

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

# КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА

## Розробка пристрою керування сервоприводом Назва теми

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»  
Шифр, назва  
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»  
Шифр, назва  
Освітня програма «Енергетичний менеджмент»

Шифр БРМА 24.00.00.000 ПЗ

Виконав студент 4 курсу  
група ЕМ-20-1

  
Підпис


І.В.Фурман  
Ініціали, прізвище

Керівник

  
Підпис, дата

С.В.Смутко  
Ініціали, прізвище

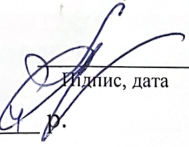
Нормоконтролер

  
Підпис, дата

С.У Тurchyn  
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:

Зав. кафедри МАЕЕС

  
Підпис, дата

О.С. Поліщук  
Ініціали, прізвище

17 06 2024 р.

# ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури

Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

Освітній рівень бакалавр

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

Шифр, назва

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Шифр, назва

Освітня програма «Енергетичний менеджмент»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МАЕЕС

д.т.н., проф. Поліщук О.С.

17 . 06 . 2024р.

## З А В Д А Н Н Я НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Фурман Іван Вікторович

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи Розробка пристрою керування сервоприводом

керівник роботи Смутко Світлана Валеріївна, к.т.н., доцент

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

Затверджено наказом ректора університету від 15 02 2024 р. № 8

2. Строк подання студентом роботи на кафедру МАЕЕС

3. Вихідні дані до роботи виконання завдань різноманітних технологічних процесів

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

Вступ. 1. Огляд та аналіз сфер застосування та конструкцій сервоприводів. 2. Проектування системи керування сервоприводом. 3. Дослідження параметрів роботи та розробка системи керування сервоприводом. Висновки. Перелік джерел посилання.

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

1. Класифікація сервоприводів та серводвигунів (ДО, А1). 2. Сервопривід (С1, А1). 3,4,5 Пристрій керування сервоприводом (ЕЗ, А1). 6. Плата керування пристроєм сервопривода (ДІ, А1)

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

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

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН


Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1. Огляд та аналіз існуючих технологічних та технічних рішень з тематики бакалаврської роботи	до 20.05.24р.	
2. Вибір елементів і розробка системи керування сервоприводом	до 29.05.24р.	
3. Розрахунок основних елементів системи керування сервоприводом	до 5.06.24р.	
4. Оформлення пояснювальної записки та графічного матеріалу	до 17.06.24р.	

Студент

  
Підпис

І.В.Фурман  
Ініціали, прізвище

Керівник роботи

  
Підпис

С.В.Смутко  
Ініціали, прізвище

# АНОТАЦІЯ

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


1. Прізвище, ім'я та по батькові Фурман Іван Вікторович

2. Тема бакалаврської роботи Розробка пристрою керування сервоприводом

3. Прізвище, ініціали, вчена ступінь та звання опонента \_\_\_\_\_

4. Об'єм бакалаврської роботи: креслень 6 арк. Формату А1,; сторінок записки 64


5. Сучасні електроприводи є основною структурною складовою більшості виробничого обладнання, вони забезпечують енергетичну основу автоматизації найрізноманітніших технологічних виробничих процесів. Тому створення інтелектуальної системи керування сервоприводом є актуальною задачею. В розрахунково-пояснювальній записці наведено всі необхідні розробки, а також розділи, що відповідають встановленим вимогам. В першому розділі проведено огляд та аналіз існуючих технічних та технологічних рішень з тематики бакалаврської роботи. В другому розділі здійснюється проектування системи керування сервоприводом. В третьому розділі виконано Дослідження параметрів роботи та розробка системи керування сервоприводом

Підпис студента   
"20" червня 2024 р.

## РІШЕННЯ ЕК:

Протокол №3 від "27" 06 2024 р.

Оцінка проекту ЕК добре / С  
Рекомендації ЕК \_\_\_\_\_

Особливі відмітки \_\_\_\_\_  
Технічний секретар 

"27" 06 2024 р.

Зміст

стор.

Вступ..... 5

1 Огляд та аналіз сфер застосування та конструкцій сервоприводів..... 7

1.1 Історія розвитку та сфери використання сервоприводів..... 7

1.2 Конструкції сервоприводів..... 14

1.3 Висновки до розділу..... 21

2 Проектування системи керування сервоприводом..... 23

2.1. Структура сервоприводу..... 23

2.2 Функціональна схема сервоприводу..... 24

3 Дослідження параметрів роботи та розробка системи керування сервоприводом ..... 31

3.1 Принципи керування сервоприводом..... 31

3.2 Дослідження роботи сервоприводу та його позиціонування..... 34

3.3 Розробка конструкції пристрою керування сервоприводом ..... 44

3.4 Висновки до розділу..... 59

Висновки..... 60

Перелік джерел посилання..... 62

Додатки..... 64

БРМА 24.00.00.000 ПЗ

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Фурман І.В.			Лит	Арк.	Аркушів
Перевір.		Смцтко С.В.				4	64
Реценз.					ХНУ. ЕМ-20-1		
Н. Контр.		Пукдій С. І.					
Затверд.		Поліщук О.С.					

Розробка пристрою керування сервоприводом

Пояснювальна записка

## ВСТУП

Актуальність роботи. Сучасні електроприводи є основними конструктивними елементами більшості виробничих установок і побутової техніки. Вони забезпечують енергетичну основу для автоматизації різних технологічних процесів виробництва. Електропривод дозволяє підвищити продуктивність, економічність і надійність технічного обладнання, впровадити нові технології і розширити функціональні можливості і сферу застосування систем автоматизації. Досягнення в області мікропроцесорної техніки і розвиток силової електроніки привели до створення принципово нових інструментів і методів побудови електромеханічних систем. Найбільш вражаючі результати були отримані в теорії і практиці управління електроприводами.

Регульований електропривод автоматизований, багато операцій в ньому виконуються за допомогою управління без участі оператора. Оскільки основними органами управління електроприводу є програмовані мікроконтролери і (або) промислові комп'ютери, сучасні автоматичні електроприводи можна визначити як комп'ютеризовані. В даний час основними вимогами до приводної системи є:

- Забезпечення широкого діапазону регулювання частоти обертання ротора двигуна (0,01 - 10 000 обертів в хвилину);
- Плавне регулювання швидкості переміщення робочого органу;
- Високе значення крутного моменту (пусковий момент до 500 Нм);
- Високі динамічні характеристики; Висока перевантажувальна здатність;
- Висока точність позиціонування.

Сервопривід відмінно справляється з поставленим завданням. Сервопривід - це будь-який тип механічного приводу (пристрою, робочого органу), який складається з датчиків (положення, швидкості, зусилля і т.д.). Залежно від заданих зовнішніх значень (положення ручки управління або

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

числових значень від інших систем) можливе автоматичне підтримання необхідних параметрів на датчику (і, отже, на пристрої).

Простіше кажучи, сервопривід - це "автоматичний точний Виконавець". Коли він отримує вхідне значення керуючого параметра (в режимі реального часу), він намагається створити і підтримувати це значення на виході приводу "Незалежно" (на основі показань датчика).

З появою на ринку і подальшими удосконаленнями за рахунок активних функцій ці приводи знаходять широке застосування. Сучасні сервоприводи виконують не тільки основні функції приводу, але і нові завдання, що формуються системою управління.

Тому створення інтелектуальної системи сервоуправління є актуальним завданням.

					<i>БРМА 24.00.00.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		6

# 1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ СЕРВОПРИВОДІВ ТА ЇХ КОНСТРУКЦІЇ

## 1.1 Історія розробки та використання сервоприводів

До 60-х років минулого століття на ринку переважали пневматичні та гідравлічні сервоприводи. І тільки з розвитком напівпровідникових технологій приводи постійного струму стали популярні тільки в 60-х роках [1-5]. З точки зору вимог динаміки, розвиток сервоприводів йшло в напрямку створення двигуна постійного струму з малим моментом інерції. Для отримання малого моменту інерції ротора використовуються два рішення.

Перший передбачений для виконання якоря двигуна у вигляді тонкого плоского диска без заліза, а 2-й заснований на отриманні циліндричного немагнітного якоря в будь-якому випадку, на початку 70-х років стали широко застосовуватися постійні магніти, виготовлені з рідкоземельних матеріалів, а величина індукції при наявності повітряних зазорів і високому крутному моменті збільшується.

В якості силового перетворювача спочатку використовувався Аналоговий Підсилювач з силовим транзистором і вихідною напругою близько 100 В.потім з'явилися тиристорні перетворювачі, які використовувалися до кінця 70-х років і були замінені імпульсними перетворювачами постійного струму на ключових транзисторах. Поряд з цим була значно підвищена спочатку низька ефективність електронних джерел живлення. Напруга, яку можна отримати на виході електронного блоку живлення, була обмежена приблизно 200 В через низький допуск транзистора по напрузі і межі напруги між перемикаються сегментами колектора двигуна. Транзисторні перетворювачі зазвичай підключалися до мережі через трансформатор. Це дозволяє регулювати вихідну напругу перетворювача за допомогою мережі електроживлення.

									Арк.
									7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БРМА 24.00.00.000 ПЗ				

Схеми управління швидкістю і крутним моментом були аналоговими, що забезпечувало завадостійкість в широкому діапазоні режимів управління, характерних для сервоприводів. Для вимірювання фактичної швидкості в каналі зворотного зв'язку використовувався генератор постійного струму ostopus.

Розробка перетворювачів частоти, спочатку реалізованих в тиристорах, а потім і в силових транзисторах, привела до розширення використання стандартних асинхронних двигунів змінного струму для приводів з низькою точністю управління.

Дослідження безщіткових двигунів, які можуть бути використані для сервоприводів, тривають з середини 70-х років, і, на відміну від звичайної схеми двигунів постійного струму, розробники пропонують нові перспективні рішення. Так з'явилися безщіткові двигуни постійного струму, або двигуни з електронним перемиканням. Ці електромеханічні машини в основному є синхронними двигунами з постійними магнітами, а положення ротора контролюється простим імпульсним датчиком положення (кодером), який генерує імпульси залежно від кількості полюсів.

Крім електронного безконтактного перемикання і низького зносу, цей тип приводу володіє наступними перевагами:

- зменшений момент інерції через відсутність обмотки ротора;
- просте охолодження, так як відведення тепла від статора краще відводить від ротора;
- відсутність втрат, пов'язаних з обмоткою збудження, підвищений ККД.

Електронне перемикання секції обмотки статора виконується через кожні 60 електричних градусів і здійснюється датчиком положення ротора (ДПР). Аналогічно перемикання колекторів в двигунах постійного струму, цей принцип перемикання також реалізований у вигляді комутаційного пристрою і має блокову конструкцію. Для контролю частоти обертання двигуна потрібен додатковий датчик швидкості, такий як генератор ostopus.

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У той же час розвивався напрямок використання асинхронних двигунів змінного струму в якості сервоприводів. Цей тип двигуна може бути виготовлений дешево і має додаткову перевагу в регулюванні діапазону ослаблення електричного поля.

З іншого боку, з розробкою безщіткових двигунів були проведені теоретичні дослідження щодо так званого синусоїдального перемикачання сервоприводів. Як правило, двигун з синусоїдальним перемикачем являє собою двигун з постійними магнітами, що володіє всіма перерахованими вище перевагами. Однак датчик положення ротора в даному випадку є перетворювачем, вихідний синусоїдальний сигнал якого управляє струмом статора машини.

Всі перераховані вище 3 типи безконтактних приводів використовуються сьогодні і з початку 90-х років практично повністю замінюють приводи з колекторними двигунами. Вирішальним фактором у цих успіхах став прогрес у галузі напівпровідникових технологій.

Розвиток передової інтеграції, високошвидкісних процесорних систем і незалежних модулів пам'яті спростило впровадження цифрового управління. У будь-якому випадку, функціональні завдання, які більш-менш часто виникають в окремих технічних системах, не зробили істотного впливу на ціну. Впровадивши індивідуальне програмне забезпечення, вдалося уникнути збільшення кількості апаратних модулів.

3 типи силових модулів всіх безконтактних систем управління приводом: перетворювач частоти (інвертор), керований датчиком положення ротора двигуна, краще, ніж незалежний керуючий інвертор, який використовується в стандартному двигуні змінного струму. Функціональні відмінності виникають лише в тому випадку, якщо система управління має замкнутий і відкритий зворотний зв'язок. Розробка силових транзисторів на початку 90-х років також дозволила підключати сервоперетворювачі живлення безпосередньо до мережі без використання мережевого трансформатора.

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Сервопривід-це привід, керований за допомогою контуру негативного зворотного зв'язку, який дозволяє точно задавати параметри руху [1-3]. Можна сказати, що сервопривід-це привід будь-якого механічного типу, що включає датчики, перетворювачі та блоки, необхідні для контролю та підтримки необхідних параметрів відповідно до заданих зовнішніх значень. Категорія сервоприводів включає в себе різні підсилювачі і регулятори з негативним зворотним зв'язком.

Слово " серво "походить від латинського"servus". У перекладі воно означає слуга або асистент.

Сервопривід живиться від імпульсу змінної тривалості, який надходить по сигнальній лінії [4]. Якщо тривалість імпульсу становить близько 1,5 мілісекунд, сервопривід знаходиться в нейтральному положенні (тобто має однакову можливість обертання в обох напрямках). Кут повороту сервоприводу залежить від тривалості імпульсу. Чим довше імпульс, тим швидше буде працювати двигун. Коли сервопривід виконує команду на рух, зовнішня сила, яка намагається зупинити його, відчуває сильний опір - це максимальна сила, яку може витримати сервопривід. Однак сервопривод не завжди зберігає задане положення-для цього йому потрібен імпульс, і він чекає 20 мс.Що стосується тривалості імпульсу, то, якщо вона менше 1,5 мілісекунд, сервопривід спробує зафіксувати положення, повернувши вал на кілька градусів проти годинникової стрілки. Якщо тривалість імпульсу велика, поверніть його в зворотному напрямку за годинниковою стрілкою. Для роботи сервоприводу потрібно, щоб тривалість імпульсу становила в середньому від 1 до 2 мс. Крім того, важливим параметром, що характеризує сервопривод, є швидкість обертання (час, необхідний сервоприводу для переміщення з одного положення в інше).

Сьогодні сервоприводи використовуються в галузях, де точність регулювання загальнопромислових перетворювачів частоти недостатня. Вони затребувані при використанні високопродуктивного обладнання. Цей тип

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

механічного приводу не тільки підтримує роботу високошвидкісних систем точного типу, але також підходить для позиціонування високоточного технічного обладнання та роботів, що використовуються в промисловому виробництві.

Існує 3 варіанти сервоприводу. Вони розрізняються за типом переміщення (обертальне або лінійне), а також за принципом дії.

Поворотний сервопривід може бути синхронним і асинхронним, що працює за принципом лінійного переміщення - плоским і круговим.

Синхронна версія дозволяє максимально точно запрограмувати кут повороту, Допустиме прискорення і кругову швидкість. Якщо порівнювати цей тип з асинхронним, то він прискорюється швидше, але при цьому обходиться дорожче. Асинхронний сервопривід дозволяє встановлювати необхідну швидкість на низьких оборотах. Лінійні двигуни характеризуються певною особливістю-можливістю розвивати величезне прискорення.

Принцип дії може бути електродинамічним і електромеханічним. В останньому варіанті рух здійснюється за рахунок електродвигуна і коробки передач, а в електромеханічному, завдяки системі поршень-циліндр, ці сервоприводи мають на порядок більш високу швидкість в порівнянні з електромеханічними.

Для автоматичної установки використовується сервопривід, який може бути представлений як керуюча частина механізованої системи або як деталь інструменту і верстата.

Механічний привід обертального руху затребуваний при промисловій експлуатації, використовується в верстатах для упаковки і друку, в різному обладнанні, використовується в авіамоделюванні і т. д.

Асинхронні варіанти найбільш затребувані в промисловому секторі. Така популярність обумовлена їх низькою вартістю і надійною конструкцією.

Синхронні сервоприводи добре взаємодіють з імпульсними системами, що використовуються для програмного управління, тому вони незамінні в

					<i>БРМА 24.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

галузях, де важливою вимогою є підтримка швидкості подачі, крутного моменту або переміщення з максимальною точністю.

Синхронний сервопривід-ви можете точно встановити кут повороту (з точністю до кута нахилу), швидкість обертання і прискорення. Він розганяється швидше, ніж асинхронний, але коштує набагато дорожче.

