

Міністерство освіти і науки України
Західноукраїнський національний університет
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем

БІЛЕНЬКИЙ Андрій Русланович

СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ШЕСТИ КООРДИНАТНИМ ПРИСТРОЄМ
ПОЗИЦІЮВАННЯ З БЕЗПРОВІДНИМ КАНАЛОМ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ./
THE CONTROL SYSTEM OF THE SIX-COORDINATE POSITIONING DEVICE
WITH A WIRELESS INFORMATION TRANSMISSION CHANNEL

спеціальність: 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка
освітньо-професійна програма – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології

Випускна кваліфікаційна робота
здобувача другого (магістерського) рівня освіти

Виконав: студент групи АКІТм–22
Біленький А. Р.

Науковий керівник:
к.т.н., доцент А. І. Сегін

Випускну кваліфікаційну роботу
допущено до захисту:
" ____ " _____ 2024 р.

Завідувач кафедри СКС
_____ А. І. Сегін

Тернопіль 2024

Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем
Освітній ступінь "магістр"
Спеціальність: 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка
Освітньо-професійна програма – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології

ЗАТВЕРДЖУЮ:

зав. кафедри СКС

_____ А. І. Сегін
" ____ " _____ 2023р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Біленькому Андрію Руслановичу

(прізвище, ім'я по-батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи

Система управління шестикоординатним пристроєм позиціонування з
безпроводним каналом передачі інформації./ The control system of the six-coordinate
positioning device with a wireless information transmission channel.

керівник роботи к.т.н., доцент Сегін А. І.

затверджено наказом по університету від «12» грудня 2023 р. № 753

2. Строк подання студентом закінченої кваліфікаційної роботи

2 грудня 2024р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи:

1. Загальна будова пристрою позиціонування.

2. Вимоги до системи автоматичного управління шестикоординатним пристроєм
позиціонування.

4. Основні питання, які потрібно розробити

1. Проаналізувати будову шестикоординатного позиціонуючого пристрою та його
складових компонентів.

2. Побудувати кінематичну модель пристрою необхідної для забезпечення
коректного позиціонування та правильної роботи пристрою.

3. Розробити структурну схему системи управління шестикоординатним
пристроєм позиціонування.

5. Перелік графічного матеріалу у роботі

1. Структурна схема системи автоматизованого управління шестикоординатним пристроєм позиціонування
2. Електричні принципові схема модулів шестикоординатного пристрою позиціонування.
3. Осцилограма синхронізуючого та інформаційного сигналів.
4. Структурна схема системи управління шестикоординатним пристроєм позиціонування.

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1	Сегін А. І.		
2	Сегін А. І.		
3	Сегін А. І.		
4	Сегін А. І.		

7. Дата видачі завдання 12 грудня 2023р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назви етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз об'єкту автоматизації шестикоординатним пристроєм позиціонування	01.01. 2024р. – 31.01. 2024р.	виконано
2	Розробка кінематичної моделі пристрої та складання випробувального стенду	01.02. 2024р.– 31.03.2024р.	виконано
3	Розробка системи управління пристроєм	01.04. 2024р.– 20.05.2024.	виконано
4	Побудова структурної схеми та регулятора автоматичного управління електродвигуном	21.05.2024р. – 30.09. 2024 р	виконано
5	Остаточне оформлення та подача кваліфікаційної роботи на перевірку щодо плагіату та виправлення недоліків	1.10.2024р. – 30.11.2024р.	виконано

Студент

(підпис)

Біленький А. Р.

Керівник роботи

(підпис)

к.т.н., доц. Сегін А. І.

АНОТАЦІЯ

Біленький А. Р. Система управління шестикоординатним пристроєм позиціювання з безпроводним каналом передачі інформації.

Дослідження на здобуття освітнього ступеня «магістр» за спеціальністю 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка, освітньо-професійна програма – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології. – Західноукраїнський національний університет, Тернопіль. 2024.

У кваліфікаційній роботі розроблено систему управління шестикоординатним позиціонуючим пристроєм з безпроводним каналом передачі інформації, яка може використовуватися для керування різного роду автоматичними маніпуляторами типу зварювальних апаратів, 3-D принтерів, свердлильних апаратів та інших у промисловості та інших сферах.

ANNOTATION

Bilenkyi A. R. The control system of the six-coordinate positioning device with a wireless information transmission channel.

Research for obtaining a master's degree in the specialty 174 – Automation, computer-integrated technologies and robotics, educational and professional program – Automation and computer-integrated technologies. – Western Ukrainian National University, Ternopil. 2024.

The qualification work developed a control system for a six-coordinate positioning device with a wireless information transmission channel, which can be used to control various types of automatic manipulators such as welding machines, 3-D printers, drilling machines and others in industry and other areas.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ОБ'ЄКТУ АВТОМАТИЗАЦІЇ ШЕСТИКООРДИНАТНИМ ПРИСТРОЄМ ПОЗИЦІЮВАННЯ.....	10
1.1 Опис будови шестикоординатного позиціонуючого пристрою.....	10
1.2 Цілі та завдання автоматизації шестикоординатним пристроєм позиціювання.....	16
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА КІНЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРИСТРОЇ ТА СКЛАДАННЯ ВИПРОБУВАЛЬНОГО СТЕНДУ.....	17
2.1 Аналіз кількості ступенів свободи пристрою та побудова його кінематичної моделі.....	17
2.2 Складання випробувального стенду.....	28
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПРИСТРОЄМ.....	30
3.1 Розробка структурної схеми системи управління шестикоординатним пристроєм позиціонування.....	30
3.2 Опис центрального блоку управління.....	32
3.3 Модуль бездротової передачі.....	35
3.4 Опис блоку керування електродвигуном.....	37
3.5 Розробка блоку прийому/передачі інформації.....	40
РОЗДІЛ 4. ПОБУДОВА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ УПРАВЛІННЯ, ПРЕДАВАЛЬНИХ ФУНКЦІЙ ТА РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ РЕГУЛЯТОРА АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОДВИГУНОМ.....	48
4.1 Побудова структурної схеми управління шестикоординатним пристроєм позиціонування та розрахунок передавальної функції	48
4.2 Визначення оптимального закону регулювання та побудова відповідних передавальних функцій.....	50

4.3. Керування електродвигунами методом широтно-імпульсної модуляції.....	53
4.4 Розробка підпрограми зчитування інформації з датчиків ОС та програми управління мотор-редуктором.....	56
4.5 Тестування системи керування шестикоординатним пристроєм позиціювання.....	61
ВИСНОВОКИ.....	66
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	67
ДОДАТКИ.....	70

ВСТУП

Актуальність теми. Механічні роботизовані системи у вигляді «руки-маніпулятора» або подібні їм пристрої з шістьма ступенями свободи, використовуються для виконання певних технологічних операцій для заміни ручної праці людини. Такі маніпулятори застосовуються для підвищення продуктивності виробництва, або заміни людини у небезпечних умовах праці. Такі системи працюють в різних режимах роботи: по заздалегідь заданій програмі, керуються оператором віддалено по певним каналам зв'язку, або в автоматичному режимі.

Сьогодні такі роботизовано комплекси все частіше впроваджуються в різних сферах, що забезпечує більшу точність виконання операцій, зменшення браку, підвищення продуктивності та інші переваги. В зв'язку з цим актуальною задачею є вдосконалення технічних засобів, алгоритмів та апаратно-праграмного забезпечення управління ними для точного позиціонування.

Мета кваліфікаційної роботи. Основною метою кваліфікаційної роботи є розробка системи управління шестикоординатного позиціонуючого пристрою з безпроводним каналом передачі інформації.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати будову шестикоординатного позиціонуючого пристрою та його складових компонентів.
2. Побудувати кінематичну модель пристрою необхідної для забезпечення коректного позиціонування та правильної роботи пристрою.
3. Розробити структурну схему системи управління шестикоординатним пристроєм позиціонування.
4. Розробити центральний блок управління пристроєм.
5. Розробити модуль бездротової передачі інформації.
6. Розробити блок керування електродвигуном пристрою.
7. Розробити блок прийому/передачі інформації для дистанційного

управління.

Об'єкт дослідження. Пристрій позиціювання з безпроводним каналом передачі інформації.

Предмет дослідження. Система автоматизованого управління шести координатним пристроєм позиціювання з безпроводним каналом передачі інформації.

Методи дослідження. В роботі використовувалися комплексні методи аналізу та синтезу структурних схем, методи теорії автоматичного управління.

Наукова новизна. Побудовано кінематичну модель пристрою для забезпечення коректного позиціонування та правильної роботи пристрою.

Практичне значення одержаних результатів полягає у тому, що спроектована система автоматичного управління з можливістю дистанційного керування шестикоординатним позиціонуючим пристроєм, яка може використовуватися для керування різного роду автоматичними маніпуляторами типу зварювальних апаратів, 3-D принтерів, свердлильних апаратів, тощо у промисловості та інших сферах.

Апробація.

1. Петро Головацький, Андрій Сивак, Андрій Завійський, Андрій Біленький, Андрій Стахів. Структура системи управління автоматизованим розливом лако-фарбових матеріалів / Збірник матеріалів проблемно-наукової міжгалузевої конференції «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» (АКІТ – 2024), Тернопіль, 2024. С. 80 – 84.

2. Сегін А.І., Сивак А.О., Біленький А.Р., Петрик М.Ю. Лінійна оптимальна система управління позовжнім рухом безпілотного літального апарату при посадці на палубу корабля // Збірник матеріалів науково-практичного симпозіуму Технології інтернету речей: системи та рішення (TIP CM–2024). Тернопіль, 2024. С. 86–91.

1 АНАЛІЗ ОБ'ЄКТУ АВТОМАТИЗАЦІЇ ШЕСТИКООРДИНАТНИМ ПРИСТРОЄМ ПОЗИЦІЮВАННЯ

1.1 Опис будови шестикоординатного позиціонуючого пристрою.

Об'єкт автоматизації являє собою пристрій із паралельною кінематикою.

Об'єкт складається з двох тіл:

- тіло "Корпус";
- Тіло «Рухливий елемент».

Зовнішній вигляд об'єкта автоматизації зображено рисунку 1.1.

Пристрій призначений для позиціонування (тобто надання певного положення) рухомого елемента щодо нерухомого корпусу.

Тіло «Корпус» складається з рами та двох нерухомих платформ, верхньої та нижньої.



Рисунок 1.1 – Зовнішній вигляд об'єкта автоматизації

Тіло «Рухливий елемент» є циліндром. До торців циліндра приєднані круглі металеві пластини, на яких встановлені шість вимірювальних вузлів та шість електродвигунів (по три вузли та електродвигуни на кожній пластині).

Вимірювальний вузол призначений визначення поточної довжини штанги, у цьому пристрої вимірювальний вузол виконує роль датчика зворотний зв'язок (ОС).

Електродвигуни в цьому пристрої призначені для зміни довжини штанг.

На рисунках 1.2 та 1.3 відображено розташування вимірювальних вузлів та електродвигунів на пластинах.

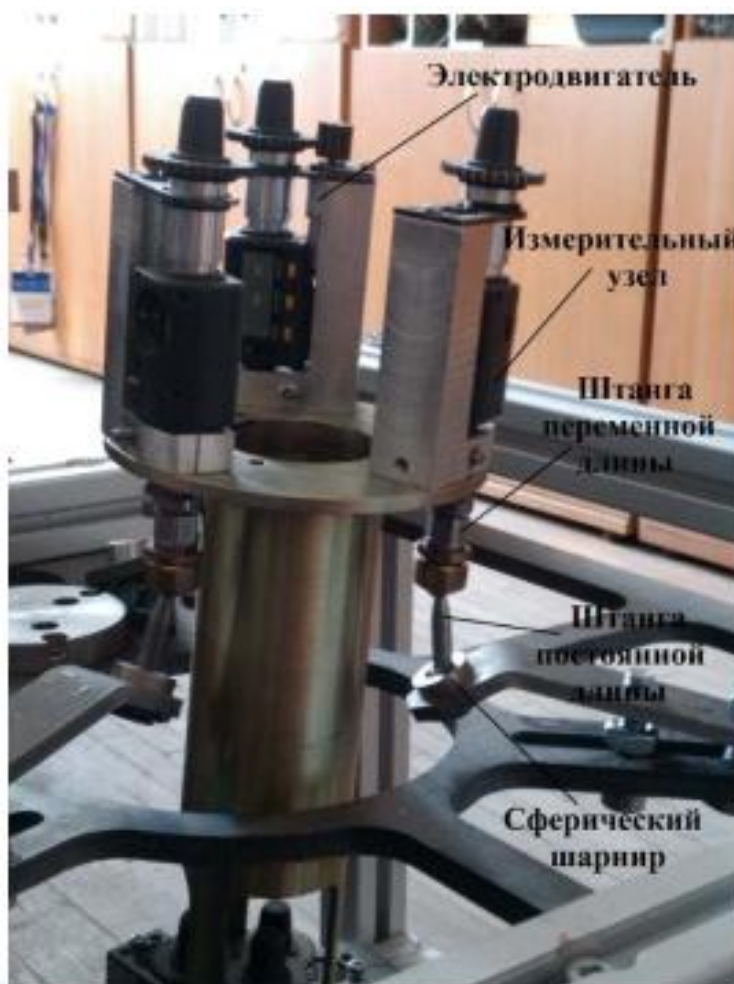


Рисунок 1.2 – Вимірювальні вузли та електродвигуни на верхній пластині

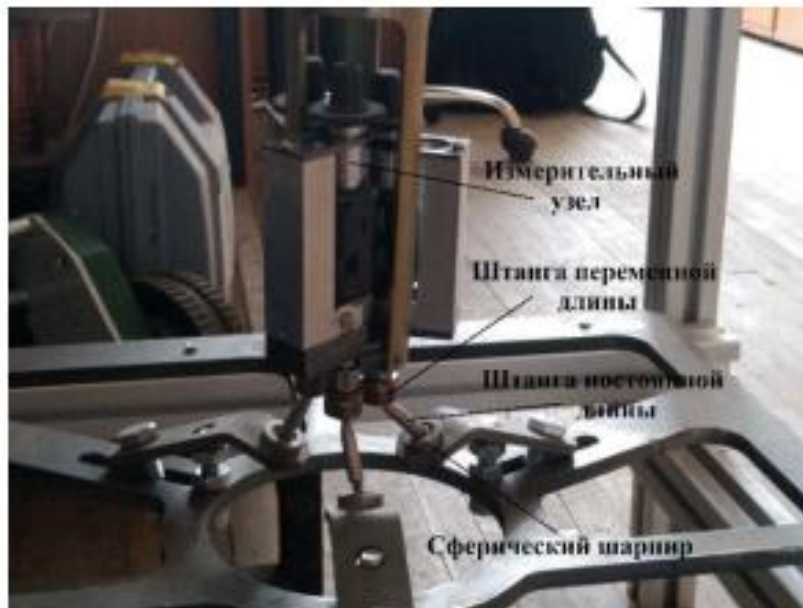


Рисунок 1.3 – Вимірювальні вузли та електродвигуни на нижній пластині

Зв'язок рухомого елемента з корпусом здійснюється за рахунок шести штанг постійної довжини та шести штанг змінної довжини.

Штанга змінної довжини одним кінцем жорстко з'єднана із вимірювальним вузлом. Іншим кінцем з'єднується із штангою постійної довжини за допомогою сферичного шарніру.

Зміна довжини штанги здійснюється з допомогою використання гвинтової кінематичної пари тобто. передачі "Вінт-Гайка".

Штанга постійної довжини з одного боку з'єднана з нерухомою платформою за допомогою сферичного шарніра, а з іншого, як говорилося, зі штангою змінної довжини.

На нерухомих платформах сферичні шарніри зміщені один щодо одного на 120° , сферичні шарніри на верхній і нижній платформах зміщені відносно один одного на 60° .

Вимірювальний вузол є видозмінений цифровий мікрометр MDC-25MX фірми Mitutoyo [2]. На малюнку 1.4 подано зовнішній вигляд

цифрового мікрометра MDC-25MX. У таблиці 1.1 наведено основні характеристики цифрового мікрометра MDC-25MX.



Рисунок 1.4 – Зовнішній вигляд цифрового мікрометра

Таблиця 1.1 - Характеристики цифрового мікрометра

Напруга живлення,	3
Струм, що споживається при включеному дисплеї, мкА	27
Споживаний струм при вимкненому дисплеї, мкА	20
Діапазон вимірювань, мм	0 25
Ціна поділу, мм	0,001
Точність, мм	0,002
Діапазон робочої температури, °C	0 -40
Вага, гр	250

Зміна мікрометра полягає в тому, що від оригінального мікрометра залишаються шток (металевий стрижень, призначений для передачі крутного моменту), ємнісна матриця (датчик для визначення поточної довжини

штанги), дисплей (для відображення поточної довжини). На рисунку 1.5 зображено складові елементи вимірювального вузла.



