6. Дистанційне управління та моніторинг:

- віддалене діагностування та управління: впровадження технологій, які дозволяють віддалено моніторити та управляти верстатом, що може зменшити необхідність фізичної присутності техніків та сприяти оптимізації їх роботи[29].

1.4 Бізнес модель

Бізнес модель для автоматизованого електроприводу верстату для лазерного гравірування повинна включати в себе декілька важливих елементів. Залежно від поставлених стратегічних задач компанії, змін на ринку та конкурентного середовища, модель буде виглядати наступним чином:

1. Продаж компонентів та систем автоматизованого крокового електроприводу:

Компанія буде пропонувати повний комплект крокового електроприводу, що ключає систему управління, електромотор, та інші компоненти. Ці компоненти можуть бути продані виробникам гравірувального обладнання для встановлення в нові верстати або модернізації існуючих.

2. Установка та послуги модернізації:

Компанія пропонуватиме послуги модернізації гравірувальних верстатів, встановлюючи свої технології на вже використовуване обладнання. Це може включати програмне забезпечення, нові компоненти або відстроювання для оптимізації електроприводу.

3. Ліцензійна модель:

Компанія використовуватиме ліцензійну модель, надаючи іншим виробникам можливість використовувати наші технології у власних продуктах. Це включатиме отримання плати за ліцензією чи відсотка з продажів продукції, що використовує технологію автоматизованого крокового електроприводу.

4. Сервісна підтримка та моніторинг:

Компанія надаватиме послуги з підтримки та моніторингу для забезпечення більшої продуктивності та надійності системи. Це включатиме технічну підтримку, регулярні технічні перевірки та віддалене обладнання для моніторингу.

5. Партнерства та співпраця:

Компанія укладатиме стратегічно важливі партнерства з виробниками гравірувальних верстатів для спільної розробки і впровадження технологій автоматизованого крокового електроприводу[30].

Висновки до розділу

Враховуючи вищенаведені переваги, можна зробити висновок, що стартап-проект «Автоматизований електропривод верстату для лазерного гравірування» є техніко-економічно обгрунтованим, оскільки він сприяє підвищенню продуктивності, зниженню витрат на обслуговування та має потенціал для успішного впровадження на ринку лазерного гравірування. Завдяки технічним перевагам, економічним вигодам та широкому ринковому потенціалу, проект може стати перспективним інноваційним рішенням, забезпечуючи підвищення продуктивності та конкурентоспроможності в сучасному сегменті лазерного гравірування.

ВИСНОВКИ

В даній магістерській роботі було здійснено розробку безредукторного автоматизованого електроприводу верстату для лазерного гравірування. В процесі виконання було отримано наступні результати.

1. На основі огляду літературних джерел були виявлені проблеми, які потребували вирішення для покращення ефективності та економічної вигідності установки.
2. За проведеними розрахунками моменту з отриманих вихідних даних було обрано кроковий електродвигун NEMA17HS2408. Даний двигун після виконання перевірки сумісності підходить для використання в даній розробці.
3. Складено структурну схему системи автоматичного керування для крокового двигуна, яка базується на контролері PIC16F84. Розроблена система автоматичного керування, яка ефективно вирішує проблеми втрати кроків при використанні мікроконтролерної системи керування на крокових двигунах, забезпечуючи надійну та точну роботу без додаткових витрат.
4. Проведено моделювання крокового електроприводу, в наслідок чого зроблено висновок про його працездатність і відповідність завданню магістерської дисертації. Дана модель дає можливість досліджувати перехідні процеси в різноманітних динамічних та статичних режимах роботи.
5. У спецчастині роботи висвітлено ключові аспекти розробки програмного забезпечення для систем числового програмного керування обробкою на верстатах з ЧПК. Продемонстровано приклад розробки програми для заданого циклу роботи крокового електроприводу.
6. Наведено техніко-економічні переваги стартап-проекту, висвітлено маркетингові можливості для покращення інтеграції продукції та залучення партнерів для співпраці.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Інтегровані технології обробки матеріалів [Текст]: підручник / Е.С. Геворкян, Л.А. Тимофєєва, В.П. Нерубацький, О.М. Мельник. И-73 – Харків: УкрДУЗТ, 2016. – 238 с., іл. 56, табл. 2, бібліогр.: 85 назв. ISBN
2. Класифікація лазерів. URL: <https://www.bystronic.ua/uk/produkty/sistemi-lasernoi-reski/>
3. Системи програмного та слідкуючого керування рухом: підручник для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / В.І.Теряєв, С.В. Король. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 150 с. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/48880>
4. Обладнання для лазерної різки. URL: https://dspace.susu.ru/xmlui/bitstream/handle/0001.74/16517/2017_599_maks_yuto
5. Лазерно-гравіювальний верстат з ЧПУ портального типу ADL 1325. URL: <https://dominant-cnc.com/ua/p540414660-lazerno-gravirovalnyj-standok.html>
6. Кінематична схема верстату для лазерного гравіювання. URL: <https://pandia.ru/text/80/446/84787.php>
7. Електропривод: Навч. посіб. / О.М. Закладний, В.В. Прокопенко, О.О. Закладний – К.: НТУУ «КПІ», 2008. - 316 с.: іл.
8. Загальні вимоги до електроприводу. URL: https://stud.com.ua/84179/tehnika/zagalni_vimogi_elektroprivodu.
9. Розрахунок параметрів та характеристик електричних машин: Методичні вказівки до розрахункового завдання з курсу «Електричні машини» для студентів електротехнічних спеціальностей всіх форм навчання, уклад. В.І. Мілих, Н.В. Полякова; за ред. В.І. Мілих.– Харків: НТУ «ХПІ», 2013.– 51 с.