Асинхронний сервопривід (асинхронна машина з датчиком швидкості) - ви можете точно налаштувати швидкість навіть на низькій швидкості.

Лінійні двигуни можуть генерувати величезні прискорення (до 70 м/с<sup>2</sup>).

Спочатку сервоприводи використовувалися тільки в машинобудуванні для інструментальної обробки матеріалів. Однак в результаті розширення сфери обробки, розробки промислових роботів і систем автоматичного управління ця можливість була реалізована дуже швидко, на початку 70-х років.

На відміну від інструментальної обробки, Заміна пневматичного та гідравлічного обладнання відбувалася повільно і часто сповільнювалася через великі відмінності у вимогах до розміщення приводів.

У промисловій обробці матеріалів та робототехнічних системах двигуни постійного струму з дисковими роторами спочатку використовувалися для планетарних редукторів з низьким люфтом та інших типів компактних редукторів, потім двигуни постійного струму з дисковими роторами були замінені безщітковими двигунами.

Оскільки Автоматизація повністю охопила всі галузі машинобудування, електроприводи і механіка були значно спрощені за рахунок використання сучасних індивідуальних приводів замість центральних. В результаті ринок сервоприводів розвинувся. Сьогодні важко знайти сфери діяльності, де не застосовувалися б сервоприводи.

На основі наведених вище документів була узагальнена Класифікація серводвигунів (рис. 1.1).

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

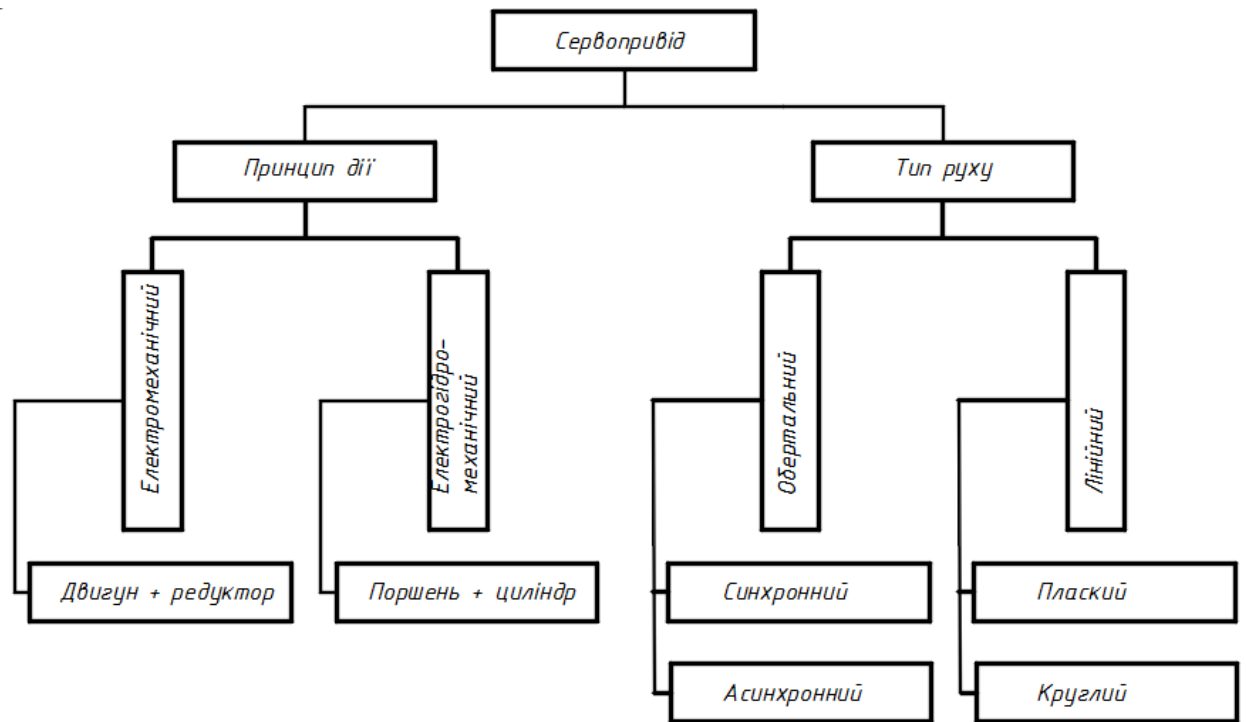


Рисунок 1.1 - Класифікація серводвигунів

Таким чином, аналізуючи наведену вище інформацію, можна зробити висновок, що сервопривід широко використовується в різних галузях промисловості завдяки своїм перевагам. Стабільне і точне управління; широке регулювання швидкості; невеликі габарити і вага, що часто є вирішальним фактором в їх застосуванні.

## 1.2 конструкція сервоприводу

Сервопривід-це будь-який тип механічного приводу (пристрою, робочого органу), який включає в себе датчики положення, швидкості, потужності і т.д. він також оснащений блоком управління приводом, який автоматично підтримує параметри, необхідні для датчика, в залежності від встановленого

зовнішнього значення, положення ручки управління або числового значення з інших систем. Таким чином, сервопривід отримує значення вхідного параметра в режимі реального часу при введенні і "незалежно" на основі показань датчика відповідно до вихідних даних приводу. Можна сказати, що саме "auto-precision performer" намагається створити і підтримувати це значення в "auto-precision performer". Сервоприводи включають багато різних регуляторів та підсилювачів з негативним зворотним зв'язком як категорія приводів, наприклад, гідроелектричні пневматичні підсилювачі для ручного приводу елементів керування, але термін "сервопривод" використовується в автоматичних системах для приводу елементів керування та робочих органів із зворотним зв'язком. Використовується для вказівки на Електропривод.

Таким чином, порядок роботи сервоприводу може бути описаний на наступному кроці [1].:

- 1) Сервопривід отримує вхідне значення керуючого параметра (наприклад, кут повороту);
- 2) Блок управління порівнює це значення зі значенням датчика;
- 3) на підставі результатів порівняння привід виконує деякі дії, такі як обертання, прискорення або уповільнення, щоб значення, отримане від внутрішнього датчика, було якомога ближче до значення параметрів зовнішнього управління.

Сервоприводи серводвигуни можна розділити на кілька груп (рис. 1.2).

Одним з варіантів точного позиціонування основних елементів є використання крокового двигуна. В цьому випадку схема управління відраховує необхідну кількість імпульсів (кроків) від положення обгортки. У цьому випадку точне позиціонування забезпечується параметричною системою з негативним зворотним зв'язком, яка утворена відповідними полюсами статора і ротора крокового двигуна, що взаємодіють один з одним.

					<i>БРМА 24.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

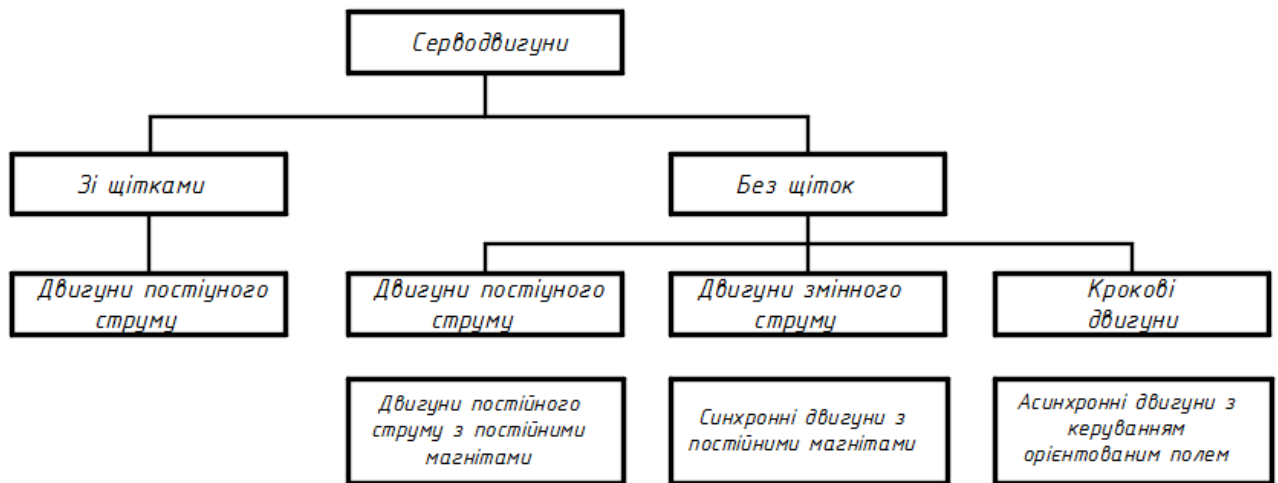


Рисунок 1.2 - Види серводвигунів

Сигнал завдання відповідної параметричної системи генерується системою управління кроковим двигуном, яка управляє відповідним полюсом статора. Оскільки датчик зазвичай керує приводним елементом, електричний сервопривід має такі переваги перед кроковим двигуном:

1) він не пред'являє особливих вимог до електродвигунів і коробок передач - вони можуть бути практично будь-якого типу і потужності (а крокові двигуни зазвичай працюють малопотужно і повільно).

2) гарантує максимальну точність за рахунок автоматичної компенсації:

- механічного (люфт приводу) або електронного збою приводу.;

- система приводу поступово зношується, але кроковий двигун вимагає періодичного регулювання у зв'язку з цим;

- теплове розширення приводу (в процесі експлуатації або протягом сезону) стало однією з причин переходу на сервопривід для позиціонування головки жорсткого диска;

- миттєвого виявлення несправностей приводу (відмов в роботі) (в залежності від механічних компонентів або електроніки).

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3) максимально можлива швидкість переміщення елемента (кроковий двигун має найменшу максимальну швидкість обертання в порівнянні з іншими типами електродвигунів).

4) споживання енергії пропорційне опору елемента (номінальна напруга завжди подається на кроковий двигун із запасом через можливість перевантаження).

Недоліки в порівнянні з кроковими двигунами:

1) необхідність додаткових сенсорних елементів;  
2) більш складний блок управління і логіка його роботи (потрібна обробка результатів вимірювання і вибір операції управління, а в основі контролера крокового двигуна відсутня функція управління).;

3) проблема кріплення: зазвичай це використання валу електродвигуна (що призводить до втрати енергії) або черв'ячно-гвинтової передачі (складність конструкції) (в кроковому двигуні кожна ступінь фіксована).

4) Сервопривід зазвичай дорожчий за кроковий привід.

Сервоприводи також можуть базуватися на крокових двигунах або, крім них, поєднувати їх переваги, усуваючи конкуренцію між ними (сервоприводи виконують приблизне позиціонування в діапазоні відповідної параметричної системи крокових двигунів, останні виконують остаточне позиціонування з відносно великим крутним моментом і фіксацією положення).

Принципова схема сервоприводу показана на малюнку 1.3 [1].

Система кодуєчих пристроїв, що використовується в двигуні, повинна забезпечувати тривалу роботу обладнання без технічного обслуговування. Датчик коду (рис. 1).1.4) Датчик положення вала є частиною приводу і прикріплений до валу двигуна. За допомогою підключення дроти підключаються до електронного обладнання перетворювача частоти серводвигуна. Датчики кутового положення дозволяють отримувати інформацію про місцезнаходження, забезпечуючи точне позиціонування вала двигуна. Робота кодуєчого пристрою заснована на використанні магнітних або

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

оптичних сигналів. Датчики коду поділяються на 2 основні типи: вирішальні та інкрементальні. Обидві системи використовують додаткову електроніку для перетворення кута повороту механічної системи в електричний сигнал.

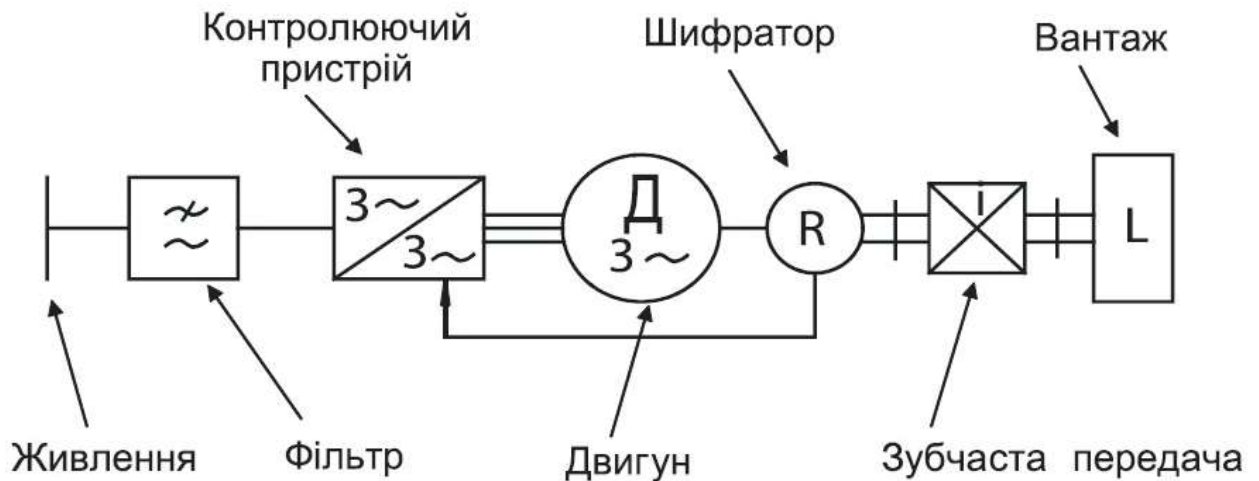


Рисунок 1.3 - Блок-схема сервопривода

Серводвигун, оснащений вбудованим контролером, являє собою повністю автоматизований пристрій контролю положення. Простота управління, аналізу і контролю декількох заданих параметрів дозволяє використовувати його в якості заміни двигунів з зовнішніми блоками контролю положення з вбудованим мовою програмування. Контролер чітко реагує на сигнали кінцевих вимикачів та інших двигунів, оцінює їх, забезпечує точне позиціонування робочого органу машини і при необхідності виробляє необхідні автоматичні регулювання.

Серводвигун, оснащений вбудованим контролером, є повністю автоматизованим пристроєм контролю положення. Простота управління, аналізу і контролю декількох встановлених параметрів дозволяє використовувати його в якості заміни двигунів з зовнішніми блоками управління Положенням з вбудованим мовою програмування. Контролер чітко реагує на сигнали кінцевих вимикачів та інших двигунів, оцінює їх, забезпечує

									Арк.
									17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БРМА 24.00.00.000 ПЗ				



високі технічні характеристики процесу. Програмне забезпечення серводвигуна, оснащене контролером, забезпечує повне комплексне управління процесом формування упаковки. Автоматичне регулювання з використанням мікропроцесорної технології гарантує, що упаковка досягне бажаного положення, якщо на початку процесу формування вона перебувала в різних положеннях.

Подача рулонних пакувальних матеріалів і формування з них контейнерів або упаковок (рис. 1.6). Одне з основних завдань, яке необхідно вирішити при упаковці значного асортименту продукції, оскільки продуктивність цих пристроїв в основному визначає продуктивність всієї пакувальної машини. Продуктивність більше 25 циклів в хвилину включає використання режиму автоматичної подачі і вимагає синхронізації з ключовими функціональними модулями. При використанні механічних з'єднань це призводить до ускладнення конструкції механізму подачі і роботи двигуна в перехідному режимі.

Використання серводвигуна і частотного перетворювача дозволяє спростити вузол подачі і забезпечити високу точність позиціонування і синхронізації більш ніж 2 потоків пакувальних матеріалів.

