

Вінницький національний технічний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)

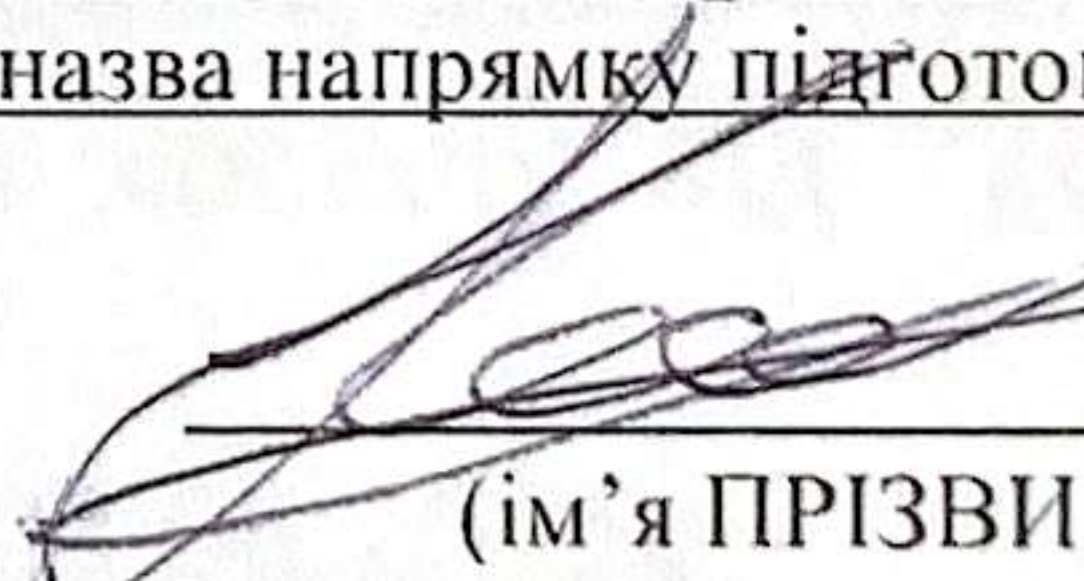
Факультет електроенергетики та електромеханіки
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

Бакалаврська кваліфікаційна робота на тему:

**«МОДЕРНІЗАЦІЯ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ
СЕРВОПРИВОДА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ»**

Виконав: студент 4 курсу, групи ЕМСА-23мс
спеціальності 141 – Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

 Вадим КРАВЕЦЬ
(ім'я ПРИЗВИЩЕ, підпис)

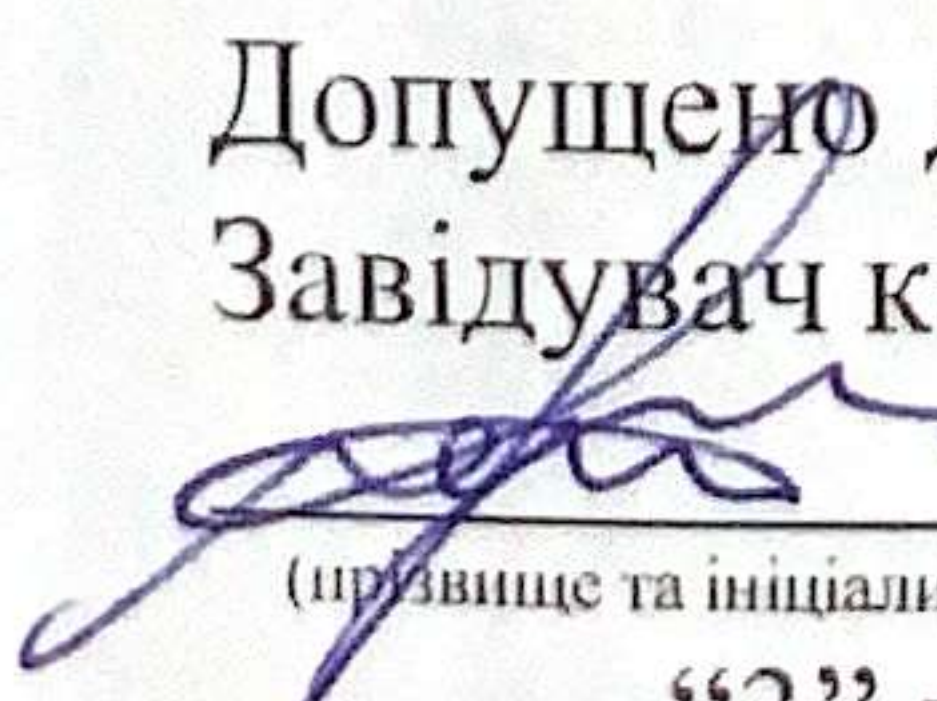
“20” травня 2025 р.

Керівник  к.т.н., доц. кафедри КЕМСК
Дмитро ПРОЦЕНКО
(ім'я ПРИЗВИЩЕ, підпис)

“20” травня 2025 р.

Рецензент  проф., проф. каф. ЕС
Олександр РУБАНЕНКО
(ім'я ПРИЗВИЩЕ, підпис)

“10” червня 2025 р.

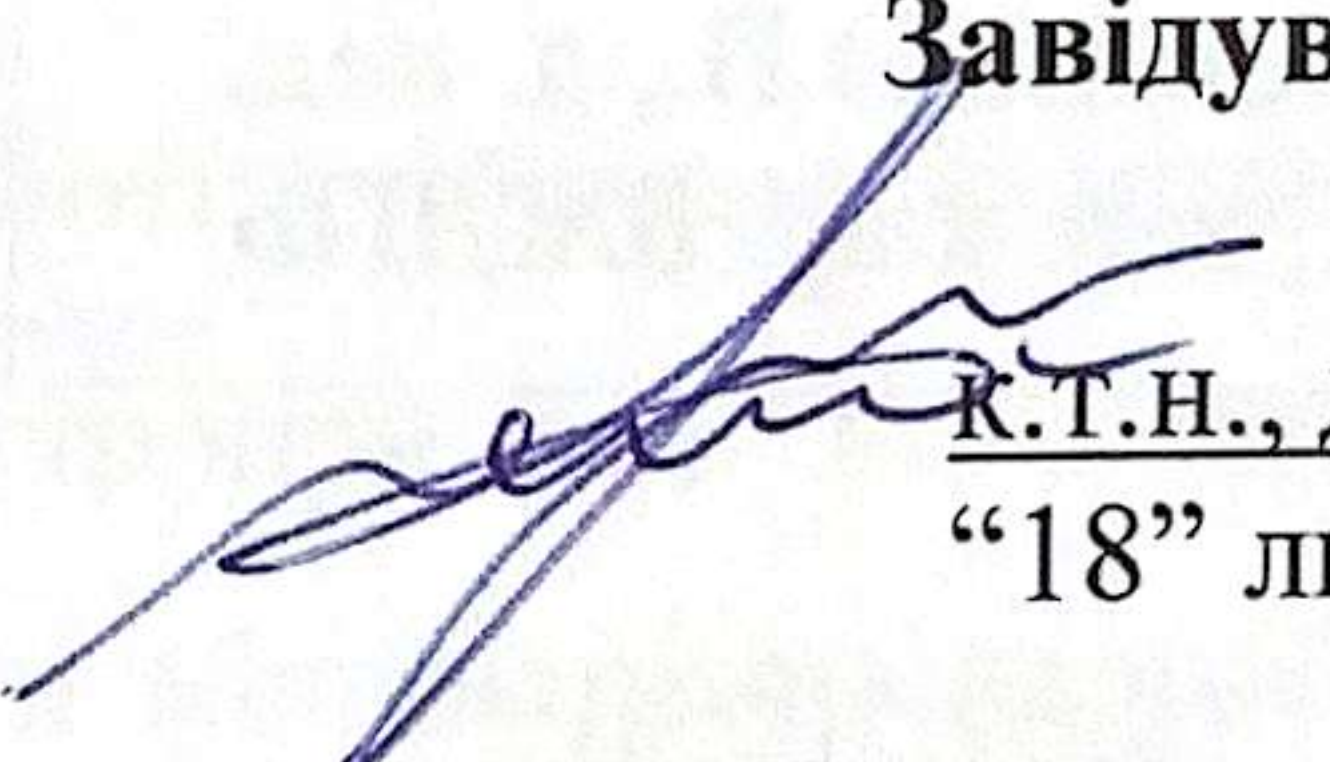
Допущено до захисту
Завідувач кафедри КЕМСК
 Микола МОШНОРИЗ
(прізвище та ініціали)

“3” червня 2025 р.

Вінницький національний технічний університет
Факультет Електроенергетики та електромеханіки
Кафедра Комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Галузь знань 14 – Електрична інженерія
Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітня програма «Електромеханічні системи автоматизації»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри КЕМСК


К.Т.Н., доц. Микола МОШНОРИЗ
“18” лютого 2025 року

З А В Д А Н Н Я

НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Кравцю Вадиму Олексійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Модернізація лабораторного стенда для дослідження сервопривода постійного струму

керівник роботи Проценко Дмитро Петрович, к.т.н., доц.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “20” березня 2025 року
№97

2. Строк подання студентом роботи 03.06.2025р.

3. Вихідні дані до роботи: Номінальна напруга живлення – 220 В, напруга живлення двигуна – 24В, тип регулятора – релейний із зоною нечутливості, закон регулювання – пропорційний (П), діапазон переміщення – 0-170 мм, роздільна здатність енкодера – 282 імп/об., коефіцієнт переміщення 96 імп/мм, інтерфейс користувача дисплей, збереження налаштувань – енергонезалежна пам'ять, додаткові сенсори – кінцевий вимикач нульового положення (NO).

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):
Побудова концепції механічної частини стенда для дослідження сервоприводів; Розробка кінематичної схеми та розрахунок потужності двигуна; вибір та проектування апаратного забезпечення стенда; Розробка схеми електричної структурної, та програмного забезпечення стенда; Розробка розробка схеми електричної принципової та вибір її елементів; Розрахунок і побудова статичних характеристик електропривода; Моделювання сервопривода; вибір підходів щодо побудови інформаційно вимірювальної системи стенда; Охорона праці.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):

Технічні характеристики стенда для дослідження сервопривода постійного струму. Схема розташування елементів стенда. Електрична схема стенда. Алгоритм роботи програми системи керування серводвигуном. Модель сервопривода в середовищі Proteus. Модель сервопривода в середовищі Matlab Simulink . Графічне меню та програмна реалізація запам'ятовування поточної позиції та пошуку нульової точки. Висновки.

6. Консультанти розділів роботи

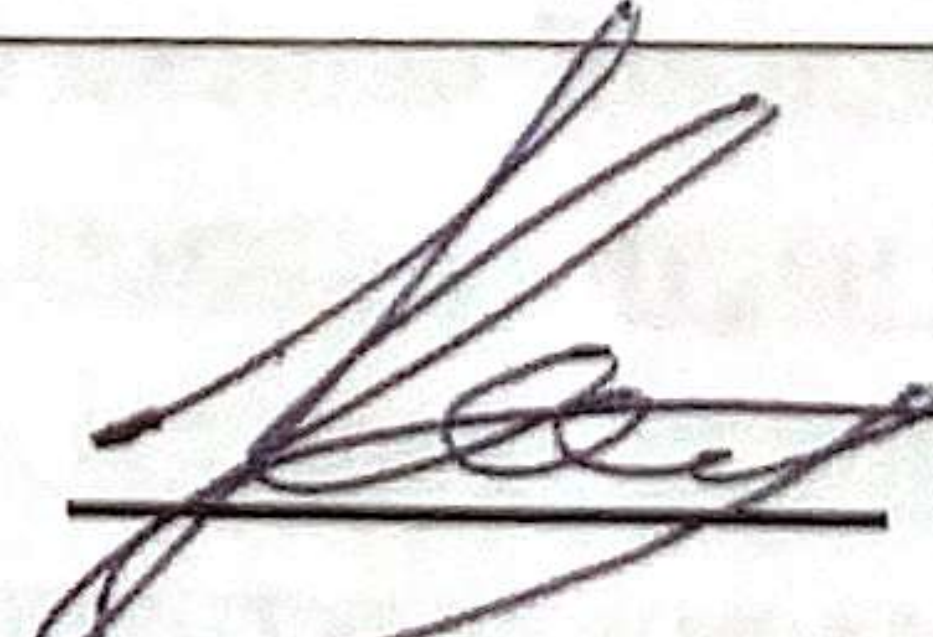
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	Проценко Д. П., к.т.н., доц. каф. КЕМСК	18.02.2025	06.05.2025
Охорона праці	Кобилянський О.В., д. пед.н., зав. каф. БЖДПБ	18.02.2025	20.05.2025

7. Дата видачі завдання 18.02.2025р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Формування та затвердження теми бакалаврської кваліфікаційної роботи	18.02.2025	
2	Виконання спеціальної частини БКР. Перший рубіжний контроль виконання БКР	06.05.2025	
3	Виконання спеціальної частини БКР. Другий рубіжний контроль виконання БКР	20.05.2025	
4	Виконання розділу «Охорона праці»	20.05.2025	
5	Попередній захист БКР	03.06.2025	
6	Нормоконтроль БКР	03.06.2025	
7	Рецензування БКР	10.06.2025	
8	Захист БКР	19.06.2025	

Здобувач освіти


(підпис) В. О. Кравець
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи


(підпис) Д. П. Проценко
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Кравець Вадим Олексійович Модернізація лабораторного стенда для дослідження сервопривода постійного струму. Бакалаврська кваліфікаційна робота. – Вінниця: ВНТУ, 2025. – 110 с. Бібл.:16. Іл.:58. Табл.:16.

В даній бакалаврській роботі здійснено комплекс робіт по модернізації стенда для дослідження електропривода позиціювання (сервопривода) з використанням енкодерів на базі мікроконтролерної платформи Arduino, яка виконує функції пристрою керування.

Основну роль відіграє можливість розширення функціональних можливостей стенда за рахунок введення інформаційно-вимірювальної системи, яка дозволяє знімати статичні та динамічні характеристики роботи електропривода позиціювання.

Розроблено програмне забезпечення дозволяє зберігати налаштування та поточну позицію в енергонезалежній пам'яті, що призводить до відсутності помилок при вимкненні чи скиданні контролера. Програма керуючого контролера передбачає зміну налаштувань (швидкість переміщення, зона нечутливості, параметри регулятора) окрім заданого значення координати. Розроблено механізм автоматичного калібрування та пошуку нульової точки. Синтезовано комп'ютерні моделі для віддаленого налаштування програмного та апаратного забезпечення стенда.

Ключові слова: сервопривод, Arduino, вимірювання, енкодер.

THE SUMMARY

Kravets Vadym Oleksiyovich Modernization of a laboratory stand for research of a DC servo. Bachelor's thesis. - Vinnytsia: VNTU, 2025. - 110 p. Bibl .: 16. Fig .: 58. Table: 16.

In this bachelor's thesis a set of works on modernization of the stand for research of the electric drive of positioning (servodrive) with use of encoders on the basis of the Arduino microcontroller platform which carries out functions of the control device is carried out.

The main role is played by the possibility of expanding the functionality of the stand through the introduction of information and measuring system, which allows you to remove the static and dynamic characteristics of the electric drive positioning.

The developed software allows you to save the settings and current position in non-volatile memory, which leads to the absence of errors when turning off or resetting the controller. The program of the control controller provides for changing the settings (speed of movement, dead zone, regulator parameters) in addition to the set coordinate value. The mechanism for automatic calibration and zero point search has been developed. Computer models have been synthesized for remote configuration of the stand software and hardware.

Keywords: servo, Arduino, measurement, encoder.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
1 ПОБУДОВА КОНЦЕПЦІЇ МЕХАНІЧНОЇ ЧАСТИНИ СТЕНДА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ СЕРВОПРИВОДІВ	8
1.1 Особливості та технічні характеристики сервоприводів	8
1.2 Класифікація енкодерів	13
1.3 Особливості інкрементних енкодерів	15
1.4 Обробка і перетворення сигналів в енкодерів	16
1.5 Розробка схеми розташування елементів стенда.....	24
2 РОЗРОБКА КІНЕМАТИЧНОЇ СХЕМИ ТА РОЗРАХУНОК ПОТУЖНОСТІ ДВИГУНА	25
2.1 Розрахунок статичних моментів опору механізму	25
2.2 Розрахунок і побудова тахограм робочого механізму	28
2.3 Попередній розрахунок потужності приводного двигуна.....	29
2.4 Розробка кінематичної схеми	30
3. ВИБІР ТА ПРОЕКТУВАННЯ АПАРАТНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТЕНДА	33
3.1 Проектування гвинтової передачі	33
3.3 Вибір двигуна	36
3.2 Вибір корпусних підшипників.....	37
4 РОЗРОБКА СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СТРУКТУРНОЇ, ТА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТЕНДА	39
5 РОЗРОБКА СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ ТА ВИБІР ЇЇ ЕЛЕМЕНТІВ	46
5.1 Розрахунок та вибір елементів апаратної платформи для реалізації системи електропривода	46

6 РОЗРАХУНОК І ПОБУДОВА СТАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОПРИВОДА	58
7 МОДЕЛЮВАННЯ СЕРВОПРИВОДА	62
8 ВИБІР ПІДХОДІВ ЩОДО ПОБУДОВИ ІНФОРМАЦІЙНО ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ СТЕНДА.....	71
8.1 Arduino як базова інтегрована система керування	72
8.2 MATLAB/Simulink - середовище ІВС та аналізу динаміки.....	73
8.3 CODESYS VERSION 2.3 для розробки ІВС.....	74
8.4 LabVIEW як інструмент візуалізації.....	75
8.5 Порівняння та вибір підходу.....	76
9 ОХОРОНА ПРАЦІ	79
9.2. Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії.....	82
9.2.1. Мікроклімат	82
9.2.2. Склад повітря робочої зони	82
9.2.3. Виробниче освітлення	83
9.2.4. Виробничий шум.....	84
9.2.5. Виробничі вібрації	85
9.3. Технічні рішення з пожежної безпеки	86
ВИСНОВКИ.....	89
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	90
ДОДАТОК А.....	92
ДОДАТОК Б	95
ДОДАТОК В.....	100
ДОДАТОК Г	101

ВСТУП

Становлення новітніх електропривідних технологій потребує постійного вдосконалення технічної бази освітніх лабораторій. Наявні в користуванні стенди, що містять електромеханічні установки з параметричним контролем за допомогою аналогових вимірювачів, мають обмежену інформативність. У лабораторних комплексах, де здійснюється аналіз електромеханічних автоматизованих систем, представлений широкий набір обладнання, до якого входять різні типи приводів, перетворювачі енергії, виконавчі механізми, а також регулятори, що забезпечують стабільне функціонування приводних систем при випадкових зовнішніх впливах на систему управління.

На сьогоднішній день персональний комп'ютер активно застосовується для оброблення та збереження даних вимірювань, а також для керування дослідницькими установками в режимі реального часу. Підключивши зовнішній пристрій збору інформації, його можливо трансформувати в універсальну лабораторну платформу.

Для створення програм для таких пристроїв можуть застосовуватися загальноприйняті мови програмування, як-от C, Pascal та інші. Однак цей процес є складним і вимагає від користувача глибоких знань та досвіду. З метою спрощення розробки програмного забезпечення для вимірювальної апаратури були розроблені спеціалізовані середовища, побудовані на основі графічного візуального програмування. Вони оснащені великим набором готових функціональних блоків, що дозволяють значно полегшити реалізацію типових дій і вирішення окремих задач, пов'язаних з автоматизацією наукових експериментів та вимірювань. Такі системи автоматично виконують низку функцій, які зазвичай потребують ручної реалізації, тим самим звільняючи користувача від необхідності працювати з низькорівневими аспектами програмування.

Отже, на сьогоднішній день набуває особливої важливості створення нових та оновлення вже наявних лабораторних стендів, призначених для

вивчення регуляторів і аналізу їхніх характеристик із застосуванням сучасних технічних засобів та програмного забезпечення.

Мета і завдання дослідження. Завданням цієї роботи є вдосконалення процесу дослідження параметрів серводвигунів на постійному струмі.

Для реалізації цієї мети необхідно вирішити такі ключові питання:

- здійснити огляд і оцінку існуючих методів побудови цифрових систем керування, що використовують серводвигуни постійного струму;
- розробити електричну структурну схему лабораторного стенда;
- реалізувати програмне забезпечення для керування стендом і провести випробування його роботи в статичних та динамічних режимах, а також за умов імітації реального технологічного процесу;
- створити комп'ютерну модель серводвигунів постійного струму для подальшого аналізу та досліджень.

Об'єкт дослідження – лабораторний стенд для дослідження характеристик сервопривода постійного струму.

Предмет дослідження – динамічні та статичні характеристики замкнутої системи керування електроприводом постійного струму з енкодером.

У ході дослідження було використано такі підходи: принципи автоматичного регулювання для проведення структурного аналізу системи електропривода та проектування регуляторів, а також алгоритмічні методи для розробки та налагодження програмного забезпечення мікроконтролера.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що на основі теоретичних розробок створено як програмні, так і апаратні компоненти, зокрема:

- спроектовано структурну, принципову та монтажну електричні схеми лабораторного стенда, призначеного для дослідження динамічних властивостей електропривода постійного струму з цифровим енкодером, з можливістю цифрового регулювання положення виконавчого елемента;
- здійснено підбір механічних і електронних складових, необхідних для

реалізації стенда з можливістю налаштування параметрів керування;

- створено інформаційно-вимірювальну підсистему для графічного відображення характеристик роботи електроприводної системи;
- проведено оновлення наявної експериментальної установки для забезпечення її відповідності сучасним вимогам.

1 ПОБУДОВА КОНЦЕПЦІЇ МЕХАНІЧНОЇ ЧАСТИНИ СТЕНДА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ СЕРВОПРИВОДІВ

1.1 Особливості та технічні характеристики сервоприводів

Сервопривод — це пристрій, який поєднує в собі електродвигун, механічну передачу та датчик положення, що дозволяє перетворювати керуючий сигнал у відповідне переміщення або обертальну швидкість. Його ключова особливість — можливість точно визначати кутове положення вала.

На відміну від звичайних електродвигунів, сервопривод дає змогу задавати та підтримувати точне значення кута повороту. Під терміном «сервоприводи» розуміють усі типи механічних систем, які оснащені датчиком для вимірювання певного параметра та блоком керування, здатним автоматично утримувати ці параметри відповідно до заданих зовнішніх умов.

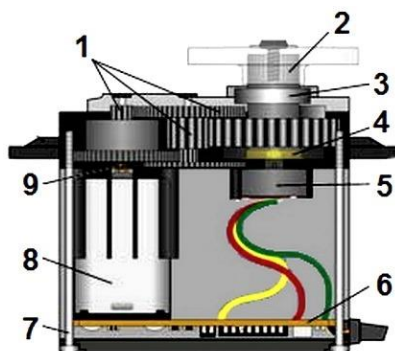


Рисунок 1.1 – Основні елементи серводвигуна

На рисунку 1.1: 1 – шестерні редуктора; 2 – вихідний вал; 3 – підшипник; 4 – нижня втулка; 5 – потенціометр (сенсор положення); 6 – плата управління; 7 – гвинти корпусу; 8 – електродвигун постійного струму; 9 – ведуча шестерня двигуна.

Для того щоб перетворити електричну енергію на механічний рух, використовується електродвигун. У складі приводу присутній мотор у парі з редуктором. Редуктор відіграє важливу роль у зменшенні обертальної

швидкості двигуна, оскільки безпосередня швидкість обертання є занадто високою для точного позиціонування за кутом повороту.

Редуктор являє собою конструкцію, що містить корпус із розміщеними всередині валами та зубчастими колесами, які забезпечують передавання та трансформацію обертового моменту. Керуючи вмиканням і вимиканням електродвигуна, можна здійснювати рух вихідного вала редуктора, з'єднаного із зубчастим механізмом сервоприводу. До цього вала можна приєднати елемент або вузол, який потребує регулювання.

Для відстеження положення вала обов'язковим є застосування сенсора зворотного зв'язку, здатного перетворювати кут повороту в електричний сигнал, що надалі використовується для корекції керування.

Такий тип сенсора відомий як енкодер. У ролі енкодера часто використовують потенціометр. При обертанні повзунка потенціометра змінюється його опір, і ця зміна є лінійно залежною від кута обертання. Завдяки цій властивості можна точно визначати положення об'єкта та здійснювати його позиціонування відповідно до заданих параметрів. Це дозволяє ефективно керувати механізмом, встановлюючи його у визначене положення.

Окрім згаданих вище електродвигуна, редуктора та потенціометра, сервоприводи також містять електронну плату, яка відповідає за обробку вхідного сигналу від потенціометра, здійснює порівняння з еталонним значенням і, залежно від результату, вмикає або вимикає двигун. Цей електронний блок реалізує принцип дії системи з негативним зворотним зв'язком, що забезпечує точне позиціонування.

Сервопривод підключається за допомогою трьох провідників: два з них подають живлення на двигун, а третій використовується для подання керуючого сигналу, який визначає бажане положення вала.

Окрім електродвигуна, приводом може слугувати інший механізм, наприклад, пневматичний циліндр зі штоком. Для зворотного зв'язку застосовують різні типи сенсорів, такі як датчики кута повороту або пристрої,

що працюють на основі ефекту Холла. Керуючий модуль виконує функції сервопідсилювача, частотного перетворювача або окремого інвертора. В деяких випадках він також включає в себе генератор управляючого сигналу.

Для забезпечення плавного гальмування чи розгону з метою уникнення надмірних динамічних навантажень на двигун застосовують більш складні схеми мікроконтролерів керування. Вони дозволяють більш точно контролювати положення робочого елемента. Аналогічний принцип використовується в приводах для позиціонування головок жорстких дисків комп'ютерів.