Рисунок 1.5 – Складові елементи вимірювального вузла

Як електродвигуни використовуються 6 малопотужних мотор-редукторів LS-16GA030-50 фірми LEISON MOTOR [3]. Мотор-редуктор є колекторним двигуном, з'єднаним з багатоступінчастим циліндричним редуктором.

Колекторні двигуни постійного струму складаються з нерухомого статора та рухомого ротора (якоря).

У колекторних двигунах малих габаритів і малої потужності як статор використовують постійні магніти. А в двигунах середньої та великої потужності статор являє собою обмотку збудження.

На рисунку 1.6 зображено складові елементи колекторного двигуна постійного струму.



Рисунок 1.6 – Складові елементи колекторного двигуна

Обмотки ротора складаються з кількох сегментів і підключаються безпосередньо до пластин колектора. За допомогою щіток (графіто-металеві контакти) забезпечується передача електричного струму до обмоток ротора.

На рисунку 1.7 представлений зовнішній вигляд одного із мотор-редукторів, встановлених на пристрої.

У таблиці 1.2 наведено основні характеристики мотор-редуктора LS-16GA030-50.



Рисунок 1.7 – Зовнішній вигляд мотор-редуктора

Таблиця 1.2 - Характеристики мотор-редуктора

Номінальна напруга,	6
Струм без навантаження, мА	80
Швидкість холостого ходу, об/хв	30
Потужність, Вт	0,250
Струм при блокуванні, мА	620
Діаметр вихідного валу, мм	3
Довжина × Ширина × Висота, мм	42,1×16×16
Передатне відношення	1:53
Крутний момент, мН · м	98
Маса, м	20

Процес позиціонування рухомого елемента можна розглянути на прикладі зміни довжини однієї зі штанг. При обертанні валу електродвигуна,

момент, що крутить, передається на шток вимірювального вузла за допомогою циліндричної зубчастої передачі. Далі момент, що крутить, передається від штока вимірювального вузла на штангу змінної довжини. Обертаючись, штанга змінює свою довжину, а, отже, змінює положення рухомого елемента.

Провівши аналіз об'єкта, можна сформулювати цілі та основні завдання автоматизації.

1.2 Цілі та завдання автоматизації шестикоординатним пристроєм позиціювання

Метою автоматизації об'єкта є можливість дистанційного керування довжинами штанг, внаслідок чого змінюється положення рухомого елемента.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- забезпечення підключення системи керування до ПК для введення необхідних довжин штанг та відстеження поточних;
- забезпечення підключення до системи керування модулів бездротової передачі даних для здійснення віддаленого керування довжинами штанг;
- забезпечення керування електродвигунами за ПД-законом.

Перед тим як почати розробку системи керування пристроєм необхідно розробити кінематичну модель, яка дозволяла б визначати довжини штанг за необхідним положенням рухомого елемента.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА КІНЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРИСТРОЇ ТА СКЛАДАННЯ ВИПРОБУВАЛЬНОГО СТЕНДУ

2.1 Аналіз кількості ступенів свободи пристрою та побудова його кінематичної моделі.

Пристрої з паралельною кінематичною структурою прийнято класифікувати за кількістю ступеня свободи пристрою. Для аналізу кількості ступенів свободи використовується формула Сомова-Малишева, яка має вид [4]:

$$W = 6n - 5p_1 - 4p_2 - 3p_p - 2p_4 - p_5, \quad (2.1)$$

де W – кількість ступенів свободи пристрою;

n – число рухомих ланок пристрою;

p_i – кількість кінематичних пар із i ступенями свободи.

Для пристрою (див. рисунок 1.1) кількість ланок і кінематичних пар можна записати наступним чином:

$n = 13$ – загальна кількість штанг плюс рухомий елемент;

$p_1 = 6$ – кількість гвинтових пар;

$p_3 = 12$ – кількість сферичних шарнірів.

З цього випливає, що кількість ступенів свободи для пристрою дорівнює:

$$W = 6 \cdot 13 - 5 \cdot 6 - 3 \cdot 12 = 12.$$

Насправді ж, при розрахунку кількості ступенів свободи враховувалося обертання шести штанг постійної довжини навколо своєї осі. Якщо обертання ліквідувати, це ніяк не обмежить рух пристрою. Внаслідок цього, можна сказати, що обертання штанг не надає додаткових ступенів свободи.

Отже, від розрахованої загальної кількості ступенів свободи потрібно відняти шість ступенів.

Даний пристрій можна віднести до класу гексапод, внаслідок того, що він володіє 6-ма ступенями свободи і має у своєму складі штанги змінної довжини.

Побудова кінематичної моделі пристрою потрібна для забезпечення коректного позиціонування та правильної роботи пристрою. Кінематична модель описує взаємозв'язок між вхідними (керованими) параметрами та вихідними.

Конструкція пристрою повинна забезпечувати переміщення рухомого елемента по шести координатах: трьома лінійними x, y, z і трьома кутовими ψ, ϑ, γ .

Лінійні координати є координатами полюса (назвемо його O') рухомого елемента в нерухомій системі координат (СК) $O'X'Y'Z'$.

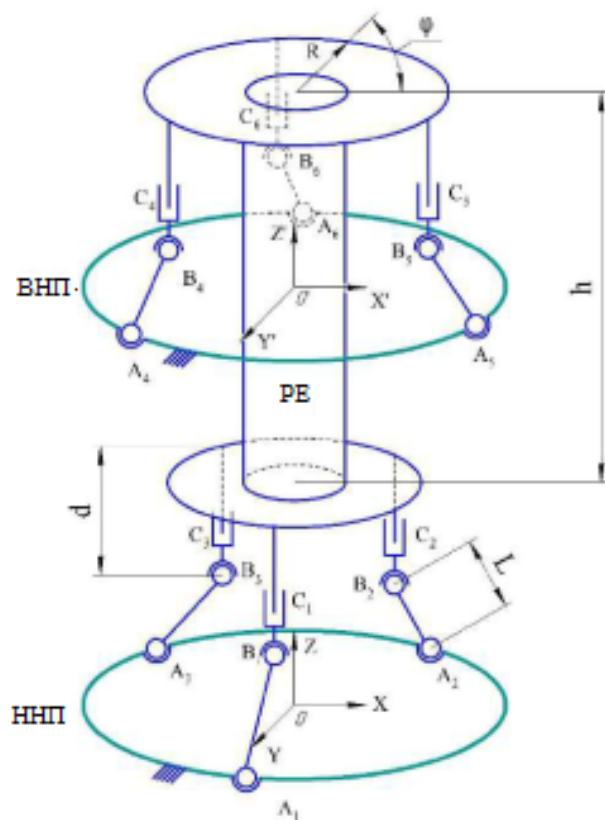
Кутові координати визначають поворот рухомого елемента навколо полюса, як такі координати використовуються кути Крилова. Дані кути описують поворот рухомої системи координат, пов'язаної з рухомих елементом відносно нерухомої системи координат $OXYZ$. Шість координат, описані вище є вихідними координатами для кінематичної моделі пристрою.

Для шестикоординатного позиціонуючого пристрою була розроблена кінематична схема.

Нехай для пристрою встановлено початкове положення:

- відомі координати полюса O' у нерухомій системі координат $OXYZ$;
- осі систем координат $OXYZ$ та $O'X'Y'Z'$ паралельні;
- осі Z та Z' систем координат збігаються;
- відомі координати сферичних шарнірів B_i у рухомій системі координат $O'X'Y'Z'$;
- відомі координати сферичних шарнірів A_i в нерухомій системі координат $OXYZ$.

На рисунку 2.1 зображено схему пристрою в початковому положенні.



- $A_1 \dots A_6$ – сферичний шарнір
 $B_1 \dots B_6$ – сферичний шарнір
 $C_1 \dots C_6$ – гвинтова пара
 РЕ – рухомий елемент
 ВНП – верхня нерухома платформа
 ННП – нижня нерухома платформа
 L – штанга постійної довжини
 d – штанга змінної довжини
 R – радіус основи рухомого елемента
 $O'X'Y'Z'$ – рухома система координат
 $OXYZ$ – нерухома система координат

Рисунок 2.1 – Схема пристрою у початковому положенні

Побудова кінематичної моделі зводиться до запису рівнянь, що зв'язують довжини штанг змінної довжини (вхідні координати) і координати полюса O' . Отримані рівняння дозволяють визначити просторове положення рухомого елемента щодо нерухомих платформ нерухомої СК $OXYZ$. Взаємозв'язок між нерухомими платформами та рухомих елементом здійснюється через сферичні шарніри A та B , а також штанги постійної довжини. Рівняння взаємозв'язку між елементами виглядає так:

$$L_i^2 = (x_{A_i} - x_{B_i})^2 + (y_{A_i} - y_{B_i})^2 + (z_{A_i} - z_{B_i})^2, \quad (2.2)$$

$x_{A_i}, y_{A_i}, z_{A_i}$ – координати i -ого сферичного шарніру A ;

$x_{B_i}, y_{B_i}, z_{B_i}$ – координати i -ого сферичного шарніру B ;

L – штанга постійної довжини.

Координати сферичних шарнірів набагато простіше визначати в

рухомій системі координат так як в цій системі координат у шарнірів В змінюється лише одна координата z. Координати шарніра В рухомій СК O'X'Y'Z' рівні:

$$\begin{aligned}x'_{B_i} &= R \cdot \cos \varphi, \\y'_{B_i} &= R \cdot \sin \varphi, \\z'_{B_i} &= \left(\frac{h}{2}\right)^2 + R - d_i.\end{aligned}\tag{2.3}$$

Перерахунок координат сферичних шарнірів B_i , пов'язаних з рухомий СК, нерухому СК OXYZ здійснюється через множення координат на направляючі косинуси:

$$\begin{aligned}x_{B_i} &= l_1 \cdot x'_{B_i} + l_2 \cdot y'_{B_i} + l_3 \cdot z'_{B_i} + x_{O'} \\y_{B_i} &= m_1 \cdot x'_{B_i} + m_2 \cdot y'_{B_i} + m_3 \cdot z'_{B_i} + y_{O'} \\z_{B_i} &= n_1 \cdot x'_{B_i} + n_2 \cdot y'_{B_i} + n_3 \cdot z'_{B_i} + z_{O'}\end{aligned}\tag{2.4}$$

де $x_{O'}$, $y_{O'}$, $z_{O'}$ – координати полюса O'.

Направляючі косинуси l_j, m_j, n_j ($j=1...3$) визначаються через вихідні кутові координати (кути Крилова):

$$\begin{aligned}l_1 &= \cos \psi \cdot \cos \gamma + \sin \vartheta \cdot \sin \psi \cdot \sin \gamma; \\m_1 &= -\sin \psi \cdot \cos \gamma + \sin \vartheta \cdot \cos \psi \cdot \sin \gamma; \\n_1 &= \cos \vartheta \cdot \sin \gamma; \\l_2 &= \cos \vartheta \cdot \sin \psi; \\m_2 &= \cos \vartheta \cdot \cos \psi; \\n_2 &= -\sin \vartheta; \\l_3 &= -\cos \psi \cdot \sin \gamma + \sin \psi \cdot \sin \vartheta \cdot \cos \gamma; \\m_3 &= \sin \psi \cdot \sin \gamma + \cos \psi \cdot \sin \vartheta \cdot \cos \gamma; \\n_3 &= \cos \vartheta \cdot \cos \gamma.\end{aligned}\tag{2.5}$$

Після підстановки координат сферичного шарніра пов'язаних з рухомий СК в рівняння в нерухомій СК, останнє набуде вигляду:

$$\begin{aligned}
L_i^2 = & \left(x_{A_i} - l_1 \cdot x'_{B_i} - l_2 \cdot y'_{B_i} - l_3 \cdot z'_{B_i} - x_{O'} \right)^2 + \\
& + \left(y_{A_i} - m_1 \cdot x'_{B_i} - m_2 \cdot y'_{B_i} - m_3 \cdot z'_{B_i} - y_{O'} \right)^2 + \\
& + \left(z_{A_i} - n_1 \cdot x'_{B_i} - n_2 \cdot y'_{B_i} - n_3 \cdot z'_{B_i} - z_{O'} \right)^2 ; \\
i = & 1 \dots 6.
\end{aligned} \tag{2.6}$$

Спростити вираз можна застосувавши до нього одну з властивостей направляючих косинусів:

$$l_i^2 + m_i^2 + n_i^2. \tag{2.7}$$

Спрощений вираз виглядає так:

$$\begin{aligned}
L_i^2 = & x_{B_i}'^2 + y_{B_i}'^2 + z_{B_i}'^2 + (x_{O'} - x_{A_i})^2 + (y_{O'} - y_{A_i})^2 + (z_{O'} - z_{A_i})^2 + \\
& + 2(l_1 \cdot x'_{B_i} + l_2 \cdot y'_{B_i} - l_3 \cdot z'_{B_i}) \cdot (x_{O'} - x_{A_i}) + \\
& + 2(m_1 \cdot x'_{B_i} + m_2 \cdot y'_{B_i} + m_3 \cdot z'_{B_i}) \cdot (y_{O'} - y_{A_i}) + \\
& + 2(n_1 \cdot x'_{B_i} + n_2 \cdot y'_{B_i} + n_3 \cdot z'_{B_i}) \cdot (z_{O'} - z_{A_i}); \\
i = & 1 \dots 6.
\end{aligned} \tag{2.8}$$

Підставивши в місце вихідних кутових координат кути Крилова, вираз набуде наступного вигляду:

$$\begin{aligned}
L_i^2 = & x_{B_i}'^2 + y_{B_i}'^2 + z_{B_i}'^2 + (x_{O'} - x_{A_i})^2 + (y_{O'} - y_{A_i})^2 + (z_{O'} - z_{A_i})^2 + \\
& + 2(x'_{B_i} [C_\psi \cdot C_\gamma + S_\psi \cdot S_g \cdot S_\gamma] + y'_{B_i} \cdot S_\psi \cdot C_g + z'_{B_i} [S_\psi \cdot S_g \cdot C_\gamma - C_\psi \cdot S_\gamma]) \times \\
& \times (x_{O'} - x_{A_i}) + \\
& + 2(x'_{B_i} [C_\psi \cdot S_g \cdot S_\gamma - S_\psi \cdot C_\gamma] + y'_{B_i} \cdot C_\psi \cdot C_g + z'_{B_i} [S_\psi \cdot S_\gamma - C_\psi \cdot S_g \cdot C_\gamma]) \times \\
& \times (y_{O'} - y_{A_i}) + \\
& + 2(x'_{B_i} \cdot C_g \cdot S_\gamma - y'_{B_i} \cdot S_g + z'_{B_i} \cdot C_g \cdot C_\gamma) \cdot (z_{O'} - z_{A_i}); \\
i = & 1 \dots 6.
\end{aligned} \tag{2.9}$$

де $S_\psi = \sin \psi$, $C_\psi = \cos \psi$, і т.д.

Шість рівнянь (9) пов'язують між собою всі шість вхідних і шість вихідних координат пристрою, що розглядається. Система даних рівнянь є кінематичною моделлю пристрою.

Позиціонування рухомого елемента обмежується особливостями конструкції шестикоординатного пристрою. Одним із таких обмежень є граничний кут відхилення штанг у сферичних шарнірах.

Перед початком розрахунку граничного кута відхилення необхідно запровадити таке поняття як геометричні параметри. Під геометричними параметрами мається на увазі наступне.

1. Розташування шарнірів, що з'єднують штанги механізму з корпусом, описується через їх координати відносно нерухомої системи координат OXYZ, де точка O є точкою початку координат.

Прийmemo, що шарніри розташовуються у площині OXY на колі радіусом R_A ; центр кола збігається з початком координат (див. рисунок 2.1).

Таким чином, координати шарнірів визначаються наступними виразами:

$$\begin{aligned}x_{A_j} &= R_A \cdot \cos \varphi_j, \\ y_{A_j} &= R_A \cdot \sin \varphi_j.\end{aligned}\tag{2.10}$$

2. Розташування шарнірів, що з'єднують штанги із рухомою платформою. Приймемо, що ці шарніри розташовані на колі радіусом R_B , що лежить у площині O'X'Y'. Тоді координати шарнірів визначаються через вирази:

$$\begin{aligned}x_{B_j} &= R_B \cdot \cos \varphi_j, \\ y_{B_j} &= R_B \cdot \sin \varphi_j.\end{aligned}\tag{2.11}$$

3. Межі зміни всіх штанг пристрою мають бути однаковими.