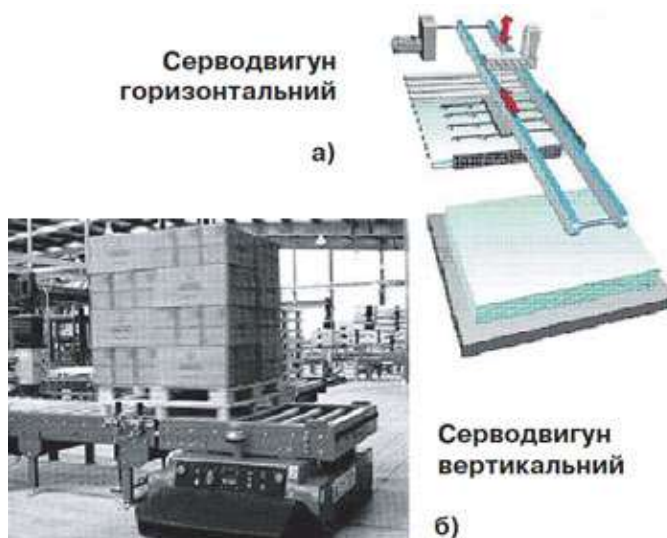


Рисунок 1.5 - Машина для формування габаритних вантажних одиниць:

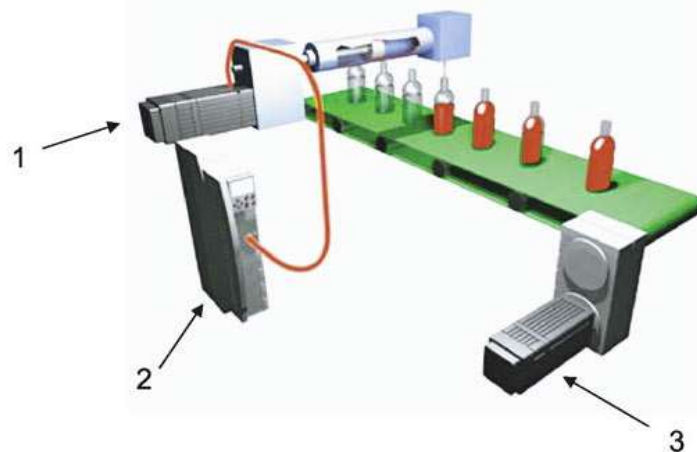
а) технологічна схема; б) загальний вигляд

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19



Рисунок 1.6 - Пристрій розмотування та подачі плівкового матеріалу

Продуктивність дозуючого пристрою (рис. 1.7) визначається тривалістю кінематичного циклу дозування. Оптимізація процесу розливу досягається, коли час формування дози підтримується постійним і забезпечується необхідна швидкість подачі продукту в споживчу тару. Використання серводвигунів і сервоперетворювачів спрощує конструкцію дозатора і дозволяє плавно регулювати дозу в діапазоні без байпаса, в залежності від потреб споживачів і типу продукту. Використання мікропроцесора для управління приводом дозатора дозволяє зберігати до 8 запрограмованих режимів роботи пристрою, плавно перемикаючись на кожен з них, регулюючи динамічні і силові параметри процесу. Налаштування серводвигуна конвеєра і дозатора дозволяє забезпечити якість процесу дозування і виключити втрати продукту.



1 - серводвигун дозатора; 2 - сервоперетворювач; 3 - серводвигун конвеєра

Рисунок 1.7 - Схема дозуючого пристрою

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

Знову ж таки, слід зазначити, що розробка пристроїв сервоуправління є актуальним завданням, оскільки сервоприводи широко використовуються в різних галузях промисловості.

### 1.3 Висновки до розділу

Аналізуючи принцип роботи і характеристики сучасних серводвигунів, можна визначити наступні тенденції в розвитку технічних машин, беручи до уваги високу ступінь автоматизації на базі високошвидкісних мікропроцесорів з новітнім програмним забезпеченням для системи управління сервосистемами.:

- використання сервоприводу-це шлях до максимально швидкої автоматизації системи, що забезпечує високу продуктивність обладнання;
- сервосистема є основою модульного принципу побудови функціональних модулів верстата з можливістю швидкої реконфігурації обладнання;
- сервосистема надає засоби візуалізації технологічних процесів для високошвидкісного зв'язку з іншими технологічними лініями та інтеграції в систему автоматичного управління підприємством.;
- використання новітніх приводів є необхідною умовою для мінімізації кількості деталей машин і зниження експлуатаційних витрат.

Було вирішено, що необхідно розробити систему сервоуправління.

					<i>БРМА 24.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						21
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

## 2 ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ СЕРВОПРИВОДОМ

### 2.1. Структура сервоприводу

Сервопривід (рис. 2.1). Умовно його можна розділити на 2 частини: механічну, що складається з двигуна і передавального механізму, і цифрову частину, що містить контролер і потенціометр, який встановлює і підтримує потрібний кут нахилу осі [5].

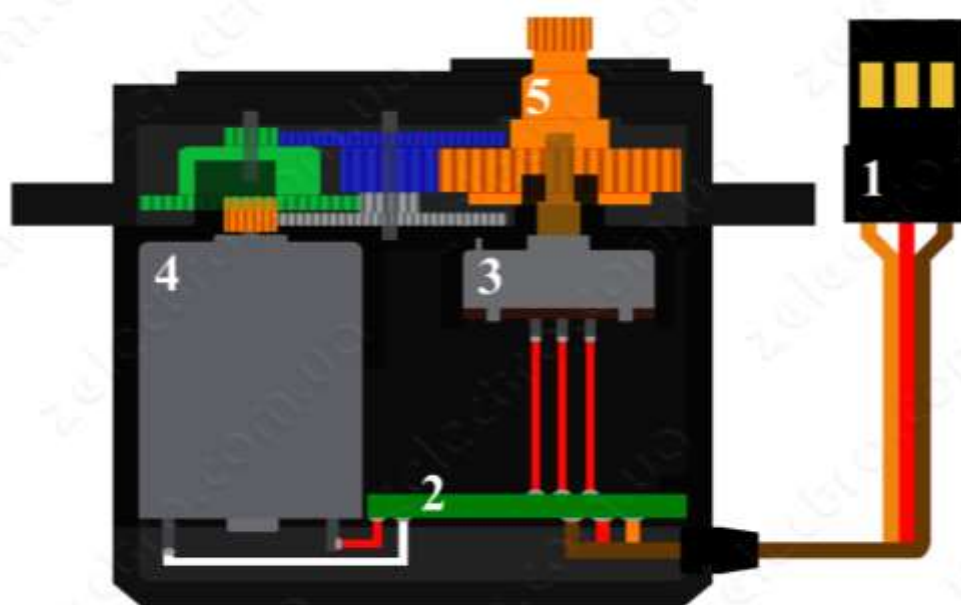


Рисунок 2.1 Схематична конструкція сервоприводу

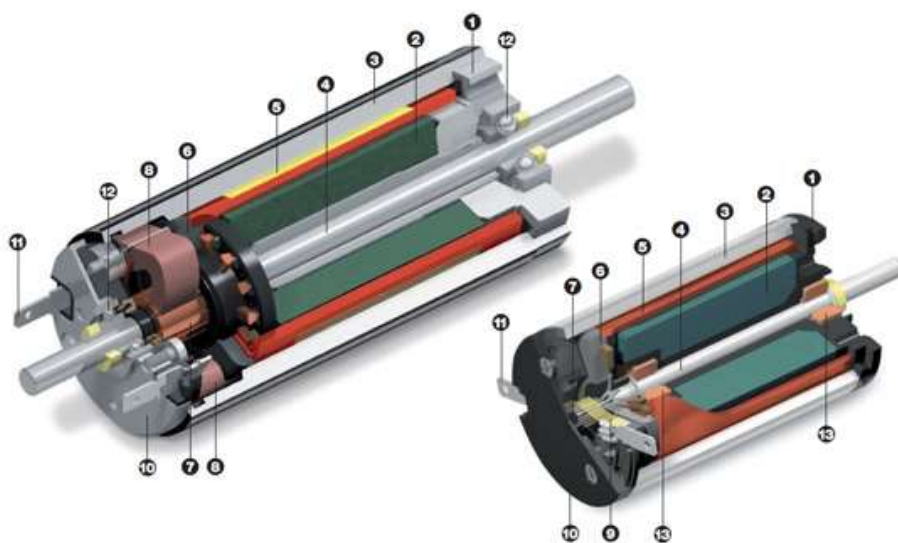
Привід складається з електродвигуна з коробкою передач. Зазвичай швидкість обертання двигуна занадто висока для практичного використання. Для зниження швидкості використовується коробка передач: зубчастий механізм, який передає і перетворює крутний момент. Мікромотор 4 не може створювати сильного зусилля (крутного моменту) на валу, але має високу швидкість обертання. Для перетворення високої кутової швидкості при невеликому крутному моменті в низьку кутову швидкість при високій кутовій

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

швидкості-це саме те, що вам потрібно, але вам потрібно використовувати коробку передач. Редуктор представлений шестернею, що з'єднує вал двигуна і вихідний вал 5.

Розглянемо конструкцію колекторних серводвигунів постійного струму.

Серводвигун (рис.2.2.) складається з статора, ротора, колектора (щітково-колекторного вузла), постійного магніту, вала, підшипників ковзання і / або кочення, корпусу [6]. Основною відмінністю серводвигуна від звичайного аналога є спеціальна конструкція полого якоря.



- 1 – фланець, 2 – постійний магніт, 3 – корпус, 4 – вал, 5 – обмотка якоря, 6 – плата колектора, 7 – колектор, 8 – графітові щітки, 9 – щітки з благородних металів, 10 – кожух, 11 – електричний контакт, 12 – кульковий підшипник, 13 – металокерамічний підшипник ковзання

Рисунок 2.2 - Будова серводвигуна

Взаємодія магнітного поля і струму необхідно для створення крутного моменту на валу двигуна. Обмотки розміщені на якорі, сегменти якого по черзі підключаються до клем двигуна за допомогою щітки і колектора. При подачі напруги уздовж сегмента обмоток ротора починає протікати струм. Взаємодія з

										Арк.
										23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

магнітним полем постійного магніту, розташованого на статорі, призводить до виникнення моменту, прикладеного до валу двигуна.

Переваги серводвигуна постійного струму з порожнистим якорем:

- порожнистий ротор (з низькою інерцією) забезпечує високе прискорення двигуна і можливість зупинки в будь-якому положенні;
- сталевий сердечник не втрачає потужності і магнітного насичення, забезпечуючи високий ККД (до 90%);
- лінійні характеристики двигуна, простота управління.

Недоліки.

У його комплектації є механічний щітковий колектор, щітки якого з часом стираються, навіть якщо вони виготовлені з найміцніших матеріалів, а термін служби двигуна коротше, ніж у безщіткового двигуна.

Включаючи і вимикаючи електродвигун, ви можете обертати вихідний вал і підключати робочі інструменти технічного обладнання. Однак для контролю положення пристроєм необхідний датчик зворотного зв'язку-енкодер, який перетворює кут повороту в електричний сигнал. Для цієї мети часто використовується потенціометр 3 (рис. 2.3.). Коли ви повертаєте повзунок потенціометра, його опір змінюється пропорційно куту повороту. Це можна використовувати для встановлення поточного положення механізму. Принцип роботи потенціометра простий. Потенціометр має 3 виходи, на крайній вихід подається плюсове і мінусове харчування (полярність значення не має), між виходами розміщується резистивне речовина, по якому до центрального виходу підключений рухливий повзунок. Наприклад, повертаючи ручку з крайнього лівого положення в крайнє праве, вона збільшує опір і в той же час умовно знижує напругу на вході до мінімуму. Це знімається з центрального виходу. Величина мінімальної напруги залежить від величини максимального опору конкретного потенціометра. У таких сервоприводах найчастіше встановлюється потенціометр з опором 5 КОм.

					<i>БРМА 24.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

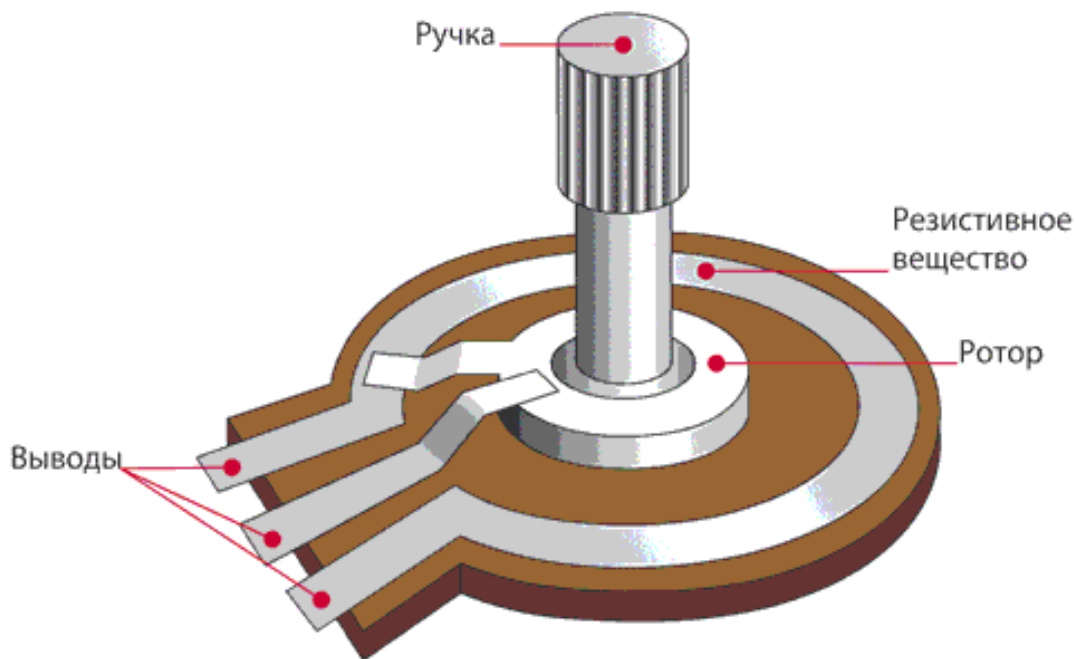


Рисунок 2.3 - Потенціометр

Рукоятка потенціометра з'єднана з вихідним валом сервоприводу, тому значення потенціометра змінюється при повороті вихідного вала. На додаток до електродвигуна, коробки передач і потенціометра сервопривід оснащений електронною платою 2 (рис. 2.1). Вона відповідає за отримання зовнішніх параметрів, зчитування значень з потенціометра, їх порівняння і включення/вимикання двигуна. Вона відповідає за підтримку негативного зворотного зв'язку. Сервопривід знаходиться в положенні 0°. Він посилав керуючий сигнал на вхід плати управління, щоб передати інформацію про Поворот сервоприводу на 90°. Електронна плата зчитує показання потенціометра і бачить на потенціометрі 0 вольт, а програма забита тим, що повинно бути 2,5. У цьому вся суть. Плата аналізує різницю, потім вибирає напрямок обертання двигуна і обертає його до тих пір, поки напруга на виході потенціометра не стане рівним 2,5 вольтам.

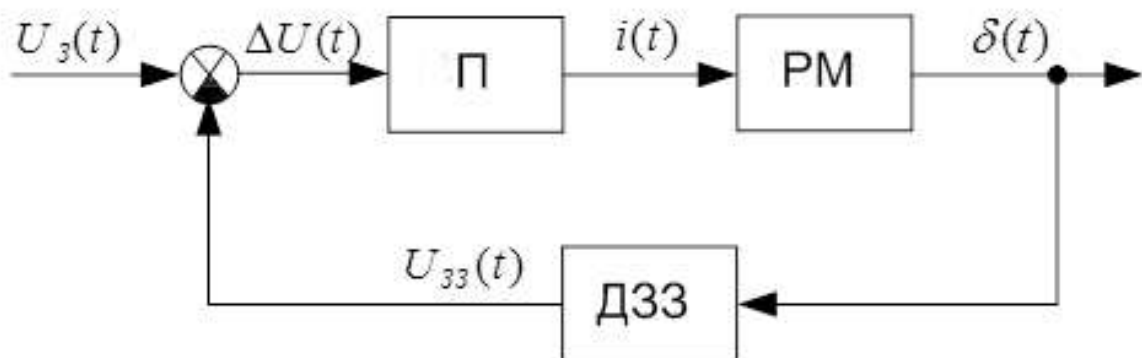
Для підключення до контролера від сервоприводу відходять 3 дроти, які в більшості випадків обжимаються стандартним 3-контактним роз'ємом з

									Арк.
									25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БРМА 24.00.00.000 ПЗ				

кроком 2,54 мм (1). Колір дроту може відрізнятися. Коричневий або чорний - заземлення (мінус), червоний - харчування з плюсом, помаранчевий або білий - сигнал управління. Таким чином, сигнал надходить на плату і перетворюється в імпульс, що направляє безпосередньо на двигун.

## 2.2 Функціональна схема сервоприводу

Побудуємо просту схему сервоприводу (рис.2.4.)