Основні параметри, які характеризують сервоприводи:

- обертовий момент є ключовим параметром сервопривода. У технічній документації зазвичай наводять кілька значень моменту, що відповідають різним рівням напруги живлення.
- швидкість обертання також є важливою характеристикою. Вона зазвичай вимірюється як час, необхідний для повороту вихідного вала на 60 градусів. Цей показник часто наводять для декількох значень напруги.
- за типом керування сервоприводи поділяються на аналогові та цифрові.
- максимальний кут повороту — це найбільший кут, на який може обертатися вихідний вал. Зазвичай це 180 або 360 градусів. Існують також двигуни з безперервним обертанням, які можна отримати шляхом модернізації стандартного сервопривода для забезпечення постійного руху.

Сервоприводи для обертального руху знаходять застосування в промислових роботах, верстатах з числовим програмним керуванням (ЧПУ), поліграфічному обладнанні, промислових швейних машинах, пакувальних механізмах, різноманітних приладах та у моделізмі авіатехніки.

Іншим методом забезпечення точного позиціонування без використання сенсора зворотного зв'язку є застосування крокового двигуна. В такій системі

керування відраховує кількість необхідних імпульсів (кроків) від початкового положення. Точність позиціонування досягається за рахунок параметричних систем із негативним зворотним зв'язком, які утворюються взаємодією відповідних полюсів статора та ротора крокового двигуна. Контролер крокового двигуна активує певний полюс статора та генерує сигнал управління для відповідної параметричної системи.

Оскільки сенсор зазвичай відповідає за контроль положення приводного елемента, електричні сервоприводи мають такі переваги порівняно з кроковими двигунами:

- не висувають спеціальних вимог до типу і потужності двигуна та редуктора — можна використовувати практично будь-які варіанти (у той час як крокові двигуни здебільшого мають низьку потужність і працюють на невеликих швидкостях);
- забезпечують високу точність, автоматично коригуючи механічні люфти або електронні збої в приводі;
- мають широкий діапазон регулювання швидкості руху (крокові двигуни мають порівняно низьку максимальну швидкість);
- споживання енергії пропорційне навантаженню, тоді як кроковий двигун зазвичай постійно отримує номінальну напругу з резервом на перевантаження.

Недоліки сервоприводів у порівнянні з кроковими двигунами:

- потреба в додатковому елементі — сенсорі положення;
- складніша конструкція керуючого блоку та логіки, оскільки треба обробляти сигнали датчика та визначати управляючі дії, тоді як у крокових двигунах використовується простий лічильник імпульсів;
- проблема утримання вала у фіксованому положенні: зазвичай це досягається постійним пригальмовуванням механізму або застосуванням черв'ячних/гвинтових передач, що ускладнює конструкцію і викликає

енергетичні втрати (крокові двигуни фіксують положення кожним кроком самі по собі);

- менший крутний момент при низьких швидкостях обертання;
- зазвичай сервоприводи мають вищу вартість порівняно з кроковими двигунами.

На рисунку 1.2 зображено стенд для дослідження серводвигуна постійного струму в лабораторії спеціальних електричних машин.

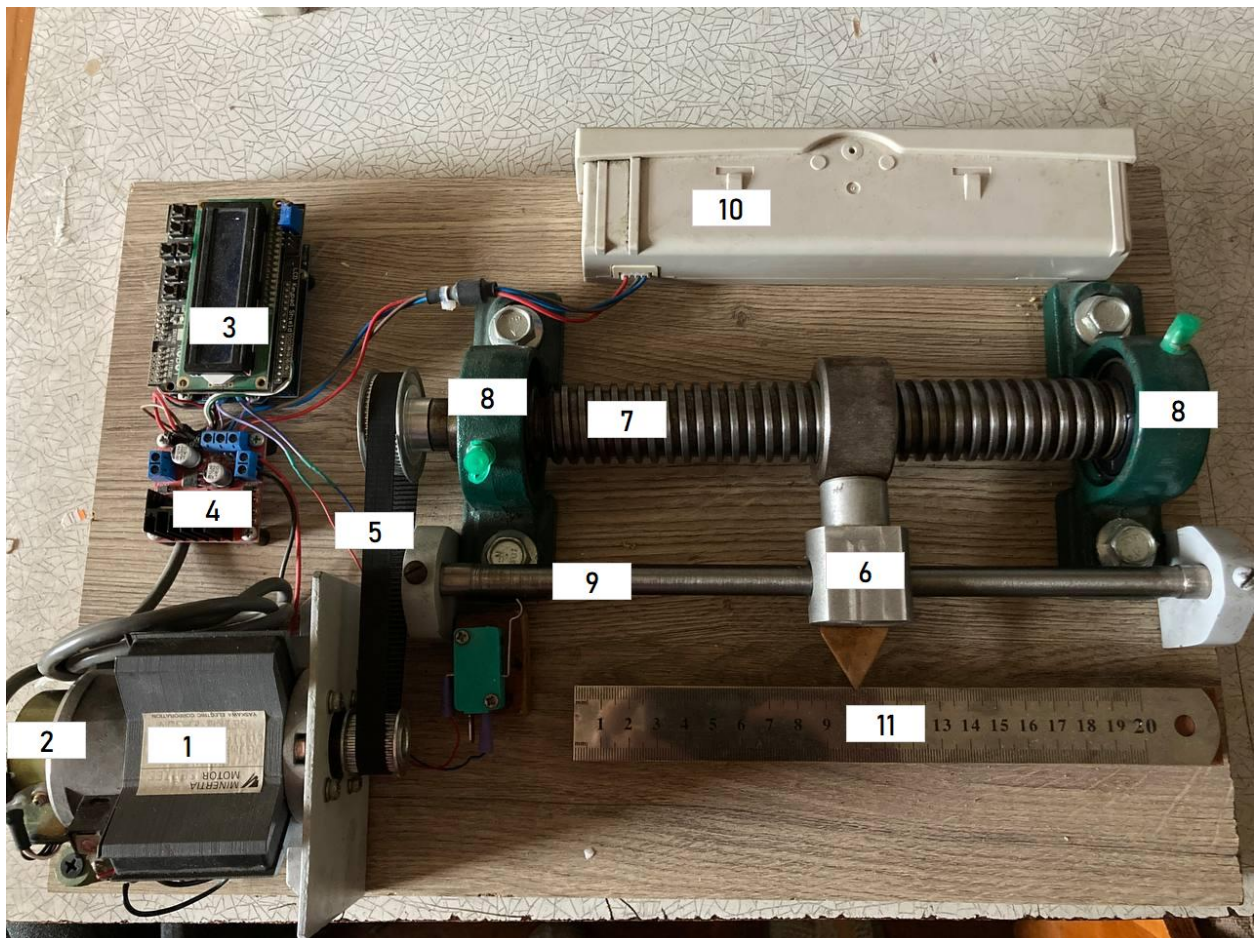


Рисунок 1.2 – Стенд для дослідження серводвигуна

Основними елементами стенда є: 1 – двигун постійного струму з постійними магнітами; 2 – вбудований енкодер двигуна; 3 – контролер керування з дисплеєм та кнопками керування; 4 – реверсивний драйвер двигуна; 5 – зубчата ремінна передача; 6 – стрілка позиціонування; 7 – гвинтова

передача; 8 – підшипники; 9 – горизонтальна направляюча; 10 – блок живлення; 11 – лінійка.

Необхідність модернізації даного стенда зумовлена такими ключовими недоліками:

1. Програмне забезпечення не підтримує збереження налаштувань та поточної позиції у енергонезалежній пам'яті, що призводить до втрати даних і можливих помилок після вимкнення або перезавантаження контролера.

2. Програма керуючого контролера не передбачає гнучкої зміни параметрів, таких як швидкість переміщення, зона нечутливості або параметри регулятора, окрім жорстко зафіксованого значення координати.

3. Відсутній механізм автоматичного калібрування стенда та пошуку нульової точки, що ускладнює запуск та підвищує ризик некоректної роботи системи.

4. Відсутність комп'ютерних моделей та інструментів для віддаленого налаштування програмного і апаратного забезпечення обмежує можливості адаптації та оптимізації роботи стенда.

1.2 Класифікація енкодерів

Ключовим компонентом стенда є енкодер — пристрій, який служить для перетворення кутового положення або лінійного зсуву в аналоговий чи цифровий пропорційний сигнал. Тобто енкодер виступає як сенсор, що фіксує кутові або лінійні переміщення.

Принцип роботи енкодера ґрунтується на перетворенні механічного руху у електричні імпульси чи сигнали.

Розрізняють наступні види енкодерів:

- інкрементні магнітні енкодери;
- інкрементні оптичні енкодери;
- абсолютні магнітні енкодери;
- абсолютні оптичні енкодери;

- абсолютні оптичні однообертові енкодери;
- абсолютні оптичні багатообертові енкодери;
- аналогові оптичні енкодери;
- аналогові магнітні енкодери;
- резольвери.

Як показано у наведених типах, енкодери поділяються на магнітні та оптичні.

Фізичний механізм перетворення кута або лінійного переміщення в електричний сигнал може здійснюватися за допомогою оптичного сканування — у цьому випадку енкодер належить до оптичного типу.

Якщо ж перетворення відбувається на основі магнітного зчитування сигналу, тоді такий енкодер класифікують як магнітний.

Сучасні енкодери діляться на кілька типів, які можна розділяти за різними ознаками. Енкодери можна розділити за такими основними факторами:

- за типом встановленого вала;
- за фізичним принципом роботи;
- за типом перетворення сигналів;
- по циклу оборотів роботи енкодера;
- за кількістю каналів енкодера;
- по типу вихідних інтерфейсів енкодера;
- за кількістю цифрових інтерфейсів;
- за ступенем пило-вологозахищеності.

Крім того, енкодери класифікують по фізичному принципу роботи, а саме:

- оптичні енкодери;
- магнітні енкодери;
- магнітно-резистивні енкодери.

У енкодері може перетворюватися як саме переміщення, так і швидкість такого переміщення.

Існують основні два класи енкодерів:

- інкрементальні енкодери;
- абсолютні енкодери.

1.3 Особливості інкрементних енкодерів

Інкрементальний енкодер — це імпульсний датчик, який рахує кількість імпульсів від початкової (референтної) мітки за один повний оберт диска, що дозволяє визначити кутове положення вала енкодера.

Цей тип енкодера генерує послідовність імпульсів — цифровий код, що відображає інформацію про кут повороту вала. Імпульси утворюються в результаті світлових переривань променя через отвори або мітки (риски) на диску енкодера (див. рисунок 1.3). Початок відліку одного обороту визначається наявністю стартової або референтної мітки, яка служить нульовою точкою відліку.

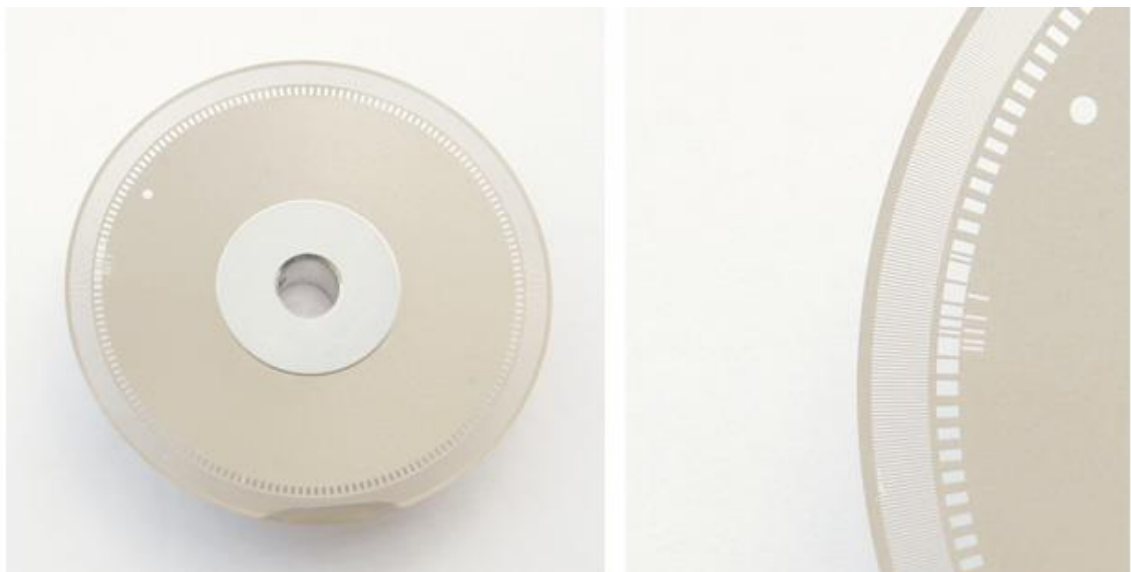


Рисунок 1.3 – Оптичний диск інкрементного енкодера

Основні мітки або риси, а також референтні (стартові) мітки, нанесені на добре відцентрований та вільно обертовий диск всередині енкодера. Положення цих стартових міток визначається першочергово після включення енкодера в

режим роботи — це необхідно для точного визначення початкової позиції вала. Такий процес ініціалізації забезпечує коректний відлік кутового положення під час подальшої роботи пристрою.

Дозвіл інкрементних енкодерів вимірюється в імпульсах за оберт.

У стані спокою (коли вал інкрементального енкодера не обертається) на його виході підтримується логічна одиниця — «1». Під час початку обертання в будь-якому напрямку один із виходів підключається до землі, створюючи логічний нуль — «0», а потім аналогічне підключення відбувається з іншим виходом.

У процесі обертання вала виходи по черзі відключаються від землі і знову переходять у стан логічної одиниці «1». Цей цикл повторюється до зупинки валу енкодера, утворюючи послідовність змін сигналів «0» і «1».

Напрямок обертання визначається за тим, який саме вихід першим підключився до землі. Підрахунок повних обертів виконується шляхом обчислення загальної кількості імпульсів, що генеруються диском енкодера за встановлений час, який задається вбудованим таймером.

1.4 Обробка і перетворення сигналів в енкодерів

Енкодер — це електронний пристрій, в конструкції якого використовуються цифрові мікросхеми та процесори, що формують сигнали у вигляді двійкового коду (Binary Code). Двійковий код являє собою певну послідовність символів «0» і «1». Саме двійковий код є основою функціонування будь-яких сучасних електронних пристроїв. У такому поданні всі цифрові дані складаються з набору бітів — послідовності нулів і одиниць.

Під час роботи енкодера відбувається процес оптичного зчитування сигналів: при механічному обертанні диска послідовно змінюється значення бітів — нулі переходять у одиниці, а одиниці — у нулі. Оптичне зчитування здійснюється одночасно з кількох доріжок, що дозволяє одночасно змінюватися значенням кількох бітів.

Наприклад, при зміні значення з 3 на 4 у двійковому коді (див. рисунок 1.4) всі три біти "011" (що відповідає числу 3) мають перейти в протилежний стан "100" (що відповідає числу 4). Проте в реальних умовах одночасна ідеальна зміна всіх бітів неможлива через фізичні мікровідхилення на малюнку диска енкодера. Це пов'язано з неможливістю виготовити абсолютно ідеальний диск без жодних відхилень. Будь-який малюнок (риски, мітки) містить певні фізичні відхилення, які називають «толерантностями». Через це виникають хаотичні переходи окремих бітів, що призводить до генерації некоректних значень. Наприклад, при переході бінарного числа "011" можуть з'явитися помилкові значення, такі як "000" замість правильного "100". Це означає, що стався збій у визначенні першого біта, внаслідок чого було отримано помилкове число "000" замість "100". Відхилення у 4 одиниці є суттєвим і свідчить про несистемний характер появи таких помилок.

Причина виникнення таких помилок полягає в мікровідмінностях малюнка диска та їхньому впливі на процес зчитування сигналів. Окремі біти змінюють свої стани неодноразово — деякі з них змінюються раніше, інші — пізніше. Реальні мітки на диску мають незначне зміщення відносно одна одної, що призводить до появи паразитних або помилкових кодів без чіткої закономірності. Для отримання достовірних даних при оптичному зчитуванні необхідно виявляти та відкидати такі некоректні значення.

біт 1 (LSB)																
біт 2																
біт 3																
біт 4 (MSB)																
Значення	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

Рисунок 1.4 – Двійковий код

За певних умов під час зчитування можуть виникати хаотичні або несинхронні помилки — тобто з'являються помилкові коди при одночасному

скануванні різних оптичних доріжок обертового диска енкадера. Внаслідок цих помилок обчислена позиція, яку видає енкадер, може бути некоректною. Тому для підвищення точності застосовують спеціалізовані алгоритми корекції помилок.

Одним із класичних методів корекції помилок у сигналах енкадера є використання так званого коду Грея.

Код Грея (Gray Code) — це двійковий код, у якому будь-які дві послідовні кодові комбінації відрізняються лише одним бітом (рисунок 1.5).

Головна відмінність коду Грея від стандартної двійкової системи полягає у властивості безперервності бінарних комбінацій.

Суть алгоритму коду Грея базується на тому, що при переході від одного значення до іншого змінюється лише один біт — старший розряд або виконується інверсія (зміна значення біта на протилежне). Це забезпечує мінімізацію помилок при зчитуванні і покращує надійність визначення положення.

В результаті формування двійкового коду за новими правилами він набуває властивості безперервності, що забезпечується такими умовами:

- старший розряд залишається незмінним;
- кожен наступний розряд інвертується, якщо попередній розряд у вихідному двійковому коді дорівнює одиниці.

Ілюстративно це можна розглядати як операцію додавання по модулю два вихідної двійкової послідовності та такої ж послідовності, зсунутої на один розряд вправо, при цьому крайній правий розряд зсунутої послідовності ігнорується або відкидається.

Помилка при зчитуванні коду в такому випадку виникає лише через тимчасову затримку формування самого коду.

Отже, код Грея є однокроковим кодом, що означає зміну лише одного біта при переході від одного значення до іншого. Ця властивість забезпечує

безперервність формування коду та повністю виключає появу надлишкових (помилкових) кодів.

Цей алгоритм корекції помилок має додаткові переваги при обробці сигналів енкодера:

- можливість дзеркального подання інформації коду — інверсія старшого біта змінює напрямок рахунку, що значно спрощує визначення напрямку обертання валу енкодера;

- сформовані значення коду можуть як збільшуватися, так і зменшуватися при однаковому фізичному напрямку обертання валу.

Проте закодовані числові дані у вигляді коду Грея безпосередньо не відображають кутовий фізичний стан валу енкодера, тому для їх подальшої обробки потрібно перекодування коду Грея у звичайний двійковий код.

Це перетворення виконується всередині енкодерного датчика за допомогою так званого декодера «Грей-Бінар». Декодер «Грей-Бінар» реалізований апаратно (вбудована схема на мікрочіпі плати енкодера) і складається з логічних ланцюгів, які включають операцію логічного «АБО», реалізовану як на апаратному, так і на програмному рівні.

біт 1 (LSB)																
біт 2																
біт 3																
біт 4 (MSB)																
Значення	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
біт 1 (LSB)																
біт 2																
біт 3																
біт 4 (MSB)																
Значення	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9						

Рисунок 1.5 – Код Грея корекції помилок енкодера

Цифрові сигнали, що формуються на виході енкодера, утворюють зовнішній цифровий інтерфейс і відповідають стандартам спеціалізованих цифрових шин для обміну даними між пристроями. Прикладами таких шин є CAN, CANopen, ProfiBus, EtherCAT, SERCOS та інші. Сьогодні існує велика кількість цифрових інтерфейсів, проте для промислового застосування найбільш поширеними є близько 15 основних типів.

Тип вихідного сигналу повинен відповідати типу сигналу, який використовується в конкретній системі, де застосовується енкодер. Наприклад, енкодер з інтерфейсом ProfiBus не сумісний із системами, що працюють з інтерфейсними шинами CAN, і навпаки.

Обробка синусоїдальних сигналів здійснюється у спеціалізованих електричних колах (рисунок 1.6). Більшість контролерів приймають лише квадратурні сигнали на своїх входах, тому попередня обробка сигналів відбувається безпосередньо в енкодері за допомогою різних вихідних схем, які вибираються залежно від конкретного застосування.

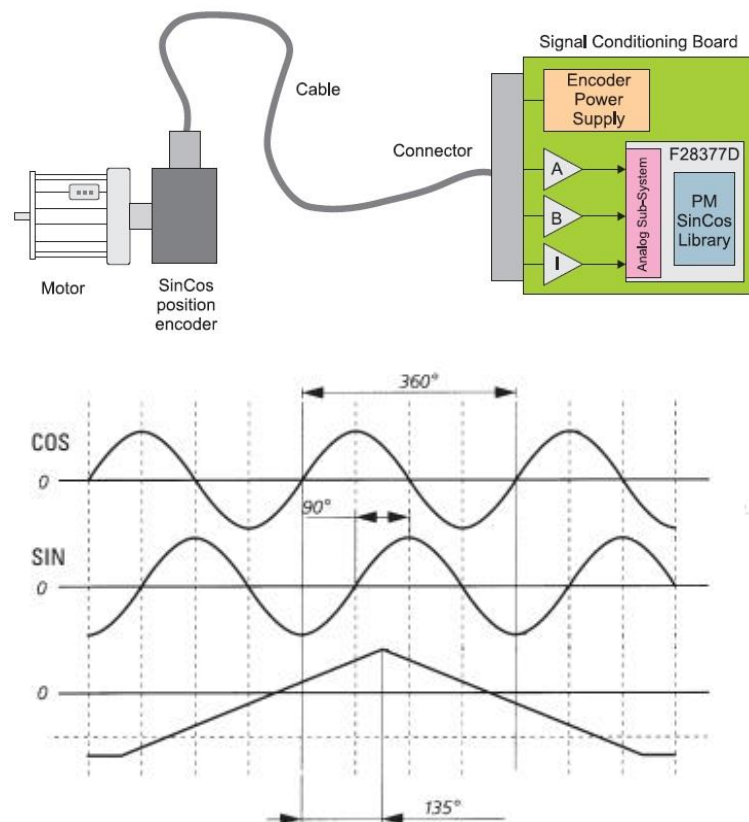


Рисунок 1.6 – Цифрові сигнали на виході синус-косинусного енкодера

Квадратурний інкрементний енкодер має на виході два сигнали А та В зміщені на 90 або -90 град. в залежності від напрямку обертання (рисунок 1.7).

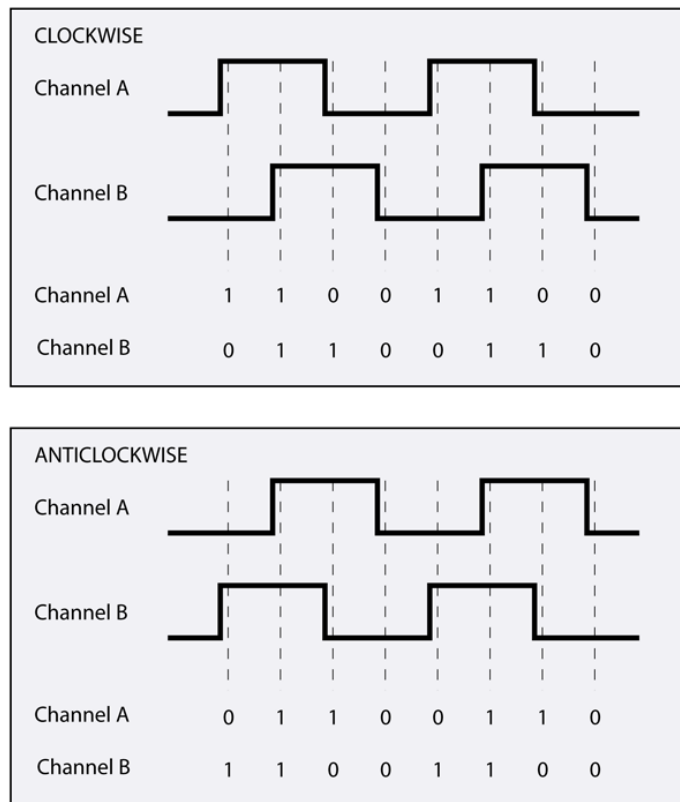


Рисунок 1.7 – Цифрові сигнали на виході квадратурного енкодера

Отже, імпульсна послідовність на виході енкодера містить інформацію про переміщення, швидкість руху та напрямок обертання. Напрямок визначається, наприклад, шляхом зчитування каналу В у момент переходу сигналу каналу А зі стану логічного «0» у логічний «1». Якщо при цьому $V = 0$, то обертання відбувається за годинниковою стрілкою, а якщо $V = 1$ — проти годинникової стрілки.

Щодо визначення положення і відповідно швидкості, існує три основні підходи, які відрізняються точністю (рисунок 1.8).

Розглянемо найпростіший метод зчитування положення енкодера. Один із каналів, наприклад канал А, підключається до зовнішнього переривання контролера, а другий канал В — до звичайного цифрового входу.

Налаштовується переривання за фронтом сигналу каналу А. Вимірювання здійснюється лише при спрацьовуванні фронту каналу А, при цьому аналізується стан каналу В: якщо на ньому високий рівень — обертання відбувається проти годинникової стрілки, якщо низький — за годинниковою стрілкою.