4. Конструкція шарніра влаштована таким чином, що вона дозволяє здійснювати штанзі рух тільки в межах деякого конуса з кутом при вершині $2\alpha_{MAX}$. На рисунку 2.2 показано поле обертання штанги у шарнірі.

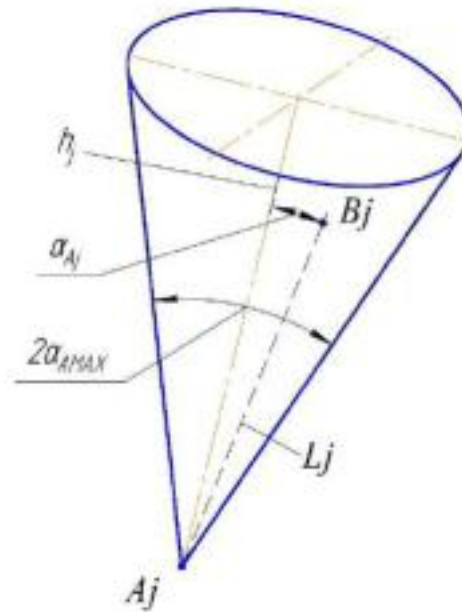


Рисунок 2.2 – Поле обертання штанги у шарнірі

Кут α_{A_j} між положенням j -ї штанги та висотою конуса не повинен перевищувати значення α_{MAX} . Кут α_{A_j} можна розрахувати за виразом:

$$\cos \alpha_{B_j} = \frac{x_{h_j} \cdot x_{AB_j} + y_{h_j} \cdot y_{AB_j} + z_{h_j} \cdot z_{AB_j}}{\sqrt{(x_{h_j}^2 + y_{h_j}^2 + z_{h_j}^2) \cdot (x_{AB_j}^2 + y_{AB_j}^2 + z_{AB_j}^2)}}, \quad (2.12)$$

де $x_{h_j} = x_{A_j} - x_{B_j}^{noch}$; $y_{h_j} = y_{A_j} - y_{B_j}^{noch}$; $z_{h_j} = z_{A_j} - z_{B_j}^{noch}$;

$x_{B_j}^{noch}$, $y_{B_j}^{noch}$, $z_{B_j}^{noch}$ – координати шарніру B в початковому стані механізму;

$x_{AB_j} = x_{A_j} - x_{B_j}$; $y_{AB_j} = y_{A_j} - y_{B_j}$; $z_{AB_j} = z_{A_j} - z_{B_j}$.

Шарніри, що зв'язують штанги з платформою, також накладають свої обмеження на переміщення штанг у просторі. Кут α_{B_j} розраховується за таким виразом:

$$\cos \alpha_{B_j} = \frac{x'_{h_j} \cdot x'_{AB_j} + y'_{h_j} \cdot y'_{AB_j} + z'_{h_j} \cdot z'_{AB_j}}{\sqrt{(x'^2_{h_j} + y'^2_{h_j} + z'^2_{h_j}) \cdot (x'^2_{AB_j} + y'^2_{AB_j} + z'^2_{AB_j})}}, \quad (2.13)$$

де $x'_{h_j} = x'^{noch}_{A_j} - x'_{B_j}$; $y'_{h_j} = y'^{noch}_{A_j} - y'_{B_j}$; $z_{h_j} = z'^{noch}_{A_j} - z'_{B_j}$;

$x'^{noch}_{A_j}$, $y'^{noch}_{A_j}$, $z'^{noch}_{A_j}$ – координати шарніра A_j в системі координат O'X'Y'Z' у вихідному стані механізму;

$x'_{AB_j} = x'_{A_j} - x'_{B_j}$; $y'_{AB_j} = y'_{A_j} - y'_{B_j}$; $z'_{AB_j} = z'_{A_j} - z'_{B_j}$, x'_{A_j} , y'_{A_j} , z'_{A_j} – координати шарніра A_j в системі O'X'Y'Z' для поточного стану механізму.

Після того, як була розроблена кінематична модель пристрою, можна переходити до розробки структурної схеми пристрою, а також електричних принципових схем.

Датчики зворотного зв'язку призначені для вимірювання довжини штанг. Вимірювання довжини здійснюється за допомогою ємнісної матриці. На рисунку 2.3 зображені плати ємнісної матриці.

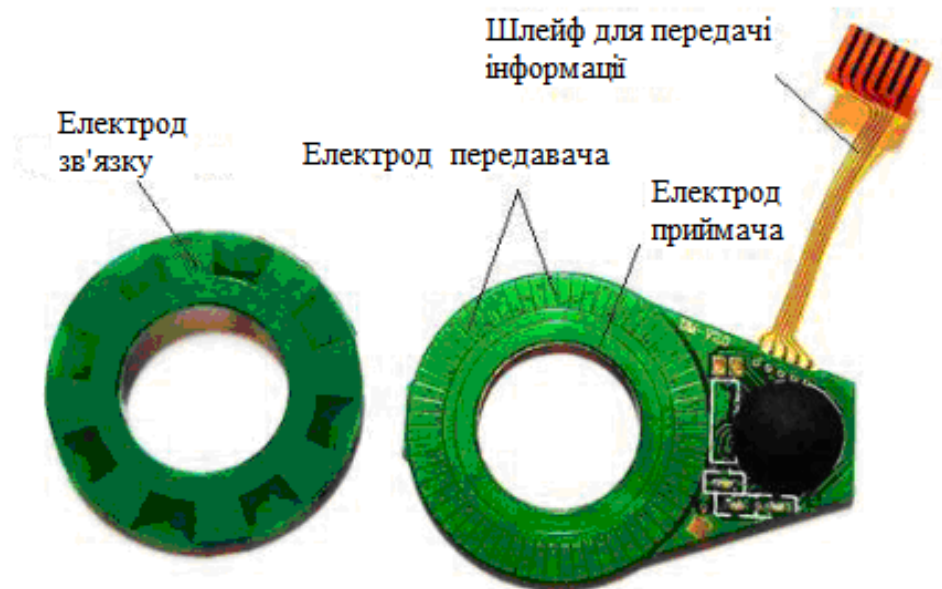


Рисунок 2.3 – Ємнісна матриця.

На платі праворуч нанесені однакові прямокутні електроди. На ці

електроди подаються напруги, що періодично змінюються, зсунуті по фазі.

Ці електроди є передавальними. Також на платі навколо отвору є цілісний електрод, який є приймальним.

На платі зліва знаходяться електроди зв'язку, які перекривають і передавальні і приймаючі електроди і здійснюють ємнісний зв'язок частини передавальних електродів з приймальним.

На платі справа є шлейф, яким передається інформація від ємнісної матриці до мікроконтролера мікрометра. Після отримання інформації мікроконтролер (встановлений на платі праворуч) обробляє її та виводить на дисплей поточне значення довжини.

На шлейфі (див. рисунок 3.1) присутні 5 контактів: загальний провід, контакт синхронізуючого сигналу, контакт сигналу інформації та два контакти сигналів високого рівня.

Осцилограма синхронізуючого та інформаційного сигналів, отриманих з ємнісної матриці, зображена на рисунку 2.4.

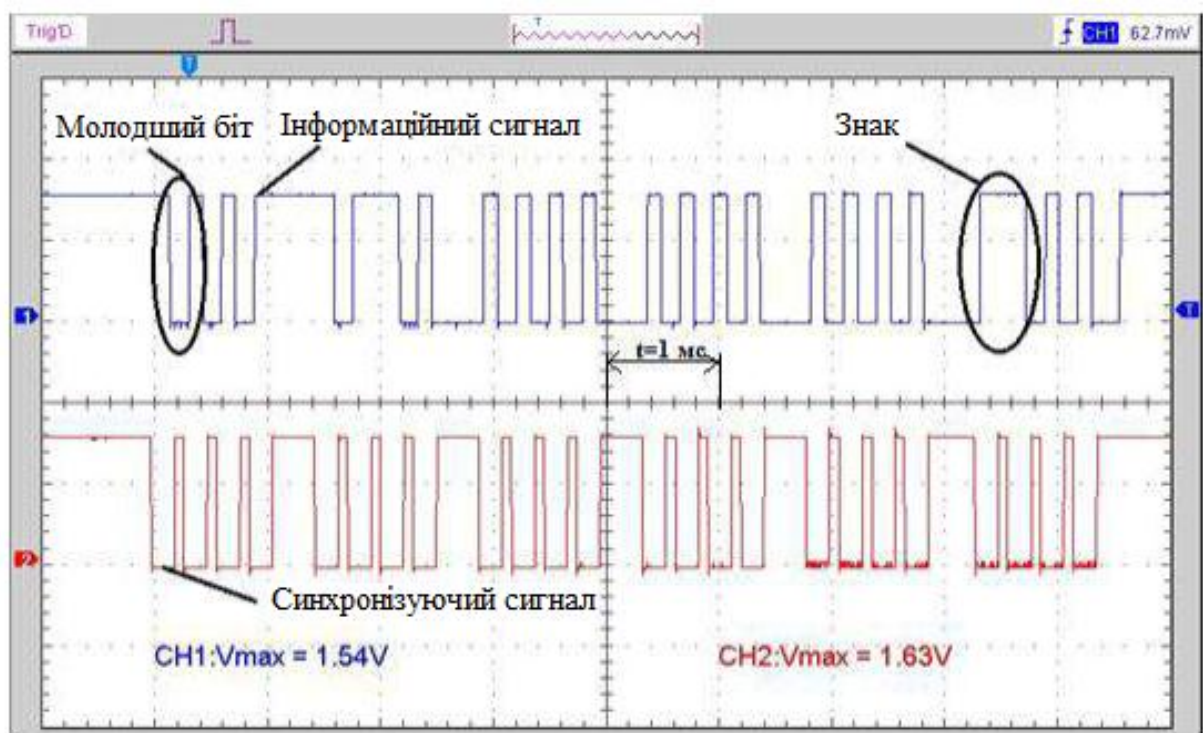


Рисунок 2.4 – Осцилограма сигналів з матриці

Синхронізуючий та інформаційний сигнали передаються пакетами раз на 100 мс. Амплітуда сигналів становить близько 1,5 В.

Пакет синхронізуючого сигналу складається з 23 імпульсів.

Передача пакета інформаційного сигналу здійснюється починаючи з молодшого біта. Під час передачі пакета, у той час, коли синхронізуючий сигнал має високий логічний рівень, зчитується стан інформаційного сигналу.

Слід зазначити, що 21-й імпульс у пакеті відповідає за знак, тому високий логічний рівень відповідає знаку мінус, низький – плюсу.

Значення довжини, отримане з ємнісного датчика, має особливе кодування. рисунку 2.5 представлені осцилограма інформаційного сигналу та його представлення у бінарній формі.

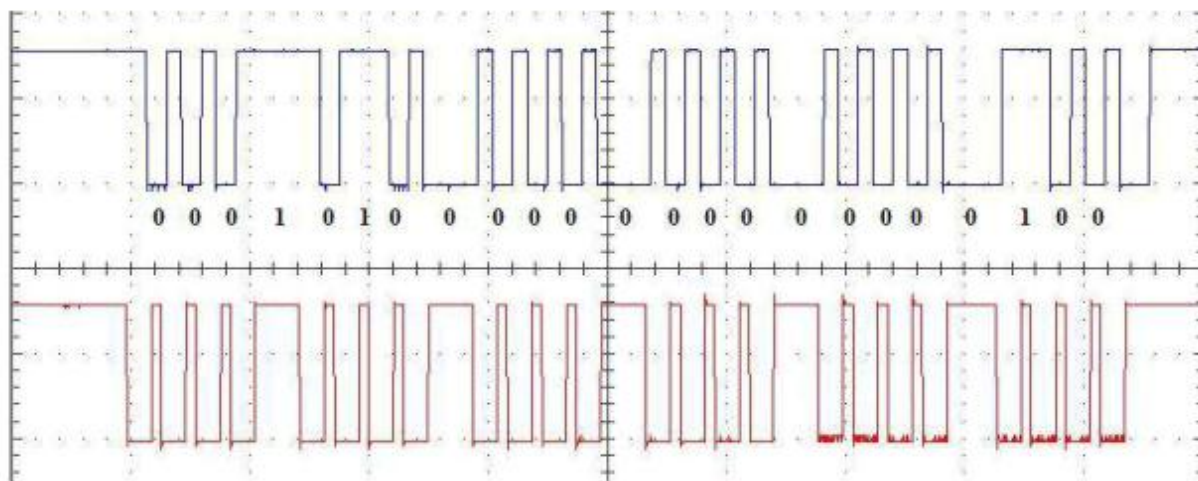


Рисунок 2.5 – Осцилограма інформаційного сигналу

Так, наприклад, значення довжини, що зчитується з інформаційного сигналу (див. малюнок 2.5) можна подати у вигляді числа в двійковому коді: (починаючи з молодшого біта) 0001 0100 0000 0000 0000 100.

Двійкове уявлення довжини не дуже зручне для подальших обчислень, отже його необхідно перевести в десяткову систему числення. І тому необхідно відобразити їх у нормальному вигляді, тобто. зі старшого біта, а потім відкинути три старші біти. Таким чином, двійковий код зображений на

осцилограмі можна представити у вигляді числа 40. Дане число відповідає значенню -0,005 мм на дисплеї мікрометра.

Після проведення серії вимірювань довжини (таблиця 3.1), емпіричні дані були внесені до програмного продукту Microsoft Excel для виявлення залежності між значеннями довжини на дисплеї мікрометра та закодованими значеннями, отримані з датчика.

Таблиця 2.1 – Емпіричні дані

Значення довжини на дисплеї, мм	Значення довжини з датчика
0	0
0,005	40
0,010	80
0,070	560
0,223	1813
0,900	7318

Для встановлення залежності між цими величинами необхідно визначити коефіцієнт кореляції.

Скориставшись вбудованими функціями Excel, було встановлено, що коефіцієнт кореляції дорівнює 1. Це означає, що величини перебувають у прямій залежності.

Зважаючи на похибки вимірювання, графічно залежність між величинами представляється у вигляді кривої. Скориставшись вбудованими засобами Excel, можна апроксимувати криву та отримати графік лінійної залежності величин, а також функцію, що описує цю залежність.

На рисунку 2.6 представлені графік залежності довжин на дисплеї і датчику.

По осі ординат (y) відкладено значення довжини, одержуваної з датчика, по осі абсцис (x) відкладено значення довжини в міліметрах, що відображаються на дисплеї.

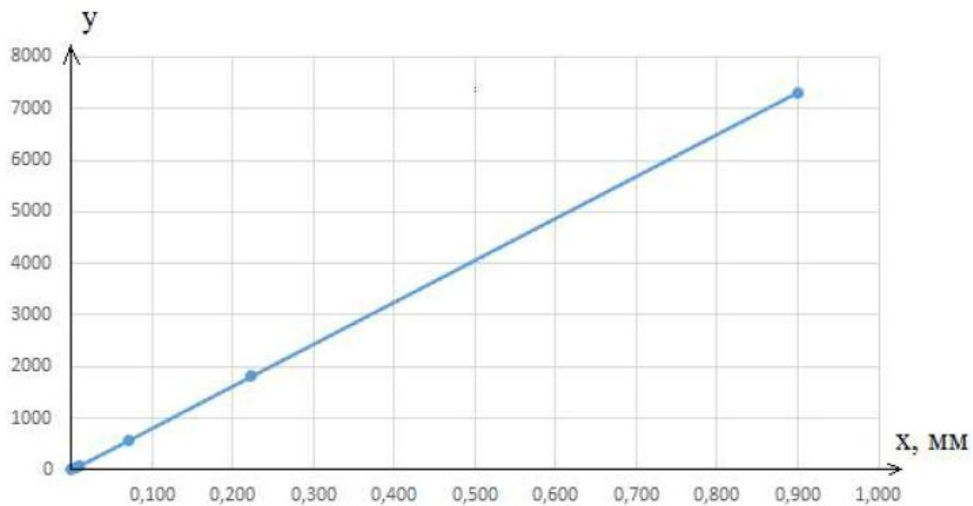


Рисунок 2.6 – Графік залежності показів довжин на дисплеї та датчику.

Функція, що описує залежність довжини на дисплеї та датчику, виглядає наступним чином:

$$y(x) = 8310,3x. \quad (2.14)$$

Завдяки виведеній залежності (14) довжини на дисплеї та на датчику можна легко отримати поточне значення довжини, рахуючи інформацію з датчика ОС. Ця залежність буде використовуватися для розробки ПЗ системи управління.

Наступним кроком, після аналізу датчиків ОС, є складання випробувального стенду, який дозволить продемонструвати принцип зміни довжини штанги, а також зчитування інформації про поточну довжину.