П – плата(драйвер); РМ – рульова машинка; ДЗЗ – датчик зворотного зв'язку;  
 $i(t)$  – струм управління рульової машинки;  $U_{33}(t)$  – струм зворотного зв'язку;  
 $U_3(t)$  – командний струм;  $\Delta U(t)$  – результуючий струм, сума струмів  $U_{33}(t)$   
 (сумарний струм);  $\delta(t)$  – поворот вихідного валу або переміщення штока РМ

Рисунок 2.4 - Функціональна схема сервоприводу

На базі функціональної схеми побудовано електричну структурну схему сервоприводу (БРМА 24.00.00.000 Е1).

Розглянемо типову структурну схему сервоприводу (рис. 2.5).

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26



імпульсу в запам'ятовуючому пристрої вибірки. Вихід останнього управляє ключами силового моста.

Давайте подивимося, як змінюється сигнал в різних режимах роботи сервоприводу.

Положення вала відповідає встановленому керуючому сигналу. В цьому випадку тривалість керуючого імпульсу і опорного імпульсу сервоприводу будуть рівні. На обох виходах компаратора є нулі. Вони також зберігаються в блоці зберігання зразків. Клавiші на обох важелях перемички замкнуті, двигун вимкнений, і качалка утримує своє положення.

Керуючий імпульс збільшується. Потім компаратор на верхньому штифті видає різницевий імпульс. Його величина буде запам'ятати в ПВЗ. Верхній вихід ПВЗ відкриє 1 і 3 ключі мостів. На мотор подано напругу. Він починає провертати вал через редуктор і, відповідно, потенціометр зворотного зв'язку, тривалість опорного імпульсу починає збільшуватися. Цей стан триває протягом багатьох циклів керуючого імпульсу до тих пір, поки тривалість опорного імпульсу не зрівняється з його ходом. Потім компаратор закриває Мостовий ключ. Двигун зупиниться.

Керуючий імпульс зменшиться. Він буде коротшим за стандартний. Різницевий імпульс з'являється на нижньому виводі компаратора і через ПВЗ відкриє ключі 2 і 4 мостів. Двигун починає обертати гойдалку і потенціометр зворотного зв'язку через редуктор, але повертає їх в іншу сторону до тих пір, поки тривалість імпульсу знову не стане рівною.

Вал залишається під навантаженням і прагне обертатися в напрямку, протилежному напрямку прикладання навантаження. У той же час змінюється тривалість опорного імпульсу, різницевий імпульс з компаратора через ПВЗ відкриває пару ключів моста так, що мотор передає на редуктор момент, перешкоджаючи повороту вала зовнішньою силою. Відбувається силове утримання положення вала.

					<i>БРМА 24.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

Якщо на сервопривід передається невірний сигнал, наприклад, імпульс тривалістю 3 мтс, через будь-яких перешкод, то в цьому випадку робота сервоприводу залежить від алгоритму, вбудованого в плату управління. Цифрова машина перевіряє точність вхідного сигналу і не обробляє "неправильний" сигнал. Найпростіша панель управління починає виконувати "неправильну" команду. Сервомеханізм повністю повертає вихідний вал, продовжує подавати живлення на серводвигун і намагається рухатися далі. Відмова, як правило, не відбувається.

### 2.3 Висновки до розділу

У цьому розділі розглядається структура сервоприводу, принцип його роботи, його компоненти і взаємодія всіх елементів.

Пропонується електрична структурна схема сервоприводу.

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ ТА РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ СЕРВОПРИВОДОМ

#### 3.1 Принципи керування сервоприводом

Щоб сконструювати систему сервоуправління, необхідно вивчити характеристики роботи сервоприводу і його позиціонування відповідно до імпульсом, що надходять з пульта управління.

Діаграма повороту валу серводвигуна (рис.3.1.) [9].

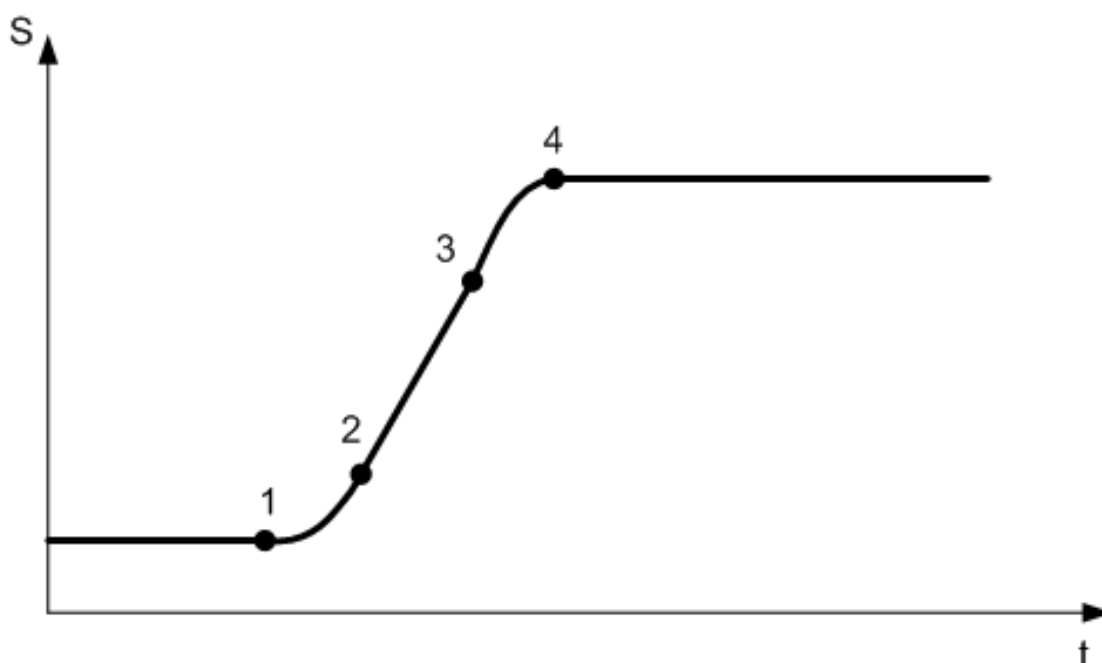


Рисунок 3.1 - Діаграма повороту валу серводвигуна

На графіку рисунка 3.1  $S$  – «шлях» валу,  $t$  - час. Точка 1 відповідає команді на поворот валу, двигун починає обертатися і в точці 2 досягає основної швидкості обертання валу. У точці 3 контролер посилає команду на Реверсивний запуск двигуна. Час гальмування менше, ніж час розгону, оскільки зовнішні сили і тертя допомагають при гальмуванні, а при

прискоренні, навпаки, заважають роботі двигуна. При правильному налаштуванні в точці 4 двигун зупиниться, а тривалість керуючого імпульсу і опорного імпульсу буде однаковою. Таким чином, загальний час обертання вала складається з:

- часу розгону;
- часу обертання з постійною швидкістю;
- часу гальмування.

Час обертання при постійній швидкості залежить від потужності двигуна і, отже, важливо для довгих траєкторій повороту. Навпаки, для невеликих відхилень час прискорення і уповільнення дуже важливо, оскільки тільки з них складається загальний час невеликих переміщень.

Сервоуправління здійснюється наступним чином.

На вхід сервоприводу подається керуючий сигнал (рис. 3.2) в вигляді імпульсів постійної частоти і змінної ширини. Такий спосіб керування сервоприводами має назву ШІМ (Широтно-імпульсна модуляція).

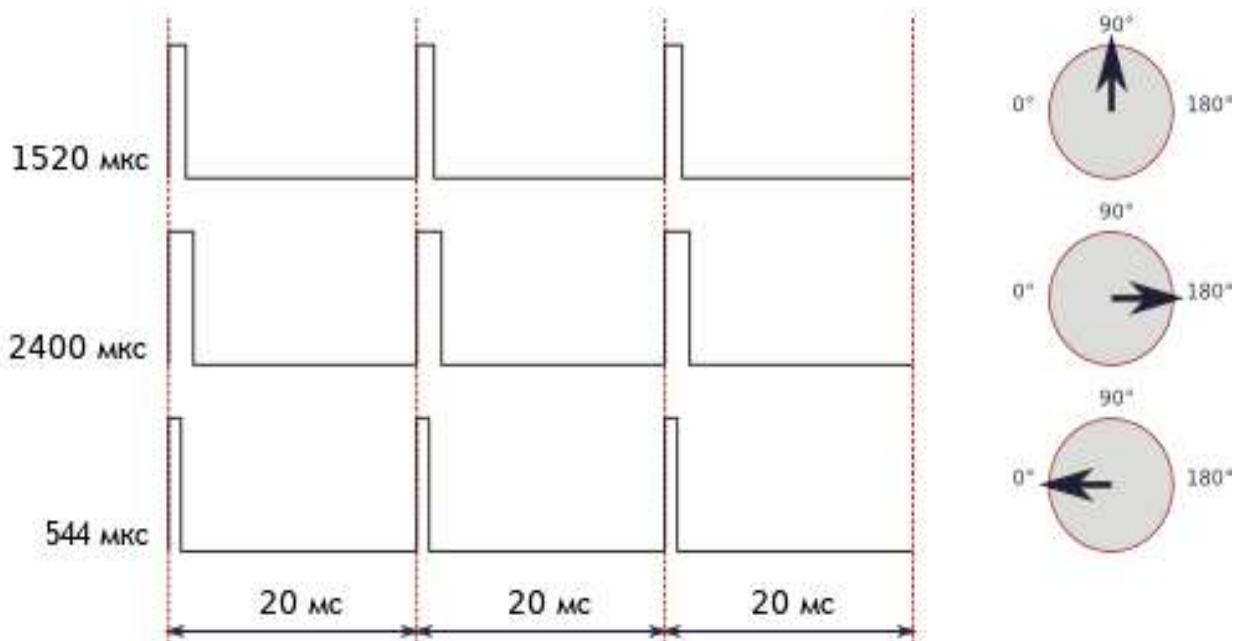


Рисунок 3.2 - Тривалість керуючих імпульсів і відповідні їм значення кутів повороту вала серводвигуна

Положення, займане сервоприводом, залежить від тривалості імпульсу. Після того, як керуючий сигнал надходить в схему Управління сервоприводом, його тривалість порівнюється з тривалістю імпульсу, що генерується сервоприводом. Тривалість імпульсу, що генерується сервоприводом, можна змінювати за допомогою потенціометра. Після порівняння тривалості двох імпульсів на електродвигун подається керуючий сигнал. Напрямок обертання визначається тривалістю меншого імпульсу. Електродвигун зупиниться, коли тривалість імпульсу стане рівною. У момент, коли тривалість імпульсу дорівнює, може спостерігатися тремтіння серводвигуна (рис. 3.3) [20].

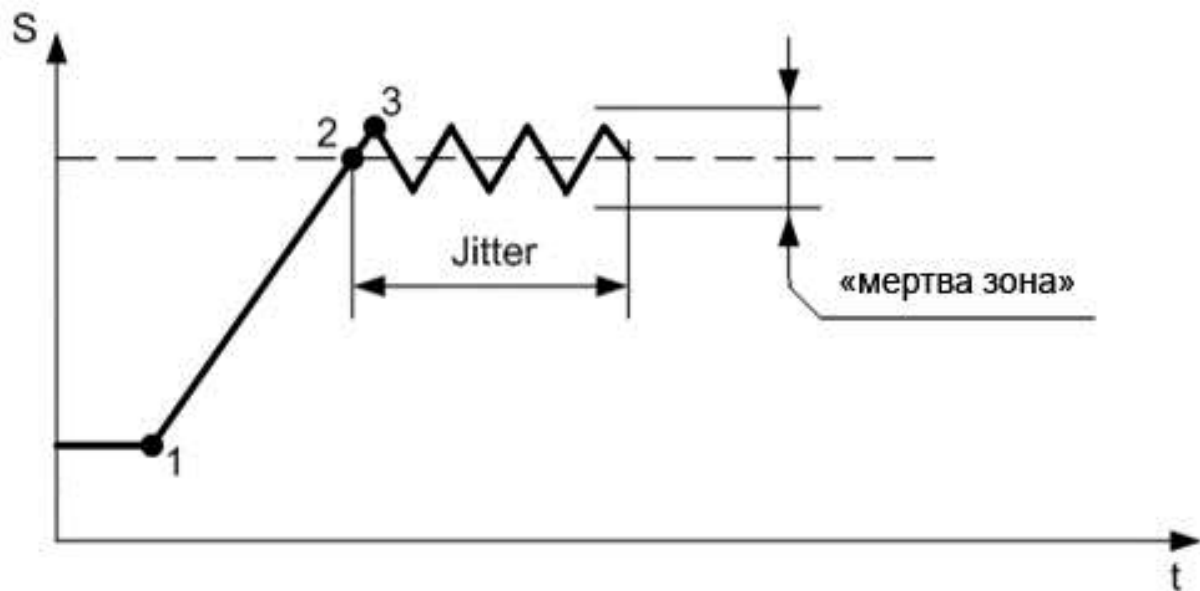


Рисунок 3.3 - Трепіння та «мертва зона» серводвигуна

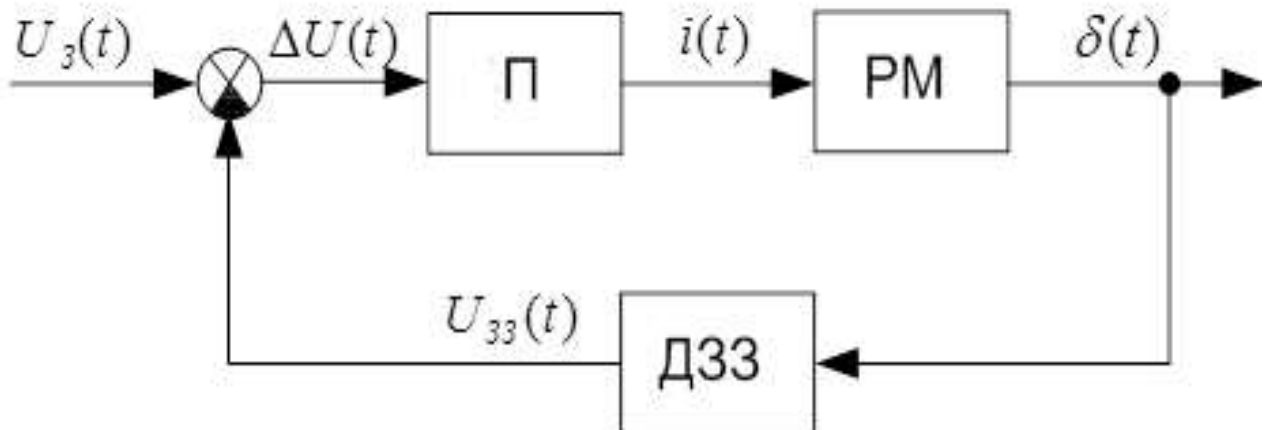
На графіку 3.3:  $S$  – «шлях» валу,  $t$  - час. У момент 1 на керований вал надходить команда, і серводвигун починає її виконувати. У момент 2 порівнюється тривалість керуючого імпульсу і опорного імпульсу в програмі управління серводвигуна. Але механічна система має інерційні характеристики, тому в точці 3 Система управління запускає двигун у зворотному напрямку, і все повторюється. В результаті відбувається тремтіння

									Арк.
									32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БРМА 24.00.00.000 ПЗ				

вала поблизу необхідного положення. Це тремтіння називається назву Jitter, для боротьби з ним в систему управління вводиться зона нечутливості до похибки позиціонування. Технічно це виглядає так: запам'ятовуючі пристрої вибірки, які оцінюють тривалість різниці в керуючому імпульсі після того, як компаратор розпізнає ці малі значення як нульові. Тобто вводиться інтервал, при якому зміна керуючого імпульсу щодо опорного імпульсу не призводить до включення серводвигуна. Цю зону також називають " мертвою зоною" (рис.3.2.). Величину "мертвої зони" виробники в характеристиках не наводять. Зазвичай ця характеристика сервопривода побічно вказується якісними поняттями: стандартна, високоточна, найточніша.

### 3.2 Дослідження роботи сервоприводу та його позиціонування

Для вивчення динаміки роботи сервоприводу запропонована його функціональна схема (рис.3.4.)