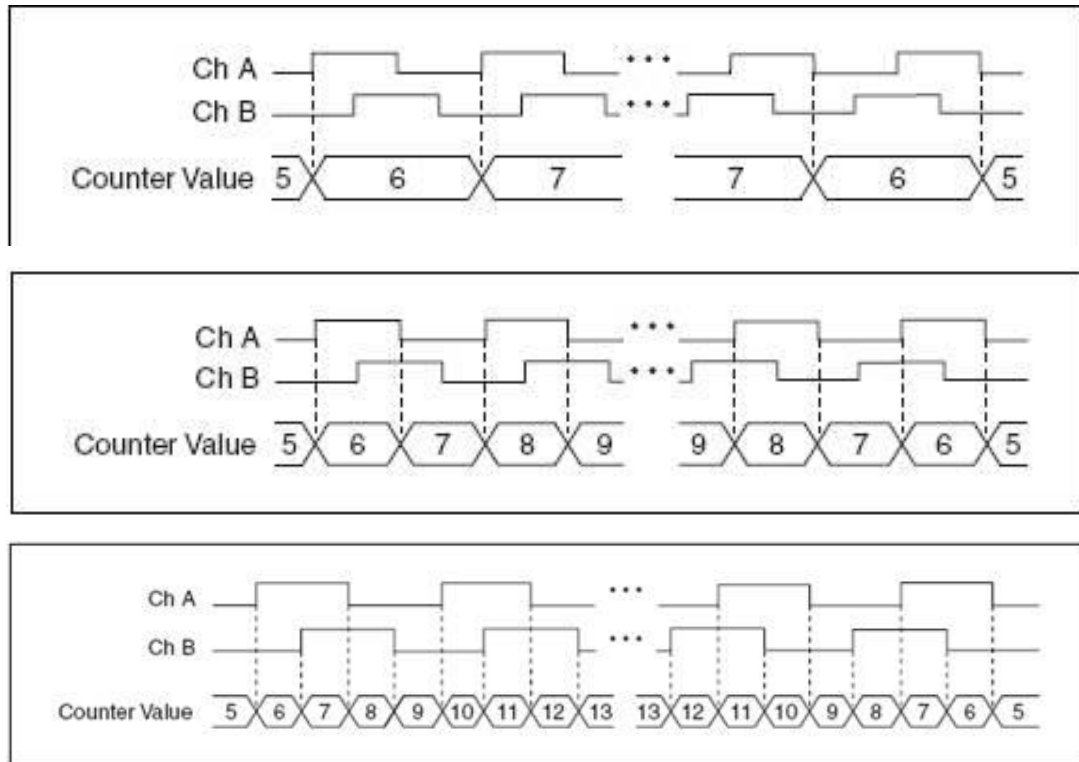


Рисунок 1.8 – Алгоритми визначення положення на виході квадратурного енкодера

Цей метод зчитування використовує лише одну чверть усіх імпульсів, що генерує енкодер, однак значно знижує навантаження на контролер, адже достатньо лише перевірити стан каналу В. Такий підхід забезпечує стабільне визначення напрямку обертання навіть у випадках пропуску імпульсів від енкодера, наприклад, якщо програма не встигає обробити всі переривання вчасно.

Розглянемо другий метод обробки сигналів енкодера. Один із каналів енкодера (наприклад, канал А) підключається до зовнішнього переривання контролера, а другий канал (В) — до звичайного цифрового входу. Переривання налаштовується як на фронт, так і на спад сигналу каналу А.

Обробка сигналів відбувається при кожному фронті або спаду каналу А із врахуванням поточного стану каналу В та типу переривання. Якщо канал В знаходиться на низькому рівні, а переривання сталося по фронті каналу А, або ж канал В — на високому рівні при перериванні по спаду каналу А, то це відповідає обертанню за годинниковою стрілкою.

Якщо на каналі В встановлено високий рівень, а переривання відбулося по фронті каналу А, або якщо на каналі В низький рівень і переривання сталося по спаду каналу А, то це означає обертання проти годинникової стрілки. Цей метод обробки сигналів використовує половину імпульсів енкадера, що підвищує точність порівняно з першим способом. Для визначення напрямку обертання достатньо виконати операцію XOR між сигналами каналів А і В.

Максимальну точність вимірювання положення енкадера можна отримати, якщо обидва канали (А і В) підключити до зовнішніх переривань контролера та налаштувати переривання по фронті і спаду для кожного з каналів. Цей третій спосіб обробки даних використовує всі імпульси, що генерує енкадер, і вимагає, щоб контролер зберігав попередній стан каналів А і В для порівняння при наступному перериванні.

Варто звернути увагу, що на відміну від двох попередніх методів, при пропуску імпульсів у цьому способі можливі помилки у визначенні напрямку обертання. Щоб частково захиститися від таких помилок, рекомендується перевіряти кількість бітів, що змінилися між двома послідовними станами. Якщо змінилися два біти, це свідчить про пропуск одного або кількох імпульсів, адже між сусідніми станами має змінюватися лише один біт.

Дуже ефективний і простий алгоритм обробки енкадерних сигналів запропонував Скотт Едвардс у статті «Nuts & Volts», випуск 1, жовтень 1995 року.

Якщо застосувати операцію " Xor " для двох будь-яких послідовностей, то порівнюючи правий біт попереднього стану з лівим бітом нового стану завжди

дасть 1 в разі якщо послідовність від обертання за годинниковою стрілкою, і 0 в разі обертання проти годинникової стрілки.

1.5 Розробка схеми розташування елементів стенда

Схема розташування елементів стенда сервоприводу постійного струму наведена на рисунку 1.9.

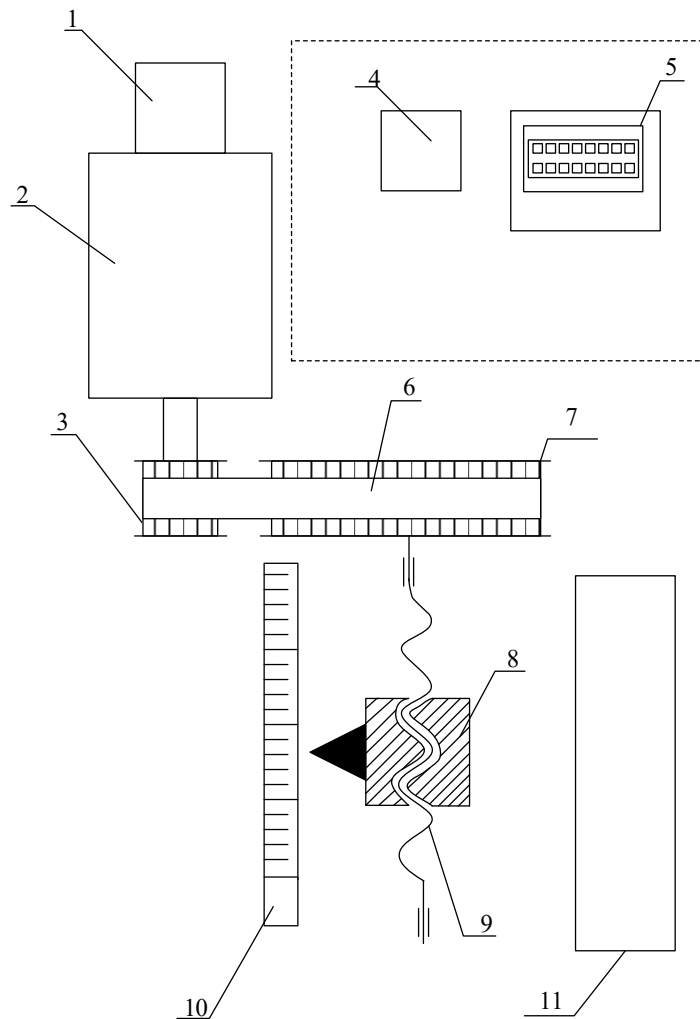


Рисунок 1.9 – Схема розташування елементів стенда сервоприводу постійного струму

На рисунку 1.9: 1 – енкодер; 2– двигун; 3 – шків двигуна; 4 – драйвер двигуна L298N; 5 – плата керування ArduinoUNO; 6 – ремінь; 7– шків; 8 – гайка; 9– вал; 10– лінійка; 11 – блок живлення.

2 РОЗРОБКА КІНЕМАТИЧНОЇ СХЕМИ ТА РОЗРАХУНОК ПОТУЖНОСТІ ДВИГУНА

Кінематичну схему та розрахунок потужності розглянемо на прикладі привода подачі металорізального токарного верстата.

Відповідно до технологічного процесу, електродвигун подачі працює в переміжному номінальному режимі, де короточасні проміжки постійного номінального навантаження (коли відбувається обробка заготовки) змінюються періодами холостого ходу (коли супорт рухається без різання). При розрахунку потужності двигуна електропривода слід враховувати навантаження згідно з механічною характеристикою механізму, тертя в механічних передачах, режим роботи електропривода, а також технологічні вимоги й особливості конструкції механіки привода.

2.1 Розрахунок статичних моментів опору механізму

В токарних верстатах основними приводами є головний привод та привод подачі (поздовжній і поперечний). Під час зняття стружки різцем виникає зусилля, що прикладається під певним кутом до ріжучої кромки інструмента, яке можна розкласти на три складові (див. рисунок 2.1).

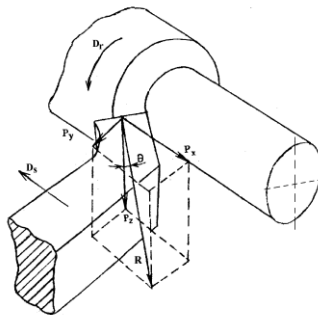


Рисунок 2.1 – Зусилля різання

Для попереднього підбору двигуна створимо навантажувальну діаграму (графік статичних навантажень механізму) та тахограму механізму, виходячи з технологічних вимог і специфіки індивідуального завдання.

Знайдемо час роботи електропривода виробничого механізму з номінальним навантаженням [4]:

$$t_p = \frac{L_1}{V_{п.х.}}, \quad (2.1)$$

де L_1 – робочий хід виробничого механізму ($L_1=0,5$ м);

$V_{п.х.}$ – швидкість прямого ходу ($V_{п.х.}=0,01$ м/с),

$$t_p = \frac{0,5}{0,01} = 50 \text{ (с)}.$$

Знайдемо час роботи електропривода виробничого механізму під час зворотного ходу з навантаженням холостого ходу:

$$t_{xx} = \frac{L_1}{V_{з.х.}}, \quad (2.2)$$

де $V_{з.х.}$ – швидкість зворотного ходу ($V_{з.х.}=0,05$ м/с),

$$t_{xx} = \frac{0,5}{0,05} = 10 \text{ (с)}.$$

Оскільки цикл включає прямий рух виробничого механізму під номінальним навантаженням і зворотний хід з навантаженням холостого ходу, можна припустити, що:

$$t_{ц} = t_p + t_{xx}, \quad (2.3)$$

де $t_{\text{ц}}$ – тривалість циклу,

$$t_{\text{ц}} = 50 + 10 = 60(\text{с}).$$

Оскільки цикл включає прямий рух виробничого механізму з номінальним навантаженням і зворотний хід з навантаженням холостого ходу без технологічних пауз між ними, можна зробити висновок, що електропривод функціонує в тривалому режимі роботи S1[6].

Знайдемо потужність для приведення в рух виробничого механізму в прямому ході [6]:

$$P_{\text{п.х.}} = F_{\text{п.х.}} \cdot V_{\text{п.х.}}, \quad (2.4)$$

де $F_{\text{п.х.}}$ – сила статичного опору прямого ходу виробничого механізму
($F_{\text{п.х.}} = 270 \text{ кН}$),

$$P_{\text{п.х.}} = 270 \cdot 0,01 = 2,7(\text{кВт}).$$

Знайдемо потужність для приведення в рух виробничого механізму в зворотному ході [6]:

$$P_{\text{з.х.}} = F_{\text{з.х.}} \cdot V_{\text{з.х.}}, \quad (2.5)$$

де $F_{\text{з.х.}}$ – сила статичного опору зворотного ходу виробничого механізму
($F_{\text{з.х.}} = 55 \text{ кН}$),

$$P_{\text{з.х.}} = 55 \cdot 0,05 = 2,75(\text{кВт}).$$

Зобразимо графічно сили опору та відповідні потужності необхідні для виконання програми роботи електропривода на рисунку 2.2.

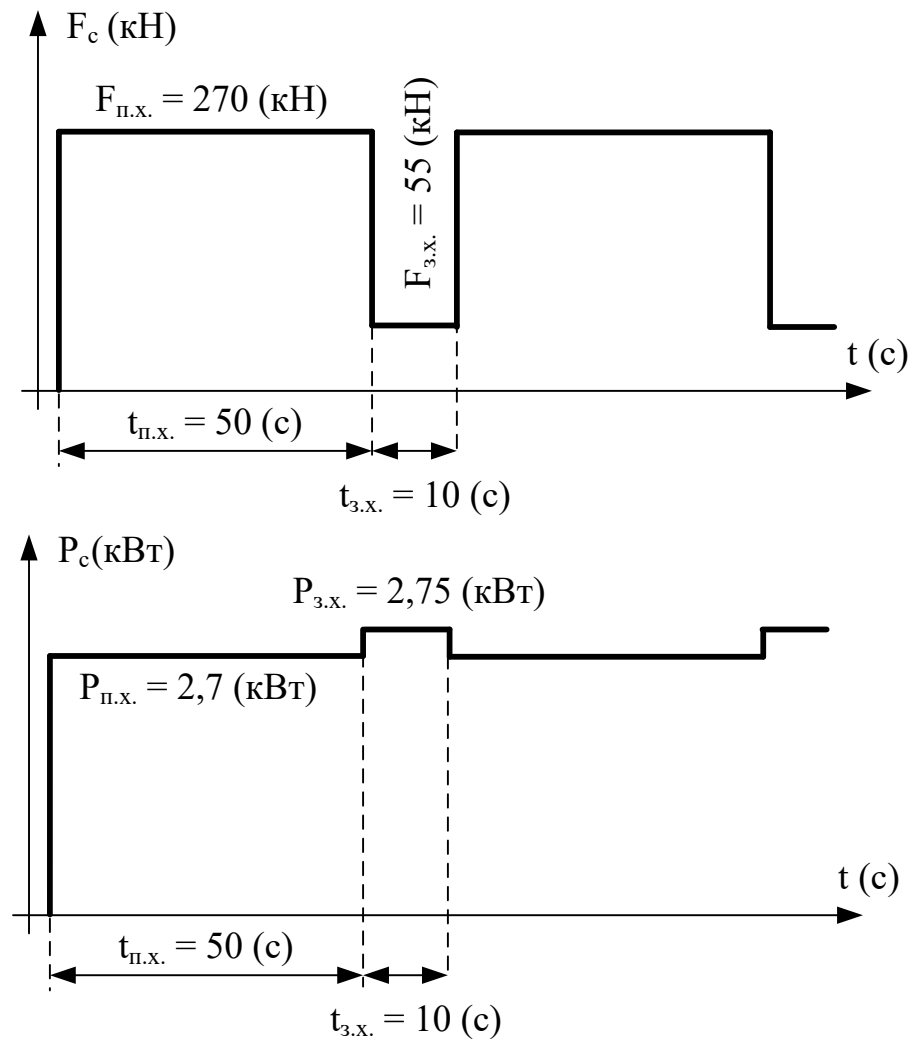


Рисунок 2.2 - Навантажувальні діаграми виробничого механізму

2.2 Розрахунок і побудова тахограм робочого механізму

Виходячи з розрахованих тривалостей роботи електропривода на окремих ділянках та відомої швидкості робочого органу на цих ділянках, можливо побудувати тахограму роботи електропривода механізму переміщення.

З використанням розрахованих та відомих даних представимо тахограму робочого механізму, на рисунку 2.3.

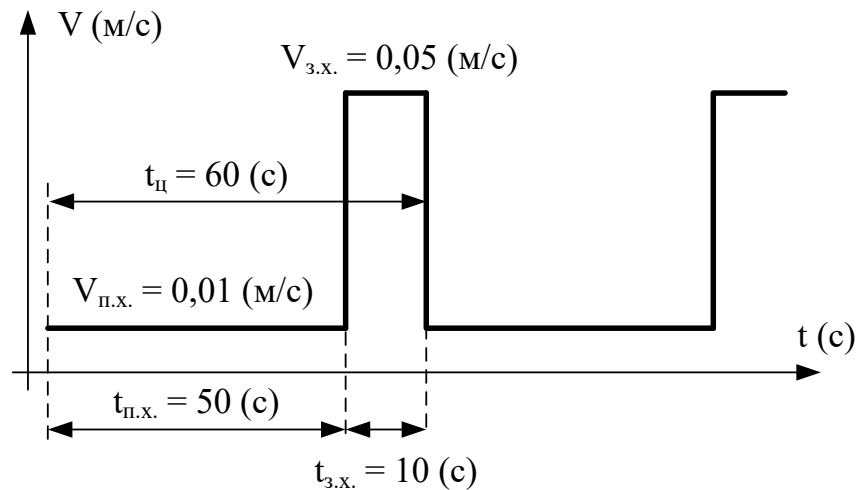


Рисунок 2.3 – Тахограма роботи електропривода виробничого механізму

Як показано на рисунку 2.3, цикл роботи виробничого механізму включає прямий хід, що змінюється зворотним ходом. Варто зазначити, що час пуску та гальмування не врахований у цьому графіку, оскільки його значення буде враховуватися при розрахунках динамічних характеристик електропривода.

2.3 Попередній розрахунок потужності приводного двигуна

При розрахунку потужності двигуна приймаємо, що приведена швидкість усталеного руху (швидкість прямого ходу механізму) відповідає номінальній швидкості двигуна.

Оскільки виробничий механізм працює в режимі S1, для попереднього визначення потужності приводного електродвигуна потрібно обчислити середню потужність за весь цикл роботи [3]:

$$P_{\text{ср}} = \frac{P_{п.х.} \cdot t_p + P_{з.х.} \cdot t_{з.х.}}{t_{ц}}, \quad (2.6)$$

$$P_{\text{ср}} = \frac{2,7 \cdot 50 + 2,75 \cdot 10}{60} = 2,725 \text{ (кВт)}.$$

Для забезпечення надійної роботи силового перетворювача двигуна та виробничого механізму необхідно врахувати запас потужності електродвигуна. Для цього розрахункову потужність, визначену за формулою (2.6), слід помножити на коефіцієнт запасу K_3 :

$$P_{\text{роз}} = K_3 \cdot P_{\text{сер}}, \quad (2.7)$$

де K_3 - коефіцієнт запасу (приймаємо $K_3 = 1,2$);

$$P_{\text{роз}} = 1,2 \cdot 2,725 = 2,97 \dots 3,52 \text{ (кВт)}.$$

Отже, у цьому розділі було виконано розрахунок та побудовано навантажувальну діаграму й тахограму роботи електропривода механізму переміщення з урахуванням експлуатаційних умов. За результатами проведених розрахунків електропривода подачі попередньо визначено потужність приводного двигуна відповідно до умов роботи, що склала стандартне значення — 3 кВт.

2.4 Розробка кінематичної схеми

На кінематичній схемі виробничого механізму (рисунок 2.4) введені такі позначення: Д – приводний двигун; ЗШ1, ЗШ2 – зубчастий шків 1 та зубчастий шків 2; Р – редуктор; ГП – гвинтова передача; ВМ – виробничий механізм (супорт), ЗР – зубчатий ремінь .

Зусилля від приводного електродвигуна передається через муфту М1 на ведучий вал редуктора. Обертання веденого вала редуктора, з'єднаного з гвинтом гвинтової передачі за допомогою ще однієї муфти, перетворюється гайкою цієї передачі у поступальний рух супорта. Саме супорт, що переміщується під дією цього руху, створює опір, який сприймається електроприводом як навантаження.

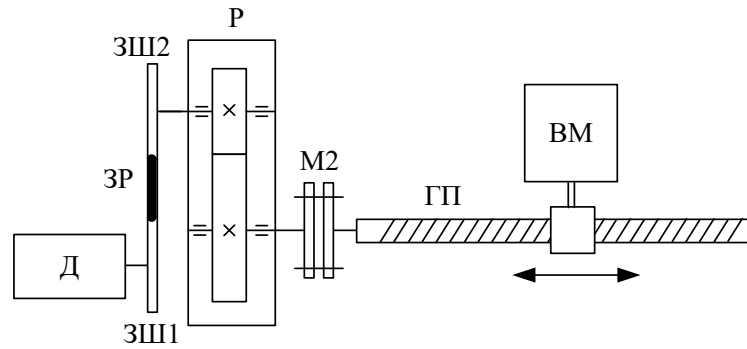


Рисунок 2.4 – Кінематична схема електропривода подачі

Гвинтова передача забезпечує перетворення обертowego руху в поступальний рух виробничого органу. Поперечний переріз гвинтової передачі зображено на рисунку 2.5.

Виходячи із характеристик електропривода подачі сила статичного опору виражається за загальною формулою:

$$F_c(\omega) = F_0 + (F_{c,ном} - F_0) \cdot (\omega/\omega_{ном})^x, \quad (2.10)$$

де F_0 - сила опору тертя в елементах механічної передачі;

$F_{c,ном}$ - номінальна сила статичного опору (в нашому випадку сила опору прямого ходу).

Механічну характеристику ВМ по аналітичному рівнянню (2.10) графічно відображає рисунок 2.5

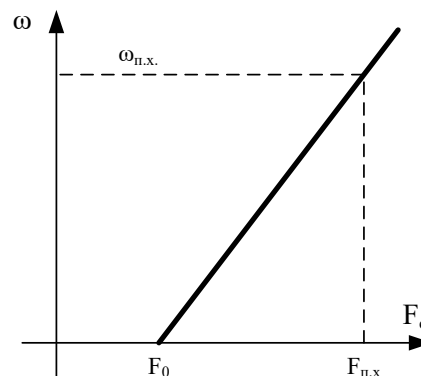


Рисунок 2.5 - Механічна характеристика механізму подачі

У наведених виробничих механізмах виникає потреба в регулюванні швидкості для забезпечення технологічних вимог, підтримання заданого рівня продуктивності або необхідного вихідного зусилля. Оскільки механізм переміщення здійснює як прямий, так і зворотній хід, потрібно забезпечити можливість реверсування електродвигуна.

3. ВИБІР ТА ПРОЕКТУВАННЯ АПАРАТНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТЕНДА

3.1 Проектування гвинтової передачі

Креслення механічних елементів виконаємо в системі Компас. На рисунку 3.1 представлено креслення гвинта з кроком 2 мм.

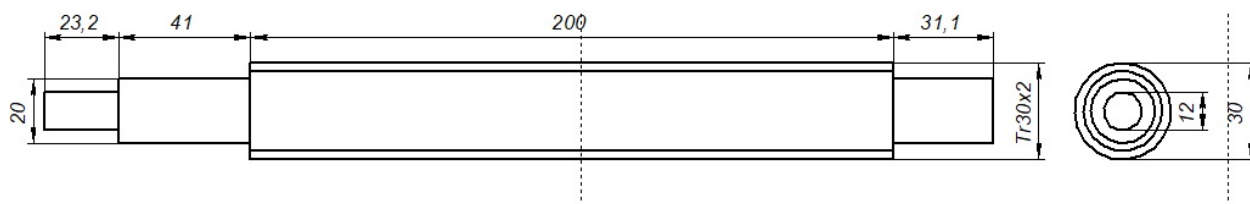


Рисунок 3.1 – Креслення гвинта подачі

Креслення ходової гайки представлено на рисунку 3.2

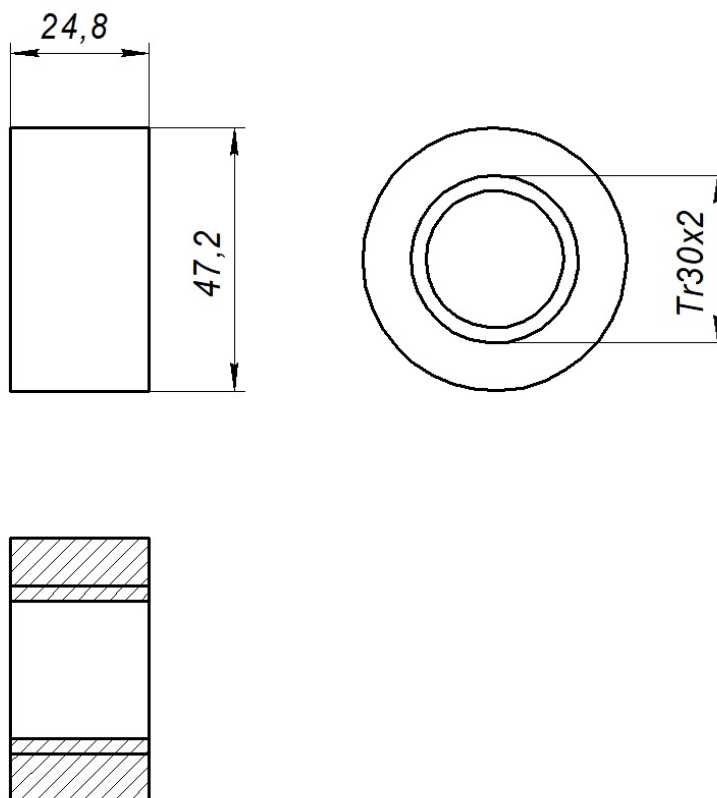


Рисунок 3.2 – Креслення ходової гайки

Креслення веденого шківa представлено на рисунку 3.3.