2.2 Складання випробувального стенду

Випробувальний стенд є конструкцією, яка дозволяє продемонструвати процес зміни довжини штанги, а також вважати інформацію з датчика зворотного зв'язку про поточну довжину. Зовнішній вигляд випробувального стенду зображено на рисунку 2.7.

До складу цього стенду входять елементи аналогічні тим, що

встановлені на об'єкті автоматизації, а саме мотор-редуктор та вимірювальний вузол. Також на випробувальному стенді встановлено жорстку муфту, для передачі обертання від вихідного валу мотор-редуктора штока вимірювального вузла та роз'єм для зчитування інформації з датчика ОС.

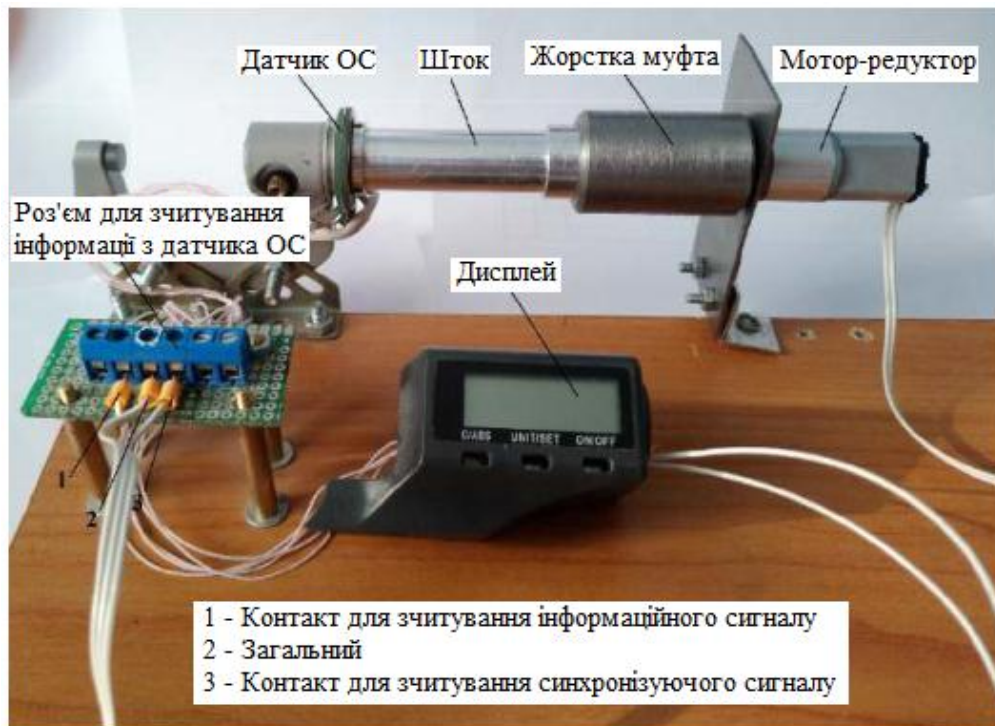


Рисунок 2.7 – Зовнішній вигляд випробувального стенду

Принцип роботи стенду можна описати в такий спосіб. При підключенні живлення до мотора-редуктора його вал починає обертатися. Крутний момент від валу мотора-редуктора до штока вимірювального вузла передається за рахунок муфти. Кутове переміщення штока аналізується датчиком зворотного зв'язку і трансформується в значення лінійного переміщення, під яким можна розуміти зміну довжини штанги. Після чого на відповідний роз'єм подається інформація про поточну довжину. Залежно від полярності живлення мотора-редуктора значення поточної довжини, що зчитується з датчика і відображається на дисплеї може бути як позитивним, так і негативним.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПРИСТРОЮ

3.1 Розробка структурної схеми системи управління шестикоординатним пристроєм позиціонування

Система управління шестикоординатним пристроєм позиціонування має дворівневу ієрархічну структуру:

- підсистема верхнього рівня;
- підсистема нижнього рівня.

Підсистема верхнього рівня є автоматизованим робочим місцем (АРМ).

Підсистема верхнього рівня повинна мати наступні функції:

- прийом інформації про поточний стан рухомого елемента від підсистеми нижнього рівня;
- візуалізація інформації про поточне положення рухомого елемента;
- передача команд про необхідне положення рухомого елемента підсистемі нижнього рівня.

Підсистема нижнього рівня є сукупністю плат управління, датчиків, виконавчих елементів, що здійснюють безпосередню взаємодію з шестикоординатним пристроєм.

Підсистема нижнього рівня, у свою чергу, повинна вирішувати такі завдання:

- прийом інформації про необхідне положення рухомого елемента з АРМ;
- керування електродвигунами пристрою;
- передача інформації про поточне положення рухомого елемента;
- бездротова передача даних між підсистемами верхнього та нижнього рівнів.

На основі вищезазначених функцій підсистем була розроблена комбінована функціональна схема системи керування шестикоординатним

пристроєм позиціонування.

У підсистемі нижнього рівня для вирішення того чи іншого завдання виділено такі блоки:

- блок прийому/передачі інформації;
- центральний блок керування;
- блоки керування електродвигунами.

Блок прийому/передачі інформації призначений для обміну інформацією з підсистемою верхнього рівня для бездротового обміну даними з центральним блоком управління.

Центральний блок керування призначений для обміну даними з блоками керування електродвигунами.

Блок керування електродвигунами призначений для зчитування інформації з датчиків ОС та керування електродвигуном.

Розглянемо процес передачі від АРМ до блоків управління електродвигунів.

З автоматизованого робочого місця надходить інформація про необхідне становище рухомого елемента центральний блок управління. Обмін інформацією між АРМ і центральним блоком управління відбувається бездротовим каналом передачі даних. Потім інформація передається на 6 блоків керування електроприводами. У цих блоках відбувається порівняння інформації про довжини штанг, отриманих з датчиків з інформацією, отриманою від центральний блок. Після цього блоки керування електроприводами подають керуючі сигнали електроприводам, змінюючи цим довжини штанг.

Слід сказати, що розробку центрального блоку управління та блоків управління електродвигунами було розглянуто у ВКР минулих років. Таким чином, далі необхідно розглянути склад блоку центрального управління та блоків управління електродвигунами, а також розробити блок прийому/передачі інформації.

3.2 Опис центрального блоку управління

Блок управління призначений для прийому інформації про необхідне положення рухомого елемента від підсистеми верхнього рівня через модуль бездротової передачі. А також для обробки прийнятої інформації та подальшої передачі інформації блокам керування електродвигунами. На рисунку 3.1 зображено зовнішній вигляд друкарського вузла блоку центрального управління.

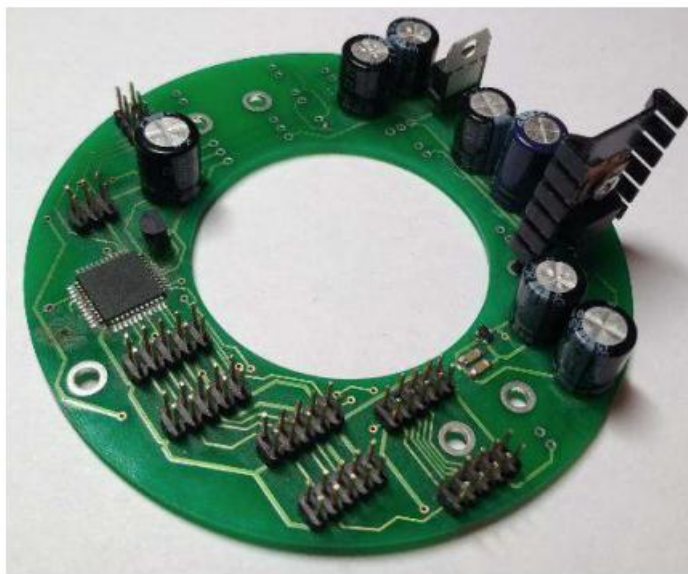


Рисунок 3.1 – Зовнішній вигляд друкарського вузла центрального блоку управління

Основою блоку центрального управління є мікроконтролер (МК) Atmega162 [5].

До складу блоку центрального управління входять каскад скидання та каскад лінійних стабілізаторів.

Далі необхідно визначити, які функції виконує кожен каскад і з яких елементів складається. Також необхідно розглянути основні характеристики модуля бездротової передачі інформації.

Каскад призначений для формування та передачі сигналу скидання на відповідний висновок мікроконтролера (RESET). Каскад скидання

реалізований на мікросхемі MCP120-450DI/TO, що є монітором живлення [6]. Схема каскаду зображено рисунку 3.2.

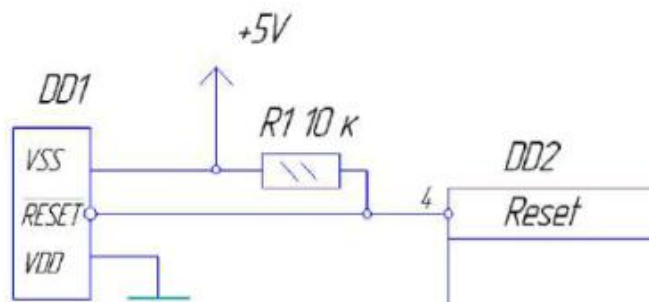


Рисунок 3.2 – Схема каскаду скидання

Монітор (супервізор) живлення - мікросхема, до завдань якої входять формування сигналу скидання при включенні живлення, при зниженні напруги живлення до порогового, а також за наявності викидів напруги в ланцюзі живлення.

У таблиці 3.1 наведено технічну характеристику мікросхеми MCP120-450DI/TO.

Таблиця 3.1 - Технічні характеристики

Номінальна напруга живлення,	5
Споживаний струм, мкА	45
Тривалість сигналу "Скидання", мс	350
Активний рівень сигналу «Скидання»	Низький
Вихід	Відкритий стік
Мінімальна контрольована напруга,	4,25
Максимальна контрольована напруга,	4,50

Мікросхема MCP120-450DI/TO не може формувати на своєму виході високий логічний рівень, внаслідок чого вихід мікросхеми підтягується живлення через резистор опором 10 кОм.

Каскад лінійних стабілізаторів призначений для забезпечення напругою живлення різних пристроїв. У каскаді присутні лінії живлення: +5, +6, +3.3, +3.

Напруга живлення, перераховані вище, формуються за допомогою лінійних стабілізаторів напруги, і призначені для живлення конкретних пристроїв:

- + 5 (L7805) - живлення мікроконтролера [7];
- + 6 В (KP142EH5B) - живлення електродвигунів [8];
- +3.3 (MCP1700T) – живлення модуля бездротової передачі даних [9];
- +3 (KP1158EH3B) – живлення датчиків зворотного зв'язку [10].

У таблиці 3.2 наведено основні технічні характеристики лінійних стабілізаторів: L7805AVC, KP142EH5B, KP1158EH3B, MCP1700T, встановлених у блоці центрального управління.

Таблиця 3.2 - Характеристики стабілізаторів напруги

Найменування	L7805AVC	KP142EH5B	KP1158EH3B	MCP1700T
Вихідна напруга,	5	6	3	3.3
Максимальна вхідна напруга,	35	15	15	6
Максимальний струм навантаження, А	1,5	2	0,5	0,25
Діапазон робочої температури, °C	0 +125	-40 +70	-45 +70	-40 +125
Корпус	TO220	TO220	TO220	SOT23

На рисунку 3.3 зображено типову схему включення стабілізаторів.

Лінійний стабілізатор є мікросхемою, принцип дії якої заснований на автоматичному регулюванні з негативною зворотною зв'язком. У схемах із зворотним зв'язком може виникати процес самозбудження, тобто. виникнення незатухаючих коливань. Для усунення процесу самозбудження

стабілізатора його вхідні та вихідні ланцюги зазвичай шунтують конденсаторами ємністю 100 нФ.

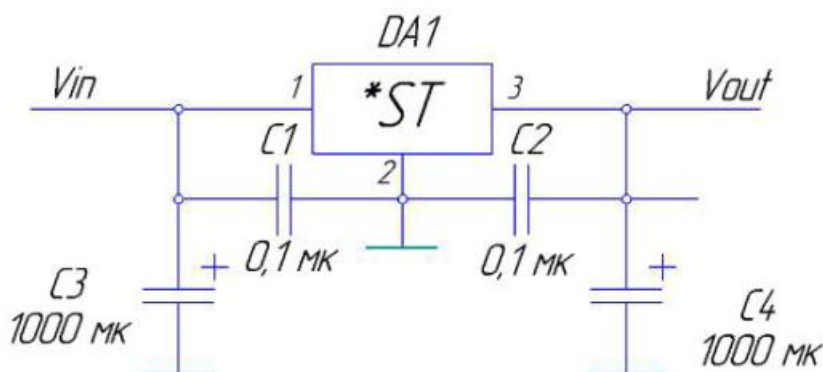


Рисунок 4.3 – Схема увімкнення стабілізаторів

Шунтування вхідних та вихідних ліній стабілізатора електролітичними конденсаторами великою ємністю забезпечує фільтрацію завад.

3.3 Модуль бездротової передачі

Модулі бездротової передачі інформації вбудовані в систему керування для забезпечення бездротового зв'язку між підсистемами верхнього та нижнього рівнів. У системі управління шестикоординатним пристроєм позиціонування використовуються модулі nRF24L01 [11]. У системі керування використовуються два модулі. Один підключається до блоку прийому/передачі інформації, інший до центрального блоку управління. Дані модулі є бездротовими приймачами, що здійснюють передачу даних на частоті 2.4 ГГц. На малюнку 4.4 зображено зовнішній вигляд модуля nRF24L01.

У таблиці 3.3 наведено основні технічні характеристики модуля бездротової передачі.

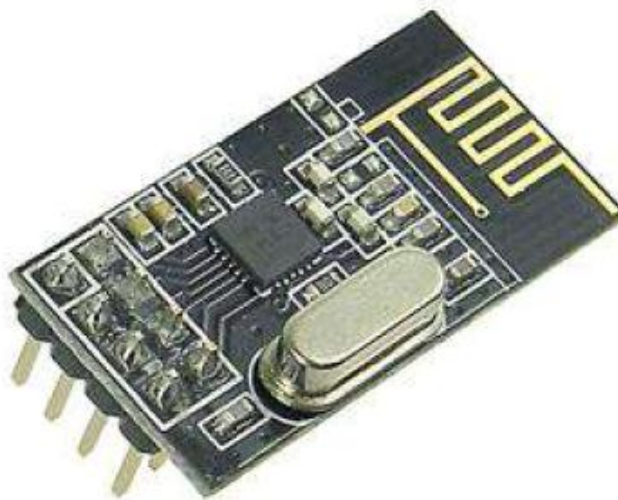


Рисунок 4.4 – Модуль бездротової передачі інформації

Таблиця 3.3 - Технічні характеристики модуля

Частота прийому/передачі, ГГц	2.4
Відстань прийому/передачі, м, не більше	100
у приміщенні, м, не більше	30
Кількість каналів, шт	126
Напруга живлення,	3.3
Швидкість передачі, Мбіт/с, не більше	2

Передача інформації від блоку до модуля здійснюється через SPI-інтерфейс. У таблиці 3.4 наведено розпіновку виводів модуля.

Виходи 4-7 призначені для обміну інформацією з інтерфейсу SPI.

Вихід 3 визначає режим роботи модуля. Якщо на виведенні є сигнал логічної 1, модуль налаштований на режим прийому інформації. Якщо на виведенні CE логічний 0 – на передачу.

Вихід 8 є виводом переривання. Призначений для відстеження прийому/передачі даних та помилок передачі. Якщо відбувається прийом/передача даних або під час прийому/передачі сталася помилка на виведенні IRQ встановлюється логічний 0. В інших випадках на виведенні

IRQ є логічна 1. Виходи 1, 2 призначені для підключення до них напруги живлення 3.3 В.

Таблиця 3.4 – Розпинання висновків модуля nRF24L01

Номер виводу	Найменування виводу	Тип виводу
1	GND	Вхід
2	VCC	Вхід
3	CE	Вхід
4	CSN	Вхід
Номер виводу	Найменування виводу	Тип виводу
5	SCK	Вхід
6	MOSI	Вхід
7	MISO	Вихід
8	IRQ	Вихід

Після того, як був розглянутий центральний блок, тепер необхідно розглянути призначення блоку управління електродвигуном та його основні елементи.

3.4 Опис блоку керування електродвигуном

Блок призначений для безпосереднього керування електродвигуном відповідно до заданого закону регулювання.

На рисунку 3.5 представлений зовнішній вигляд друкарського вузла блоку керування електроприводом.

Основою блоку є мікроконтролер Attiny20 [12]. Також до складу блоку входять каскад узгодження логічних рівнів та вихідний транзисторний каскад.