П – плата(драйвер); РМ – рульова машина; ДЗЗ – датчик зворотного зв'язку;  
 $i(t)$  - струм управління рульової машини;  $U_{33}(t)$  - струм зворотного зв'язку;  
 $U_3(t)$  - командний струм;  $\Delta U(t)$  - результуючий струм;  
 $\delta(t)$  - поворот вихідного валу

### Рисунок 3.4 - Функціональна схема сервоприводу

Підсилювач сервоприводу (ПСП) – це підсилювач потужності, який є малоінерційним ланкою. Його передавальна функція має вигляд:

$$W_{ПСП} = \frac{\delta(s)}{\alpha_{Я}(s)} = \frac{K_{П}}{1+T_{П} \cdot s} \quad (3.8)$$

Зазвичай ця функція має малу величину. Передавальну функцію ПСП приблизно можна записати як:

$$W_{ПСП} \approx K_{П}, \quad (3.9)$$

де  $K_{П}$  – коефіцієнт посилення підсилювача по потужності.

Сервопривід перетворює енергію від ПСП в механічну енергію. Сервопривід є інтегральним ланкою, тобто при подачі сигналу на вхід на виході виходить постійна швидкість переміщення (кутова швидкість).

Щоб обертати вал, сервопривод повинен генерувати крутний момент, що перевищує суму моментів, які навантажують вихідний вал. Такими моментами є:

- $M_{інерц.}$  - інерційний;
- $M_{демпф}$  - демпфуючий;
- $M_{шарн.}$  - шарнірний;
- $M_{a1}$  - момент асиметрії який визначається неспівпаданням ліній дії сили тяги  $r_{\delta}$  і осі підвісу;
- $M_{a2}$  - момент асиметрії який визначається неспівпаданням ліній сили інерції і осі підвісу;
- $M_{тер}$  - момент сил сухого тертя.

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таким чином, рушійний момент  $M_{РУШ}$  врівноважують моментами навантажень:

$$M_{РУШ} = M_{інерц} + M_{демп} + M_{шарн} + M_{a1} + M_{a2} + M_{тер} \quad (3.10)$$

Для вивчення динамічних процесів сервопривід представлений у вигляді динамічної ланки, тобто електромеханічного перетворювача (ЕП) з рухомим елементом якорем.

Передавальна функція сервоприводу  $W_{СП}(s)$  має вигляд:

$$W_{СП}(S) = W_{ЕП}(S) \quad (3.11)$$

де  $W_{ЕП}(s)$ -передавальна функція електромеханічного перетворювача.

Передавальну функцію  $W_{ЕП}(S)$  електромеханічного перетворювача можна одержати з рівняння руху якоря:

$$I_{я} \cdot \ddot{\alpha}_{я} + B \cdot \dot{\alpha}_{я} + C \alpha_{я} = M_E = K \cdot I_{п} \quad (3.12)$$

Рівняння (3.12) в стандартній операторній формі матиме вигляд:

$$(I_{я} \cdot s^2 + B \cdot s + C) \cdot \alpha_{я} = K \cdot I_{у}, \quad (3.13)$$

де:  $I_{я}$  – приведений момент інерції якоря;

$B$  – коефіцієнт електромагнітного демпфування і демпфуючих властивостей середовища, в якому переміщається якір;

$C$  – жорсткість пружного елемента якоря;

$I_{у}$  – управляючий струм якоря (вхідна дія);

					<i>БРМА 24.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$\alpha_{Я}$  – кут повороту якоря (вихідний параметр ланки);

$K$  – коефіцієнт пропорційності, що характеризує залежність між струмом управління і електромагнітним моментом.

З рівняння (3.11) виходить передавальна функція електромеханічного перетворювача (ЕП):

$$W_{EP} = \frac{\alpha_{Я}(s)}{I_{II}(s)} = \frac{K_{EP}}{T_{Я}^2 \cdot s^2 + 2 \xi_{Я} T_{Я} s + 1} \quad (3.14)$$

де  $K_{EP} = \frac{K}{C}$  – статичний коефіцієнт передачі ЕП;

$T_{Я} = \sqrt{\frac{I_{Я}}{C}}$  – постійна часу;

$\xi_{Я} = \frac{B}{2 \cdot C \cdot T_{Я}} = \frac{B}{2 \cdot I_{Я} \cdot \sqrt{C}}$  – ступінь заспокоєння якоря.

Індуктивний датчик ІД або різниці потенціалів РД використовується як датчик зворотного зв'язку ЗЗ. Якщо датчик зворотного зв'язку є потенціометром, то в ньому є резистор. З ЗЗ сигнал надходить на суматор ПСП. Якщо датчик індуктивний, він повинен мати фазочутливий випрямляч ФЧВ і резистор.

Датчик різниці потенціалів простий в конструкції, але має недоліки, пов'язані з ковзаючим контактом і ступінчастими характеристиками, які обмежують його використання.

Індукційні датчики більш надійні і не вимагають ретельної перевірки.

Передавальна функція кола зворотного зв'язку має вигляд[9]:

$$W_{ЗЗ}(s) = -K_{ЗЗ}. \quad (3.15)$$

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

При виборі параметрів сервоприводу коефіцієнт кругового посилення, так званий коефіцієнт добротності схеми сервоприводу, підлягає оптимізації [9]:

$$K = -K_{II} \cdot K_{\omega} \cdot K_{33} \quad (3.16)$$

Щоб задовольнити цю еквівалентність, спочатку визначається значення, а потім перерозподіляється з урахуванням відомих коефіцієнтів  $K_{II}$  і  $K_{33}$ .

Звичайно, одночасно зі зміною постійної часу ми постараємося збільшити  $K_{33}$ , тому що затримка в ланцюзі сервоприводу покращиться, а чутливість всіх елементів зросте. Збільшенню короткого замикання перешкоджає обмеження потужності, а також той факт, що при деякому значенні короткого замикання ланцюг втрачає стабільність.

При оптимізації коефіцієнта циркуляції необхідно відстежувати відхилення параметрів, які можуть привести до нестабільності системи. Зазвичай відхилення параметра має математичне сподівання, рівне нулю,  $M$ , і підпорядковується закону нормального розподілу. Відхилення коефіцієнта циркуляції визначається відхиленням кожного коефіцієнта:  $K_{II}$ ,  $K_{\omega}$ ,  $K_{33}$ . Якщо ці відхилення не корелюють, тобто мають  $M=0$  і підкоряються нормальному закону розподілу, досить знайти відхилення коефіцієнта циркуляції. Припустимо, що коефіцієнти мають випадкові значення.

$K_{II}^0, K_{\omega}^0, K_{33}^0$  — математичні очікування (номінальні значення). В технічних умовах на елементи вказуються відхилення на  $K_{II}^0, K_{\omega}^0, K_{33}^0 - \Delta K_{II}, \Delta K_{\omega}, \Delta K_{33}$ . Кожне із значень не перевищує  $3\sigma$  з вірогідністю  $\approx 0,997$ . Для переводу відхилень якого-небудь параметра з % в одиниці вимірювань, наприклад: задано  $\Delta R$  - відхилення (розкид) якого-небудь параметру:

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\delta R = R^0 \cdot \frac{\Delta R}{100} = \alpha_1 \quad (3.17)$$

де  $\sigma = \frac{R^0 \cdot a}{3}$  – середньоквадратичне відхилення.

З теорії вірогідності дисперсія кругового коефіцієнта визначиться як [9]:

$$\sigma_K^2 = \sigma_K^2 + \sigma_{II}^2 + \sigma_{33}^2. \quad (3.18)$$

По цій формулі можна визначити  $\sigma_K$  в %, а потім перевести в одиниці вимірювання самого параметру.

$$\sigma_K = \frac{\alpha K}{3} K^0, \quad (3.19)$$

де  $3\sigma_K = \Delta K$ .

Тут одне невідоме –  $K$ , яке визначаємо, знаючи  $\sigma_K$  і  $K_{кр}$ . Крім того, необхідно задати вимоги до запасу стійкості замкнутого контуру.

Використовуючи ці положення, розраховується коефіцієнт циркуляції.

Вибір коефіцієнтів циркуляції.

Набір:

- 1) критичне значення коефіцієнта циркуляції –  $K_{кр}$ ;
- 2) розкиди  $K_{II}, K_{\omega}, K_{33} - \Delta K_{II} [\%], \Delta K_{\omega} [\%], \Delta K_{33} [\%]$  (з технічних умов);
- 3) вірогідність стійкої роботи сервоприводу –  $P_{СП}$ .

Наше завдання-визначити номінальне значення номінальне значення кругового коефіцієнта (добротність) –  $K^0$ .

Визначаємо  $\Delta K$

$$\Delta K = \sqrt{\Delta K_{II}^2, \Delta K_{\omega}^2, \Delta K_{33}^2} [\%], \quad (3.20)$$

Розкид параметрів

									Арк.
									38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БРМА 24.00.00.000 ПЗ				

$$\sigma = \frac{K^0}{3} \cdot \frac{\Delta K}{100} = \alpha_K \cdot K^0 \quad (3.21)$$

Значенню  $P_{СП} (\Phi(i))$  в таблицях інтеграла вірогідності відповідає відносна величина  $U$  (або  $n$ ).

В нашому випадку  $x$  – це круговий коефіцієнт  $K$ , що є випадковою величиною.

Величина  $U$  показує, скільки разів вміщається  $\sigma$  в  $\Delta K$ .

Отже:

$$K_{KP} = K^0 + n \cdot \sigma, \quad (3.22)$$

де  $\sigma = \alpha_K \cdot K^0$

Маємо

$$K^0 \cdot (1 + n \cdot \alpha_K) = K_{KP}, \text{ або} \quad (3.23)$$

$$K^0 \frac{K_{KP}}{1 + n \cdot \alpha_K} = \quad (3.24)$$

вираз для визначення номінального значення кругового коефіцієнту сервоприводу.

На стабільну роботу сервопривода має вплив нелінійність.

Основною нелінійністю сервоприводу є нелінійність статичних характеристик, в тому числі високошвидкісних і миттєвих.

Швидкісна характеристика рульової машини полягає в тому, що кутова швидкість вихідного сигналу рульової машини залежить від вхідного сигналу:

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\dot{\delta} = \dot{\delta}(i), \quad (3.25)$$

де на вхід сервоприводу подається струм  $i$ , а - на виході сервоприводу – кутова швидкість.

Мертва зона обов'язкова, оскільки вона обумовлена особливостями конструкції сервоприводу і нечутливістю реле на вході.

Насичення  $M_{\max}$  обумовлено обмеженням потужності та моментною характеристикою безпосередньо не використовується.

Нечутлива зона - з тієї ж причини [10]. Те ж саме можна сказати і про розглянутих характеристиках моменту. Крім того, певний сенс надає той факт, що сервоприводу завжди потрібно долати якесь навантаження  $M_1$ . Треба подати команду  $i_0$ ; до цього вихідний шток нерухомий, швидкість рівна нулю. Зона нечутливості "плаває" залежно від моменту. Це створює невизначеність у конструкції.

Зона байдужості складається з 2 частин. Вона регулюється за допомогою:

І конструкції сервоприводу;

Дивіться крутний момент, прикладений до вихідного стрижня сервоприводу.

Щоб зменшити крутний момент, що застосовується до вихідної шини сервоприводу, він прагне зробити миттєву характеристику крутішою (ближче до реле).

Всі ці нелінійності необхідно враховувати при проектуванні сервоприводу.

Автоколивання зазвичай присутні в нелінійних системах. Вимога про відсутність автоколивань в нелінійних системах використовується в якості основного критерію для вибору кругових коефіцієнтів. Щоб перевірити

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

систему на наявність автоколивань, необхідно відкрити її, щоб підкреслити нелінійність.

Замініть всю відкриту систему двома ланками: лінійною частиною і нелінійною частиною (рис. 1). 3.5).

Використовуйте метод гармонічної лінеаризації, щоб записати умови наявності автоколивань у системі[11]:

$$W_L(s) \cdot W_H(s) = 1, \quad (3.26)$$

звідки

$$W_L(s) = \frac{1}{W_H(s)}. \quad (3.27)$$

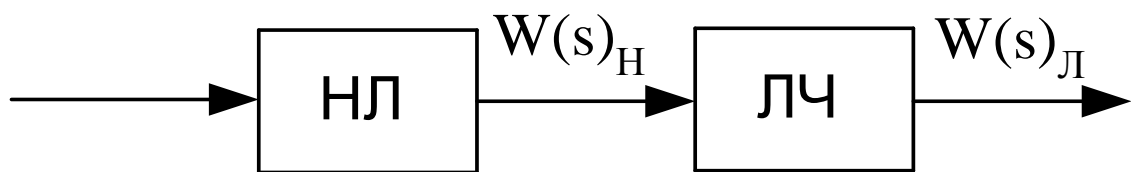


Рисунок 3.5 - Ланки: лінійна і нелінійна частини

Перейдемо до умови відсутності автоколивань, що має наступний вигляд:

$$W_L(s) \cdot W_H(s) < 1, \text{ отже } W_L(s) < \frac{1}{W_H(s)}. \quad (3.28)$$

Мінімальне значення коефіцієнта посилення кругового сервоприводу, при якому виконуються умови наявності власних коливань в системі, називається критичним значенням.

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

В системі завжди є 2 граничних циклу. 1 з них стабільний, а інший 1 нестабільний. Але коефіцієнти не важливі.

Мінімальний коефіцієнт, який отримується лише при дотику і стає мінімальним і критичним [8, 11]. Бо якщо його зменшити, то автоколивань не буде.

Розглянемо деякі окремі випадки.

Розірвемо систему на вході нелінійної ланки (рис. 3.6).

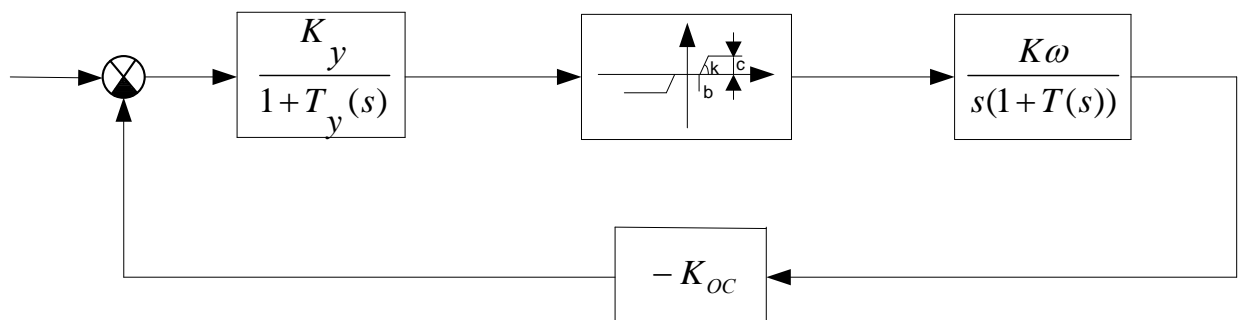


Рисунок 3.6 - Розірвана система на вході нелінійної ланки

Передавальна функція лінійної частини системи становить:

$$W_{\text{л}}(s) = \frac{\delta(s)}{i(s)} = - \frac{K}{s(1 + T_{\text{л}}(s))(1 + T(s))} \quad (3.29)$$

Передавальна функція нелінійної частини системи  $W_{\text{н}}$  – це коефіцієнт гармонійної лінеаризації в методі гармонійної лінеаризації. В загальному випадку  $W_{\text{н}}$  складається з речовинної і уявної комплексної складових.

В даному випадку  $W_{\text{н}}(s)$  – це дійсне число.

В загальному випадку:  $W_{\text{н}}(s) = q + jq'$ .

В даному випадку:  $W_{\text{н}}(s) = q; q' = 0$ .

Для  $K=1$ ,  $W_H(s)$  виглядає таким чином (рис 3.7.)