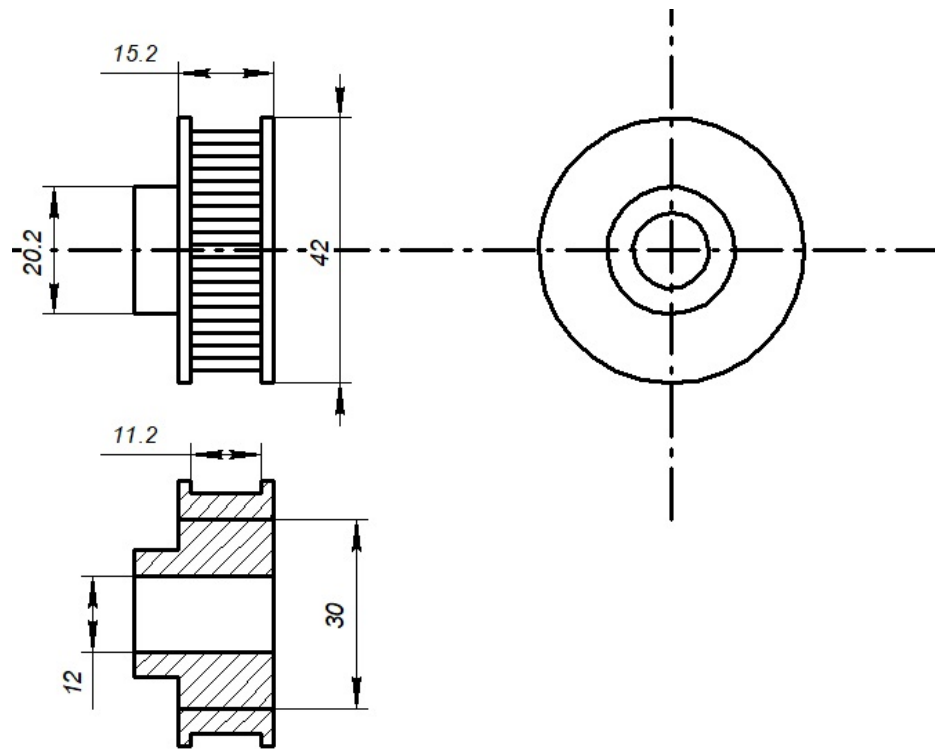


Рисунок 3.3 – Креслення веденого зубчатого шківa

Креслення в зборі вказаних деталей разом із корпусними підшипниками наведено на рисунку 3.4

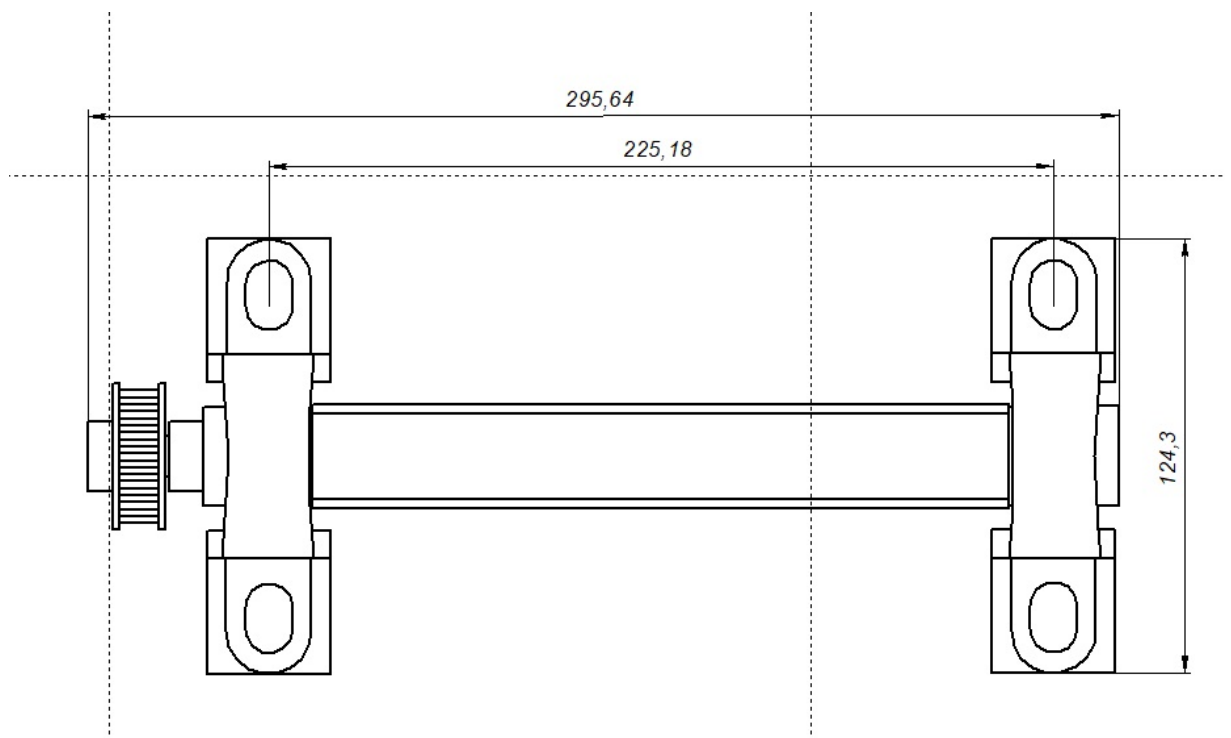


Рисунок 3.4 – Збірне креслення гвинта

Креслення в зборі вказаних деталей разом із корпусними підшипниками в розрізі наведено на рисунку 3.5

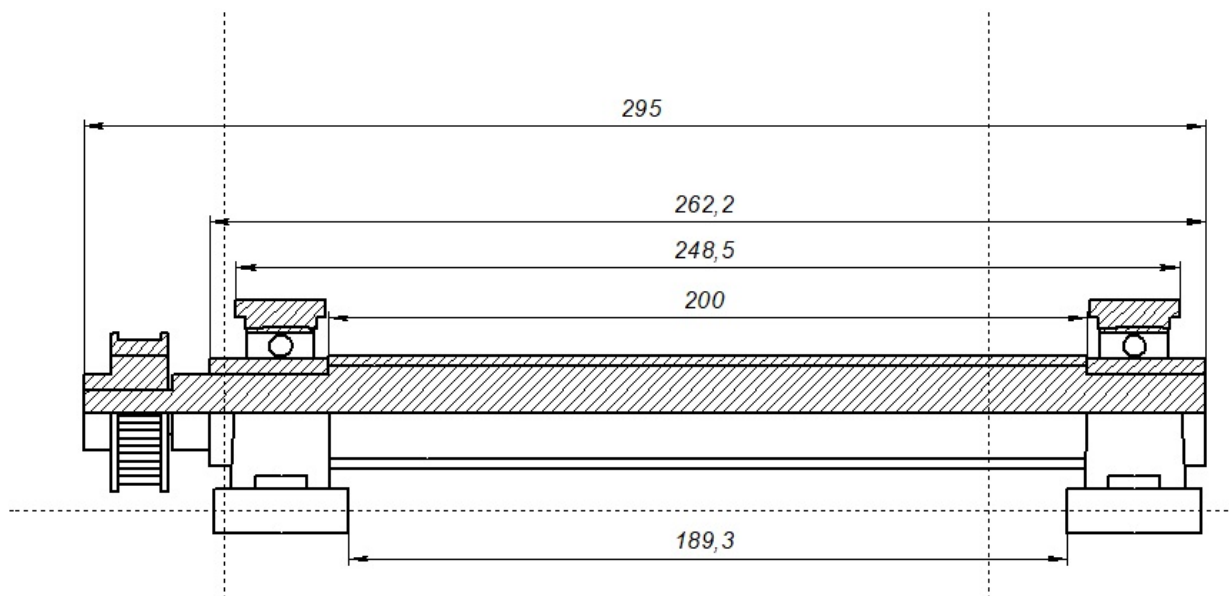


Рисунок 3.5 – Збірне креслення гвинта в розрізі

Для привода гвинта обираємо замкнутий зубчатий ремінь 320-2GT зовнішній вигляд якого показано на рисунку 3.6



Рисунок 3.6 – Замкнутий зубчатий ремінь 320-2GT

3.3 Вибір двигуна

Для побудови стенда вибираємо двигун з умови $P_{\text{ном.кат}} \geq P_{\text{дв}}$. Обираємо з довідника двигун EM-115, це двигун постійного струму з постійними магнітами з технічними характеристиками приведеними в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики двигуна

P_n , Вт	$U_{\text{ном}}$, В	$n_{\text{ном}}$, об/хв	$M_{\text{ном}}$, Н·м	ККД, %
30	24	2000	0,09	80

Зовнішній вигляд двигуна EM-115 представлено на рисунку 3.7.



Рисунок 3.7 – Зовнішній вигляд двигуна EM-115

3.2 Вибір корпусних підшипників

Корпусні підшипники відрізняються від інших тим, що мають сферичну зовнішню поверхню обойми. Їх монтаж здійснюється у спеціальні підшипникові вузли, внутрішня поверхня яких також виконана у вигляді частини сфери. Така конструктивна особливість дозволяє компенсувати можливі монтажні похибки шляхом автоматичного самовстановлення підшипника відносно корпусу. Під час встановлення вузла разом із валом, підшипник самостійно займає оптимальне положення для ефективної та надійної роботи.

На рисунку 3.8 зображено загальний вигляд підшипника в корпусі типу UCP200.



Рисунок 3.8 – Підшипник в корпусі типу UCP 200 «на лапах»

При конструюванні механізму підйому штор було використано 2 підшипники в корпусі моделі UCP 210.

На рисунку 3.9 зображено розмірні параметри підшипника даної моделі.

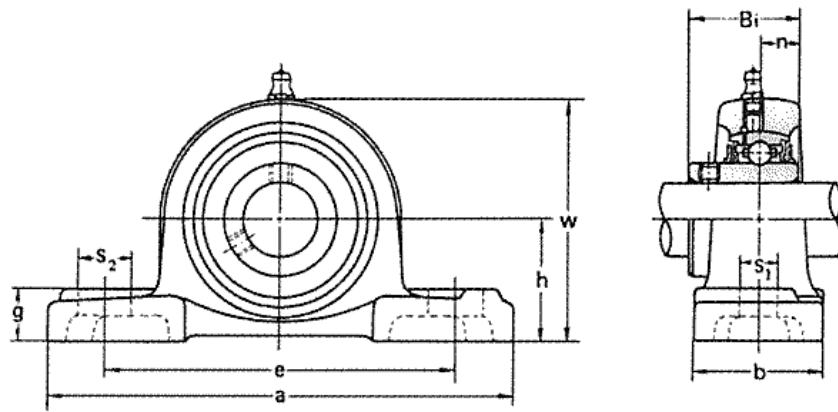


Рисунок 3.9 – Розміри підшипника в корпусі UCP 210

Таблиця 3.2 – Параметри підшипника в корпусі

тип	іам. ала, м	Розміри, мм										Р озмір б олта, м	Кор пус №	ага г
						1	2				i			
CP 210	5	7,2	06	59	0	0	5	2	14	1,6	9	16	210	,3

А також показано особливості будови на рисунку 3.10.

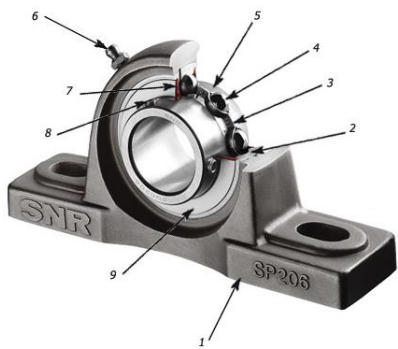


Рисунок 3.10 – Будова підшипника в корпусі

На рисунку 2.5: 1 – корпус; 2 – зовнішнє кільце підшипника; 3 – сепаратор; 4 – тіла кочення; 5 – внутрішнє кільце підшипника; 6 – змащувальний ніпель; 7 – ущільнення; 8 – штопорний гвинт; 9 – захисне кільце.

4 РОЗРОБКА СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СТРУКТУРНОЇ, ТА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТЕНДА

Схема електрична структурна стенда з використанням запропонованого підходу зображена на рисунку 4.1.

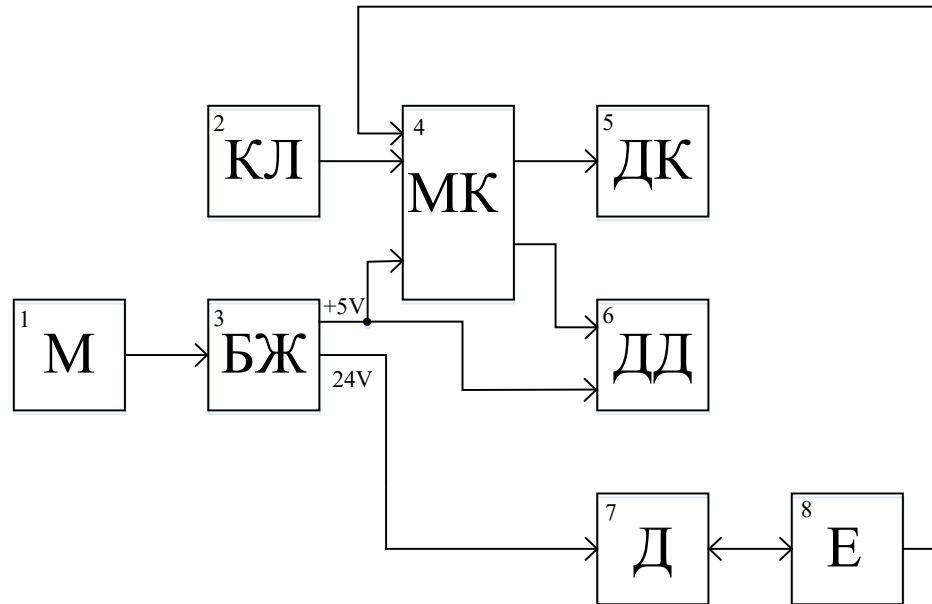


Рисунок 4.1 - Схема електрична структурна стенда сервоприводу постійного струму

На рисунку 4.1: М – мережа ; БЖ – блок живлення; КЛ – клавіатура; – мікроконтролер Arduino Uno; К – клавіатура; МК – мікроконтролер; ДД – драйвер двигуна; Д – двигун; Е – енкодер; ДК – дисплей користувача.

Основу стенда становить мікроконтролер Arduino Uno. Він здійснює керування роботою сервопривода постійного струму шляхом подачі керуючих сигналів на драйвер двигуна. Крім того, мікроконтролер зчитує дані про поточне положення виконавчого механізму за допомогою енкодера. Для взаємодії з користувачем передбачено дисплей та клавіатура, що забезпечують введення необхідних параметрів регулювання [4].

Для живлення мікропроцесорних пристроїв використовується стабілізований блок живлення (БЖ).

Алгоритм роботи регулятора положення сервопривода зображено на рисунку 4.2.

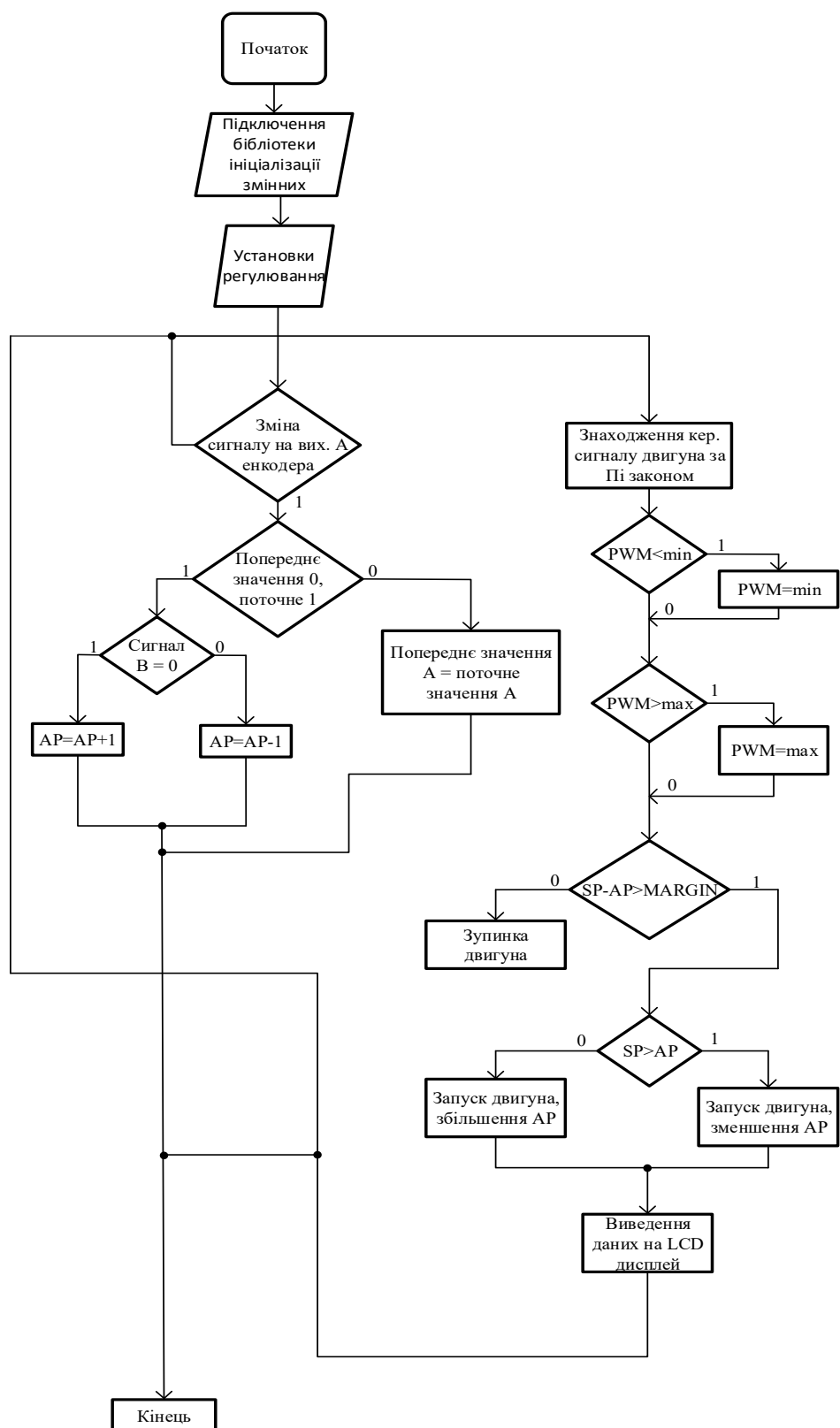


Рисунок 4.2 – Алгоритм роботи програми

Значення блоків на блок-схемі алгоритму:

– блок «Початок» - виконується ініціалізація системи, підключення обладнання та початкове налаштування;

- блок «Установка регулювання» - здійснюється конфігурування параметрів регулювання;
- блок «Зміна сигналу на виході “А” енкодера?» - відбувається перевірка про зміну сигналу з енкодера;
- блок «Попереднє значення “0”, поточне “1”?» - якщо попереднє значення “0” а поточне “1” то зчитується значення з вихода “В”;
- блок «Сигнал $V = 0$?»- якщо так, то до поточного значення додається одиниця, якщо ні, то віднімається одиниця;
- блок «Знаходження керуючого закону двигуна» - знаходження керуючого закону двигуна за П законом;
- блок « $PWM < min$?» - якщо значення менше мінімального воно прирівнюється до мінімального;
- блок « $PWM > max$?» - якщо значення більше максимального воно прирівнюється до максимального;
- блок « $SP - AP > MARGIN$?» - якщо різниця між поточним та заданм входить в межі допуску двигун зупиняється;
- блок « $SP > AP$?» - якщо поточне значення більше за задане, двигун запускається та збільшує/зменшує задане значення;
- блок «Виведення даних на LCD» - виведення даних поточного та заданого значення на LCD;
- блок «Кінець» - завершення алгоритму.

Після увімкнення системи здійснюється ініціалізація змінних та налаштування параметрів регулювання. У разі відсутності зміни сигналу енкодера розраховується керуючий сигнал для двигуна. Якщо отримане значення менше допустимого мінімуму — воно встановлюється на мінімальному рівні; якщо перевищує максимально допустиме — обмежується значенням максимуму. Під час контролю відхилення між заданим і поточним значенням, у разі якщо ця різниця не перевищує меж допуску, двигун припиняє роботу. В іншому випадку він активується і коригує заданий параметр у

напрямку до поточного значення. Після цього оброблені дані виводяться на екран дисплея.

У випадку, якщо все ж таки відбувається зміна сигналу, а попереднє значення зазнало змін, до поточного значення додається або віднімається відповідне значення, необхідне для досягнення заданого параметра. Програмне забезпечення для мікроконтролера розроблено в середовищі Arduino IDE. Повний лістинг програми з пояснювальними коментарями представлено в додатку Б.

Для налаштування переметрів сервопривода та програмного коду його роботу промодельовано в середовищі Proteus (рисунок 4.3).

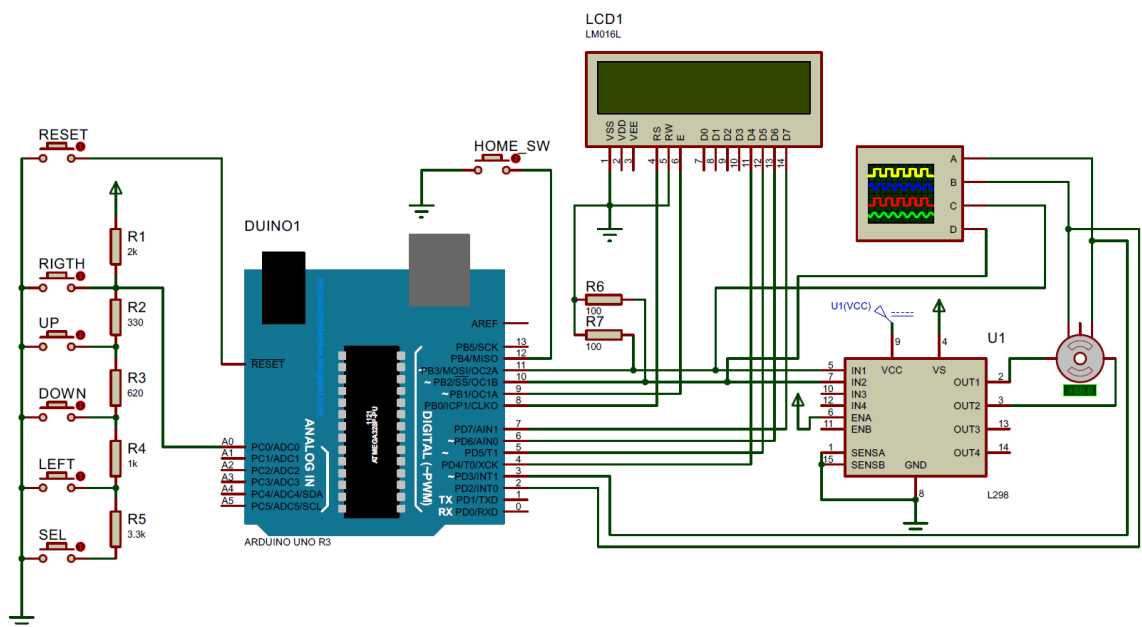


Рисунок 4.3 – Модель сервопривода в середовищі Proteus

Зокрема, виконане моделювання (рисунок 4.4) демонструє адекватність роботи програми та наявність перехідних процесів. На рисунку 4.4 представлені графіки імпульсних сигналів з виходів енкодера та ШІМ-сигналів керування обома напрямками транзисторного моста. Як видно з графіків, спостерігається незначне перерегулювання, величина якого залежить від значення пропорційного коефіцієнта регулятора, інерційних характеристик привода, а також від встановлених меж максимальної та мінімальної напруги.

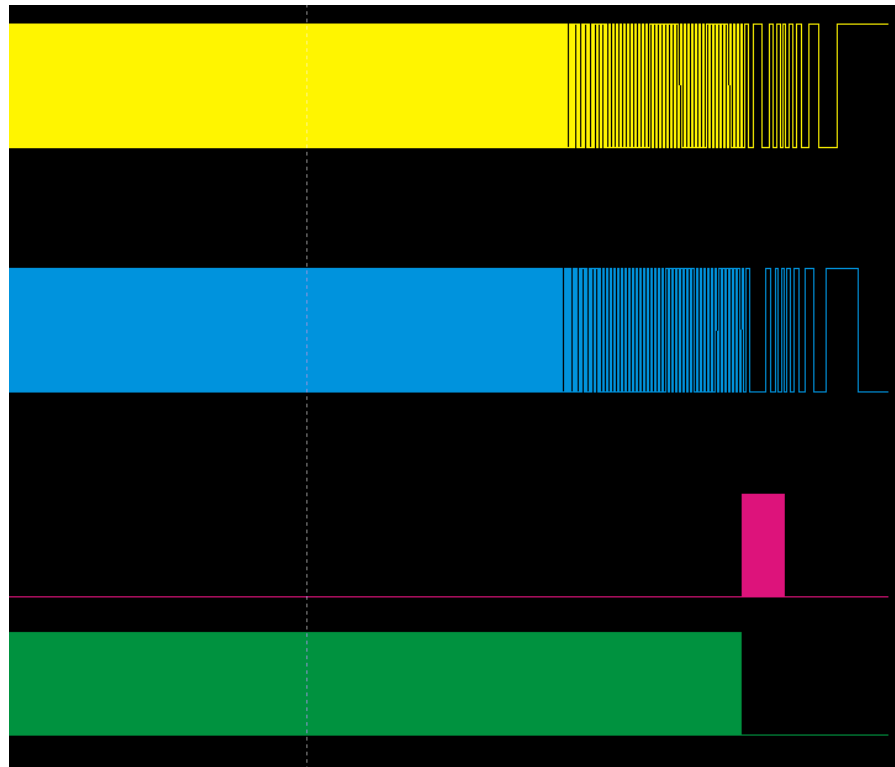


Рисунок 4.4 – Результати моделювання сервопривода в середовищі
Proteus

У ході роботи реалізовано користувацьке меню з виведенням інформації на дисплей, що дозволяє здійснювати налаштування основних параметрів привода, зокрема: заданої координати, мінімальної та максимальної швидкості переміщення, зони нечутливості регулятора, а також передбачено окреме меню для процедури пошуку нульової точки. Варто зазначити, що усі введені параметри, а також поточне значення координати зберігаються в енергонезалежній пам'яті. Завдяки цьому, при повторному включенні живлення, значення налаштувань та координати автоматично відновлюються. Задане положення вводиться у міліметрах, а у головному меню поточне та задане значення виводяться в імпульсах, отриманих з енкодера, що працює за одинарним методом зчитування. Ці значення є пропорційними — для модернізованої механіки станда встановлено коефіцієнт перерахунку 96, тобто переміщення на 1 мм відповідає 96 імпульсам енкодера.