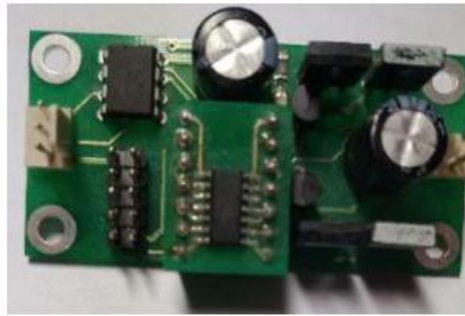


Рисунок 3.5 – Зовнішній вигляд друкарського вузла

Блок не має окремого роз'єму живлення, саме тому живлення мікроконтролера та живлення електродвигуна здійснюється через підключення до блоку центрального керування.

Каскад узгодження логічних рівнів призначений для узгодження логічних рівнів сигналів, що одержуються з датчиків зворотного зв'язку та надходять до мікроконтролера. Схема каскаду зображено рисунку 3.6.

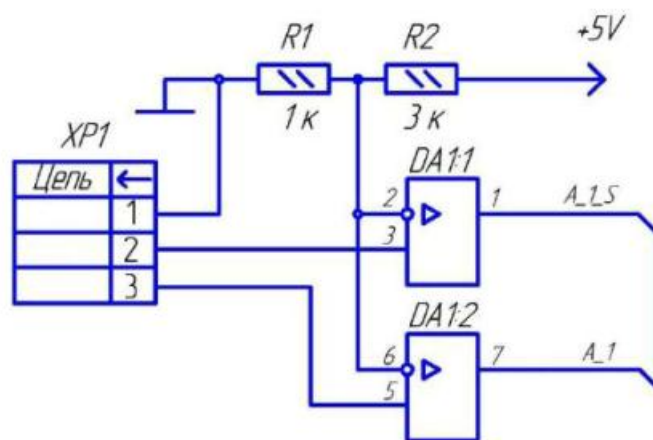


Рисунок 3.6 – Схема каскаду узгодження

Через роз'єм ХР1 здійснюється отримання інформації про поточну довжину штанги від датчика зворотного зв'язку.

Розмах імпульсів сигналів з датчиків приблизно дорівнює 1,5 Ст. Для того щоб мікроконтролер зміг визначити в сигналах з датчиків логічні 0 і 1 необхідно, щоб на його входи надходили сигнали з розмахом імпульсів мінімум 2 В.

Для вирішення цього завдання в каскад інтегрований двоканальний операційний підсилювач LM358L, включений за схемою без компаратора гістерезисного [13].

На входи, що інвертують, подається опорна напруга, взята з резистивного діляника. На входи, що не інвертують, подаються сигнали з датчиків зворотного зв'язку.

Якщо прийняти опорну напругу на рівні 1,25 і опір резистора R1 рівним 1 кОм, то опір резистора R2 визначається за наступною формулою:

$$R_2 = R_1 \cdot \left(\frac{U_{POWER}}{U_{REF}} - 1 \right) = 1000 \cdot \left(\frac{5}{1.25} - 1 \right) = 3000 \text{ Ом}, \quad (3.1)$$

де U_{POWER} – напруга на резистивному ділянику,;

R_1, R_2 – опори резисторів, Ом;

U_{REF} – вихідна напруга, Ст.

Вихідний транзисторний каскад призначений для керування електроприводом. Каскад є два транзисторних напівмоста, призначені для забезпечення двонаправленого обертання мотор-редуктора. На рисунку 3.7 зображено схему каскаду (правий та лівий напівмости).

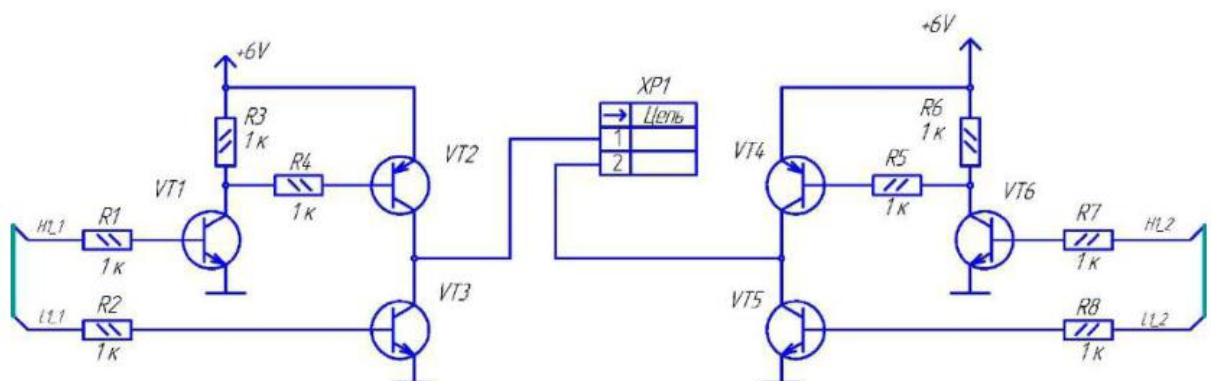


Рисунок 3.7 – Схема вихідного каскаду

Кожен із напівмостів складається з верхнього та нижнього плечей. Кожне з плечей може формувати високий та низький логічні рівні.

Роз'єм ХР1 призначений безпосередньо для підключення мотор-редуктора.

Розглянемо принцип роботи лівого напівмосту, правий працює аналогічно:

1. Для формування на виході півмоста логічної 1 необхідно, щоб сигнал Н1_1 мав високий логічний рівень. Тим самим транзистор VT1 відкривається. У свою чергу, база транзистора VT2 з'єднується через резистор R4 із загальним провідником – транзистор VT2 теж відкривається. На виході верхнього плеча формується найвищий логічний рівень.

Сигнал L1_1 повинен мати низький логічний рівень, щоб тримати транзистор VT3 закритим.

2. Для формування на виході півмоста логічного 0 необхідно, щоб сигнал Н1_1 мав низький логічний рівень. Сигнал L1_1 повинен мати високий логічний рівень для того, щоб відкрити транзистор VT3 і тим самим з'єднати вихідну лінію напівмосту із загальним проводом.

Згідно зі схемою комбінованої функціональної, до складу системи входить блок прийому/передачі інформації. Саме розробці цього блоку буде присвячено наступний розділ.

3.5 Розробка блоку прийому/передачі інформації

Блок прийому/передачі інформації призначений для обміну інформацією з АРМ, а також для обміну даними бездротовим каналом передачі з блоком центрального управління. На АРМ встановлено ПК, з якого оператор здійснює безпосереднє керування пристроєм. Отже, необхідно забезпечити блок прийому/передачі інтерфейсами аналогічним персональному комп'ютеру.

Найбільш поширеним інтерфейсом у ПК є USB, отже необхідно забезпечити можливість підключення блоку прийому/передачі інформації до ПК через USB-порт. Перевагою даного інтерфейсу є наявність виводів живлення від USB порту, отже, зникає потреба у зовнішньому джерелі живлення блоку.

Основою блоку буде мікроконтролер, який і здійснюватиме управління прийомом і передачею даних між верхнім і нижнім рівнями. Мікроконтролер, який буде використовуватися в блоці прийому/передачі, повинен мати відповідати наступним вимогам:

- напруга живлення МК має становити 5 В;
- вбудований інтерфейс SPI для обміну даними з модулем бездротової передачі;
- вбудований інтерфейс USB для обміну інформацією з ПК через USB-порт;

Зважаючи на те, що в обмежені терміни необхідно зібрати систему управління цілком і провести її функціональне тестування, було прийнято рішення не купувати МК із вбудованим USB інтерфейсами, а скористатися МК, який є зараз «на руках». Таким контролером виявився ATmega8A [14]. Також вже був перетворювач інтерфейсів USB-UART RDC1-USB-UART [15].

На основі всього вище сказаного, можна скласти структурну схему блоку прийому/передачі інформації, яка відображає елементи з яких складатиметься блок прийому/передачі інформації, а також їх взаємозв'язку між собою.

Структурна схема зображено рисунку 3.8.

Назви елементів структурної схеми розшифровуються так:

- ПК – персональний комп'ютер;
- ПІ – перетворювач інтерфейсів;
- МК – мікроконтролер;
- БІ – блок індикації;
- Модуль БПД – модуль бездротової передачі.

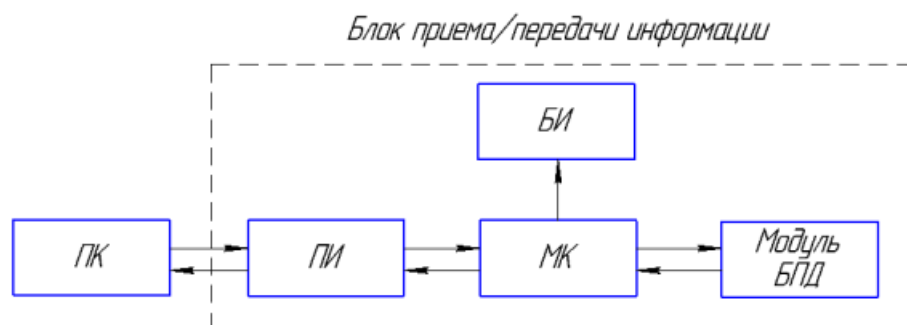


Рисунок 3.8 – Структурна схема блоку прийому/передачі інформації

Блок індикації необхідний для налагодження блоку прийому/передачі, а також для відображення того, що інформація прийнята/передана бездротовим каналом зв'язку.

Основним елементом блоку прийому/передачі інформації має бути мікроконтролер (МК). У блоці прийому/передачі використовуватиметься мікроконтролер ATmega8A.

Основні технічні характеристики даного МК наведено у таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 - Основні технічні характеристики МК ATmega8A

Напруга живлення,	5
Кількість входів/виходів, шт	23
Вбудовані інтерфейси I2C, SPI,	UART
Тактова частота, МГц	16
Об'єм пам'яті програм, Кбайт	8

Мікроконтролер ATmega8A не підтримує протоколи обміну даними за інтерфейсом USB. Отже, необхідно використовувати плату перетворювач інтерфейсу USB на той інтерфейс, який підтримує МК ATmega8A, наприклад, інтерфейс UART.

Перетворювач інтерфейсів USB-UART вбудований у систему управління для здійснення обміну інформацією між АРМ та МК АТmega8А. Як перетворювач інтерфейсів обрано перетворювач RDC1-USB-UART.

Зовнішній вигляд цього перетворювача зображено малюнку 3.9.

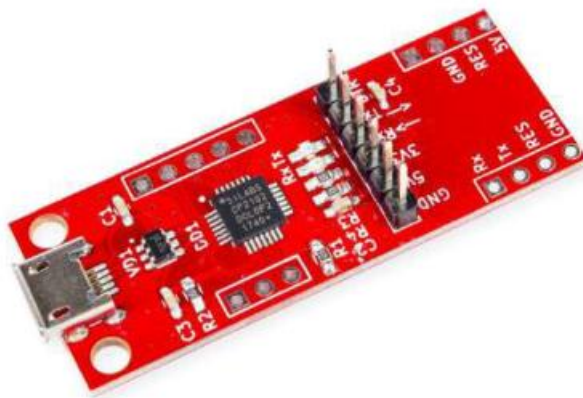


Рисунок 3.9 – Зовнішній вигляд перетворювача інтерфейсів.

МК АТmega8А, встановлений у блоці прийому/передачі інформації, буде спілкуватися з перетворювачем UART, а до АРМ дані передаються по USB. Персональний комп'ютер, встановлений на АРМ, розпізнає підключений пристрій як COM-порт, тому працювати з ним можна як зі звичайним COM-портом.

Для зв'язку з ПК на платі встановлений роз'єм microUSB, для зв'язку з пристроями відповідні висновки Rx і Tx.

На платі встановлені SMD світлодіоди для відстеження прийому/передачі інформації.

Цей перетворювач має у своєму складі мікросхему захисту USB порту USBLC6-2SC6 [16].

На платі перетворювача інтерфейсів є висновки 5V та GND для живлення різних пристроїв.

Наступним етапом розробки блоку прийому передачі є розробка схеми електричної принципової.

Було вирішено використовувати як основний елемент блоку приймання/передачі МК АТmega8А. Для реалізації обміну інформацією між

МК та АРМ було вирішено використовувати перетворювач інтерфейсів. Також блок прийому/передачі інформації повинен мати можливість обмінюватися даними бездротовим каналом зв'язку за допомогою модуля nRF24L01.

На підставі цього була розроблена схема електричного принципового блоку прийому/передачі інформації.

У складі мікроконтролера ATmega8A є вбудований тактуючий RC генератор на 16 МГц. Допуск на частоту внутрішнього генератора становить $\pm 5\%$. Це може спричинити те, що фактична швидкість передачі даних за інтерфейсами UART і SPI буде відрізнятися від встановленої.

Внаслідок цього приймач та передавач інформації (наприклад, АРМ та блок прийому/передачі інформації) не зможуть здійснити обмін між собою.

Для збільшення точності тактування в блок інтегрований зовнішній кварцовий резонатор HC-49U [17]. Резонансна частота цього резонатора становить 8 МГц, точність налаштування становить $\pm 0,003\%$.

Для живлення модуля бездротової передачі інформації потрібне живлення від

+3.3 до +3.6 В. Для цього в електричну схему вбудований лінійний стабілізатор напруги MCP1700T з номінальною вихідною напругою +3.3 Ст.

У електричну схему були додані роз'єми, необхідні підключення перетворювача інтерфейсів до блоку прийому/передачі інформації.

Через лінії 5V та GND перетворювача інтерфейсів здійснюється живлення мікроконтролера. Лінії Rx та Tx підключаються безпосередньо до висновків TXD та RXD мікроконтролера для обміну даними за інтерфейсом UART.

У схемі є роз'єм призначений для програмування мікроконтролера через спеціальний пристрій – програматор.

Програмування здійснюється через інтерфейс SPI мікроконтролера.

У схемі присутні три світлодіоди VD1-VD3. Світлодіоди VD1, VD2 призначені для налагодження та перевірки працездатності мікроконтролера.

Світлодіод VD3 необхідний контролю наявності живлення всієї схеми.

Для фільтрації перешкод по лінії живлення +5 і +3,6 присутні електролітичні конденсатори С1-С3 на 1000 мкф.

Друкована плата – двостороння, на обох її сторонах здійснена розмітка доріжок та всі необхідні з'єднання відповідно до схеми електричної принципової.

Для плати обрано координатну сітку з кроком 1,25 мм за ГОСТ 10317-79 [18].

На платі будуть використовуватися металізовані отвори для кріплення компонентів та переходів між шарами плати. Діаметр перехідних отворів становить 0,6 мм. Розміри отворів визначимо для кожного вивідного елемента друкованої плати.

Розміри отворів для кріплення мікроконтролера та роз'ємів представлені у таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Розміри отворів для виводів

Елемент друкованої плати	Ширина виведення елемента, мм	Товщина виведення елемента, мм	Діаметр металізованого отвору, мм
XP1... XP4, XS1	0,64	0,64	0,80
DD1	0,53	0,28	0,80

Для кріплення елементів з висновками круглого перерізу таблиці 3.7 наведені діаметри металізованих отворів під дані елементи.

Таблиця 3.7 – Розміри отворів

Елемент друкованої плати	Діаметр виведення елемента, мм	Діаметр металізованого отвору, мм
HC-49	0,47	0,80
C1 ... C3	0,53	0,80
HL1 ... HL3	0,50	0,80

Для кріплення конденсаторів $C1...C3$ та резисторів $R1...R15$ використовуються контактні майданчики шириною 0,6 мм та довжиною 0,85 мм.

Для встановлення друкованої плати потрібна наявність монтажних отворів. У разі отвори будуть діаметром 3,2 мм під різьблення М3 по ГОСТ 11284-75 [19].

Розміри друкованої плати та правила її виконання взяті з ГОСТ 23751-86 [20]. Габаритні розміри плати становлять 60 мм x 65 мм.

ГОСТ 23751-86 встановлює п'ять класів точності виконання елементів конструкції. Прийmemo для друкованої плати третій клас точності.

Як матеріал друкованої плати використовується лист фольгованого склотекстоліту СФ-2-35Г товщиною 1,2 мм, фанерований з двох сторін мідною фольгою товщиною 0,035 мм за ГОСТ 10316-78 [21].

Розрахуємо ширину друкарського провідника для ланцюгів живлення. Згідно з документацією виробника мікроконтролера АТmega8А, максимальний струм, що протікає по лінії живлення, не повинен перевищувати 300 мА.