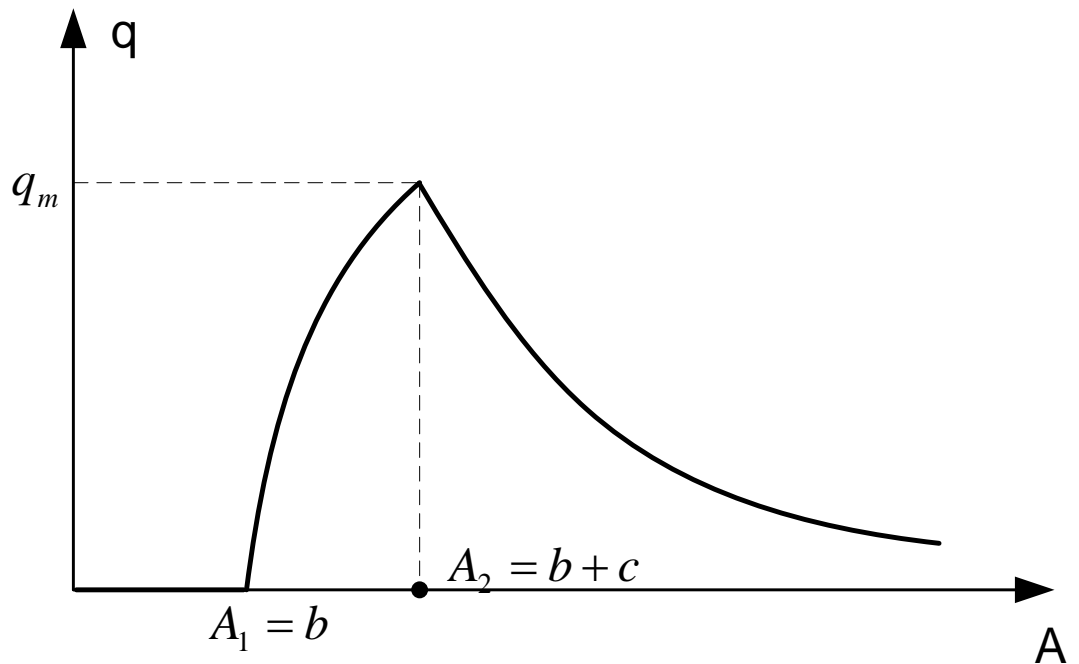


Рисунок 3.7 -. Дійсне число  $W_H$  для  $K=1$

Величина  $q$  для однозначної нелінійності залежить тільки від величини амплітуди  $A$ .

Оскільки  $K=1$ , то нелінійність має вигляд (рис 3.8.)

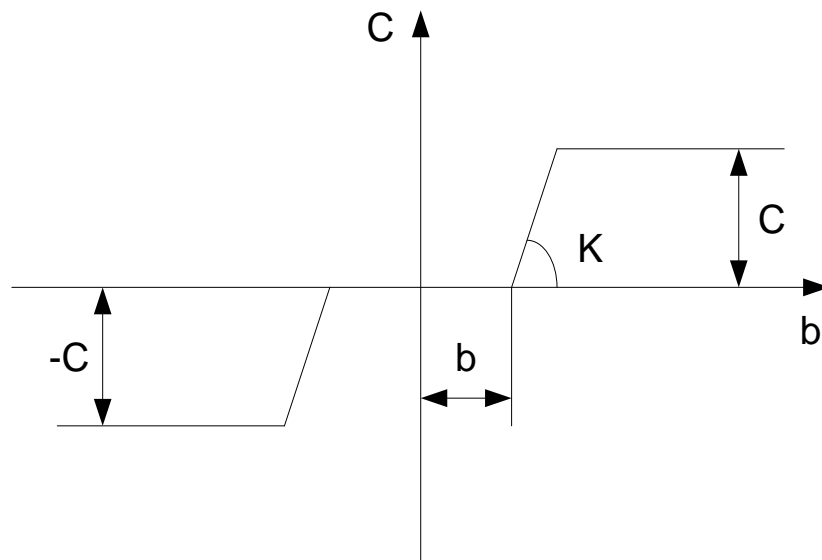


Рисунок 3.8 - Нелінійність для K=1

Доки амплітуда  $A$  не перевищує зону нечутливості  $b$  (тобто до  $A=b$ ), система розімкнена і  $A=0$ .

Представимо годограф для  $W_L(s)$  і  $\frac{1}{W_H(s)}$  (рис 3.9.)

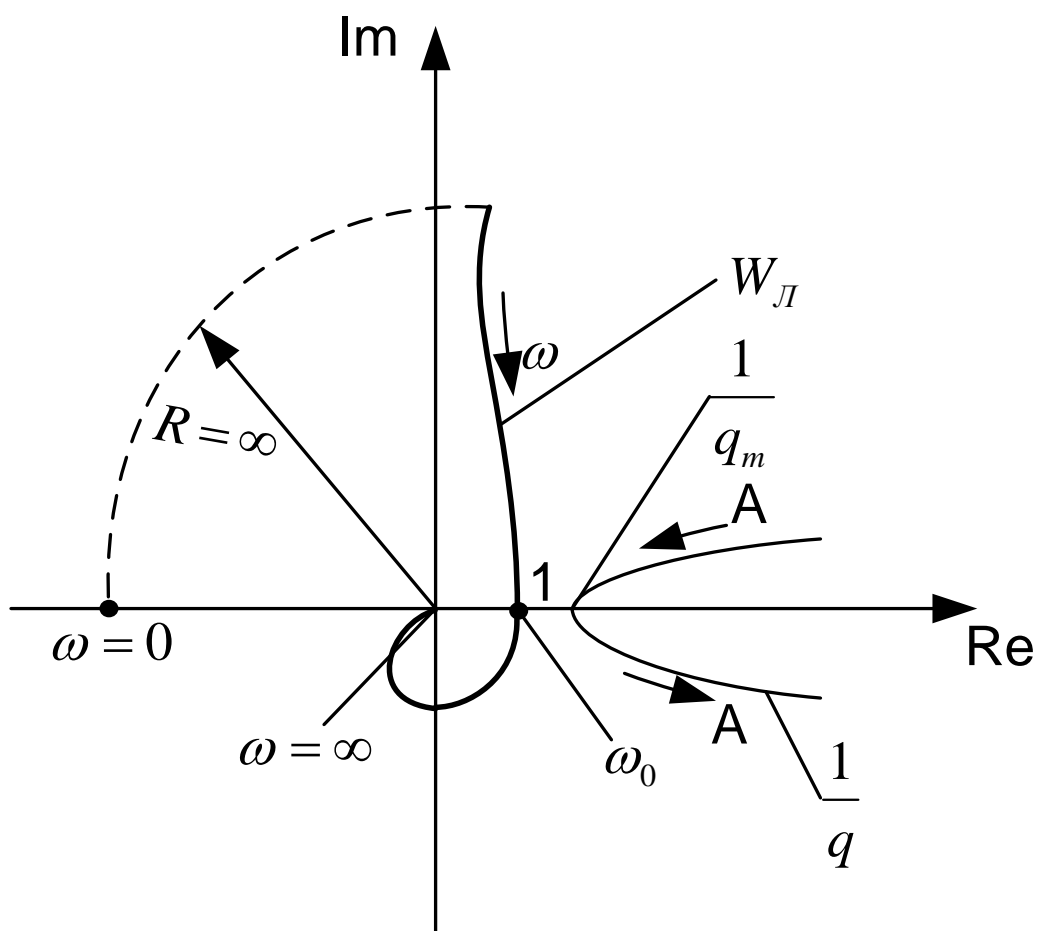


Рисунок 3.9 - Годограф для  $W_L(s)$  і  $\frac{1}{W_H(s)}$  де  $\frac{1}{W_H(s)} = \frac{1}{q}$ .

Для будь-якої лінійної передавальної функції, заданої передавальною функцією лінійної частини системи, ми можемо записати:

$$W(s) = \frac{A_1 + jB_1}{A_2 + jB_2} \quad (3.30)$$

Такий запис є правильним, якщо у функції передачі немає нульового полюса.

A і B-це поліноми від  $\omega$ .

A – парний ступінь  $\omega$ ; B-непарний ступінь  $\omega$ .

Точка 1 на годографі характеризується тим, що фазовий зсув чисельника дорівнює фазовому зсуву знаменника передавальної функції.

Сумарна частотна характеристика таких ланок дорівнює фазовій характеристиці в чисельнику за вирахуванням фазової характеристики в знаменнику, тому фазовий зсув дорівнює: нулю:  $\frac{tg \varphi_2 - tg \varphi_3}{\omega = \omega_0} = 0$ , звідси

$$\frac{B_1}{A_1} = \frac{B_2}{A_2} \text{ при } \omega = \omega_0.$$

Встановимо модуль передавальної функції лінійної частини системи.

$$|W(s)| = \frac{\sqrt{A_1^2 + B_1^2}}{\sqrt{A_1^2 + B_1^2}} = \frac{A_1}{B_2} \cdot \frac{\sqrt{1 + \frac{B_1^2}{A_1^2}}}{\sqrt{1 + \frac{B_1^2}{A_1^2}}} = \frac{A_1}{A_2} = \frac{B_1}{B_2} = A_0 \quad (3.31)$$

де  $A_0$  – модуль передавальної функції на частоті  $\omega_0$ .

Знайдемо значення частоти  $\omega_0$  за формулою:

$$W_{II}(s) = \frac{\delta(s)}{i(s)} = -\frac{K}{s(1+T_{II}(s))(1+T(s))} = -\frac{K}{s^3 \cdot T_V \cdot T + s^2(T_{II} + T) + s};$$

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$W_{II}(j\omega) = \frac{\delta(j\omega)}{i(j\omega)} = \frac{K}{\omega^2(T_{II} + T) + j\omega(\omega^2 \cdot T_{II} \cdot T - 1)};$$

$$A_0 = \frac{K}{\omega_0^2(T_{II} + T)} = \frac{T_{II} \cdot T \cdot K}{T_{II} + T};$$

$$\omega_0^2 = \frac{1}{T_{II} \cdot T}; \quad A_0 = \frac{1}{q_m}. \quad (3.32)$$

З отриманого співвідношення визначається значення коефіцієнта кола нелінійного сервоприводу.

$$\frac{T_{II} \cdot T \cdot K_{KP}}{T_{II} + T} = \frac{1}{q_m}; \quad K_{KP} = \frac{T_{II} + T}{T_{II} + T \cdot q_m}. \quad (3.33)$$

### 3.3 Розробка конструкції пристрою керування сервоприводом

#### 3.3.1 Короткий опис та призначення пристрою

Конструкція пристрою сервоуправління (далі - ПКС) являє собою систему управління двигуном, засновану на попередній аналогічній розробці кафедри машин та апаратів електромеханічних та енергетичних систем Хмельницького національного університету. Пристрій розроблено з урахуванням рекомендацій, описаних у [5-11].

Даний блок управління призначений для управління роботою електродвигунів, таких як:

- трифазний асинхронний двигун;
- однофазний асинхронний двигун;
- колекторний двигун.

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Залежно від типу двигуна використовуються різні режими управління, які забезпечуються відповідним програмним забезпеченням. Для двигунів, які містять 1 або 2 фази, використовуються 3 з 2 приводних важелів - режим зворотного Н-образного моста. Як правило, можна підключати двигуни з електричними обмотками, що містять 1-3 фази. Виняток становить двофазний (біполярний) кроковий двигун, електрична схема управління яким включає в себе 2 незалежні обмотки. Управління таким двигуном передбачає наявність драйвера, що дозволяє змінювати напрямок струму в кожній з цих обмоток.

Структура цього блоку управління є компонентом бажаної кінцевої системи управління і повинна включати систему управління з джерелом живлення та інтерфейсом вводу-виводу даних на додаток до поточної плати. Комп'ютер може служити в якості системи управління і інтерфейсу введення-виведення, для чого на друкованій платі передбачений інтерфейсний роз'єм RS232.

Ви також можете керувати друкованою платою в демонстраційному режимі, виконуючи кілька основних функцій, таких як запуск двигуна, зупинка, реверс та зміна швидкості. Для управління цим режимом на друкованій платі передбачені 4 кнопки управління.

Додаткові функції друкованої плати також включають в себе можливість підключення датчиків зворотного зв'язку, можливість підключення тахометрів для контролю частоти обертання двигуна і можливість підключення охолоджуючих вентиляторів.

### 3.3.2 Опис конструкції та електричної частини друкованої плати керування

Друкована плата друкована плата виконана в двошаровому виконанні з захисним покриттям (маскою). Більшість електричних проводів розташовані у верхньому шарі, і майже всі електричні компоненти спаяні (рис. 3.10). У

					<i>БРМА 24.00.00.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		47

нижньому шарі в основному розташовані багатокутні і герметичні силові транзистори, що пов'язано з можливістю зручної установки теплових випромінювачів.

Всю систему цієї ПКС можна розділити на наступні основні частини (вузли)::

- блок живлення;
- вузол управління;
- вузли введення / виведення;
- вузол моніторингу;
- вузол драйвера.

Давайте коротко розглянемо кожен з них окремо.

Блок живлення складається з 4 лінійних стабілізаторів напруги на 3.3В, 5.0В, 12.0В і 15.0В відповідно (рис. 3.11).

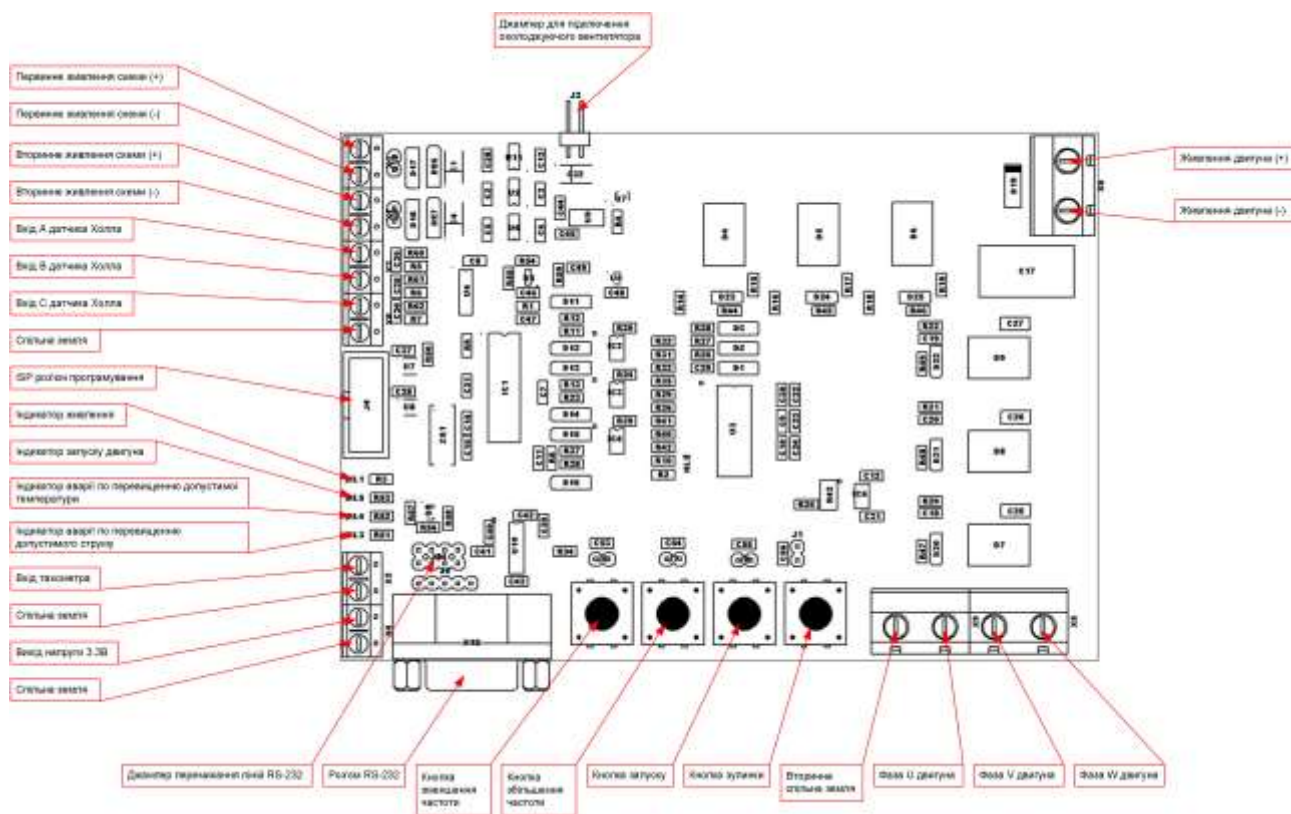


Рисунок 3.10–Плата ПКС (електричні компоненти)

Регулятор напруги 3,3 В використовується для живлення всієї логіки контролера управління та друкованої плати, 5,0 В використовується для живлення датчика струму, 12,0 В використовується для живлення вентилятора охолодження, а 15,0 В використовується для живлення драйвера ключа живлення (рис. 3.11).

Вузол управління фактично являє собою програмований контролер (рис. 3.12), який виконує всі функції вводу-виводу і керує самим драйвером двигуна. Для програмування останнього на платі передбачений спеціальний роз'єм ISP.

Вузол введення-виведення включає в себе наступні елементи, такі як кнопки управління (рис. 3.13), інтерфейс RS232 (рис. 3.14), термінал для підключення вхідних сигналів світлодіодного підсвічування, вентилятора і логіки управління тахометром.