Графічне зображення переходів між пунктами меню наведено на рисунку 4.5. Слід зауважити, що збереження поточної координати відбувається після її досягнення з певною затримкою в часі з метою підвищення надійності зберігання та зменшення похибки, спричиненої перехідними процесами. У режимі пошуку нульової точки привод переміщується на знижених обертах у напрямку кінцевого вимикача до моменту його спрацювання.

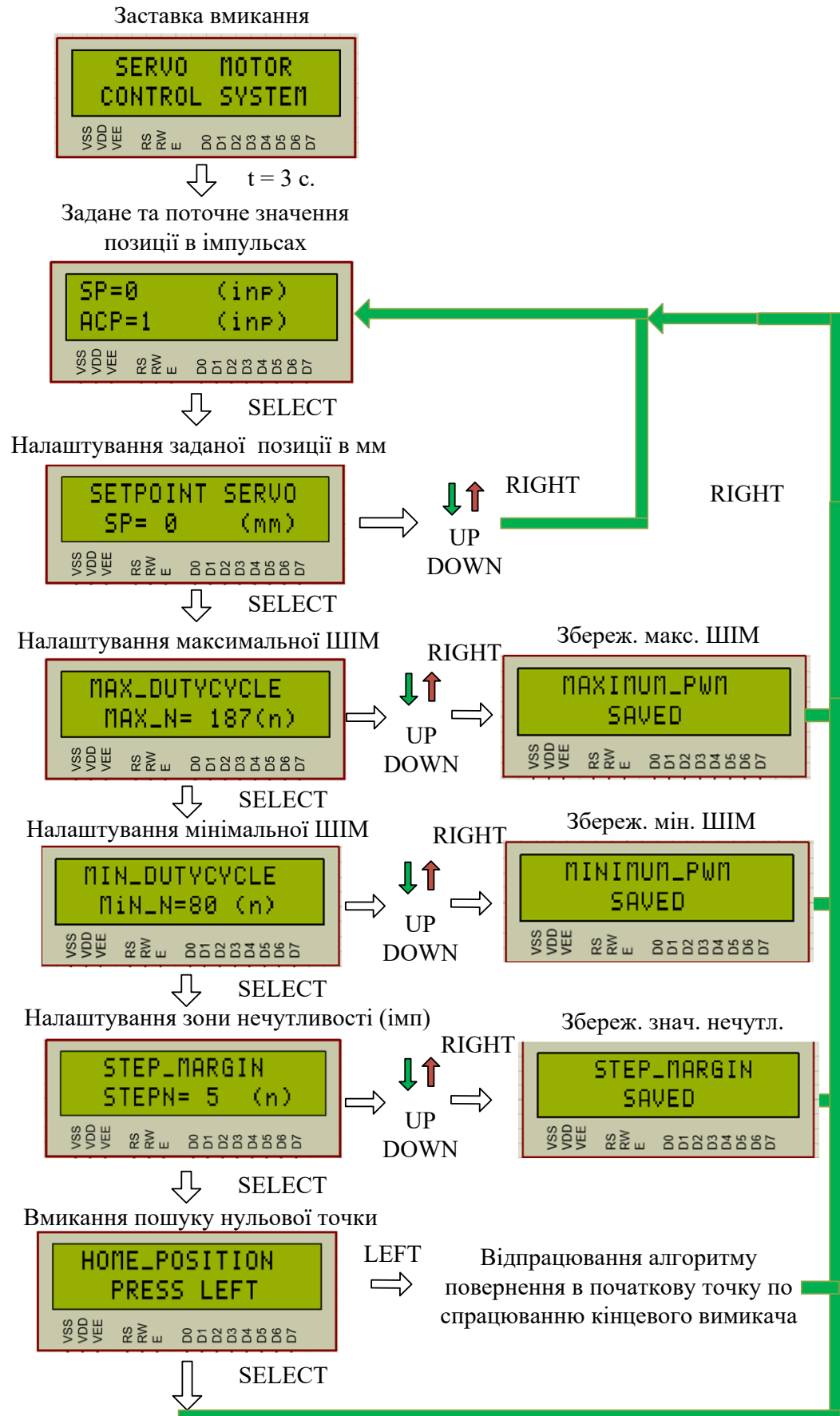


Рисунок 4.5 – Діаграма налаштувань сервопривода

5 РОЗРОБКА СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ ТА ВИБІР ЇЇ ЕЛЕМЕНТІВ

5.1 Розрахунок та вибір елементів апаратної платформи для реалізації системи електропривода

В якості базової вимірювальної платформи у стенді для дослідження характеристик енкодерів застосовано апаратну платформу Arduino [1].

Arduino — це електронний конструктор і зручна платформа для швидкої розробки електронних пристроїв. Платформа здобула широку популярність у світі завдяки своїй архітектурі та програмному забезпеченню.

Середовище розробки Arduino включає вбудований текстовий редактор для написання коду, поле повідомлень, консоль для виводу тексту, а також панель інструментів з найчастіше використовуваними командами і кілька меню.

У цьому випадку вибрано апаратну платформу типу Arduino Uno.

Arduino Uno — це контролер на базі мікроконтролера ATmega328. Платформа оснащена 14 цифровими входами/виходами, з яких 6 можуть використовуватися як ШІМ-виходи, 6 аналоговими входами, кварцовим генератором частотою 16 МГц, USB-роз'ємом, роз'ємом живлення, роз'ємом ICSP та кнопкою скидання. Для роботи платформу необхідно підключити до комп'ютера через USB-кабель або забезпечити живлення за допомогою адаптера змінного/постійного струму чи батареї.

На відміну від усіх попередніх плат, що використали FTDI USB мікроконтролер для зв'язку по USB, новий Ардуіно Uno використовує мікроконтролер ATmega8U2. Зовнішній вигляд плати Arduino Uno зображено на рисунку 5.1.



Рисунок 5.1 – Зовнішній вигляд Arduino Uno

Arduino Uno спроектована так, щоб перед завантаженням нового коду перезавантаження мікроконтролера відбувалося автоматично через програму Arduino на комп'ютері, а не вручну шляхом натискання кнопки на платі. Одна з ліній DTR мікросхеми ATmega8U2, яка відповідає за керування потоком даних, підключена до виводу скидання (reset) мікроконтролера ATmega328 через конденсатор 100 нФ. Коли ця лінія активується, тобто на неї подається сигнал низького рівня, відбувається скидання мікроконтролера. Таким чином, середовище Arduino використовує цю можливість, щоб завантажувати програму одним натисканням кнопки Upload, автоматично викликаючи перезавантаження пристрою. Подача сигналу низького рівня на лінію DTR синхронізована з початком процесу запису коду, що дозволяє зменшити затримку завантажувача (bootloader).

Функція автоматичного перезавантаження Arduino Uno має ще одне важливе застосування. При підключенні плати до комп'ютера з операційною системою Mac OS X або Linux через USB, перезавантаження відбувається автоматично кожного разу. Після цього протягом приблизно півсекунди працює завантажувач (bootloader).

Під час програмування відбувається затримка передачі кількох перших байтів, щоб уникнути отримання платою некоректних даних — тобто не фрагментів старої програми, а саме коду нової програми. Якщо ж ви здійснюєте разову налагоджувальну сесію вже записаного скетчу або передаєте інші дані

при першому запуску, важливо, щоб програма на комп'ютері чекала приблизно секунду перед тим, як почати передавати дані. Це дає завантажувачу час правильно ініціалізуватися і уникнути втрати або пошкодження інформації.

На Uno є можливість відключити лінію автоматичного перезавантаження розривом відповідної лінії. Контакти мікросхем з обох кінців лінії можуть бути з'єднані з метою відновлення. Лінія маркована «RESET-EN». Відключити автоматичну перезавантаження також можливо підключивши резистор 110 Ом між джерелом 5 В і даною лінією.

Для зручності програмування та ініціалізації портів входу виходу можна використовувати карту розпіновки зображену на рисунку 5.2.

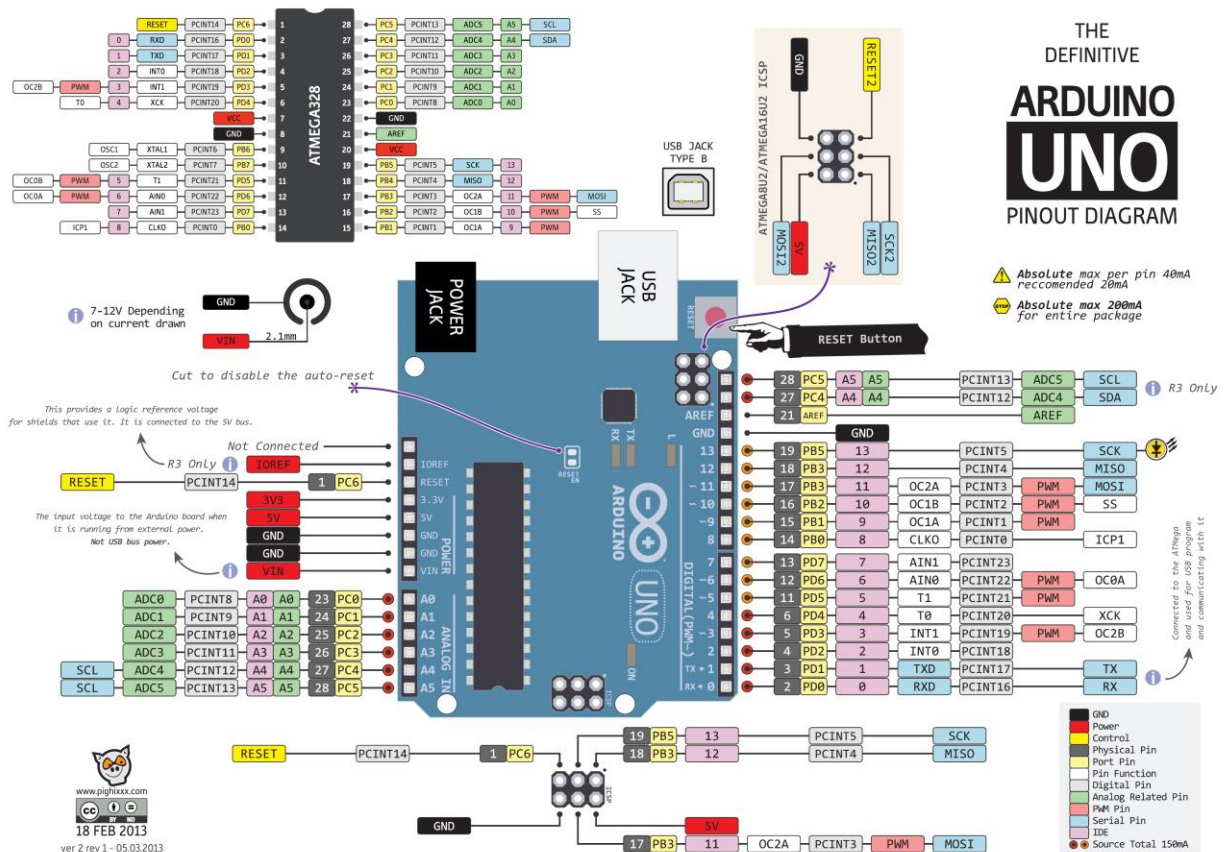


Рисунок 5.2 – Призначення виводів Arduino Uno

З використанням функцій `pinMode()`, `digitalWrite()` і `digitalRead()` кожен

із 14 цифрових виводів плати Arduino Uno може працювати як вхід або вихід. Напруга на цих виводах обмежена рівнем 5 В, а максимальний струм, який може віддавати або споживати один вивід, не повинен перевищувати 40 мА.

Всі виводи мають внутрішні підтягуючі резистори, які за замовчуванням відключені і мають номінал приблизно 20–50 кОм. За потреби їх можна активувати програмно.

Окрім стандартних цифрових функцій, деякі виводи Arduino Uno можуть виконувати додаткові функції, зокрема:

- ШІМ-виходи (PWM) — 6 пінів можуть генерувати широтно-імпульсну модуляцію для керування швидкістю двигунів, яскравістю світлодіодів тощо.
- Апаратний інтерфейс UART — використовується для послідовного зв'язку (пін 0 – RX, пін 1 – TX).
- SPI — пін 10–13 можуть використовуватися для високошвидкісного послідовного інтерфейсу.
- I2C — пін A4 (SDA) та A5 (SCL) для двопровідного послідовного інтерфейсу.
- Аналогові входи — 6 пінів (A0–A5) для зчитування аналогових сигналів.

На платформі Arduino Uno встановлено 6 аналогових входів, позначених як A0 ... A5. Кожен з цих входів має розрядність 10 біт, що дозволяє зчитувати до 1024 різних значень (від 0 до 1023). За замовчуванням аналогові входи вимірюють напругу у діапазоні від 0 В до 5 В відносно загального проводу (землі).

Проте існує можливість змінити верхню межу вимірювання за допомогою спеціального виводу AREF (Analog Reference) і функції `analogReference()` в середовищі Arduino IDE. Це дозволяє використовувати зовнішню опорну напругу для підвищення точності або налаштування діапазону вимірювання

відповідно до специфіки застосування.

Таблиця 5.1 – Характеристики Arduino Uno

Параметри	Характеристика
Мікроконтролер	ATmega328
Робоча напруга	5 В
Вхідна напруга (рекомендована)	7-12 В
Вхідна напруга (гранична)	6-20 В
Цифрові Входи / Виходи	14 (6 з яких можуть використовуватися як виходи ШІМ)
Аналогові входи	6
Постійний струм через вхід / вихід	40 мА
Постійний струм для виводу 3.3 В	50 мА
Флеш-пам'ять	32 Кб (ATmega328) з яких 0.5 Кб використовуються для завантажувача
ОЗУ	2 Кб (ATmega328)
EEPROM	1 Кб (ATmega328)
Тактова частота	16 МГц

Для сигналізації роботи системи моніторингу буде використано світлодіодну індикацію. Обрано світлодіод типу AL120A, параметри якого наведені в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Параметри світлодіода AL120A

Параметри	Значення
Потужність випромінювання при $I_{пр}=50$ мА, мВт	0,8
Пряма напруга при $I_{пр}=50$ мА, В	2
Номінальний прямий струм, мА	20
Час наростання імпульса випромінювання, нс	15
Час спаду імпульса випромінювання, нс	20

Струмообмежуючий резистор визначимо з закону Ома з умови забезпечення струму через світлодіод не більше 20 мА

$$R = \frac{U_{\text{ж}}}{I_{\text{VD}}}, \quad (5.1)$$

де $U_{\text{ж}}$ – напруга живлення світлодіодного індикатора ($U_{\text{ж}} = 3,3 \text{ В}$);

I_{VD} – прямий струм світлодіода ($I_{\text{VD}} < 20 \text{ мА}$),

$$R = \frac{3,3}{20 \cdot 10^{-3}} = 165 \text{ (Ом)}.$$

Вибираємо резистори номіналом 220 Ом з ряду E24 потужністю 0,25 Вт.

Драйвер двигуна відіграє ключову роль у проектах на базі Arduino, що передбачають керування двигунами постійного струму або кроковими двигунами.

Модуль L298N застосовується для управління кроковими двигунами з напругою від 5 до 35 В. Однією платою L298N можна керувати одночасно двома двигунами. Максимальний струм, який може забезпечити мікросхема для кожного двигуна, становить 2 А. При паралельному підключенні двигунів ця величина може бути збільшена до 4 А.

Принцип роботи драйвера базується на схемі Н-мосту — електронній схемі, що складається з чотирьох ключів, підключених до навантаження. Назва «Н-міст» походить від конфігурації схеми, що нагадує букву «Н».

На рисунку 5 показана схема моста, де Q1...Q4 — польові, біполярні або IGBT транзистори. Останні застосовуються переважно в мережах з високою напругою.

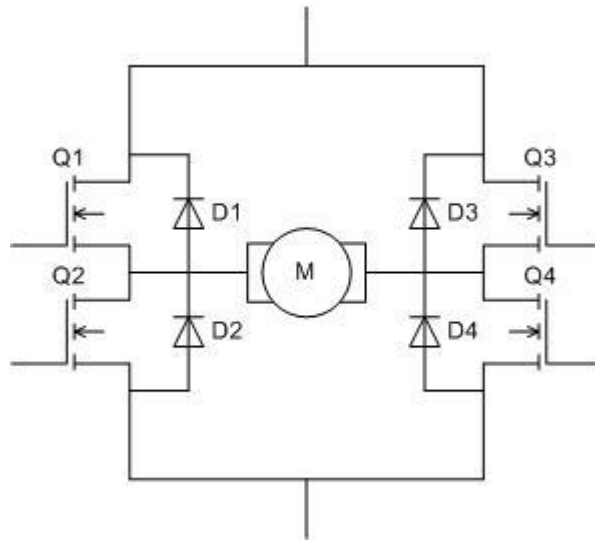


Рисунок 5.3 – Н-міст

Біполярні транзистори нині майже не застосовуються, здебільшого їх можна зустріти в малопотужних схемах. Для керування великими струмами перевага надається польовим транзисторам з ізольованим затвором.

Діоди D1...D4 виконують захисну функцію, зазвичай застосовуються діоди Шотткі, які обмежують перенапруги.

Регулювання напрямку обертання та гальмування двигунів здійснюється шляхом перемикання станів ключів Н-мосту. У таблиці наведено основні стани Н-мосту та відповідні їм комбінації сигналів на виходах.

Вигляд плати зображений на рисунку 5.4:



Рисунок 5.4 – Драйвер L298N

Драйвер L298N працює у двох режимах: активному, коли мікроконтролер керує каналами й можна регулювати швидкість обертання двигунів, та пасивному, при якому керування швидкістю недоступне, і встановлюється максимальна швидкість.

Для підключення L298N до Arduino необхідно під'єднати джерело живлення: позитивний провід («+») підключається до контакту 4 на платі L298N, а «мінус» (GND) — до контакту 5. Далі потрібно з'єднати виходи драйвера IN1, IN2, IN3 та IN4 з відповідними цифровими виводами Arduino — D7, D6, D5 та D4 відповідно. При цьому деякі з цих пінів повинні підтримувати ШІМ-сигнали, позначені на платі Arduino символом ~.

Напрямок обертання двигуна визначається подачею сигналів HIGH або LOW на відповідні канали драйвера. Двигуни починають обертатися лише тоді, коли на 7-му піні для першого мотора та на 12-му піні для другого мотора плати L298N подається сигнал HIGH. Якщо ж сигнал подається LOW, обертання припиняється. Для регулювання швидкості обертання використовуються імпульсно-широтні (ШІМ) сигнали.

Для керування серводвигунами в середовищі Arduino IDE існує стандартна бібліотека Stepper. Для перевірки працездатності зібраної схеми можна завантажити тестовий приклад stepper_oneRevolution, при правильному підключенні якого вал двигуна виконає один повний оберт.

Іноді під час роботи з двигунами Arduino може перезавантажуватись через високий пусковий струм і моменти гальмування моторів. Для зменшення таких проблем на платі драйвера вбудовані конденсатори, діоди та інші захисні елементи. Також часто застосовується роздільне живлення для плати та моторів, щоб уникнути перешкод і стабілізувати роботу системи.

З врахуванням вибраних елементів схема електрична принципова станда матиме вигляд, що приведено на рисунку 5.5.

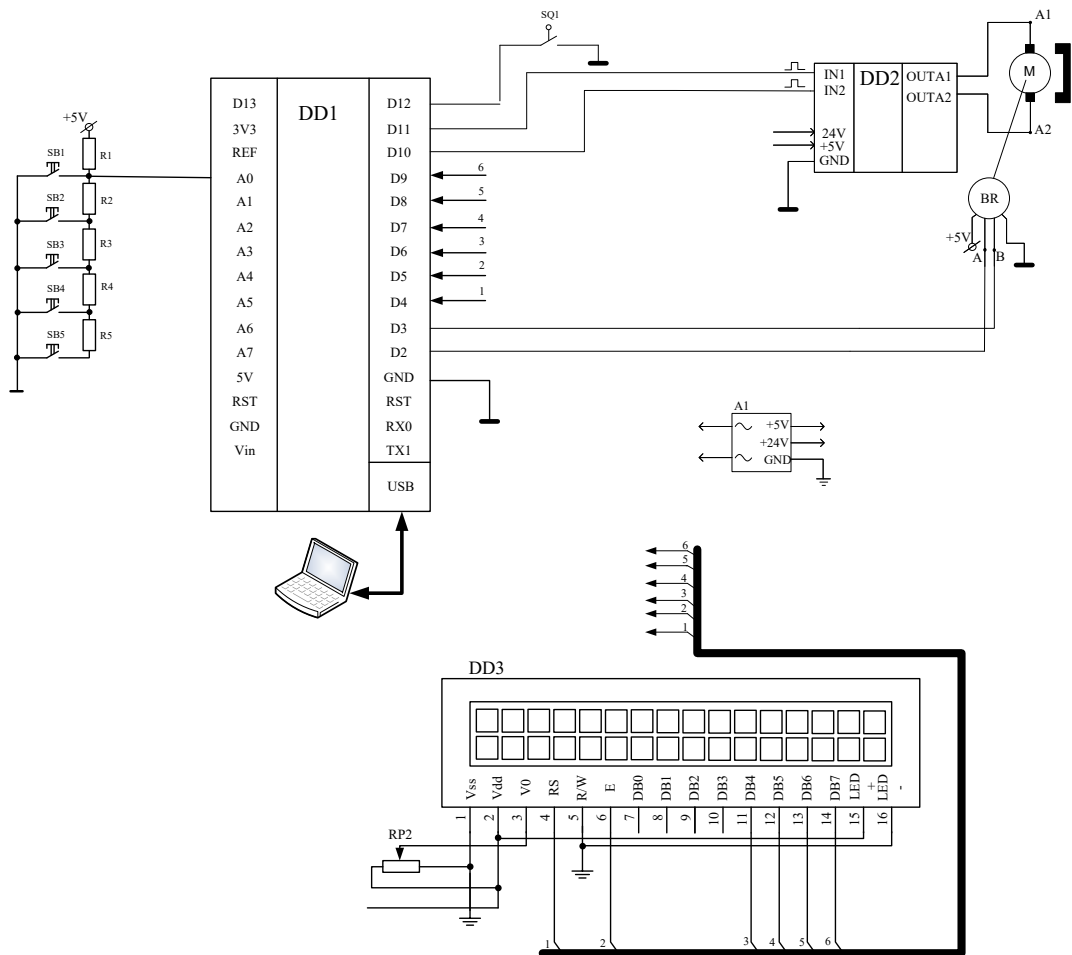


Рисунок 5.5 - Схема електрична принципова стенда

Для живлення контролерів та зовнішніх пристроїв було розроблено автономний стабілізований блок живлення, який включає акумуляторну батарею, контролер заряду та підвищуючий стабілізатор. Живлення необхідне для пристроїв з напругою +5 В, тому для цього використовується інтегральний стабілізатор напруги L7805CV, встановлений на платі Arduino. Схема автономного стабілізованого блоку живлення наведена на рисунку 5.6.

В якості джерела живлення використано літєвий акумулятор стандарту 18650 Videx ємністю 2200 мАгод. Для зарядки акумулятора використаємо контролер заряду DA1 TP4056.

Модуль заряду TP4056 призначений для заряджання одного або кількох літєвих (Li-ion) акумуляторів, з'єднаних паралельно. До цього модуля можна підключати активне навантаження, проте під час процесу зарядки акумулятора

слід його відключати або не використовувати підключений пристрій. Плата оснащена контролером заряду TP4056 для Li-Ion акумуляторів. Ця мікросхема має індикацію стану заряду та автоматично відключає заряд при досягненні напруги 4,2 В на акумуляторі. Під час зарядки світиться червоний світлодіод, а після повного заряджання — зелений, при цьому червоний світлодіод гасне.

Напругу на пристрій можна подавати двома способами: через роз'єм micro USB або шляхом безпосередньої пайки проводів. Основні характеристики модуля зарядки такі: метод заряджання — лінійний; струм зарядки — 1 А (регулюється); регулювання струму здійснюється заміною резистора або встановленням потенціометра; точність вихідної напруги — 1,5%; вхідна напруга — від 4,5 В до 5,5 В постійного струму; напруга автоматичного завершення зарядки — 4,2 В; поріг спрацювання захисту від перезаряду — $4,30 \pm 0,05$ В; поріг спрацювання захисту від розряду — $2,40 \pm 0,10$ В; захист від перевантаження спрацьовує при струмі 2,0 А; автоматичне відновлення роботи після спрацювання захисту; робочий температурний діапазон — від -10 °С до +85 °С; розміри — 25×19×6 мм.

Для підвищення напруги акумулятора до номінальних 5 В використовується підвищувальний стабілізатор DA1 на основі мікросхеми MT3608 — компактний регульований підвищувальний перетворювач із вихідною напругою до 28 В та максимальним струмом до 2 А. Вхідна напруга завжди має бути нижчою за вихідну. ККД модуля MT3608 становить 93 % [8].