10. Кроковий двигун NEMA23HS7401. URL: <https://ast3d.com.ua/info/nema-23-razmery-i-harakteristiki>
11. Siavash Sadeghi, Mojtaba Mirsalim. Dynamic Modeling and Simulation of a Switched Reluctance Motor in a Series Hybrid Electric Vehicle/ Acta Polytechnica Hungarica. No1, 2010.
12. Електричні машини і трансформатори : навч. посібник / М. О. Осташевський, О. Ю. Юр'єва; за ред. В. І. Мілих. – Харків : ФОП Панов А. М., 2017. – 452 с.
13. Кухарчук В.В, Усов В.В. Математичні моделі крокового двигуна як об'єкта контролю. *Діагностика в електромеханічних і енергетичних системах*. 2006. Т. 1, № 3. С. 106–109.
14. Карпенко Б.К., Ларченко В.І., Прокоф'єв Ю.А. Крокові електродвигуни. – К .: Техніка, 1972
- 15.NEMA17HS2408 Datasheet. URL: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/1245667/NINGBO/17HS2408.html>
- 16.<https://www.ti.com/product/DRV8825>
- 17.Siavash Sadeghi, Mojtaba Mirsalim. Dynamic Modeling and Simulation of a Switched Reluctance Motor in a Series Hybrid Electric Vehicle/ Acta Polytechnica Hungarica. №1, 2010.
- 18.<https://www.alldatasheetru.com/datasheetpdf/pdf/55120/ALLEGRO/A3972.html>
- 19.Texas Instruments, Reference manual / DRV8825., 2014, 22 pages
- 20.https://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=Drv8825%20Datasheet&gad_source=1&gclid=CjwKCAiAqY6tBhAtEiwAHeRopTlA8mNEoPNxTVNd2vEAhR8s4Q6pD2XLrw81Rq53i9F1fDrs6V_ObxoCOu4QAvD_BwE
- 21.Мікроконтролерне керування гібридними кроковими двигунами / В.В. Лищук та ін. *"Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*. 2021. № 44.

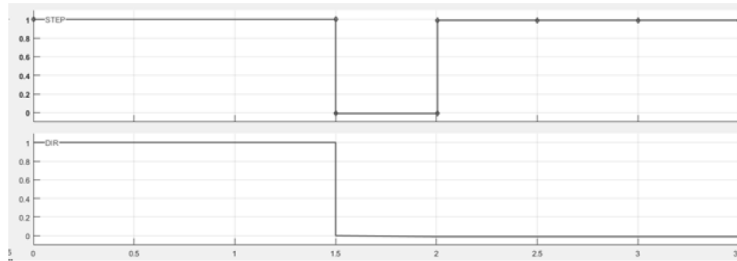
22. Irimia N.D., Simon A., Livadaru L., Vlasceanu S., Dabija O., Mihai A.M., Study of a 3 phase (6/4) switched reluctance motor control, Gheorghe Asachi Technical University of Iasi, 2011.
23. Інноваційне обладнання автоматизованого виробництва. Конструктивні особливості та основи програмування верстатів з числовим програмним керуванням [Електронний ресурс]: навчальний посібник для студентів спеціальності 131 «Прикладна механіка» спеціалізації «Технології комп'ютерного конструювання верстатів, роботів та машин» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: Ковальов В.А., Гаврушкевич А.Ю., Гаврушкевич Н.В. – Електронні текстові дані (1 файл: 21,8 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 158с.
24. Василенко О. В., Жавжаров Є. Л. Модель крокового двигуна для дослідження систем автоматичного позиціонування в ЕСAD. *Електротехніка*. 2017. № 1. С. 31–38.
25. R. Krishnan. Switched reluctance motor driver: modeling, simulation, analysis, design, and applications. BocaRaton: CRCPress, 2001.
26. Аналіз і розрахунків моделі крокового двигуна. URL: <https://wikipedia.com.ua/1x7f6b.html>
27. Системи автоматизованого програмування верстатів з ЧПК : навчальний посібник / С. Л. Міранцов, В. І. Тулупов, С. Г. Онищук, Ю. Б. Борисенко, Є. В. Мішура, О. С. Ковалевська – Краматорськ : ДДМА, 2011. – 152 с.
28. Ковальов В.А., Гаврушкевич А.Ю., Гаврушкевич Н.В. Конструктивні особливості та основи програмування верстатів з числовим програмним керуванням: Навч. посіб. / Ковальов В.А., Гаврушкевич А.Ю., Гаврушкевич Н.В. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 158 с.
29. Короткий посібник з G-Code. Кругова інтерполяція G02 та G03. URL: <https://raptorcnc.com.ua/ua/a476946-kratkoe-rukovodstvo-code.html>.