Вузол моніторингу включає в себе датчик струму (рис. 3.15) і датчик температури (рис. 3.16). Перший і другий аналогові принципи роботи, зчитування і перетворення в значення струму і температури виконуються контролером з використанням інтерфейсу АЦП.

Вузол драйвера містить всю логіку управління самим двигуном. Це включає в себе гальванічну розв'язку (рис. 3.17), драйвер силового транзистора (рис. 3.18) і сам силовий транзистор (рис. 3.19).

					<i>БРМА 24.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						49
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

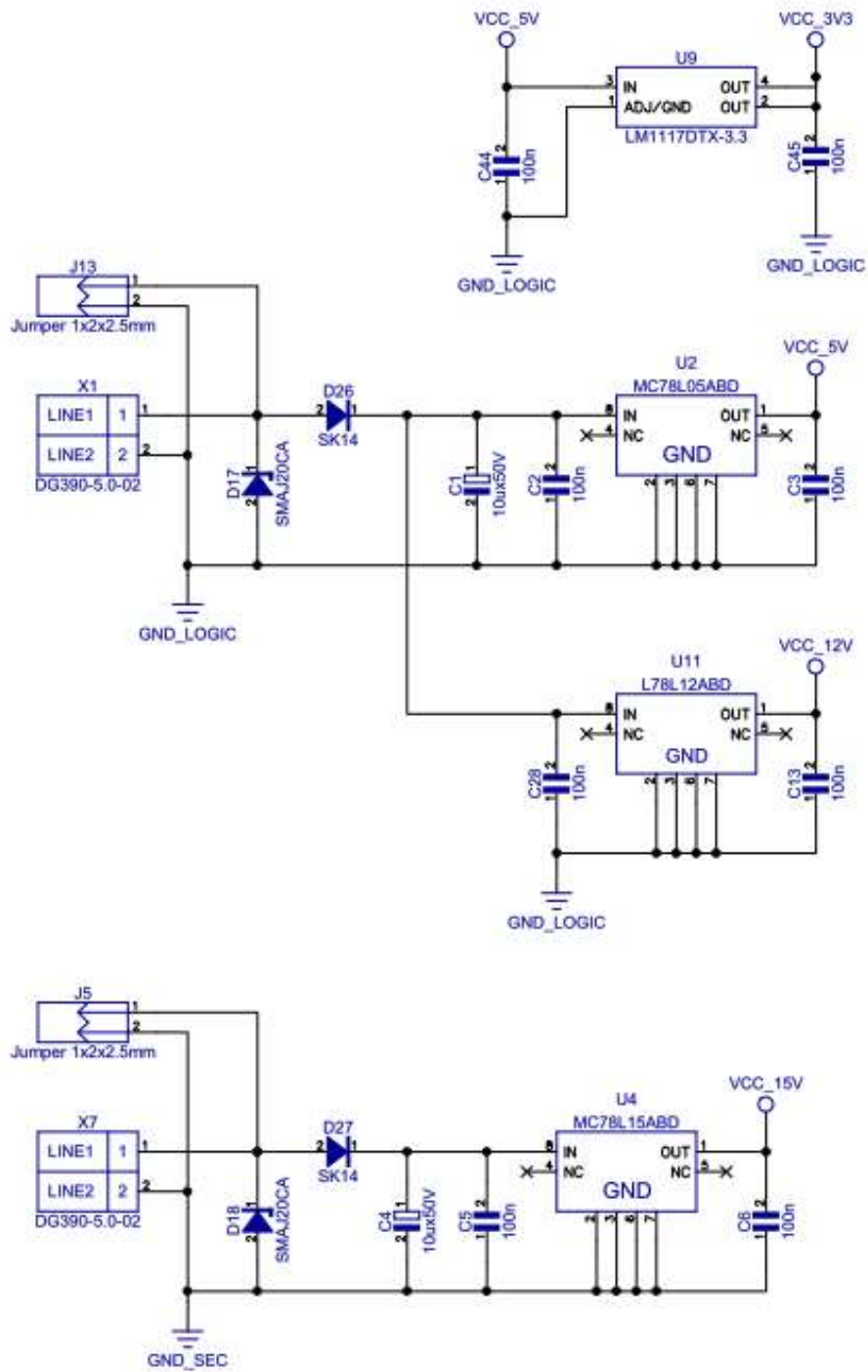


Рисунок 3.11 – Вузол живлення ПК

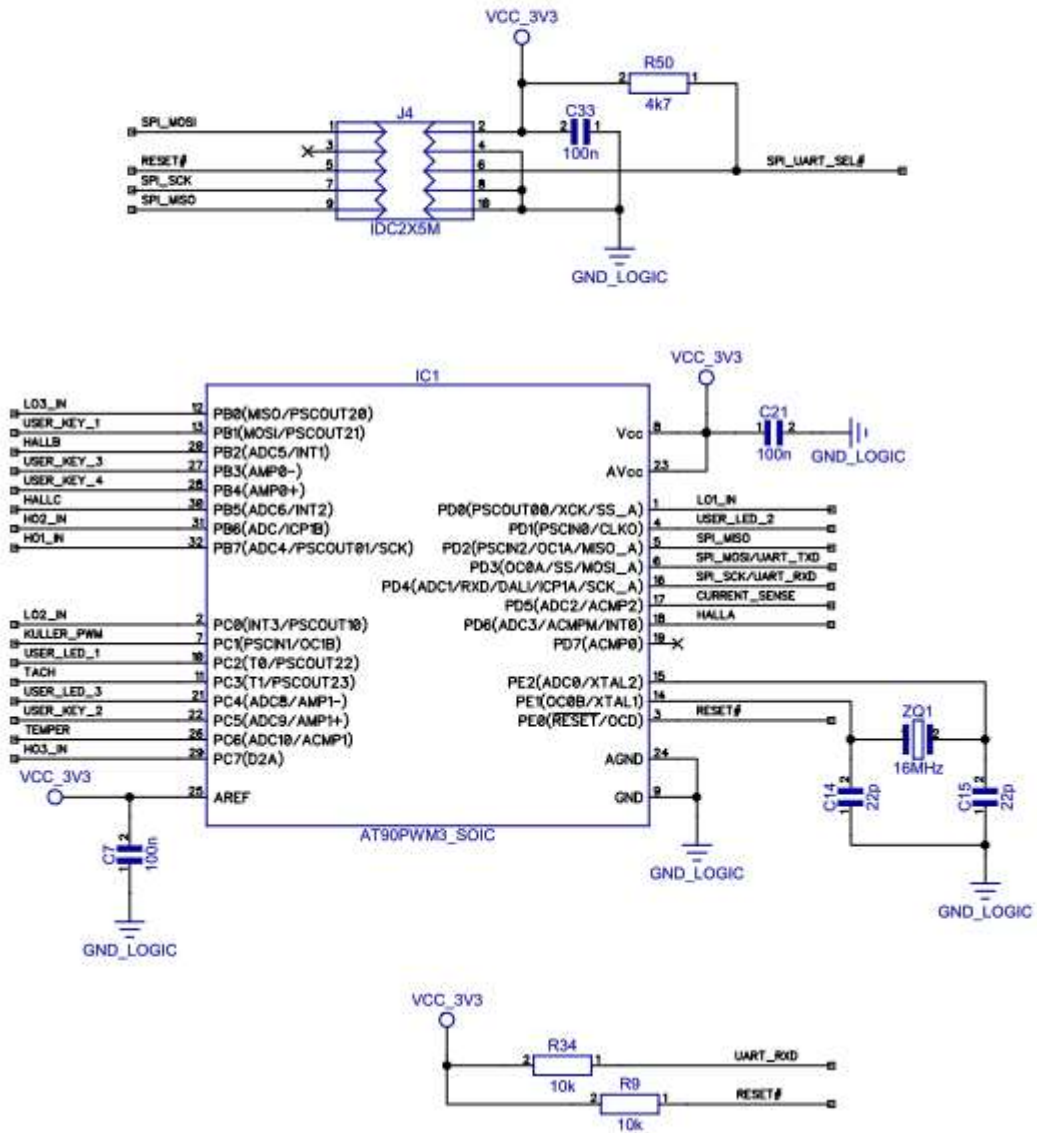


Рисунок 3.12 – Вузол контролю ПКС

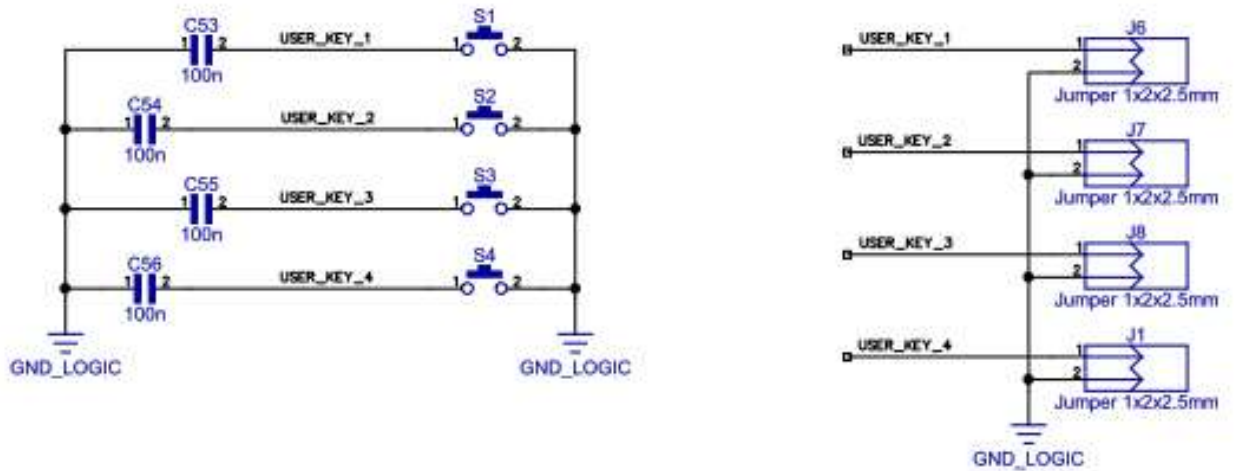


Рисунок 3.13 – Вузол вводу-виводу ПКС (кнопки управління)

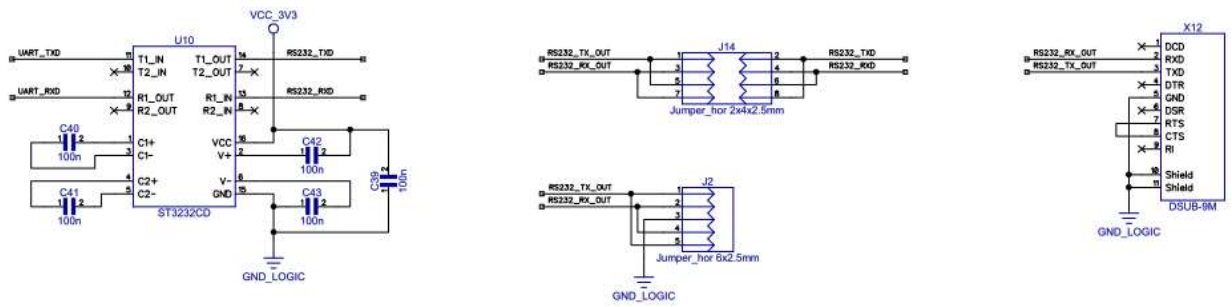


Рисунок 3.14 – Вузол вводу-виводу (інтерфейс RS232)

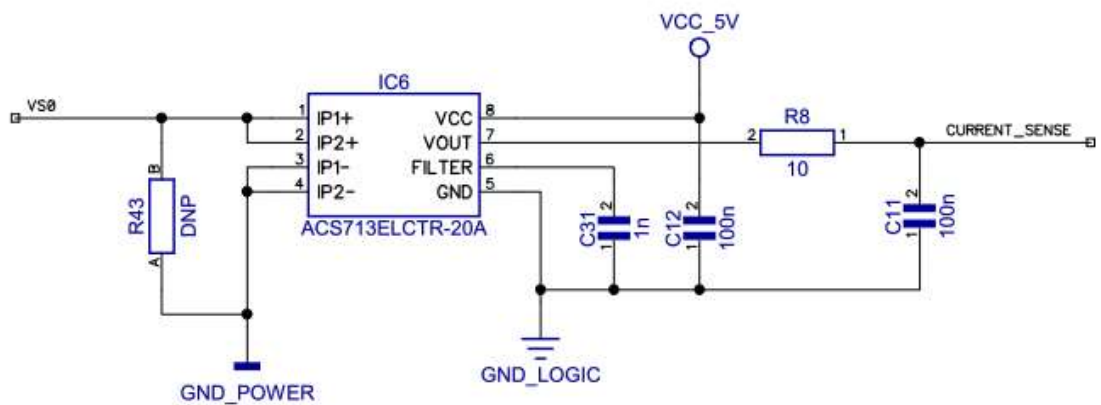


Рисунок 3.15 – Вузол моніторингу ПКС (датчик струму)

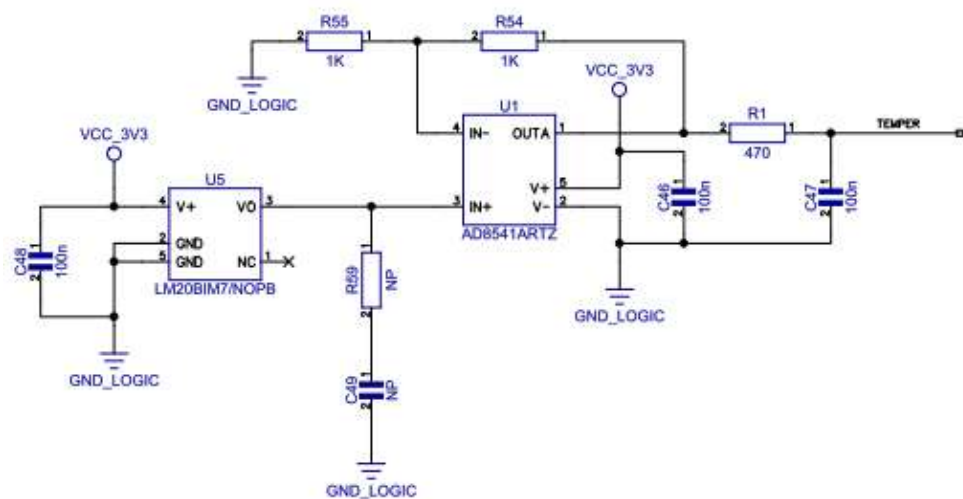


Рисунок 3.16– Вузол моніторингу ПКС (датчик температури)