Параметри стабілізатора DA3 L7805CV наведені у таблиці 5.3. Для конденсаторів C4 і C3 вибираються компоненти відповідно до рекомендацій виробника L7805CV: C4 — електролітичний конденсатор CapXon GS ємністю 2000 мкФ із робочою напругою 50 В, C3 — багатошаровий керамічний конденсатор типу X7R ємністю 0,1 мкФ із робочою напругою 50 В та температурним коефіцієнтом ± 10 %.

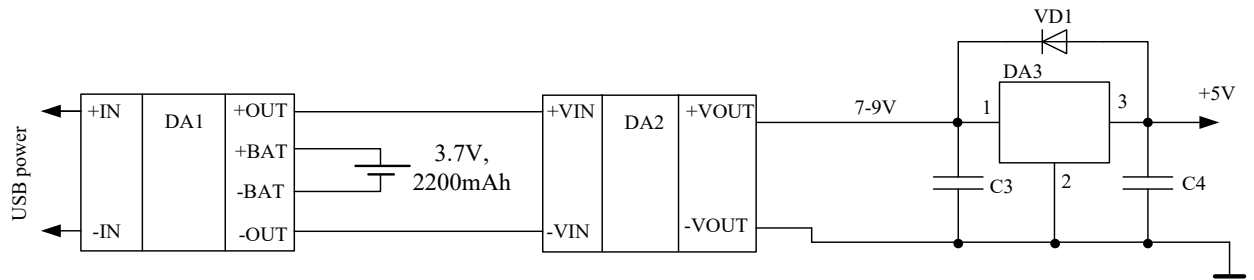


Рисунок 5.6 – Схема автономного стабілізованого блоку живлення

Таблиця 5.3 – Технічні характеристики мікросхеми L7805CV

Параметр	Значення
Вхідна напруга живлення, В	8-35
Вихідна стабілізована напруга, В	4,5-5,5
Робоча температура мікросхеми, °C	-55 - 150
Максимальний струм, мА	1200

Діод VD1 служить для захисту стабілізатора від перенапруг на виході. В якості VD1 застосовуємо імпульсний діод типу SF14 у корпусі DO-41, який має номінальний прямий струм 1 А, робочу зворотну напругу 200 В та час зворотного відновлення 35 нс.

Для виведення інформації про основні параметри роботи системи автоматизації використаємо LCD Keypad Shield — плату розширення з дворядковим дисплеєм і шістьма кнопками. Цей модуль дуже зручний у використанні, адже дозволяє уникнути необхідності розводити окрему перехідну плату.

Всі кнопки плати підключені через резистори з різним опором до одного аналогового входу, що дозволяє заощадити 5 дискретних пінів для інших завдань. Зовнішній вигляд передньої панелі цього модуля зображено на рисунку 5.7.



Рисунок 5.7 - Зовнішній вигляд LCD Keypad Shield

6 РОЗРАХУНОК І ПОБУДОВА СТАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОПРИВОДА

Побудуємо і розрахуємо електромеханічну характеристику двигуна ЕМ-115 номінальні параметри якого наведені в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Паспортні дані двигуна ЕМ-115

Параметр	Значення
Напруга живлення, В	36.5
Номінальний струм, А	1,5
Максимальна швидкість обертання, об/хв	3000
Привід	Біполярний привід постійного струму

Електромеханічною характеристикою називається залежність кутової швидкості ω від струму якоря двигуна I_a . Електромеханічна характеристика двигуна буде мати вигляд:

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{I_a \cdot R_{\Sigma}}{k\Phi}, \quad (6.1)$$

де k – коефіцієнт, що залежить від конструктивних даних двигуна;

ω – кутова швидкість двигуна;

Φ – магнітний потік.

Номінальна кутова швидкість

$$\omega_n = 2\pi n/60, \quad (6.2)$$

$$\omega_n = 209,333 \text{ (с}^{-1}\text{)}.$$

За номінальними параметрами можемо розрахувати такі величини:

Знайдемо R_{Σ} – сумарний опір якорного кола. Для цього спочатку знайдемо

номінальний опір:

$$R_H = U_H / I_H, \quad (6.3)$$

$$R_H = 36,5 / 1,5 = 24,33 \text{ (Ом)}.$$

Тоді:

$$R_\Sigma = 0,5(1 - \eta)R_H, \quad (6.4)$$

$$R_\Sigma = 0,5(1 - 0,475) \cdot 24,33 = 6,38 \text{ (Ом)}.$$

Розрахуємо коефіцієнт потоку:

$$k\Phi = \frac{U_H - I_{я} \cdot R_{я}}{\omega_H}, \quad (6.5)$$

$$k\Phi = \frac{36,5 - 1,5 \cdot 6,38}{209,333} = 0,128.$$

Розрахуємо кутову швидкість холостого ходу:

$$\omega_0 = \frac{U_H}{k\Phi}, \quad (6.6)$$

$$\omega_0 = \frac{36,5}{0,128} = 285,15 \text{ (с}^{-1}\text{)}.$$

Можемо розрахувати падіння кутової швидкості:

$$\Delta\omega = \frac{I_{я} \cdot R_{я}}{k\Phi}, \quad (6.7)$$

$$\Delta\omega = \frac{1,5 \cdot 6,38}{0,128} = 74,76 \text{ (с}^{-1}\text{)}.$$

Побудуємо електромеханічну характеристику, для цього визначимо точки:

Точка 1: $I_{\text{я}} = 0$; $\omega = 0$; $\omega_0 = 285,15 \text{ c}^{-1}$;

Точка 2: $\omega = 0$; $I_{\text{кз.}} = U/R_{\text{я}} = 36,5/6,38 = 5,72 \text{ A}$.

Електромеханічна характеристика двигуна постійного струму показана на рисунку 3.1.

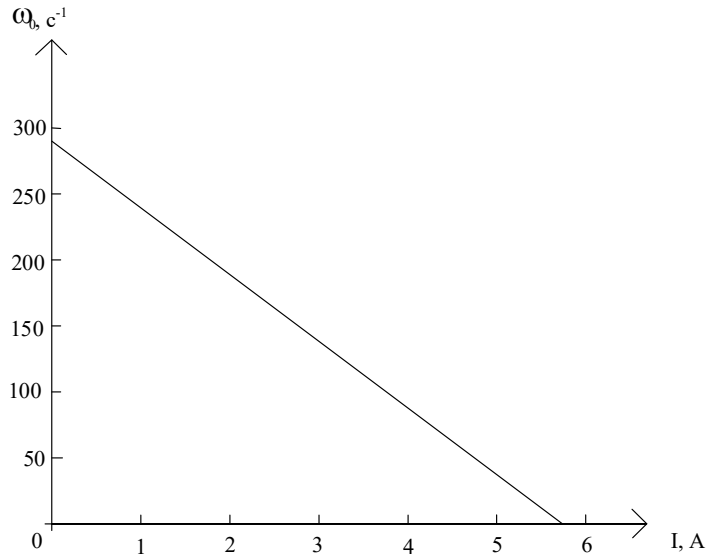


Рисунок 6.1 – Електромеханічна характеристика двигуна постійного струму

Проведемо розрахунок і побудуємо механічну характеристику двигуна. Механічна характеристика електродвигуна – це залежність між кутовою швидкістю обертання і струмом, що проходить через його обмотки. Вона має вигляд:

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{M_{\text{д}} \cdot R_{\Sigma}}{(k\Phi)^2}. \quad (6.8)$$

Усі номінальні параметри залишаються такими ж, як і для електромеханічної характеристики двигуна. Для побудови механічної характеристики визначимо ключові точки:

Точка 1: $M = 0$, $\omega = U / k\Phi = \omega_0 = 285,15 \text{ c}^{-1}$,

Точка 2: $\omega_0 = 0$, $M_{\text{кз}} = (U / R_{\text{я}}) \cdot K\Phi = (36,5/6,38) \cdot 0,128 = 0,73 \text{ Нм}$.

По даним точкам побудуємо механічну характеристику на рисунку 6.2.

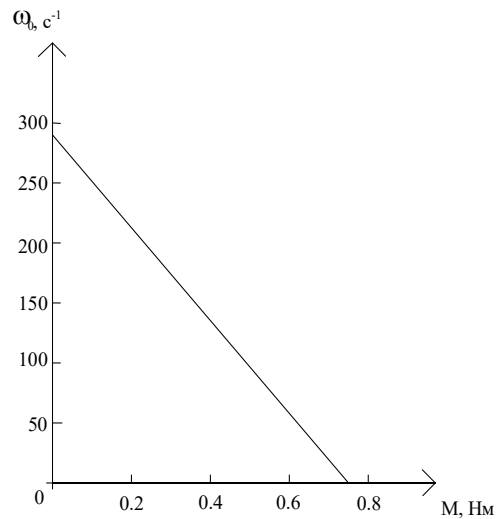


Рисунок 6.2 – Механічна характеристика електродвигуна

Дозвіл інкрементних енкодерів вимірюється кількістю імпульсів на один оберт. На рисунку 6.3 показано, що інкрементний енкодер генерує 282 імпульси за повний оберт.

На рисунку 3.21 ілюстровано дозвільну здатність інкрементного енкодера, що свідчить про те, що за один повний оберт енкодера утворюється 282 імпульси.

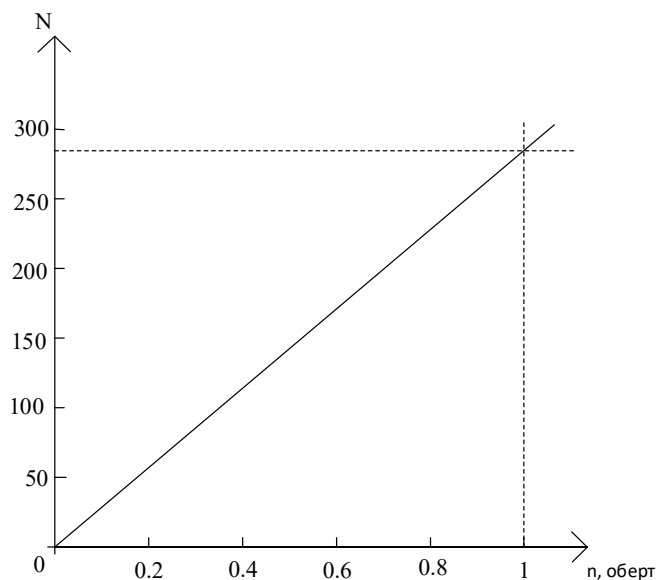


Рисунок 6.3 – Дозвільна здатність інкрементного енкодера

7 МОДЕЛЮВАННЯ СЕРВОПРИВОДА

Для забезпечення можливості віддаленого налаштування параметрів сервопривода створено комп'ютерні моделі сервопривода у середовищі Matlab Simulink. На рисунку 7.1 наведена цифрова модель сервопривода, яка являє собою релейний регулятор положення з рівномірним темпом збільшення або зменшення поточної координати, що визначається частотою тактового генератора.

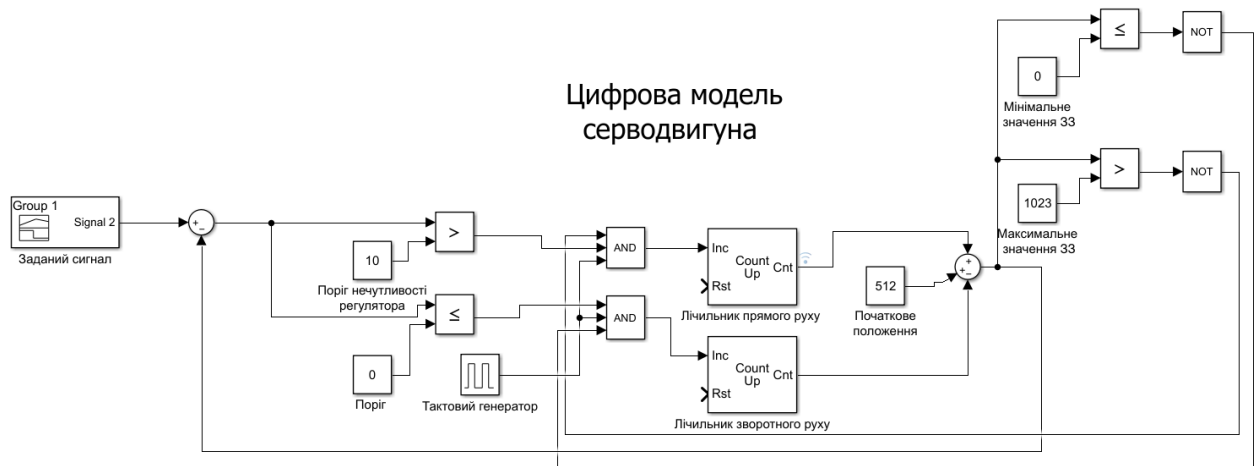


Рисунок 7.1 – Цифрова модель сервопривода

Положення сервопривода в моделі обмежене діапазоном від 0 до 1000, що пропорційно відповідає фактичному положенню або куту повороту. Значення координати положення формується на виході суматора, вхідні сигнали якого мають протилежні знаки і подаються з виходів лічильників прямого та зворотного руху. Нарощування лічильників відбувається з частотою тактового генератора залежно від керуючого сигналу релейного регулятора. Якщо помилка регулювання перевищує поріг нечутливості, активується нарощування лічильника прямого руху, а при від'ємному значенні помилки – нарощування лічильника зворотного руху.

Здійснимо моделювання для різних форм вхідних сигналів задання, взявши початкове положення вала рівним 500, що відповідає центральному

положенню. На рисунку 7.2 показано форму тестового сигналу, який задає вихідну координату.

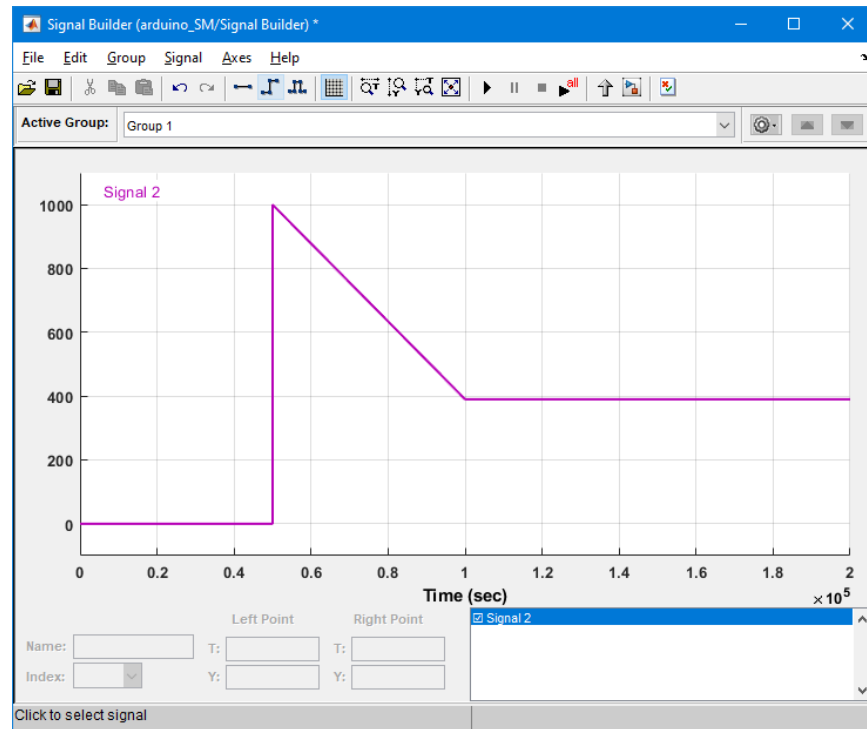


Рисунок 7.2 – Тестовий сигнал

Відпрацювання координати задання наведено на рисунку 7.3

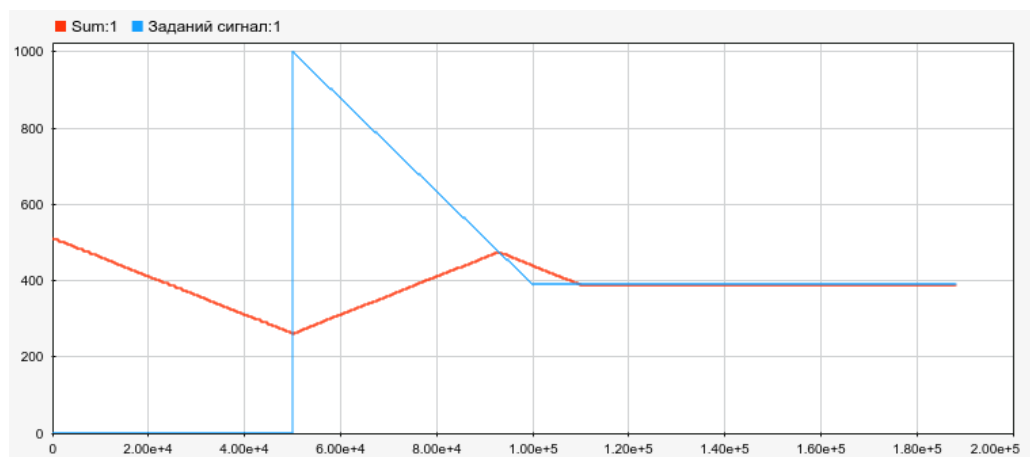


Рисунок 7.3 – Відпрацювання сигналу задання

Промодельюємо відпрацювання положення сервоприводом для стрибкоподібного сигналу (рисунок 7.4)

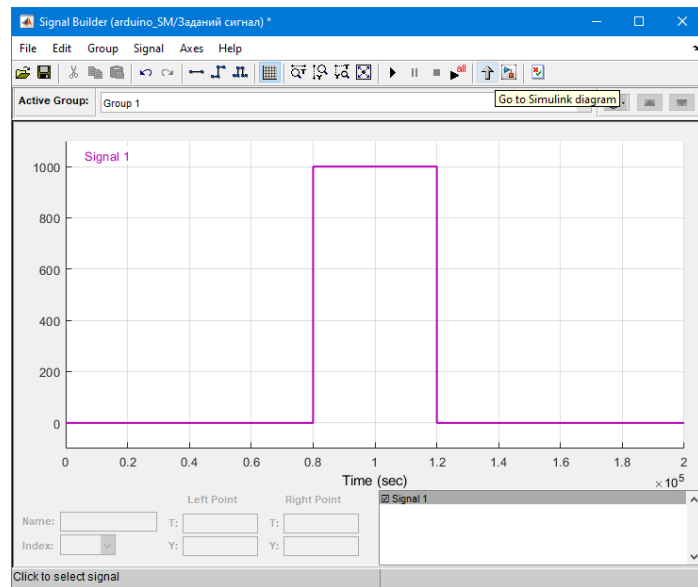


Рисунок 7.4 – Тестовий стрибкоподібний сигнал

Як видно з результатів моделювання (рисунок 7.5), сервопривод правильно реагує на задане положення, проте його динамічні характеристики недостатні для повного відтворення цього положення.

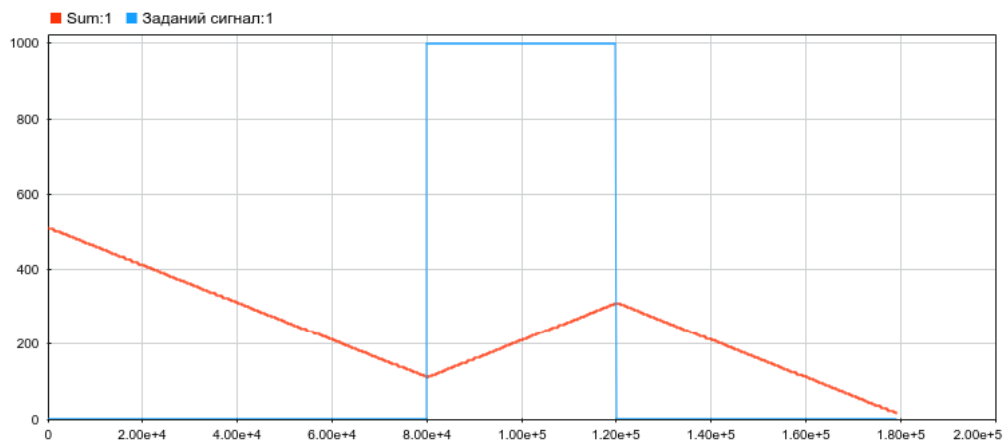


Рисунок 7.5 – Тестовий стрибкоподібний сигнал

Змінимо налаштування генератора тактових імпульсів збільшивши частоту в 10 разів. Відповідні налаштування тактового генератора наведені на рисунку 7.6.

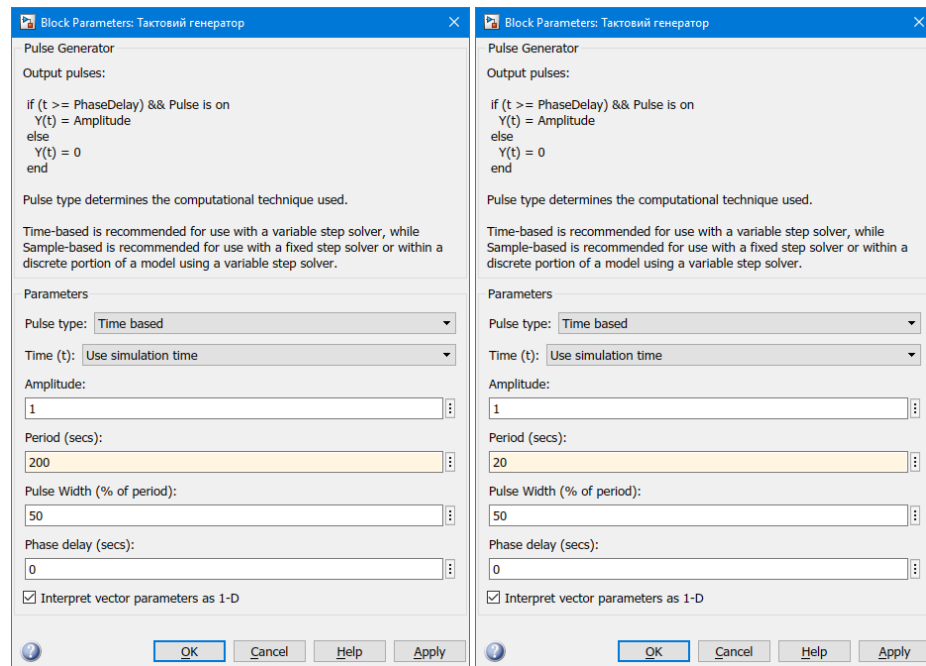


Рисунок 7.6 – Параметри налаштування тактового генератора

Відповідно відпрацювання координати сервоприводом відбувається із більшою ступінню подібності (рисунок 7.7).

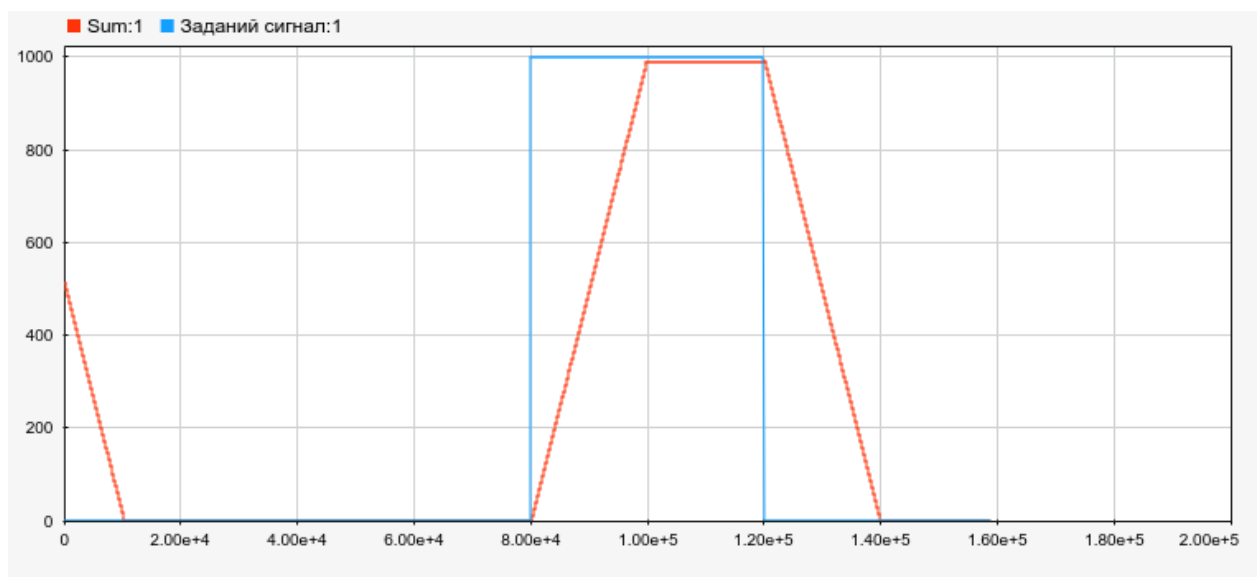


Рисунок 7.7 – Відпрацювання тестового стрибкоподібного сигналу

Промодельюємо відпрацювання положення сервоприводом для синусоїдального сигналу (рисунок 7.8).