30. Бізнес план стартапу: інструкція для початківців. URL:
<https://noosphereengineering.com/news/business-plan-startup-noosphere-ua>.
31. Як складати бізнес-план: покрокова інструкція та приклади. URL:
<https://fondy.ua/uk/knowledge/business-plan/>.

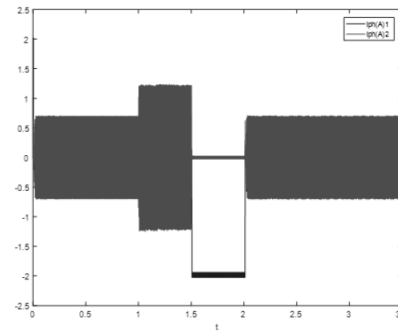
ДОДАТОК А

Графічна частина магістерської дисертації

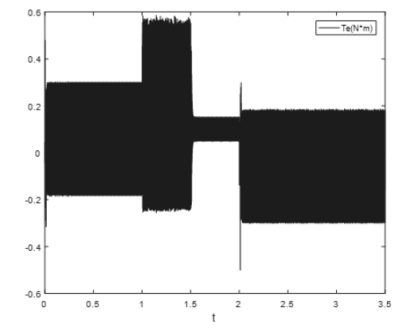
[illegible]



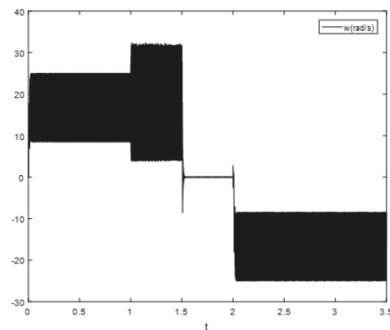
Завдання керування електроприводом



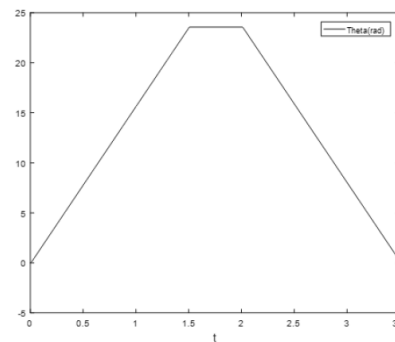
Крива фазних струмів крокового двигуна



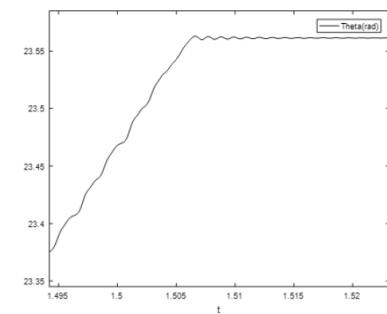
Крива електромагнітного моменту крокового двигуна



Крива частоти обертання ротора крокового двигуна



Крива відпрацювання завдання положення



Крива відпрацювання завдання положення у збільшеному масштабі

				14.1215.015.МД			
Дир. деп.	ІН	Відп.	Лект.	Автоматизовані електроприводи			
Розроб.	Швець В.Г.	Лект.	Викл.	Верстат для лазерного			
Лектор.	Горбач В.І.	Лект.	Викл.	програмування			
Лектор.		Лект.	Викл.	Результати підготовки			
Лектор.		Лект.	Викл.	Курс 1. Лекції			
Лектор.		Лект.	Викл.	Каб. АЕМС-СП			
Лектор.		Лект.	Викл.	гр. ПП-21м			
Курсовий				Формат А7			

Параметр	Позначення	Значення
1	2	3
Передаточне число	i_p	1
Крок гвинта, м	t_v	0.001
Швидкість швидкого ходу, м	$V_{вх}$	10
Максимальна швидкість робочої подачі, м	$V_{роб\ max}$	4
Мінімальна швидкість робочої подачі, м	$V_{роб\ min}$	0.1
ККД коробки подач	η_1	1
ККД гвинтової пари	η_2	0.9
Маса рухомого вузлу станка, кг	$m_{вузлст}$	4.4
Коефіцієнт тертя в напрямних	$f_{тр}$	0.03
Діаметр гвинта, м	$D_{гв}$	0.008
Довжина гвинта, м	$l_{гв}$	0.2
Час розгону до $V_{вх}$, с	$t_{пп}$	0.1
Тривалість включення	$TВ$	100