ГОСТ 23751-86 щільність струму для фольги повинна становити від 100 до 250 А/мм². Прийmemo густину струму рівну 100 А/мм². Ширину провідника визначимо за такою формулою:

$$h = \frac{I}{i \cdot \Delta}, \quad (3.2)$$

де I – сила струму, А; i – густина струму, А/мм²; Δ – товщина фольги, мм.

$$h = \frac{0.3}{100 \cdot 0.035} = 0.086 \text{ мм.}$$

За третім класом точності мінімальна ширина доріжки друкованої плати становить 0,25 мм. Прийmemo ширину сигнальних провідників 0,3 мм. Тоді ширину силових провідників ліній +5 В прийmemo рівною 0,7 мм, а лінії +3,6 В рівній – 0,5 мм, що забезпечить візуальний поділ сигнальних та силових ліній.

Розробка друкованої плати велася за допомогою редактора ARES програмного продукту Proteus. Цей редактор дозволяє спроектувати друковану плату з урахуванням створеної електричної схеми у редакторі ISIS.

Проектування друкованої плати в редакторі ARES є розстановкою посадочних місць компонентів і подальше з'єднання їх між собою друкованими провідниками.

Друкований вузол – друкована плата з приєднаними до неї електричними та механічними елементами.

Усі елементи друкованого вузла необхідно паяти припоєм ПОС-61 за ГОСТ 21931-76 [22].

При монтажі полярних елементів таких як електролітичні конденсатори (C1-C3), світлодіоди (VD1-VD3) необхідно дотримуватись полярності.

При монтажі мікроконтролера DD1 необхідно дотримуватися правильності її встановлення. Так, на корпусі мікроконтролера невеликим кружком позначена перша ніжка елемента.

При монтажі кварцового резонатора ZQ1 необхідно між ним та друкованою платою встановити діелектричну підкладку, щоб уникнути замикання на корпус резонатора.

РОЗДІЛ 4

ПОБУДОВА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ УПРАВЛІННЯ, ПРЕДАВАЛЬНИХ ФУНКЦІЙ ТА РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ РЕГУЛЯТОРА АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОДВИГУНОМ

4.1 Побудова структурної схеми управління шестикоординатним пристроєм позиціонування та розрахунок передавальної функції

Систему керування шестикоординатним пристроєм позиціонування можна віднести до замкнутої системи з від'ємним зворотним зв'язком. Схема управління зображено рисунку 4.1.

Управління пристроями з паралельною структурою має ряд особливостей, а саме одночасне керування всіма приводами при формуванні необхідної траєкторії руху рухомого елемента. Отже, керування таким пристроєм повинне здійснюватися за 6 вхідними змінними.

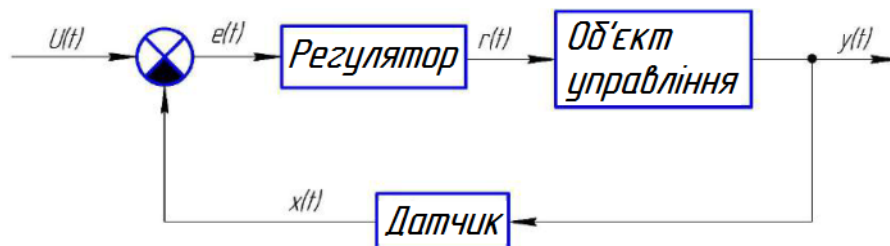


Рисунок 4.1 – Схема керування шестикоординатним пристроєм позиціонування

На рисунку 4.1 прийнято такі позначення:

$$U(t) = \begin{pmatrix} U_1(t) \\ U_2(t) \\ \dots \\ U_6(t) \end{pmatrix} \text{ – вектор потрібних координат;}$$

$$y(t) = \begin{pmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ \dots \\ y_6(t) \end{pmatrix} - \text{вектор фактичних координат};$$

$$e(t) = \begin{pmatrix} e_1(t) \\ e_2(t) \\ \dots \\ e_6(t) \end{pmatrix} - \text{вектор помилок управління (розузгодження)};$$

$$r(t) = \begin{pmatrix} r_1(t) \\ r_2(t) \\ \dots \\ r_6(t) \end{pmatrix} - \text{вектор параметрів управління}.$$

Принцип управління за цією схемою полягає в тому, що сигнал, який несе в собі інформацію про необхідну координату рухомого елемента, подається на регулятор. Він, у свою чергу, відповідно до заданого закону управління, передає параметри управління на об'єкт. Потім сигнал об'єкта порівнюється з необхідним. Фактично ця схема прагне зменшити неузгодженість $e(t)$ між необхідними $U(t)$ та фактичними $y(t)$ координатами. Величина неузгодженості визначається за таким виразом:

$$e(t) = U(t) - y(t). \quad (4.1)$$

У системі управління об'єктами управління, що розробляється, служать електродвигуни. Датчиками у цій системі є ємнісні матриці від мікрометра. Отже реалізації завдання управління необхідно розробити регулятор управління об'єктом, тобто. електродвигуном.

4.2 Визначення оптимального закону регулювання та побудова відповідних передавальних функцій

Управління електродвигунами пристрою здійснюється за деяким законом регулювання відповідно до схеми керування (див. рис. 5.1). Як такий закон виступає ПД-закон регулювання, а як пристрій здійснює даний закон ПД-регулятор відповідно.

ПД-регулятор – пристрій, який здійснює керування деяким об'єктом, у контурах із зворотним зв'язком. Керуючий сигнал регулятора є сумою трьох складових: пропорційної (P), інтегральної (I), диференційної (D).

На рисунку 4.2 зображено структурну схему ПД-регулятора

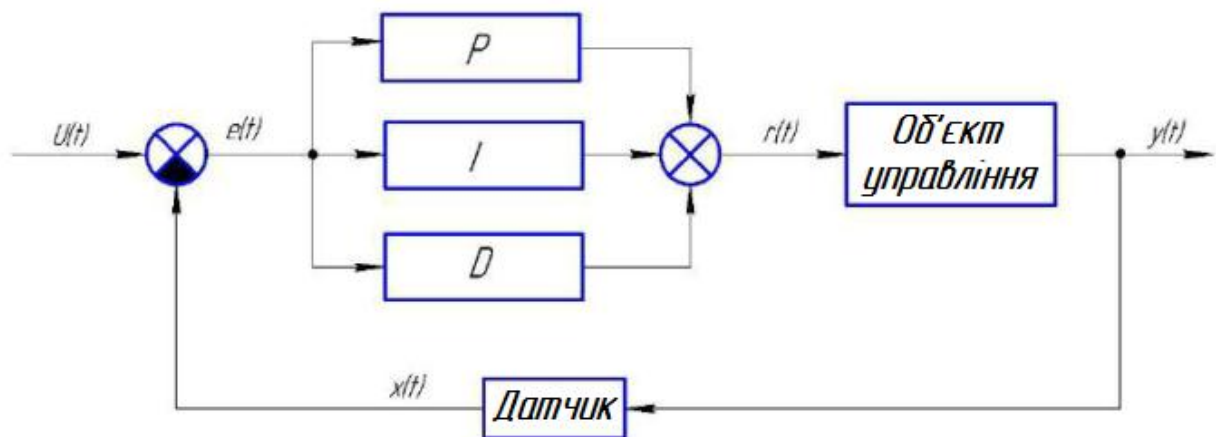


Рисунок 4.2 – Схема ПД-регулятора

Умовно ПД-регулятори можна поділити на безперервні та дискретні.

Керуюча дія $u(t)$ для безперервного ПД-регулятора можна описати так:

$$u(t) = P + I + D = K \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^{t_0} e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right], \quad (4.2)$$

де K – пропорційний коефіцієнт регулятора, T_I – інтегральний коефіцієнт регулятора, T_D – диференціальний коефіцієнт регулятора.

На відміну від безперервних, дискретні регулятори забезпечують зміну регулюючого впливу тільки в певні моменти часу. Між цими моментами регулюючий вплив залишається незмінним.

Скориставшись перетворенням Лапласа, можна отримати рівняння для керуючого впливу в операторній формі:

$$U(s) = K \left[1 + \frac{1}{T_I \cdot s} + T_D \cdot s \right]. \quad (4.3)$$

Передавальна функція ПІД-регулятора виглядає так:

$$W(s) = K \cdot \frac{(T_I \cdot T_D \cdot s^2 + T_I \cdot s + 1)}{T_I \cdot s} \quad (4.4)$$

де s – комплексна змінна.

У виразі передавальної функції можна побачити, що рівень комплексної змінної в чисельнику перевищує рівень знаменника. Це говорить про ідеальний регулятор і свідчить про його фізичну нереалізацію.

Метод білінійного перетворення полягає у формальній заміні комплексної змінної s на вираз із комплексної змінної z .

$$s = \frac{2}{h} \cdot \frac{z-1}{z+1}. \quad (4.5)$$

де $z = e^{j\omega h}$ – комплексна змінна.

Імпульсна передавальна функція:

$$H(z) = K \frac{\left[T_I \cdot T_D \left(\frac{2}{h} \cdot \frac{z-1}{z+1} \right)^2 + T_I \left(\frac{2}{h} \cdot \frac{z-1}{z+1} \right) + 1 \right]}{T_I \left(\frac{2}{h} \cdot \frac{z-1}{z+1} \right)}. \quad (4.6)$$

Скориставшись програмним пакетом MathCad можна спростити цей вираз:

$$H(z) = K \left[\frac{2T_D(z-1)}{h(z-1)} + \frac{h(z-1)}{2T_I(z-1)} \right]. \quad (4.7)$$

Потім, застосувавши операцію факторизації, можна привести дробу до спільного знаменника:

$$H(z) = K \frac{h^2 \cdot z^2 + 2h^2 \cdot z + h^2 + 2T_I \cdot h \cdot z^2 - 2T_I \cdot h + 4T_D \cdot T_I \cdot z^2 - 8T_D \cdot T_I \cdot z + 4T_D \cdot T_I}{2T_I \cdot h \cdot (z-1) \cdot (z+1)} \quad (4.8)$$

Поліноміальні коефіцієнти в даному виразі виглядають так:

$$\begin{aligned} a_0 &= 2T_I \cdot h; \\ a_1 &= 0; \\ a_2 &= -2T_I \cdot h; \\ b_0 &= K(h^2 + 2T_I \cdot h + 4T_D \cdot T_I); \\ b_1 &= K(2h^2 - 8T_D \cdot T_I); \\ b_2 &= K(h^2 + 2T_I \cdot h + 4T_D \cdot T_I). \end{aligned} \quad (4.9)$$

Різницеве рівняння:

$$y_0 = \frac{b_0}{a_0} \cdot U_0 + \frac{b_1}{a_0} \cdot U_1 + \frac{b_2}{a_0} \cdot U_2 - \frac{a_1}{a_0} \cdot y_1 - \frac{a_2}{a_0} \cdot y_2 \quad (4.10)$$

Отримане різницеве рівняння буде використане в програмному коді для мікроконтролера ATiny20, таким чином буде реалізовано дискретний ПІД-регулятор для керування електродвигунами.

У наступному розділі буде розглянуто метод керування електродвигунами, який передбачається використовувати у системі

керування. Використання цього методу обумовлено тим, що розроблений у ВКР минулих років блок керування електродвигуном, спроектований саме для використання цього методу керування.

4.3. Керування електродвигунами методом широтно-імпульсної модуляції

Як метод управління електродвигуном передбачається використання імпульсного управління за принципом широтно-імпульсної модуляції (ШІМ).

Імпульсне управління полягає в тому, що на об'єкт управління подаються імпульси, що мають певні характеристики. Змінюючи дані характеристики імпульсів здійснюється керування об'єктом [23].

При широтно-імпульсній модуляції відбувається зміна тривалості імпульсів, при цьому період проходження імпульсів залишається незмінним.

ШІМ сигнал характеризується такими параметрами як період сигналу, ширина (тривалість) імпульсу, коефіцієнт заповнення (зворотна величина – шпаруватість).

Коефіцієнт заповнення - відношення тривалості імпульсу до періоду проходження імпульсів. Коефіцієнт заповнення визначає частку потужності, що доставляється до двигуна.

На рисунку 4.3 зображені ШІМ сигнал та параметри, що його характеризують.

Таким чином коефіцієнт заповнення (D) можна обчислити за такою формулою:

$$D = \frac{1}{Q} = \frac{t'}{T} \cdot 100\%, \quad (4.11)$$

де t' – тривалість імпульсу, с;

T – період сигналу, с;

Q – скважність сигналу.

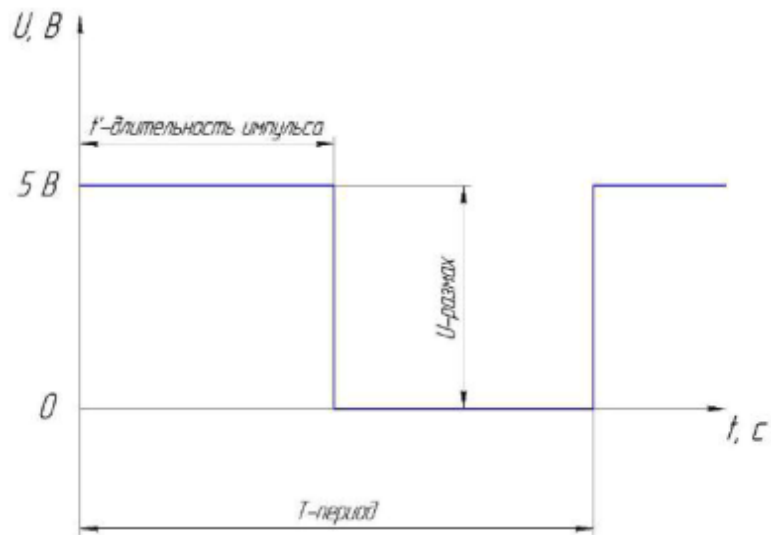


Рисунок 4.3 – Часова діаграма ШІМ сигналу.

На рисунку 4.4 зображені ШІМ сигнали з різними коефіцієнтами заповнення.

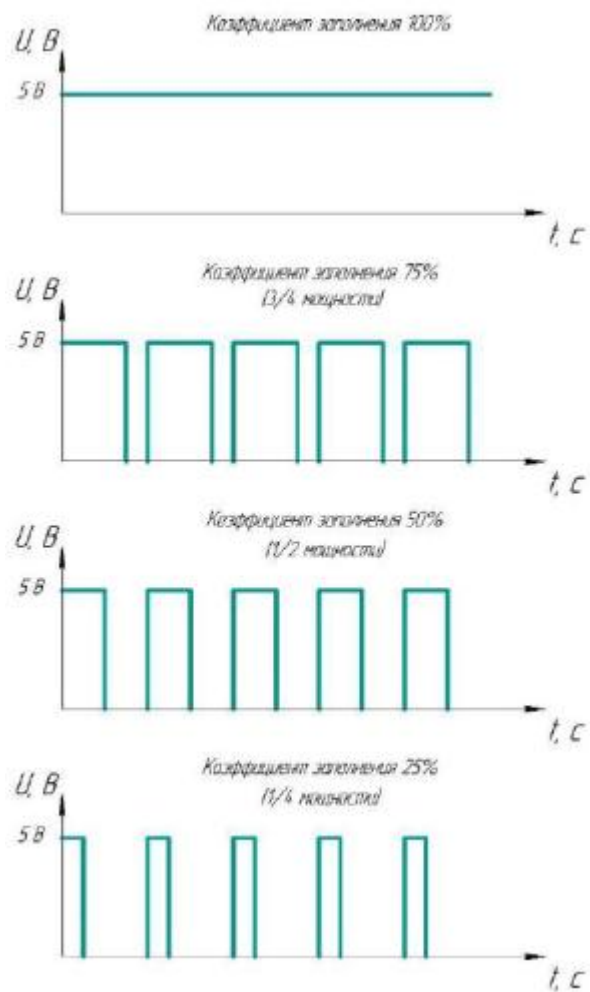


Рисунок 4.4 – Діаграми ШІМ сигналів

Провівши серію випробувань над електродвигуном, який встановлений на випробувальному стенді, було отримано значення частот обертання ротора відповідно до заданих коефіцієнтів заповнення, що подається на статор ШІМ сигналу (таблиця 4.1).

Період проходження імпульсів ШІМ сигналу становив 10 мс. Відлік часу зупинявся, коли на дисплеї з'являлося значення 1 мм.

Таблиця 4.1 – Емпіричні дані

Коефіцієнт заповнення, %	Час, с	Частота обертання, об/хв
0	—	0
5	—	0
10	—	0
20	—	0
30	—	0
40	10,39	5,78
50	7,74	7,75
60	6,64	9,04
70	5,65	10,62
80	5,15	11,65
90	4,68	12,82
100	4,19	14,32

За допомогою вбудованих засобів програмного продукту Excel було отримано коефіцієнт кореляції, що описує взаємозв'язок між коефіцієнтом заповнення та частотою обертання ротора електродвигуна. Коефіцієнт кореляції становив 0,971 – висока кореляція.