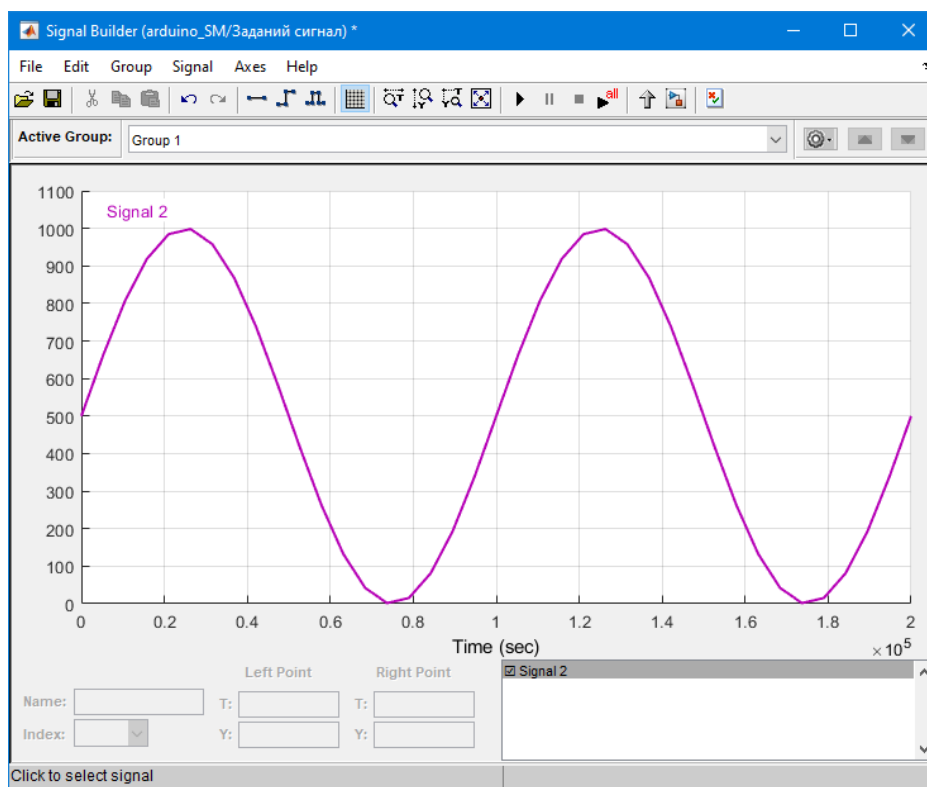


Рисунок 7.8 – Тестовий синусоїдальний сигнал

Відповідно, відпрацювання координати сервоприводом відбувається коректно з урахуванням його динаміки (рисунок 7.9). На рисунку 7.10 показано графік відпрацювання координати при синусоїдальному входному сигналі і нульовому початковому положенні.

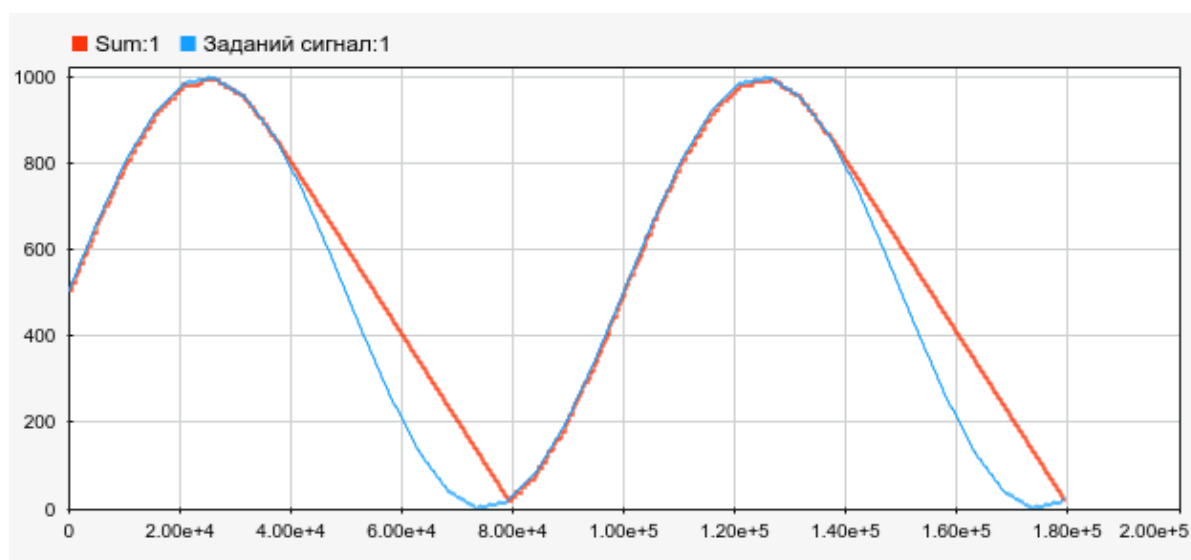


Рисунок 7.9 – Відпрацювання тестового синусоїдального сигналу

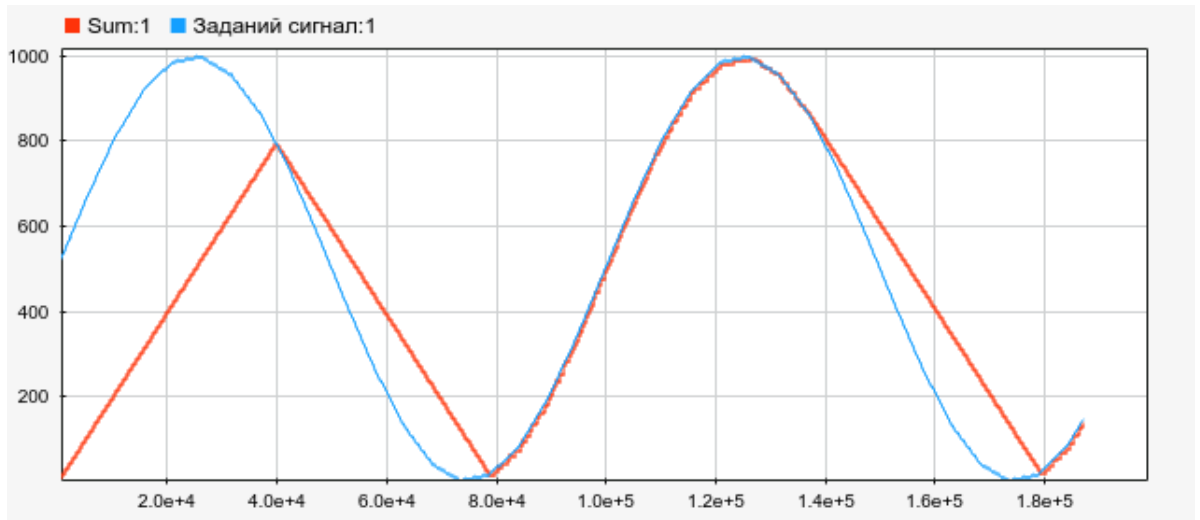


Рисунок 7.10 – Відпрацювання синусоїдального сигналу при нульовому початковому положенні

Також представлена неперервна модель сервопривода (рисунок 7.11), у якій положення визначається як вихідний сигнал інтегратора з обмеженням. Задане значення регулятора планується формувати вручну за допомогою елемента керування.

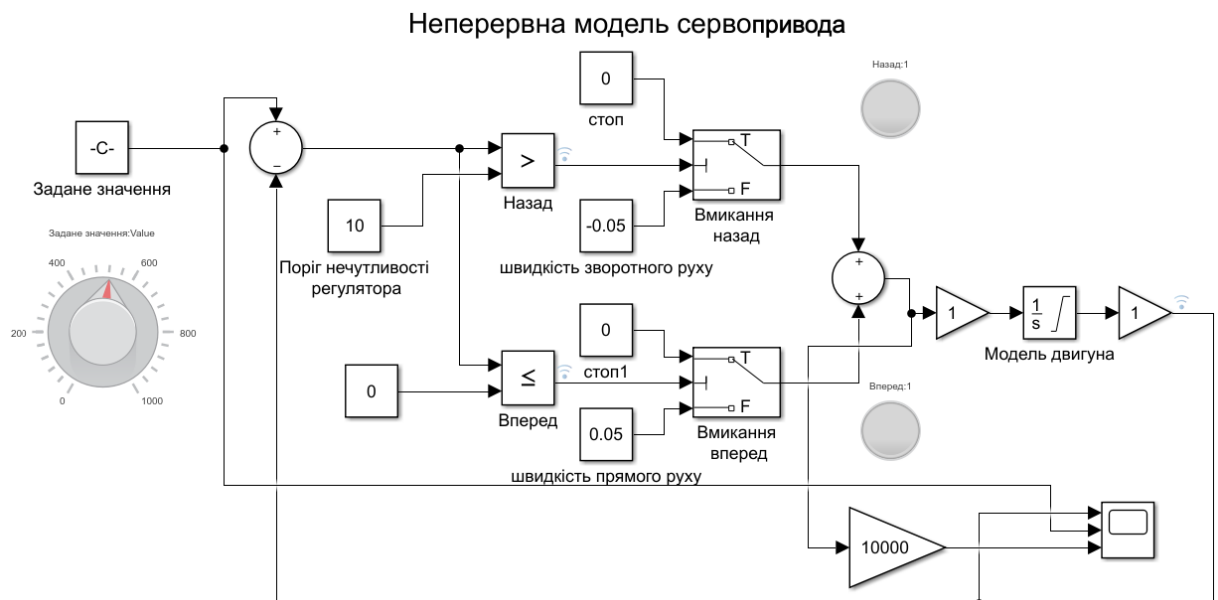


Рисунок 7.11 – Неперервна модель сервопривода

Регулятор функціонує таким чином: на його вхід подається сигнал, який є

різницею між заданим значенням і фактичним. Тобто, від бажаного значення віднімається поточне. Залежно від отриманого результату регулятор визначає, у якому напрямку потрібно рухатися — вперед чи назад — щоб компенсувати цю помилку. Таким чином, усі регулятори прагнуть усунути відхилення, керуючи рухом у відповідному напрямку.

Представимо графік для кращого розуміння процесу регулювання (рисунок 7.12).

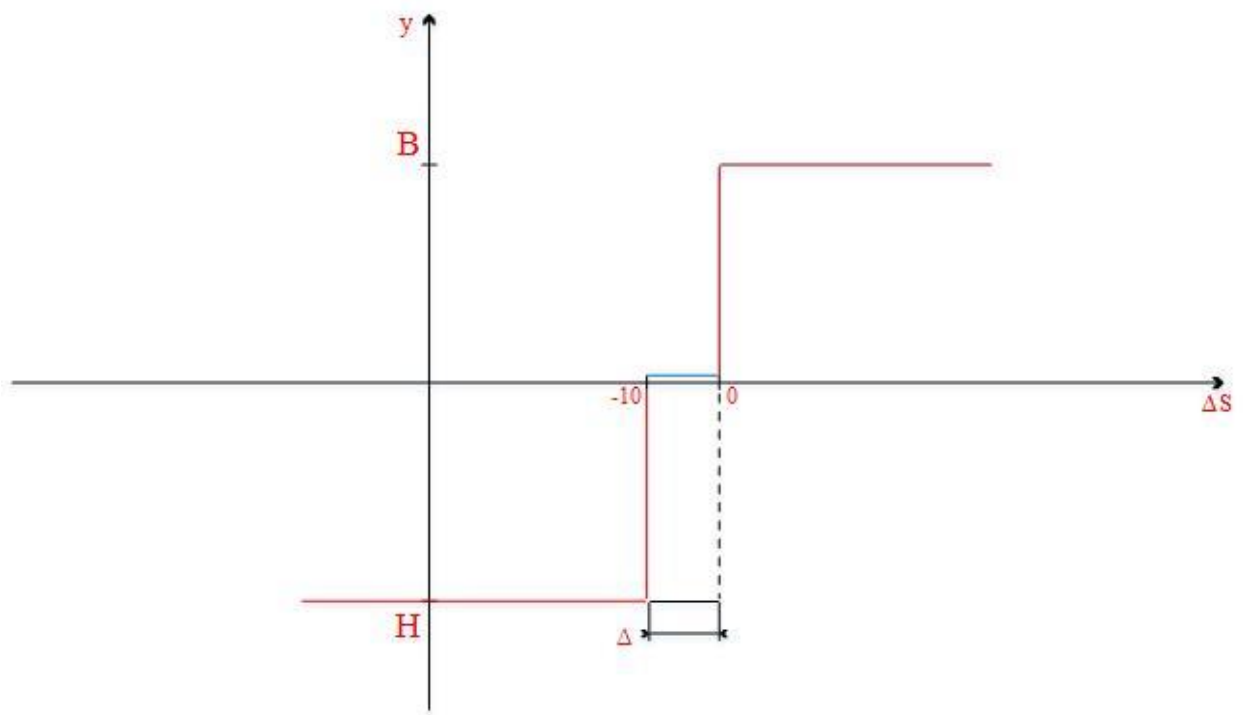


Рисунок 7.12 – Вихідна характеристика релейного регулятора із зоною нечутливості

Якщо різниця є додатною, то рух відбуватиметься вперед — тобто ми віднімаємо зворотний зв'язок від заданого значення. З часом ця різниця поступово зменшуватиметься до нуля. Простий релейний регулятор при від'ємній різниці одразу вмикає рух у зворотному напрямку, але це може спричинити нестабільний режим через інерцію, через яку пристрій може "переїжджати" задану точку. Щоб уникнути цього, вводять зону нечутливості (на графіку вона позначена синім кольором). В цій зоні регулятор вимкнений, навіть якщо прилад трохи відхилиться, наприклад, на -5, — тоді нічого не

відбувається. А рух у зворотньому напрямку запускається тільки тоді, коли різниця перевищує поріг, наприклад -10.

Це також відбувається, коли змінюється задане значення. Якщо зворотний зв'язок стає більшим за задане, то рух знову спрямовується в протилежну сторону, і різниця починає зменшуватися. Коли вона досягає -10, прилад знову вимикається.

На рисунку 7.13 показано відпрацювання стрибкоподібного сигналу.

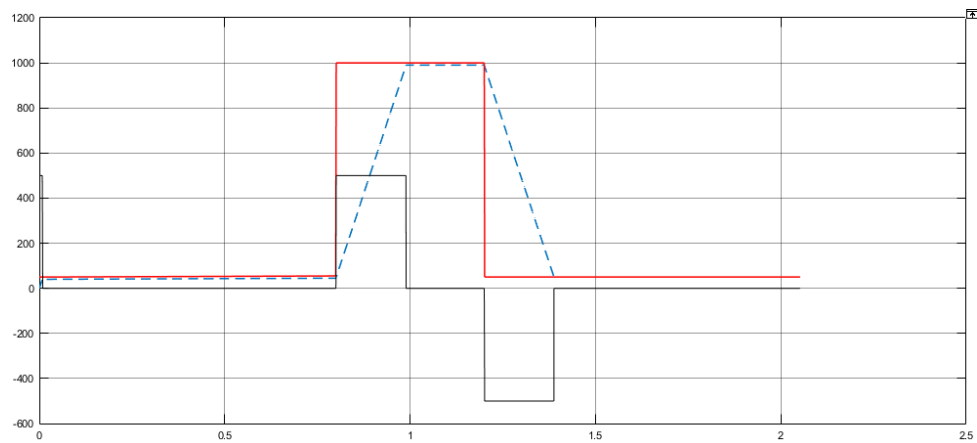


Рисунок 7.13 – Відпрацювання тестового стрибкоподібного сигналу

На рисунку 7.14 показано відпрацювання змінного сигналу задання

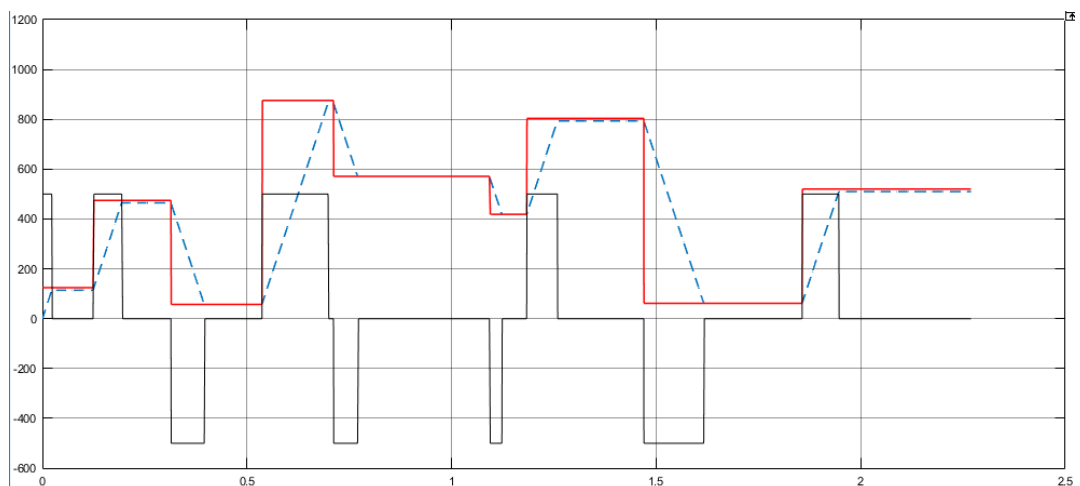


Рисунок 7.14 – Відпрацювання змінного сигналу задання

На рисунку 7.15 наведено графік відпрацювання координати для

синусоїди при нульовому початковому положенні.

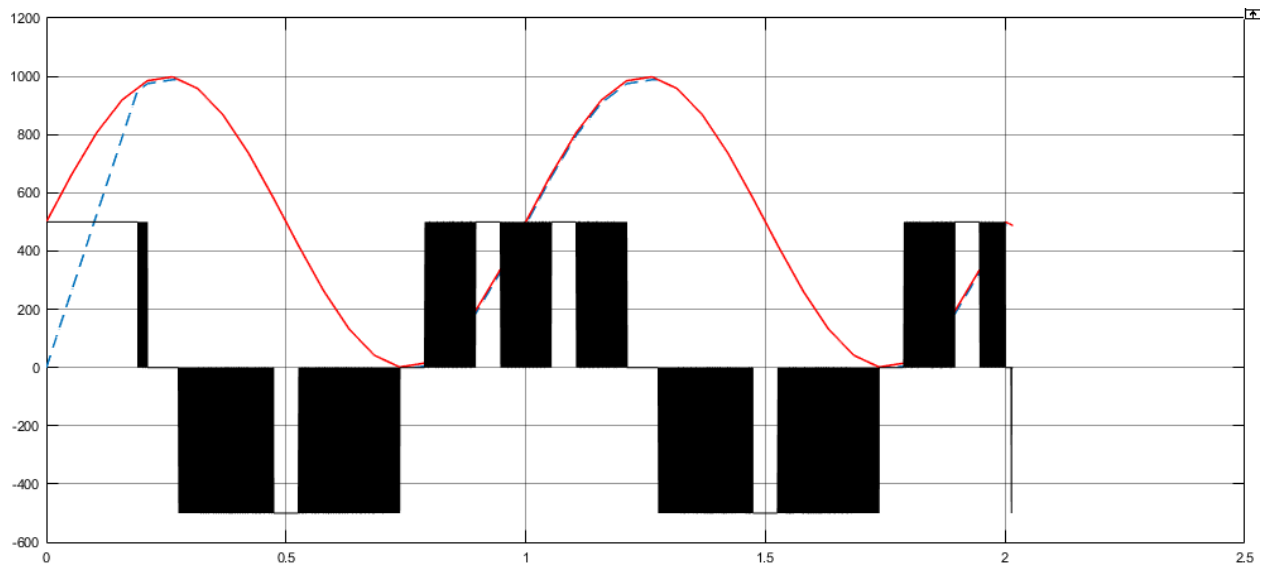


Рисунок 7.15 – Відпрацювання синусоїдального сигналу при нульовому початковому положенні

Як показує графік 7.15 неперервна модель недостатньо ефективна для відпрацювання безперервного сигналу задання.

8 ВИБІР ПІДХОДІВ ЩОДО ПОБУДОВИ ІНФОРМАЦІЙНО ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ СТЕНДА

Мета оновлення лабораторного обладнання - не лише для управління рухом електродвигуна, а й розширення його можливостей, додавши інформацію та налаштування вимірювань. Така система повинна забезпечити збірку, зберігання та візуалізацію як статичних, так і динамічних характеристик сервоприводу з можливістю їх аналізу та корекції параметрів реального часу.

Основним фактором вибору дизайну системи була її гнучкість, простота в налаштуванні та здатність налаштуватися на зміну середовища. Обчислювальний центр мережі даних та вимірювань обрав платформу мікроконтролера Arduino UNO, яка пропонує необхідну кількість з'єднань/виходів, підтримки зовнішньої пам'яті, екранів, кодерів та інших аксесуарів. Простота кодування, широкий спектр доступних інструментів та жвава група творців пропонують додаткові переваги.

Щоб гарантувати інтерфейс користувача та управління параметром у режимі реального часу для контролера використовують LCD Keypad Shield. Це дозволяє користувачеві спостерігати за нинішніми налаштуваннями, змінювати параметри, ініціювати вирівнювання та визначати напрямок руху без додаткових інструментів.

Оскільки стенд призначений для навчання та навчання, важливо дотримуватися налаштувань між робочими періодами. Щоб досягти цього, пам'ять EEPROM, яка покладається на енергію, включається в систему, яка зберігає значення налаштувань швидкості, областей, де вона не чутлива, остання позиція та параметри регулятора. Це запобігає необхідності повторної калібрування після відключення або перезапуску пристрою.

Щоб гарантувати точне вирівнювання та видалити накопичення помилок, система використовує автоматичне регулювання та виявлення нульової точки, активовану при необхідності. Це підвищує надійність та стійкість пристрою зберігання протягом тривалості.

Під час проєктування лабораторного стенда для дослідження сервоприводів одним з ключових завдань є побудова ефективної інформаційно-вимірювальної системи (далі ІВС), яка забезпечує зчитування, обробку, візуалізацію та зберігання основних параметрів роботи привода. Для реалізації ІВС розглядалося декілька варіантів, кожен з яких має свої переваги й недоліки залежно від цілей, умов експлуатації та технічної реалізації.

8.1 Arduino як базова інтегрована система керування

Найбільш доцільним і практичним підходом для стенда на базі мікроконтролера стало використання платформи **Arduino** у поєднанні з **LCD Keypad Shield**, який виконує функції модуля індикації та введення. Такий підхід забезпечує автономну роботу пристрою без потреби в зовнішньому комп'ютері, дозволяє оперативно переглядати параметри (швидкість, координати, зону нечутливості), а також змінювати їх за допомогою кнопок.

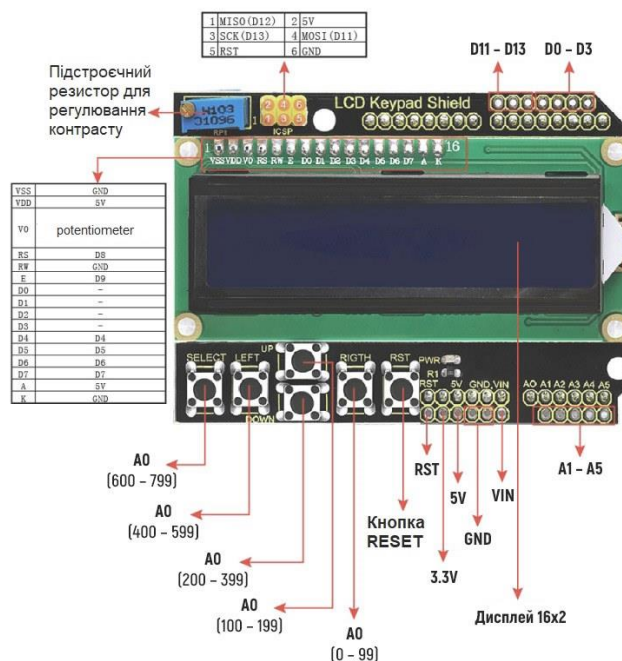


Рисунок 8.1 – модуль LCD Keypad Shield

Крім того, мікроконтролер дозволяє зчитувати сигнали з енкодера, формувати дані для моделювання, а також зберігати поточне положення й

налаштування в енергонезалежній пам'яті EEPROM, що особливо важливо при повторних запусках або аварійному відключенні живлення.

8.2 MATLAB/Simulink - середовище ІВС та аналізу динаміки

Для побудови цифрової моделі сервопривода та дослідження його характеристик було використано середовище MATLAB/Simulink, яке забезпечує широкі можливості моделювання, аналізу та візуалізації. Однією з ключових переваг цього середовища є можливість підключення реального мікроконтролера Arduino Uno через інтерфейс Simulink Support Package for Arduino Hardware.

Це дозволяє:

- передавати керуючі сигнали з моделі безпосередньо на апаратний стенд;
- зчитувати дані з сенсорів у реальному часі;
- проводити експериментальну верифікацію результатів моделювання.

У Simulink було реалізовано кілька моделей:

- релейний регулятор з дискретним тактуванням;
- неперервна модель із зоною нечутливості;
- моделі для аналізу впливу різної форми сигналів задання (синусоїда, прямокутник, імпульс).