Швидкість для передачі гвинт-гайка:

- максимальна

$$n_{де} = \frac{V_{max} i_p}{t_b} = \frac{10 \cdot 1}{0,001} = 10000 \text{ об/хв,}$$

- робоча

$$n_{де} = \frac{V_{роб} i_p}{t_b} = \frac{4 \cdot 1}{0,001} = 4000 \text{ об/хв,}$$

- мінімальна

$$n_{де} = \frac{V_{min} i_p}{t_b} = \frac{0.1 \cdot 1}{0,001} = 100 \text{ об/хв,}$$

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi \cdot \Delta l}{t_z} = \frac{2\pi \cdot 5 \cdot 10^{-6}}{0,001} = 0,0314 \text{ рад} \approx 1.8 \text{ град}$$

$$J_{мет} = m_{вз} \left(\frac{t_z}{2\pi} \right)^2 \frac{1}{i_p} = 4.4 \left(\frac{0,001}{2\pi} \right)^2 = 1,11 \cdot 10^{-7} \text{ кг/м}^2,$$

$$J_b = \frac{\pi D_{гв}^4 J_b \gamma}{32 i_p^2} = \frac{3.14 \cdot (0.008)^4 \cdot 0.3 \cdot 7.8 \cdot 10^3}{32} = 9.4 \cdot 10^{-7} \text{ кг/м}^2,$$

$$J_z = J_{мет} + J_b = 1.11 \cdot 10^{-7} + 9.4 \cdot 10^{-7} = 10.51 \cdot 10^{-7} \text{ кг/м}^2,$$

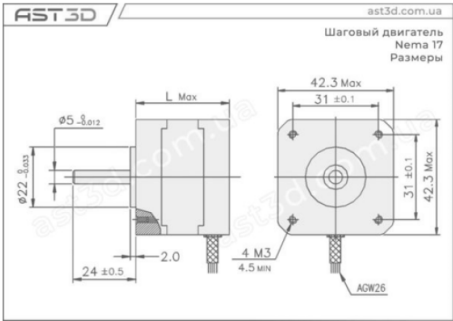
$$M_{np} = \frac{m_{вз} \cdot g \cdot f_{тр} \cdot t_z}{2 i_p \eta_1 \eta_2} = \frac{4.4 \cdot 9.8 \cdot 0.03 \cdot 0.001}{2 \cdot 0.9} = 0.71 \cdot 10^{-3} \text{ Н}\cdot\text{м,}$$

$$M_G = \frac{m_{вз} \cdot g \cdot t_z}{2 \pi i_p \eta_2} = \frac{4.4 \cdot 9.8 \cdot 0.001}{2 \cdot 0.9 \cdot 3.14} = 7.6 \cdot 10^{-3} \text{ Н}\cdot\text{м,}$$

$$M_{cm} = M_{np} + M_G = 0.71 \cdot 10^{-3} + 7.6 \cdot 10^{-3} = 8.31 \cdot 10^{-3} \text{ Н}\cdot\text{м,}$$

$$M_{dyn} = \frac{0.2 J_z}{V_{вх} t_b} (J_z + J_{де}) = \frac{0.2}{0.1 \cdot 0.002} (10.51 \cdot 10^{-7} + 70 \cdot 10^{-7}) = 16.1 \cdot 10^{-3} \text{ Н}\cdot\text{м,}$$

$$M_{\Sigma} = K_z (M_{cm} + M_{dyn}) = 1.8 (8.31 \cdot 10^{-3} + 16.1 \cdot 10^{-3}) = 43.93 \cdot 10^{-3} \text{ Н}\cdot\text{м,}$$



Параметр	Одиниці вимірювання	Значення
Крок гвинта	град	1.8
Довжина	мм	28
Номинальний струм	А	0.6
Номинальний опір	Ом	8
Індуктивність	мГн	10
Момент утримання	Н·м	0.12
Момент кручення	Н·м	0.016
Вага	г	150

					14.12115.015.МД					
Лист	№ докум.	Лист	Датум	Автоматизований електронний пристрій				Лист	Масштаб	Масштаб
Розроб	Мельник В.Г.			верстати для лазерного						1:1
Лист	Терехів В.І.			зроблення						
Лист				Розроблено на підставі: 14.12115.015.МД						
Наказ								Лист	Масштаб	Масштаб
Мод	Кодовий С.М.							1 з 1		
								Код АЕС-ЕП		
								зр. 01-21м		
				Копіювання				Формат А1		