На рисунку 4.5 зображено графік залежності частоти обертання ротора коефіцієнта заповнення сигналу.

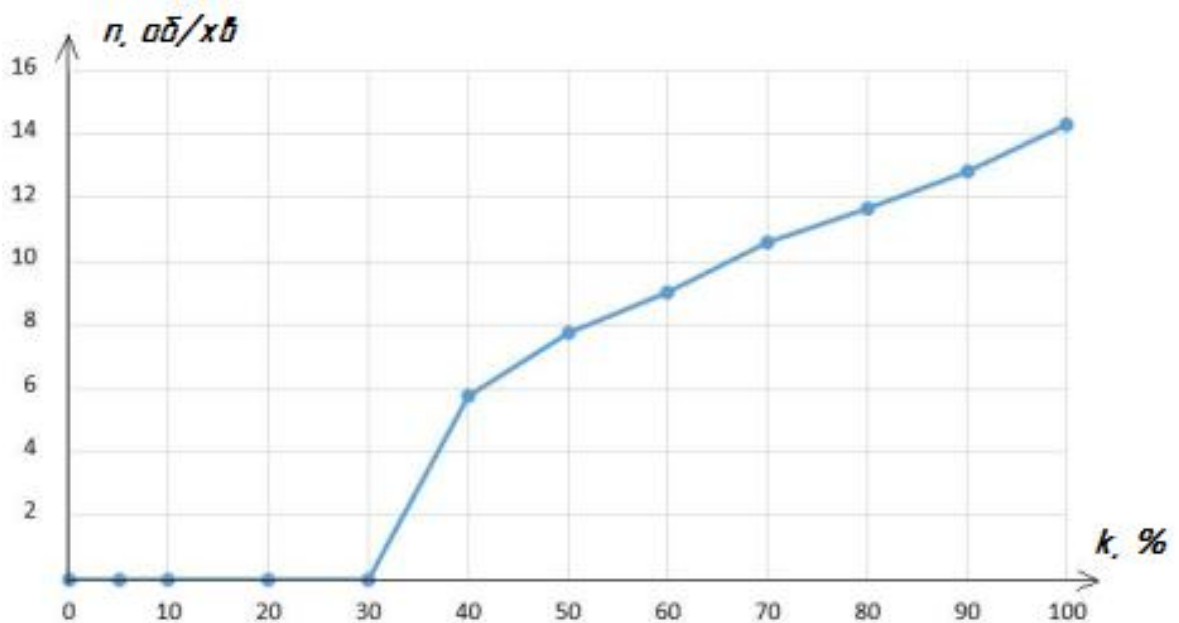


Рисунок 4.5 – Залежність між коефіцієнтом заповнення ШІМ сигналу та частотою обертання ротора

На графіку видно, що з коефіцієнті заповнення понад 30% залежність має лінійний характер. Такий вид графіка обумовлений тертям у підшипниках двигуна, а також його інерцією. Так, при коефіцієнті заповнення понад 30%,

Струм у ланцюгу якоря достатній для подолання сил тертя.

4.4 Розробка підпрограми зчитування інформації з датчиків ОС та програми управління мотор-редуктором

У блоці керування електродвигуном інформація, отримана з датчика ОС, повинна оброблятися мікроконтролером. Отже, необхідно розробити для мікроконтролера ATtiny20 програму для зчитування інформації з датчика ОС.

Функціональне тестування програми буде проводитись на випробувальному стенді, опис якого наведено в розділі 3.2 пояснювальної

записки, після того, як програма буде завантажена в МК, а блок прийому/передачі підключений до випробувального стенду.

Щоб переконатися в тому, що інформація зчитана з датчика ОС необхідно додатково підключити РКІ LM016L [24]. Якщо значення поточної довжини на РКІ та на дисплеї вимірювального вузла збігатимуться (допускаючи похибку в 0,001 мм) означає розроблена програма зчитування інформації з датчика коректна.

Для перевірки даного програмного коду на коректність зчитування інформації з датчика було зібрано схему, зображену на рисунку 6.1. На макетній платі розташований МК, до якого підключається РКІ. Також до МК підключені два дроти, що йдуть від блоку управління електродвигуном. Завдяки операційному підсилювачу, встановленому в блоці, МК зможе зчитувати інформацію сигналів датчика ОС.

На рисунку 4.6 видно, що значення, що відображається на РКІ збігається зі значенням на дисплеї вимірювального вузла (на дисплеї 1571, на РКІ 1571).

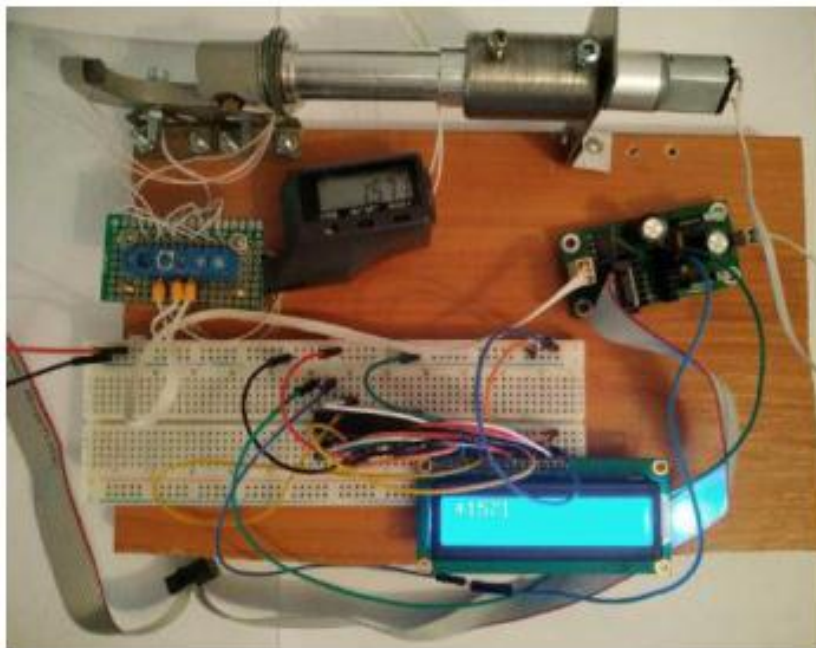


Рисунок 4.6 – Функціональне тестування

На основі звірки показів, можна зробити висновок про те, що програма для зчитування інформації з датчика ОС працює правильно.

На рисунку 4.7 зображено схему для тестування програми (на дисплеї - 3915, на РКІ -3916).



Рисунок 4.7 – Тестування програми

На наступному етапі розроблено програму для управління мотор-редуктором згідно ПД-закону регулювання.

Управління мотор-редуктором має здійснюватися за ПД-законом. У підрозділі 4.2 кваліфікаційної роботи були отримані коефіцієнти різницевого рівняння дискретного ПД-регулятора. Різницеве рівняння дискретного ПД-регулятора буде основою для роботи програми управління мотор-редуктором.

У різницевому рівнянні є такий параметр, як помилка регулювання. Відповідно до рівняння (4.10), помилка визначається як різниця необхідного та поточного значення величини, в даному випадку довжини. Для знаходження поточної довжини необхідно використати код програми розроблений у попередньому розділі.

В якості методу управління мотор-редуктором було обрано управління за допомогою ШІМ сигналу. ШІМ сигнал буде реалізований за допомогою режиму CTC першого таймера лічильника МК ATiny20. Перший

таймер/лічильник має два регістри порівняння OCR1A та OCR1B. Регістр OCR1A відповіє за період генерації імпульсів. При збігу внутрішньої змінної лічильника зі значенням даного регістра необхідно на відповідні плечі напівмостів, щоб включити живлення мотор-редуктора. Регістр OCR1B буде відповідати за ширину імпульсу. При збігу внутрішньої змінної лічильника зі значенням даного регістру необхідно подати сигнали на відповідні плечі півмостів, щоб відключати живлення мотор-редуктора. Розроблено програмний код для МК ATtiny20 для керування мотор-редуктором.

Після того, як програмний код для управління мотор-редуктором був розроблений, необхідно провести функціональне тестування. Для цього цей програмний код був завантажений у МК ATtiny20, після чого блок управління електродвигуном було підключено до випробувального стенду.

При проведенні функціонального тестування допускається щоб величина помилки регулювання була не більше 10 мкм.

Нехай необхідно, щоб значення довжини на дисплеї становило 200 мкм. Для цього необхідно в програмному коді змінної `micrometr_zad` присвоїти значення 200.

Результат роботи розробленого програмного коду зображено рисунку 4.8.

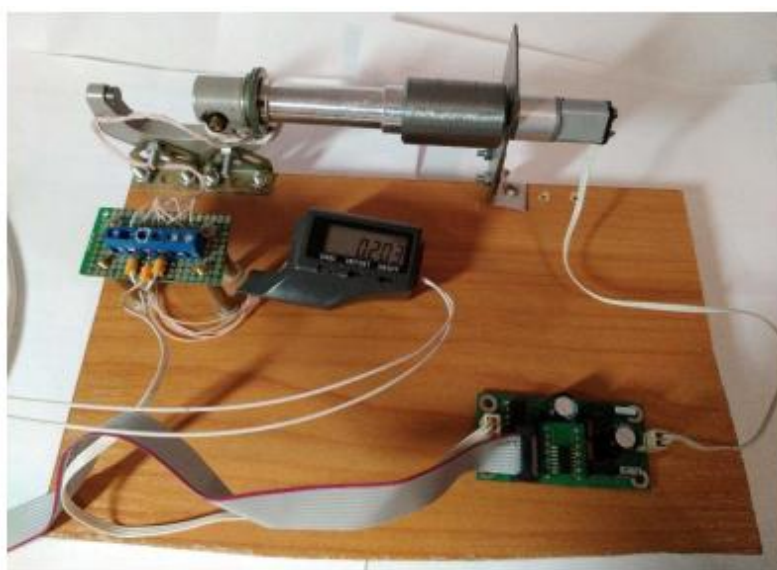


Рисунок 4.8 – Результат роботи програми за значенням 200 мкм.

На дисплеї (див. рисунок 4.8) відображається значення довжини 203 мкм. Це означає, що помилка регулювання становить 3 мкм.

Щоб переконатися в тому, що програма працює коректно, змінимо необхідне значення довжини на -300 мкм (тобто `micrometr_zad= -300`), після завершення процесу управління мотор-редуктором, на дисплеї відобразиться значення -299 мкм. Таким чином помилка регулювання склала 0,001. мм.

На рисунку 4.9 відображено результат роботи програми.

З порівняння показів значень довжини на дисплеї та реальної зміни довжини переміщення, можна зробити висновок, що розроблений програмний код керування мотор-редуктором пройшов функціональне тестування.

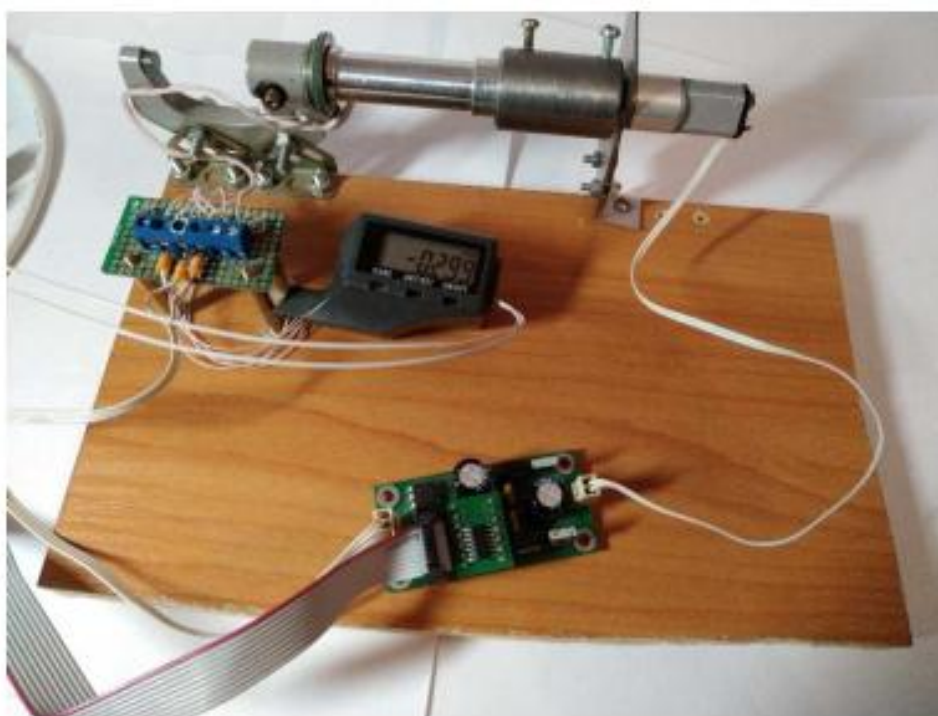


Рисунок 4.9 – Результат роботи програми за значенням -300 мкм.

Останнім етапом розробки системи управління шестикоординатним пристроєм є розробка програмного забезпечення (ПЗ) для кожного з блоків, а також проведення функціонального тестування ПЗ та всієї системи в цілому.

4.5 Тестування системи керування шестикоординатним пристроєм позиціювання

Для тестування системи керування шестикоординатним пристроєм необхідно зібрати друкований вузол блоку прийому/передачі інформації. З огляду на відсутність можливості виготовлення друкованої плати для блоку прийому/передачі інформації було прийнято рішення зібрати друкований вузол на макетній платі з використанням методу навісного монтажу.

Зовнішній вигляд друкованого вузла блоку керування електродвигуном, зібраного на макетній платі, зображено на рисунку 4.10.

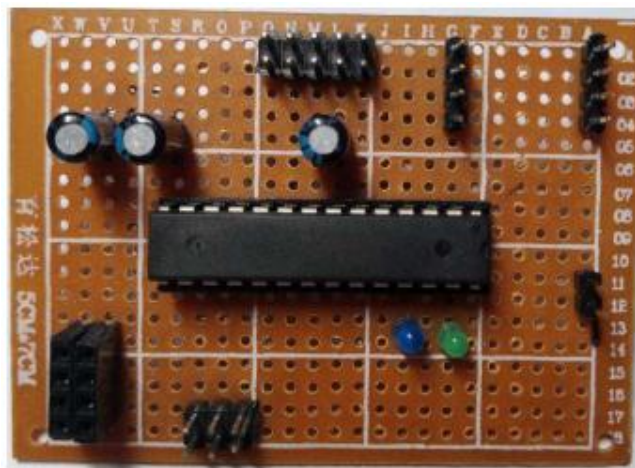


Рисунок 4.10 – Зовнішній вигляд друкованого вузла блоку керування.

Розроблено програмний код для МК ATmega8A. У цьому програмному коді реалізовано алгоритм обміну інформацією між блоком прийому/передачі та ПК за протоколом USART. Також реалізовано алгоритм обміну інформацією між блоком і модулем бездротової передачі інформацією за протоколу SPI.

У програмному коді реалізовані алгоритми обміну інформацією між центральним блоком управління та модулем бездротової передачі інформації, а також між цим блоком та блоком управління електродвигуном. Обмін інформацією здійснюється за протоколом SPI.

У програмному коді МК ATtiny20 реалізовані алгоритми зчитування інформації з датчика ОС, керування мотор-редуктором за ПІД-законом, обмін інформацією з центральним блоком керування протоколом SPI.

У програмному коді для МК ATmega162 реалізовані алгоритми обміну інформацією між центральним блоком управління та модулем бездротової передачі інформації, а також між цим блоком та блоком управління електродвигуном.

У програмному коді для МК ATtiny20 також реалізовані алгоритми зчитування інформації з датчика ОС, управління мотор-редуктором за ПІД-законом, обмін інформацією з центральним блоком управління протоколом SPI.

Для надсилання інформації з ПК на блок прийому/передачі використовується термінальна програма Terminal 1.9 послідовного порту.

Інтерфейс термінальної програми «Terminal 1.9» зображено рисунку 4.11.