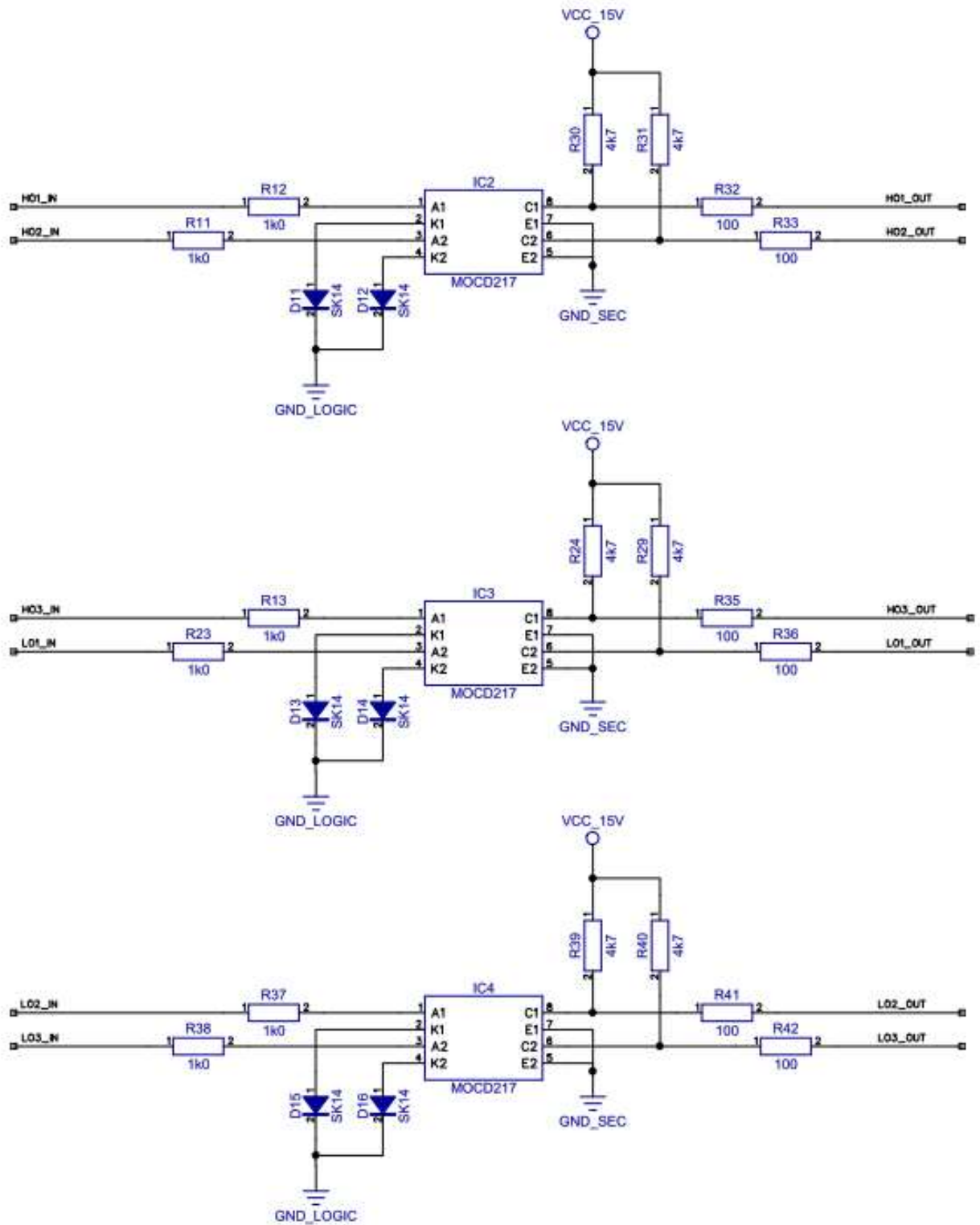


Рисунок 3.17 – Вузол драйвера ПКС (гальванічна розв'язка)

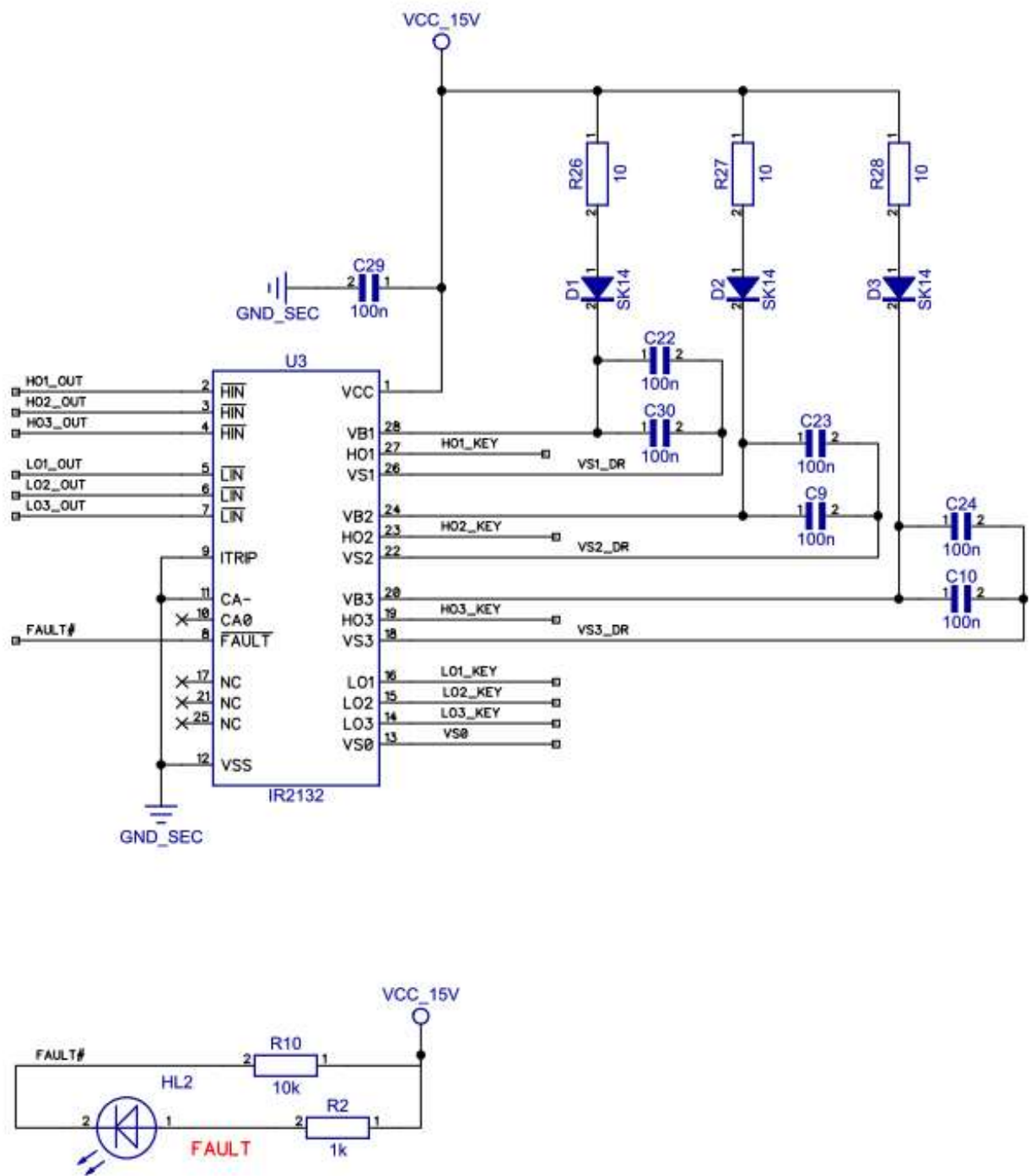


Рисунок 3.18 – Вузол драйвера ПКС (драйвер силових транзисторів)



Третій-це джерело живлення самого двигуна, яким необхідно керувати. Напруга і струм, які повинні подаватися джерелом струму, залежать від потужності двигуна. Електрична схема ПКС включає в себе силовий транзистор IGBT, максимальне падіння напруги між колектором і емітером становить 600 В, а при кімнатній температурі він забезпечує тривалий струм колектора в 60 А.

### 3.3.3 Опис роботи програми керування

Керуюча програма, розроблена для поточного контролера ПКС, надає можливість вибору типу двигуна для управління за допомогою наступних директив компіляції.

```
//#define MOTOR_STEP_3PH
//#define MOTOR_VENT_3PH_HALL
//#define MOTOR_DC
//#define MOTOR_STEP_3PH_N
//#define MOTOR_AC_3PH
//#define MOTOR_AC_1PH
```

Залежно від обраної директиви компілятор налаштовує програму під певний тип движка, видаляючи непотрібні або додаючи необхідні функції і окремі частини програми. Таким чином, контролер друкованої плати відразу ж налаштовується для управління потрібним типом движка. Щоб змінити програму управління для роботи в іншій системі з іншими типами двигунів, потрібно перепрограмувати наступну систему управління:

На малюнку 3.12 показаний зовнішній вигляд комп'ютерної програми, розробленої для управління роботою асинхронного двигуна.

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

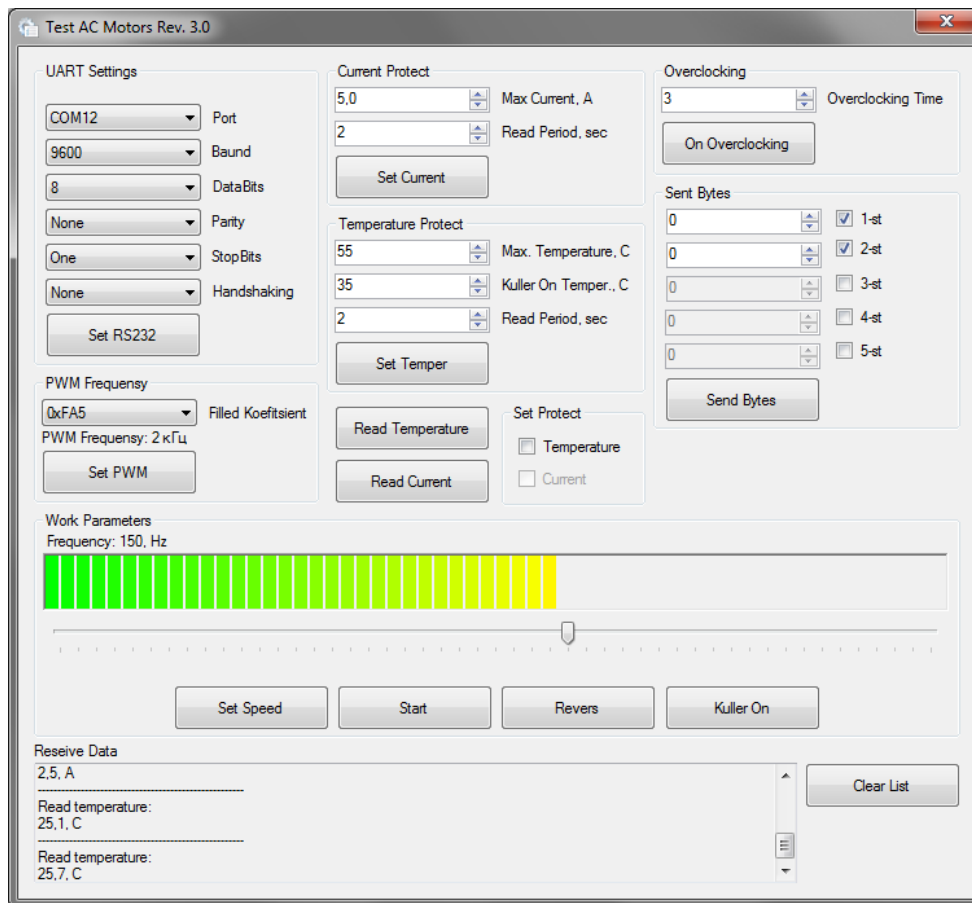


Рисунок 3.12 – Зовнішній вигляд комп'ютерної програми керування асинхронними двигунами

За допомогою цієї програми ви можете продемонструвати управління асинхронним двигуном, використовуючи завдання вимірювання частоти синусоїдальної хвилі, що генерується драйвером, самого ШІМ-сигналу. Включення/вимикання захисту при перевищенні допустимого струму і температури в задачах визначення критичного значення і періоду зчитування, часу прискорення/уповільнення, напрямку обертання. Також можна протестувати програму контролера і відправляти окремі незалежні команди, що визначають кількість байт, які необхідно відправити, щоб з датчика можна було зчитувати дані про струм і температуру.

### 3.4 Висновки до розділу

Проведено вивчення деталей роботи сервоприводу і його позиціонування в залежності від імпульсу, що посилається з пульта управління. Залежність кута повороту від тривалості імпульсу, а також проблеми, які можуть виникнути при управлінні і вивченні сервоприводу.

Розглянуто методику розрахунку окремих його складових сервопривода та параметрів роботи.

Запропоновано конструкції пристроїв сервоуправління, призначеної для управління роботою електродвигунів, таких як трифазні асинхронні двигуни; однофазні асинхронні двигуни; колекторні двигуни і т. д.

Залежно від типу двигуна використовуються різні режими управління, які забезпечуються відповідним програмним забезпеченням. Для двигунів з 1 або 2 фазами використовуються 3 з 2 приводних важелів - режим зворотного н-образного моста. Як правило, можна підключати двигуни з електричними обмотками, що містять 1-3 фази.

Розроблено принципову схему сервоконтролера (БРМА 24.00.00.000 К3).

Друкована плата пристрою сервоуправління виконана в двошаровому виконанні з захисним покриттям (маскою).

Була розроблена керуюча програма для поточного пристрою управління сервоуправляємим пристроєм і передбачена можливість вибору типу двигуна, яким буде здійснюватися управління.

					<i>БРМА 24.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						58
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

## ВИСНОВКИ

1. Проаналізовано принцип роботи і характеристики сучасних серводвигунів і засоби високого ступеня автоматизації на основі швидкодіючих мікропроцесорів з новітнім програмним забезпеченням для систем сервоуправління. Визначили наступні тенденції розвитку:

- використання сервоприводів-це спосіб забезпечити максимально швидку автоматизацію системи і високу продуктивність обладнання.;

- сервосистема є основою модульного принципу побудови функціональних модулів машини з можливістю швидкої реконфігурації обладнання;

- сервосистема надає засоби візуалізації технологічних процесів для високошвидкісного зв'язку з іншими технологічними лініями та інтеграції в систему автоматичного управління підприємством.;

- використання новітніх приводів є необхідною умовою для мінімізації кількості деталей машин і зниження експлуатаційних витрат.

2. Було прийнято рішення про необхідність розробки системи сервоуправління.

3. У бакалаврській роботі розглядається структура сервоприводу, принцип його роботи, його компоненти і взаємодія всіх елементів.

4. У даній роботі пропонується електрична структурна схема сервоприводу.

5. Вивчено деталі роботи сервоприводу і його позиціонування в залежності від імпульсу, що посилається з пульта управління. Розглянуто залежність кута повороту від тривалості імпульсу, а також проблеми, які можуть виникнути при управлінні і вивченні сервоприводу.

6. Встановлено, як розрахувати окремі компоненти параметрів сервоприводу та робочі параметри.

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

7. Запропонована конструкція пристроїв сервоуправління, призначених для управління роботою електродвигунів, таких як трифазні асинхронні двигуни; однофазні асинхронні двигуни; колекторні двигуни і т.д. в залежності від типу двигуна використовуються різні режими управління, які забезпечуються відповідним програмним забезпеченням. Для двигунів, які містять 1 або 2 фази, використовуються 3 з 2 приводних важелів - режим зворотного Н-образного моста. Як правило, можна підключати двигуни з електричними обмотками, що містять 1-3 фази.

8. Розроблено принципову схему сервоконтролера (БРМА 24.00.00.000 К3).

9. Друкована плата пристрою сервоуправління виконана в двошаровому виконанні з захисним покриттям (маскою).

10. Була розроблена керуюча програма для поточного пристрою управління сервоуправляемим пристроєм і передбачена можливість вибору типу двигуна, яким буде здійснюватися управління.

					<i>БРМА 24.00.00.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		60

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Електронний ресурс: [svaltera.ua/solutions/typical/packing\\_equipment/6493.php](http://svaltera.ua/solutions/typical/packing_equipment/6493.php) - Регульований привід у механізмах пакувальних машин. - Мова: укр.
2. AC servo drive LXM05A: Product manual. Document 0198441113232. Edition V1.04, 01.2006.
3. Motion control Lexium 05: Catalogue. Document DIA7ED2050910EN. Edition V2.0 05.2006.
4. Електронний ресурс <https://uk.wikipedia.org/wiki> - Сервопривід. - Мова: укр.
5. Будова та алгоритм керування низькошвидкісним сервоприводом на основі синхронного двигуна зі збудженням від постійних магнітів / О. В. Макаруч, М. В. Хай // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 1 (1223). – С. 28–34. – Бібліогр.: 6 назви. – ISSN 2409-9295.
6. Omatu S., Khalid M., Yusof R. Neuro-Control and its application. Corrected edition, Springer: 1996. – 255 p. – ISBN: 3540199659
7. С.Ю.Монашко, Н.В.Здолбіцька, А.П.Здолбіцький ARDUINO–проект рухомої відеокамери / Науковий журнал «Комп’ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво» Луцьк: 2014. - №5. – С. 32-36
8. Iserman, R. Fault-diagnosis applications / R. Iserman. – Berlin: Springer, 2011.
9. Wijnheijmer, F.P. Modelling and control of hydraulic servo system hinf control and lrv control versus classical control / F.P. Wijnheijmer // Master thesis. – University of technology Eindhoven. – 2005
10. Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування: підручник / М.Г. Попович, О.В. Ковальчук. - Київ: «Либідь», 2007. – 656 с.
11. Клепиков В.Б., Гуль А.І., Кунченко Т.Ю.. Комплексний критерій якості керування умовно стійких електромеханічних систем // Техніч. електродин.

					<i>БРМА 24.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

Тематич. вип. «Силова електроніка та енергоефективність».— К.: 2005. — Ч.3.  
— С. 66 — 68.

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Додатки

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63