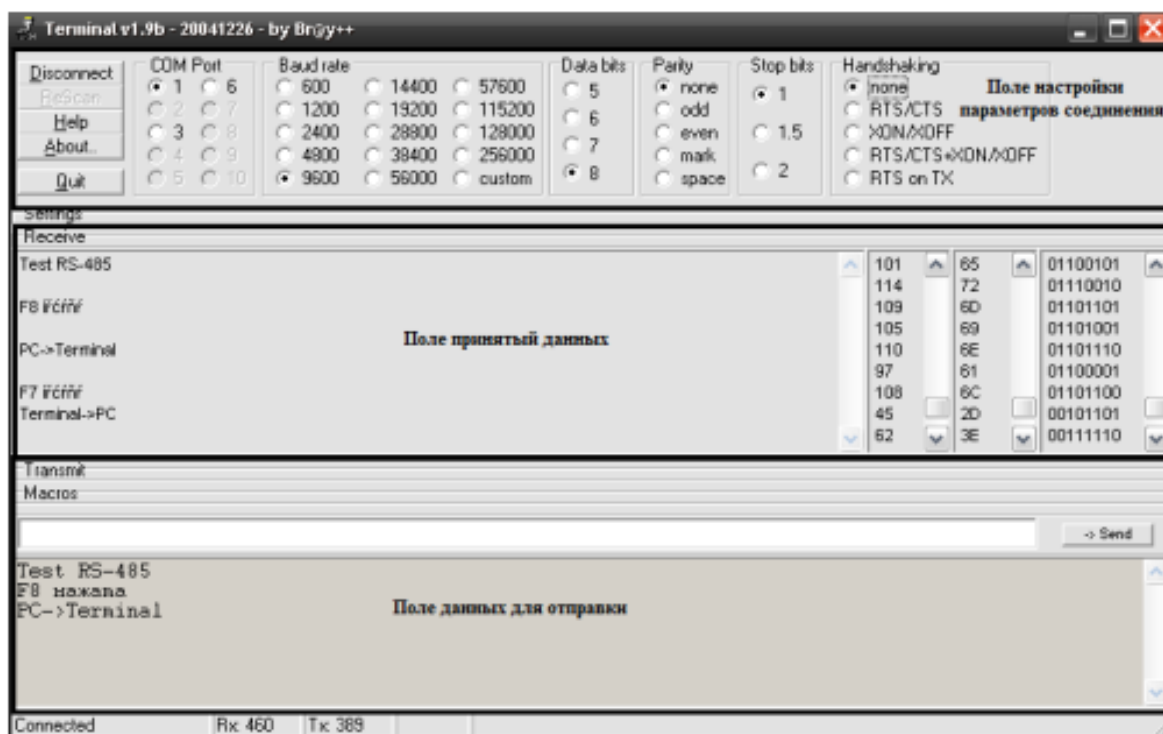


Рисунок 4.11 – Інтерфейс термінальної програми

Перед початком тестування системи управління необхідно виконати такі операції:

- завантажити у кожний МК відповідне ПЗ;
- підключити модулі бездротової передачі до блоку приймання/передачі та центрального блоку управління;
- підключити перетворювач інтерфейсів до блоку прийому/передачі інформації;
- підключити перетворювач інтерфейсів до ПК;
- підключити дисплей вимірювального вузла до центрального блоку керування;
- центральний блок керування з'єднати з блоком керування електродвигуном;
- підключити блок керування електродвигуном до випробувального стенду;
- підключити живлення до центрального блоку керування;
- налаштувати параметри обміну даними в термінальній програмі.

Після виконання всіх операцій, описаних вище, можна приступити до тестування системи. Введемо в поле для надсилання даних термінальної програми значення -450 (рисунок 4.12).

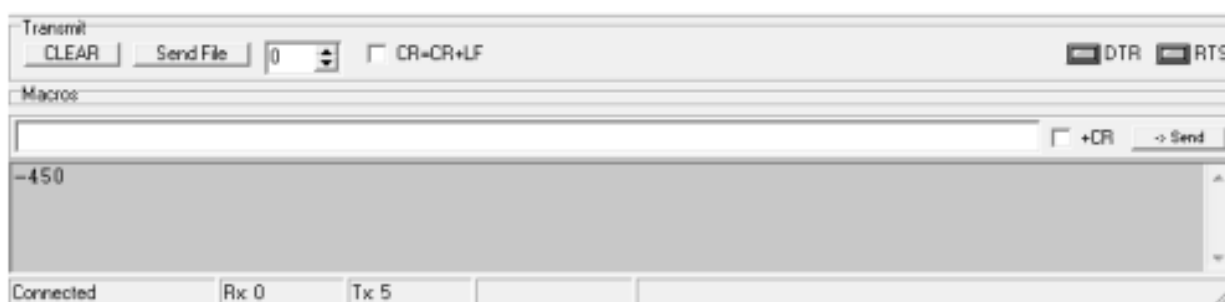


Рисунок 4.12 – Поле для надсилання даних із введеним значенням довжини «-450»

Після того як було введено значення та натиснута клавіша «Enter», на блоці прийому/передачі загоряється світлодіод, це говорить про те, що дані

успішно відправлені бездротовим каналом зв'язку. Дані приймаються центральним блоком керування та передаються на блок керування електродвигуном. Відповідно до заданого закону регулювання мотор-редуктор починає обертати шток вимірювального вузла. Коли на дисплеї з'являється значення -0,450, двигун зупиняється (рисунок 4.13).

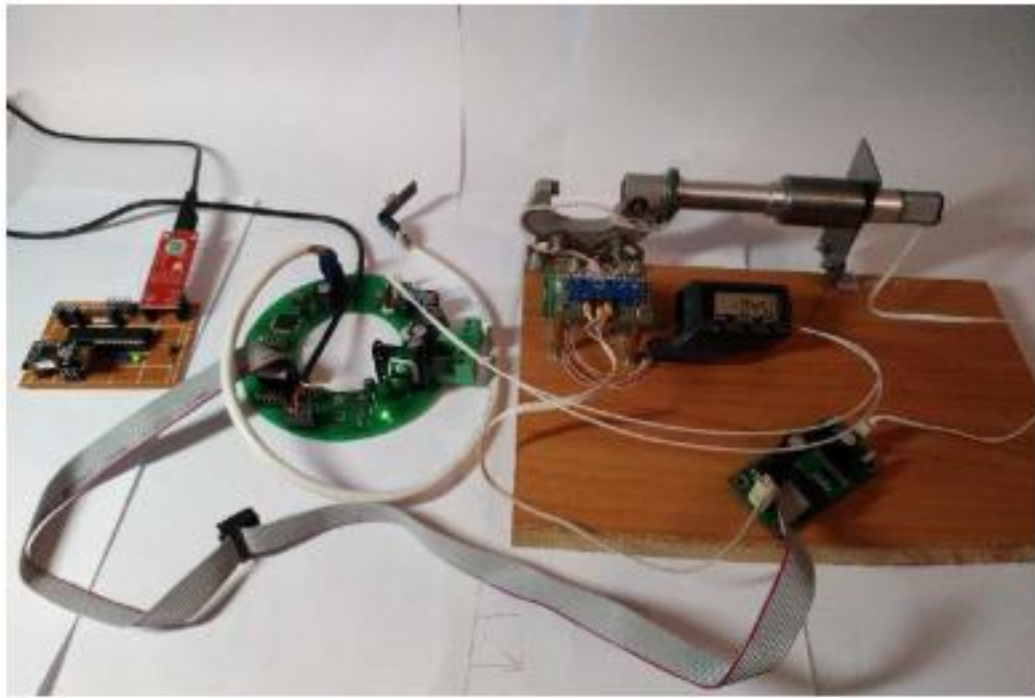


Рисунок 4.13 – Тестування системи керування (значення -450)

Якщо ввести в термінальній програмі значення +250 (рисунок 4.14), двигун почне обертатися у зворотний бік.

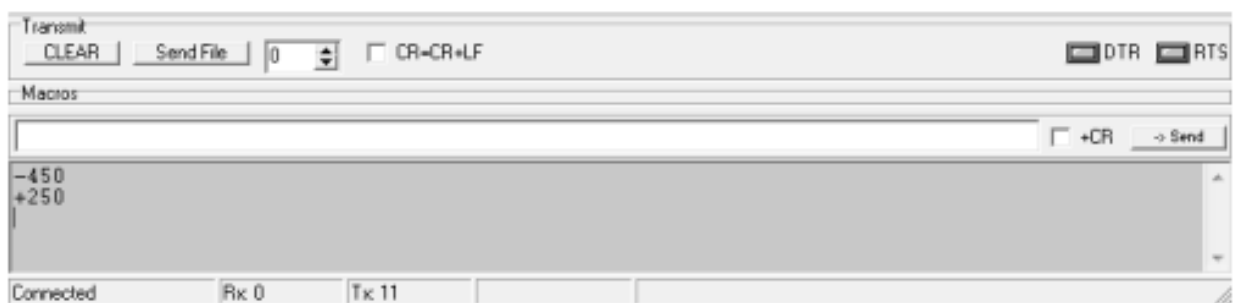


Рисунок 4.14 – Поле для надсилання даних із введеним значенням довжини 250

Після того, як на дисплеї вимірювального вузла з'явилося значення 0,252, двигун зупинився (рисунок 4.15).

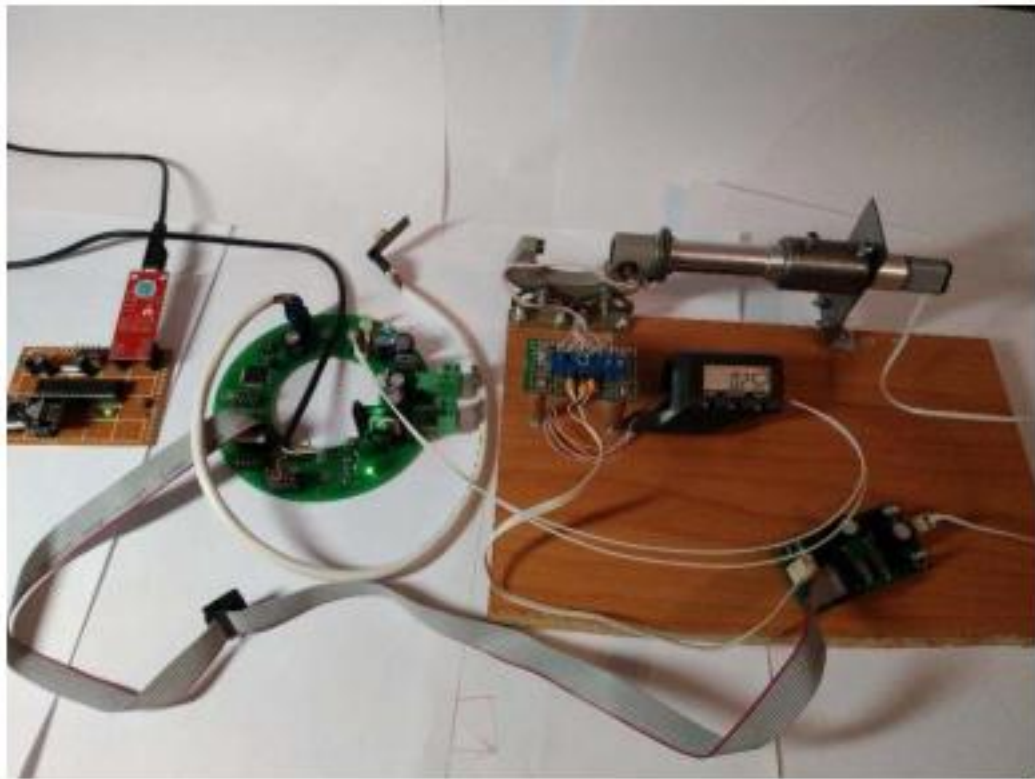


Рисунок 4.15 – Тестування системи керування (значення 250)

На підставі цього можна зробити висновок про те, що розроблене програмне забезпечення для мікроконтролерів, розроблений блок прийому/передачі працездатні. На даний момент розроблена система управління здатна керувати зміною однієї штанги об'єкта автоматизації.

ВИСНОВКИ

В результаті виконання кваліфікаційної роботи було розроблено систему управління шестикоординатного позиціонуючого пристрою з безпроводним каналом передачі інформації та протестовано її працездатність на дослідному стенді. Для цього виконано ряд поставлених задач.

1. Проаналізовано будову шестикоординатного позиціонуючого пристрою та його складових компонентів.
2. Побудовано кінематичну модель пристрою необхідної для забезпечення коректного позиціонування та правильної роботи пристрою.
3. Розроблено структурну схему системи управління шестикоординатним пристроєм позиціонування.
4. Розроблено центральний блок управління пристроєм.
5. Розроблено модуль бездротової передачі інформації.
6. Розроблено блок керування електродвигуном пристрою.
7. Розроблено блок прийому/передачі інформації для дистанційного управління.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Конспект лекцій з курсу “Автоматизація виробничих процесів” для студентів спеціальності 181 «Харчові технології» / В.Б.Савків, Р.І.Михайлишин, І.Р.Козбур. – Тернопіль: ТНТУ, 2018. – 89 с.
2. Технічні характеристики цифрового мікрометра MDC-25MX. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.mitutoyo.com/wp-content/uploads/2014/08/2145-MDC-MX.pdf>.
3. Каталог продукції компанії KYSAN Electronics: Spur Geared Motors LS-16GA030-50. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.kysanelectronics.com/Catalog/Catalog.pdf>.
4. К. Б. Остапченко. Робототехнічні системи та комплекси: Алгоритмізація і верифікація управління. Комп’ютерний практикум. Навчальний посібник. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського. – 2022. – 144с.
[Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/0c7bacd5-3fbd-4c5b-8af4-38b37bca7184/content>.
5. Технічні характеристики мікроконтролера ATmega162. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-2513-8-bit-AVR-Microncontroller-ATmega162_Datasheet.pdf.
6. Технічні характеристики монітора живлення MCP120-450DI/TO. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/11184d.pdf>.
7. Технічні характеристики стабілізатора напруги L7805. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://users.ece.utexas.edu/~valvano/Datasheets/L7805.pdf>.
8. Технічні характеристики стабілізатора напруги KP142EH5Б. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://static.chipdip.ru/lib/491/DOC001491784.pdf>.

9. Технічні характеристики стабілізатора напруги MCP1700T.
[Електронний ресурс]. Режим доступу:
<https://static.chipdip.ru/lib/276/DOC000276804.pdf>.
12. Технічні характеристики стабілізатора напруги KP1158EH3B.
[Електронний ресурс]. Режим доступу:
<https://www.promelec.ru/pdf/1158en.pdf>.
11. Технічні характеристики модуля бездротової передачі інформації nRF24L01. [Електронний ресурс]. Режим доступу:
[https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/SMD/nRF24L01Pluss Preliminary Product Specification v1_0.pdf](https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/SMD/nRF24L01Pluss_Preliminary_Product_Specification_v1_0.pdf)
12. Технічні характеристики мікроконтролера ATtiny20. [Електронний ресурс]. Режим доступу:
http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/atmel-8235-8-bit-avr-microcontroller-attiny20_datasheet.pdf.
13. Технічні характеристики операційного підсилювача LM358L
[Електронний ресурс]. Режим доступу:
<http://www.unisonic.com.tw/datasheet/LM358.pdf>.
14. Технічні характеристики мікроконтролера ATmega8A.
[Електронний ресурс]. Режим доступу:
<https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Microchip%208bit%20mcu%20AVR%20ATmega8A%20data%20sheet%2040001974A.pdf>.
15. Каталог продукції компанії "Телеметрія": Перетворювач інтерфейсів RDC1-USB-UART. [Електронний ресурс]. Режим доступу:
[https://telemetry.ru/catalog/preobrazovateli_interfeysov/rdc1_usb_uart_preobrazovatel_usb_uart_s_vozmozhnostyu /](https://telemetry.ru/catalog/preobrazovateli_interfeysov/rdc1_usb_uart_preobrazovatel_usb_uart_s_vozmozhnostyu/).
16. Технічні характеристики мікросхеми USBLC6-2. [Електронний ресурс]. Режим доступу:
<https://www.st.com/resource/en/datasheet/CD00050750.pdf>.
17. Технічні характеристики кварцового резонатора HC-49U.
[Електронний ресурс]. Режим доступу:

<http://www.tdmegalit.ru/upload/iblock/59b/Quarz.pdf>.

18. ДСТУ 2783-94 «Монтаж електричної радіоелектронної апаратури та приладів. Загальні вимоги до монтажу виробів електронної техніки та електротехнічних на друковані плати»

19. ДСТУ (ГОСТ 11284-75). «Наскрізні отвори під кріпильні деталі»

20. ДСТУ (ГОСТ 23751-86) «Плати друковані. Основні параметри конструкції»

21. ДСТУ (ГОСТ 10316-78). «Гетинакс та склотекстоліт фольговані. Технічні умови».

22. ДСТУ (ГОСТ 21931-76). «Припої олов'яно-свинцеві у виробках.» 23. ШІМ-регулятор оборотів. [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://www.motor-r.info/p/blog-page_26.html.

24. Технічні характеристики РКІ LM016L. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.picaxe.com/docs/led008.pdf>.

ДОДОТКИ