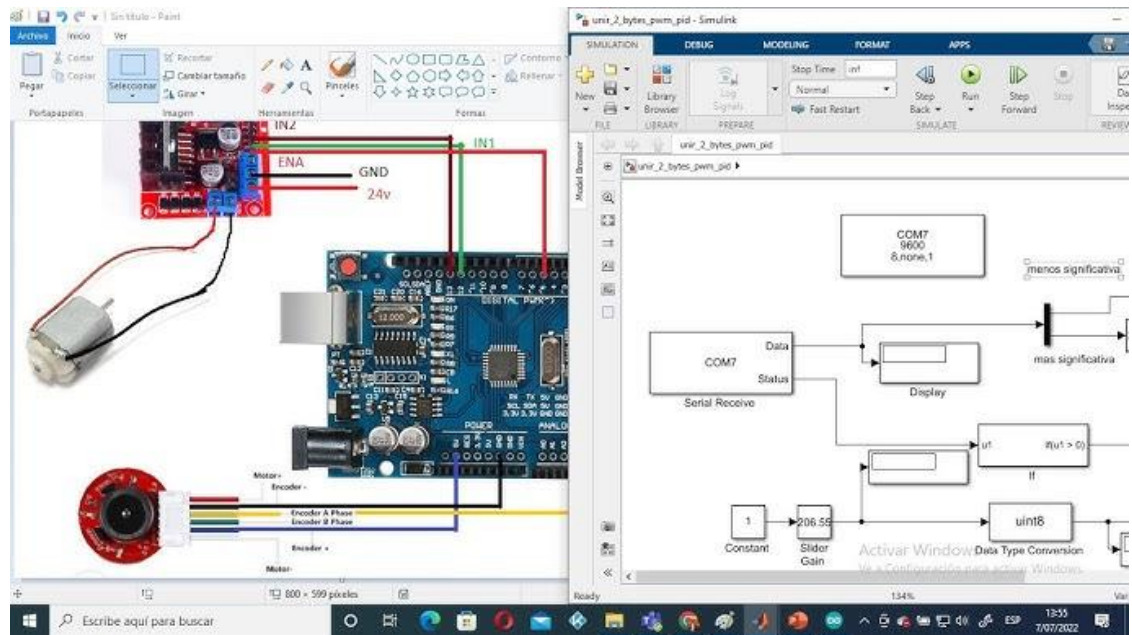


Рисунок 8.2 – Модель інформаційно-вимірювальної системи в середовищі MATLAB/Simulink

Ці моделі дозволили гнучко дослідити динаміку сервопривода, визначити вплив параметрів регулятора на точність позиціонування, а також перевірити стійкість системи до різких змін навантаження або завад. MATLAB/Simulink показав себе як потужний інструмент для етапу дослідження та розробки, однак його застосування обмежене вимогою постійного підключення до ПК та наявності ліцензії.

8.3 CODESYS VERSION 2.3 для розробки IBC

Ще одним альтернативним середовищем, яке розглядалося для реалізації IBC, є **CODESYS** — платформа, орієнтована на програмування ПЛК (програмованих логічних контролерів) за стандартом IEC 61131-3. Вона забезпечує візуалізацію, зчитування змінних, моделювання логіки керування, а також взаємодію з фізичними пристроями через мережеві інтерфейси.

CODESYS був би доречним у випадку побудови більш складної системи на базі ПЛК або при розширенні лабораторного стенда до рівня промислового тестового комплексу. Його перевагою є масштабованість та підтримка HMI-панелей, однак для невеликої системи на базі Arduino він є надлишковим і

складнішим у реалізації.

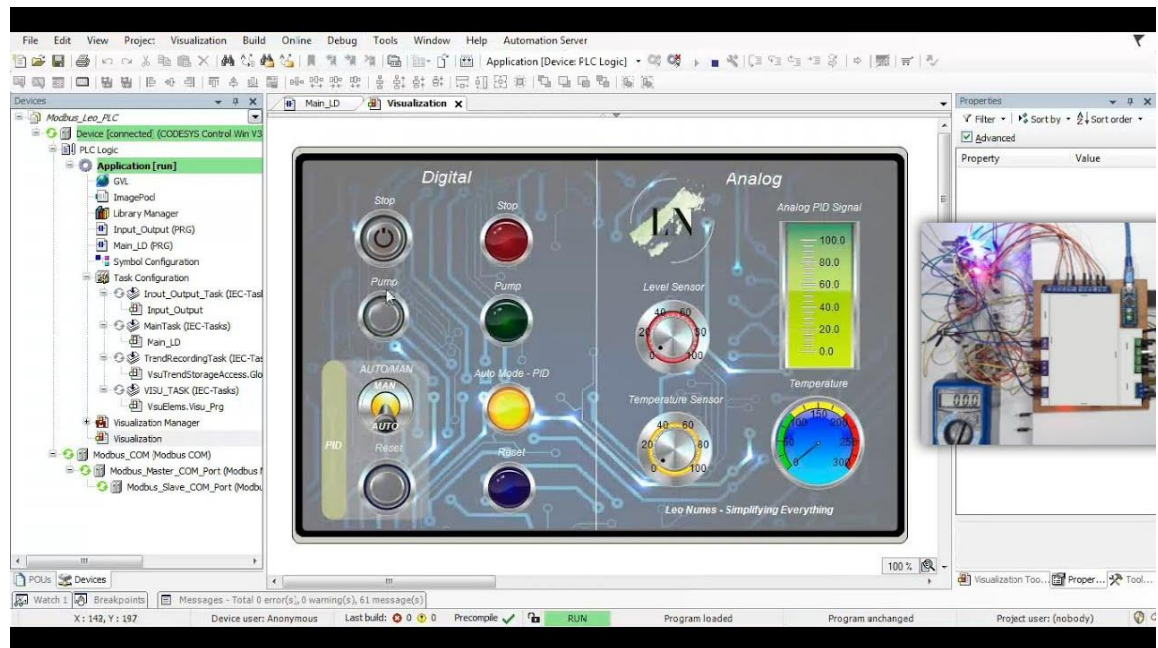


Рисунок 8.3 – Інтерфейс проєкту в середовищі CODESYS v2.3 для реалізації IBC

8.4 LabVIEW як інструмент візуалізації

LabVIEW є середовищем візуального моделювання різних процесів сучасного світу з широкими можливостями, тому інтеграція платформи Arduino з цим середовищем відкриває багато можливостей реалізації абсолютно унікальних проєктів. У цій статті ми розглянемо підключення середовища LabVIEW до плати Arduino Uno.

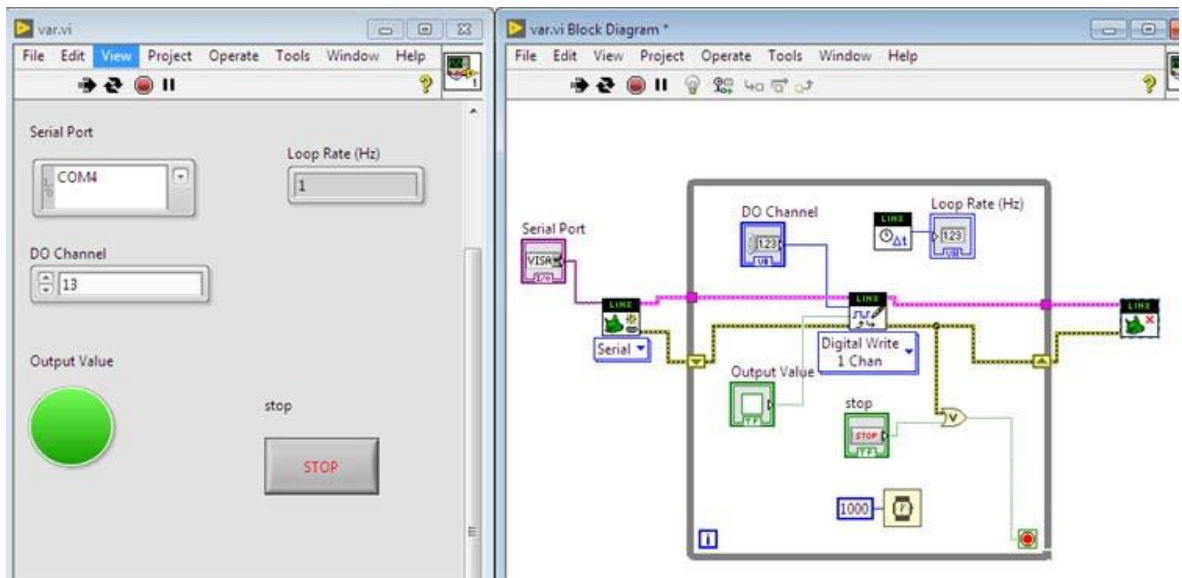


Рисунок 8.4 – Візуалізація IBC у середовищі LabVIEW

8.5 Порівняння та вибір підходу

У процесі аналізу було враховано основні технічні та експлуатаційні характеристики кожного середовища, такі як: можливість моделювання процесів, реалізація збору даних у реальному часі, зручність візуалізації, робота з фізичним обладнанням, простота освоєння, а також рівень їхнього впровадження у промисловості.

Таблиця 8.1 – Порівняльна таблиця для обраних середовищ

Середовище	Переваги	Недоліки
Arduino + LCD Keypad Shield	- Низька вартість апаратного забезпечення - Простота реалізації - Багато прикладів та бібліотек - Компактне відображення інформації	- Обмеженість інтерфейсу - Відсутність графіків у реальному часі - Потрібно програмувати вручну
MATLAB / Simulink	- Можливість моделювання та аналізу сигналів - Потужні інструменти обробки даних - Інтеграція з Arduino та іншими пристроями - Побудова графіків та блок-схем	- Висока вартість - Високі системні вимоги - Потрібні базові знання MATLAB
CODESYS Version 2.3	- Промисловий стандарт - Зручна робота з ПЛК та	- Складніший у вивченні, ніж Arduino - Менш гнучкий для

	контролерами - Підтримка мов IEC 61131-3 - Імітація та відлагодження вбудовано	виводу графіки - Не оптимальний для обробки аналогових сигналів
LabVIEW	- Графічне програмування - Потужна візуалізація даних у реальному часі - Добре підходить для наукових досліджень та стендів - Широка підтримка DAQ- пристроїв	- Висока вартість ліцензії - Високі вимоги до комп'ютера - Вивчення специфічного середовища програмування

Згідно з отриманими даними (таблиця 8.1), кожне середовище має свої переваги та недоліки. Наприклад, Arduino з LCD Keypad Shield є недорогим і простим у реалізації рішенням, що дозволяє безпосередньо керувати фізичним пристроєм. Проте воно не підтримує вбудовані засоби моделювання або гнучку візуалізацію. Натомість MATLAB/Simulink має потужні можливості для моделювання та аналізу систем, гнучкий інтерфейс візуалізації та інтеграцію з апаратним забезпеченням, але вимагає значного рівня підготовки та є комерційним продуктом.

CODESYS v2.3 позиціонується як середовище для програмування ПЛК, тому має широке застосування в промислових системах керування, хоча менш гнучке у візуалізації. LabVIEW поєднує в собі можливості для графічного програмування, зручного налаштування візуалізації та інтеграції з реальним обладнанням, що робить його популярним у промисловій автоматизації та дослідженнях.

У таблиці 8.2 наведено узагальнене порівняння можливостей кожного середовища у форматі «плюсів» і «мінусів». Це дозволяє швидко зорієнтуватися в доцільності використання кожного з варіантів для конкретних задач.

Таблиця 8.2 – Порівняння середовищ за основними можливостями

Середовище	Моделювання процесів	Збір даних у реальному часі	Візуалізація / графіки	Робота з фізичним пристроєм	Простота у вивченні	Промислове застосування
Arduino +	–	+	–	+	+	–

LCD Keypad Shield						
MATLAB / Simulink	+	+	+	+	–	+
CODESYS v2.3	+	+	–	+	–	+
LabVIEW	+	+	+	+	–	+

Загалом вибір середовища повинен ґрунтуватися на вимогах до функціональності системи, наявності досвіду у користувача та цільовому призначенні стенда. Для навчальних цілей доцільно використовувати Arduino, як найбільш доступний варіант, а для глибшого аналізу та промислової апробації — MATLAB/Simulink або LabVIEW.

9 ОХОРОНА ПРАЦІ

Охорона праці є ключовим чинником забезпечення безпечних і здорових умов праці в будь-якій галузі, особливо в умовах стрімкого розвитку технологій та широкого впровадження автоматизованих систем. Для фахівців з автоматизації особливо важливим є розуміння не лише технологічного процесу, а й потенційних виробничих ризиків, пов'язаних з експлуатацією складного електротехнічного та електронного обладнання. Забезпечення безпеки праці на етапах проєктування, монтажу, налагодження та експлуатації систем автоматизації є запорукою збереження життя та здоров'я персоналу, підвищення продуктивності праці та зменшення виробничих витрат.

Об'єктом даної бакалаврської роботи є лабораторний стенд для дослідження системи автоматизованого керування сервоприводом постійного струму на базі мікроконтролера Arduino Uno. До складу стенду входить серво двигун, плата Arduino Uno, модуль драйвера двигуна L298N, енкодер, модульний блок живлення, модуль кнопок, LCD-дисплей 16×2, а також кінцевий вимикач, що забезпечує апаратну безпеку рухомих елементів. Стенд змонтовано на макетній основі та використовується для проведення експериментів у навчальних умовах, зокрема для налаштування П-регулятора швидкості обертання двигуна та дослідження динаміки регулювання.

Особливості об'єкта, які впливають на розробку рішень з охорони праці, включають: наявність джерел підвищеної небезпеки у вигляді напруги до 24 В, рухомі частини сервопривода, що можуть призвести до механічних травм, ризик перегріву елементів електронної схеми, а також необхідність багаторазового ручного втручання під час досліджень. Прилади та елементи автоматизації розміщені на макетній панелі стенду, що знаходиться на робочому столі в лабораторному приміщенні. Експлуатація здійснюється в умовах навчальної лабораторії з доступом до мережі 220 В, тому особливої уваги потребує електробезпека та захист від короткого замикання.

На основі аналізу умов проведення робіт відповідно до Державних санітарних норм і правил «Гігієнічна класифікація праці...», у вступній частині визначаються потенційно небезпечні та шкідливі фактори, серед яких: вплив електромагнітного випромінювання, можливість ураження електричним струмом, надмірне зорове навантаження при роботі з дисплеєм, ризик травмування під час обслуговування рухомих елементів. Варто підкреслити, що небезпека цих факторів виникає лише за умов порушення правил експлуатації та нехтування вимогами з охорони праці.

Згідно з вимогами ДСТУ OHSAS 18002:2015 [10] та ДСТУ ISO 45001:2019 [11], система управління охороною праці в даному випадку має бути інтегрована у процес управління лабораторним дослідженням, що дозволяє зменшити ризики на всіх етапах експлуатації стенду. Ідентифікація потенційно небезпечних процедур дозволяє впровадити превентивні заходи для уникнення інцидентів.

9.1. Технічні рішення з безпечного проведення досліджень

9.1.1 Технічні рішення з безпечної організації робочих місць

Рациональна організація робочих місць є важливим аспектом забезпечення безпечних і здорових умов праці. У процесі експлуатації лабораторного стенда для дослідження сервопривода постійного струму були реалізовані технічні рішення, що спрямовані на зниження виробничих ризиків, забезпечення електробезпеки, ергономічності та пожежної безпеки.

Розміщення стенда, комп'ютера, блока живлення та допоміжного обладнання здійснено з урахуванням вимог ергономіки. Всі органи керування розташовані в межах досяжності рук (до 600 мм), що відповідає вимогам ДСТУ EN 547-3:2004 і дозволяє уникати зайвих рухів, поворотів корпусу або нахилів, що можуть призвести до втоми або травм.

Робоче місце обладнане комбінованим освітленням: загальне штучне освітлення (люмінесцентні лампи) доповнюється локальним (настільна лампа). Рівень освітленості становить не менше 500 лк, для робіт середньої точності.

Для забезпечення електробезпеки передбачено використання джерел живлення з обмеженням струму, реалізовано захисне заземлення струмопровідних частин, встановлено автоматичні вимикачі з функціями захисту від короткого замикання та перевантаження. Всі електричні з'єднання мають відповідну ізоляцію та маркування. Рівень напруги в ланцюгах керування не перевищує 12 В, що відповідає вимогам ПУЕ.

З'єднувальні кабелі прокладені в захисних каналах або закріплені стяжками, що виключає їх вільне розміщення на підлозі чи робочому столі. Це знижує ймовірність механічного пошкодження або травмування внаслідок спотикання. Кожен кабель має маркування, що дозволяє швидко ідентифікувати з'єднання та уникнути помилок при підключенні.

9.1.2 Електробезпека

Живлення лабораторного стенда здійснюється від чотирипровідної трифазної мережі 380/220 В (фаза-нуль 220 В).

Для запобігання ураженню електричним струмом всі металеві частини та огороження системи досліджень підключають до захисного заземлення згідно з ДСТУ Б А.3.2-13:2011. Додатково застосовуються захисні кожухи, понижувальні трансформатори для ланцюгів керування низькою напругою та пристрої контролю напруги й струму.

Захисне заземлення й занулення струмопровідних частин слід виконувати у відповідності до ДСТУ EN 61140:2019.

Під час нормальної експлуатації додатково використовуються ізоляційні кожухи на струмоведучих елементах, малонебезпечні напруги керування та захисні пристрої. Обслуговуючий персонал зобов'язаний працювати в діелектричному взутті й рукавицях та регулярно перевіряти цілісність цих

засобів захисту, захищаючи їх від механічного пошкодження й старіння матеріалів. В мережах напругою до 1 кВ огороження струмоведучих частин виконуються суцільними, а мінімальна відстань від відкритих металевих поверхонь до захисних огорожень має складати не менше 5 см згідно з ПУЕ. Регулярний контроль стану ізоляції сприяє своєчасному виявленню дефектів і попередженню пробою під час дотику до проводки.

9.2. Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

9.2.1. Мікроклімат

Роботи з оперативно-ремонтного обслуговування серводвигуна належать до 1а категорії за ступенем важкості праці, із енергоспоживанням у межах до 120 Вт. Норми допустимої температури, відносної вологості та швидкості руху повітря в робочій зоні наведені в таблиці 9.1.

Таблиця 9.1 – Допустимі норми параметрів повітря

Період року	Категорія робіт	Температура, °С Допустима		Відносна вологість	Швидкість руху, X
		Верхня межа	Нижня межа	Допустима	Допустима
Холодний	Ia	21-25	18-26	75	не більше 0,1
Теплий		22-28	20-30	55 при 28 °С	0,1-0,2

9.2.2. Склад повітря робочої зони

Забруднення повітря в робочій зоні контролюється гранично допустимими концентраціями. Під час монтажних робіт утворюється нетоксичний пил. При провітрюванні або роботі системи вентиляції через відкриті вікна й двері в приміщення можуть потрапляти пилові та хімічні забруднювачі, що містяться в атмосферному повітрі. Відповідні гранично допустимі концентрації шкідливих речовин в повітрі наведені в таблиці 9.2.

Таблиця 9.2 - Гранично допустимі концентрації шкідливих речовин для повітря атмосфери, в робочій зоні для обслуговуючого персоналу

Назва речовини	ГДК, мг/м ³		Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньо добова	
Пил	0,5	0,15	4

Для підтримання якісного складу повітря в робочій зоні відповідно до ДСН проектом передбачено встановлення пиловідсмоктуючих агрегатів з рукавними фільтрами безпосередньо біля обладнання, що забезпечує подачу очищеного повітря в приміщення, а також регулярний контроль гранично допустимих концентрацій шкідливих речовин у повітрі.

9.2.3. Виробниче освітлення

Для створення оптимальних умов зорової праці на робочому місці оператора стенда побутового підігріву води регламентується рівень освітленості. Роботи за приладами належать до середньої точності (розряд IV, підрозряд «в» за ДБН В.2.5-28-2018) [12]. Нормативні значення при природному, штучному та комбінованому світлі наведено в таблиці 9.3.

Щоб підтримувати необхідні показники освітленості, не рідше ніж двічі на рік очищають вікна та світильники від пилу і регулюють проникнення денного світла за допомогою жалюзі. У разі недостатнього природного світла застосовують загальне штучне освітлення за допомогою світлодіодних ламп E27 LED 15W NW A60 “SG”. Висота підвісу світильників над робочою поверхнею становить 2,5 м.

Таблиця 9.3 – Вимоги до освітлення приміщень виробничих підприємств

Харак-ка зорової роботи	Найменший або еквівалентний розмір об'єкта розрізнення, мм	Розряд зорової роботи	Під-розряд зорової роботи	Контраст об'єкта з фоном	Характеристика фону	Штучне при системі комбінованого освітлення		Природне $E_{н пр}$	Суміщене $E_{н сум}$
						всього	у т. ч. від загального		
Середньо і точності	Від 0,5 до 1,0 включно	IV	в	малий середній великий	світлий середній темний	400	200	4	2,4

9.2.4. Виробничий шум

Під час виконання монтажних робіт утворюється виробничий шум широкопasmового характеру з безперервним спектром, що охоплює більше однієї октави. Допустимі рівні звукового тиску, середні та еквівалентні рівні шуму на робочих місцях визначені в ДСН 3.3.6.037-99[13] і наведені в таблиці 9.4.

Таблиця 9.4 – Допустимі рівні звукового тиску у октавних смугах частот, еквівалентні рівні звуку на робочих місцях

Вид трудової діяльності, робоче місце	Рівні звукового тиску (дБ) в октавних смугах з середньгеометричними частотами, Гц									Рівні шуму та еквів. рівні шуму, дБА, дБАекв.
	1,5	3	25	50	100	200	400	800	1600	
Висококваліфіковані роботи, які вимагають зосередженості, адміністративно-керівна діяльність, роботи з вимірювачами, аналітичні роботи в лабораторії, робочі місця в приміщеннях цехового керівного апарату, в робочих кімнатах	3	9	0	3	8	5	2	0	9	60

конторських приміщень, лабораторіях.										
---	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Для зменшення шуму до допустимого рівня двигуни будівельних машин і механізмів поміщають у герметичні металеві кожухи, регулярно змащують рухомі частини та використовують пластикові деталі для часткового поглинання вібрацій. Персонал забезпечують протишумними навушниками, які щільно охоплюють вушну раковину і знижують вплив інтенсивних тонів. Додатково між рухомими елементами встановлюють звукопоглинаючі прокладки та застосовують спеціальні мастила для мінімізації тертя й шуму.

9.2.5. Виробничі вібрації

Допустимі рівні вібрації на постійних робочих місцях визначаються залежно від типу вібрації (загальна чи локальна), частоти коливань, напрямку дії (X, Y, Z), тривалості експозиції та характеру виконуваної роботи (розумова чи фізична праця). Згідно з ДСН 3.3.6.039-99[13], нормування здійснюється як за середньоквадратичними значеннями віброшвидкості (м/с), так і за відповідними логарифмічними рівнями вібрації (дБ), які розраховуються за формулою:

$$L = 20 \cdot \lg(V_1 / V_0),$$

де

V_1 – середньоквадратичне значення віброшвидкості за повний період часу, м/с,

$V_0 = 5 \cdot 10^{-8}$ м/с – опорне значення віброшвидкості.

Нижче в таблиці 9.5 наведено допустимі значення середньоквадратичної віброшвидкості та відповідні логарифмічні рівні вібрації для постійних робочих місць у різних октавних смугах частот. Ці значення використовуються для оцінки умов праці працівників, які зазнають впливу виробничих вібрацій.

Таблиця 9.5 – Допустимі рівні вібрації на постійних робочих місцях

Вид вібрації	Октавні смуги з середньгеометричними частотами, Гц									
	2	4	8	16	31,5	63	125	250	500	1000
Загальна вібрація:										
в приміщеннях для робітників розумової праці (КБ, лабораторії та інш.)	$\frac{0,18}{91}$	$\frac{0,063}{82}$	$\frac{0,032}{76}$	$\frac{0,028}{75}$	$\frac{0,028}{75}$	$\frac{0,028}{75}$	-	-	-	-
Локальна вібрація	-	-	$\frac{2,8}{115}$	$\frac{1,4}{109}$	$\frac{1,4}{109}$	$\frac{1,4}{109}$	$\frac{1,4}{109}$	$\frac{1,4}{109}$	$\frac{1,4}{109}$	$\frac{1,4}{109}$

9.3. Технічні рішення з пожежної безпеки

Пожежну безпеку промислових та інших об'єктів регламентують «Правила пожежної безпеки в Україні». Вибухонебезпечність і пожежна небезпека речовин і матеріалів класифікується відповідно до ДСТУ 8829:2019[14], який встановлює категорії приміщень за характером займистості та вибухонебезпечності. Приміщення, де розміщено приводний асинхронний двигун, належать до категорії Д (речовини й матеріали груп В, але без горючих газів, пилу та волокон, а також негорючі речовини в холодному стані), за умови що в сусідніх зонах не зберігаються речовини категорій А–В; усі зони П–Ш у приміщенні відповідають місцям зберігання твердих горючих матеріалів.

Будівля, в якій розташовані ці приміщення, має III ступінь вогнестійкості, тобто її несучі та огорожувальні конструкції виготовлені з каменю, бетону чи залізобетону.

Перекриття можуть бути дерев'яними за умови вогнезахисного шару штукатурки або обшивки негорючими листовими або плитними матеріалами, а також матеріалами груп Г1–Г2. Елементи покриття не обов'язково мають вимоги до меж вогнестійкості чи поширення полум'я, але дерев'яні конструкції

на горищі повинні бути оброблені вогнезахисною сумішшю.

Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвиликах) та максимальні межі поширення вогню по них визначені в ДБН В.1.1.7-2016[15] та наведені в таблиці 9.6, а вимоги до протипожежних перешкод – у таблиці 9.7. Протипожежні відстані між житловими, громадськими, адміністративно-побутовими та виробничими спорудами встановлюються згідно з таблицею 9.8.

Таблиця 9.6 – Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій та максимальні межі поширення вогню по них

Ступінь вогнестійкості будинків	Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвиликах) і максимальні межі поширення вогню по них (см)								
	стіни				коло-ни	сходові площадки, костури, сходи, балки, марші сходових кліток	перекрыття між поверхові (у т.ч. горищні та над підвалами)	елементи суміщених покриттів	
	несучі та сходових кліток	само-несучі	зовнішні не-несучі	внутрішні не-несучі (перегородки)				плити, настили, прогони	балки, ферми, арки, рами
III	REI 120 M0	REI 60 M0	E 15 M0	E1 15 M1	R 120 M0	R 60 M0	REI 45 M1	Не нормуються	

Таблиця 9.7 – Протипожежні перешкоди та мінімальні межі їх вогнестійкості

Протипожежні перешкоди	Типи протипожежних перешкод або їх елементів	Мінімальна межа вогнестійкості протипожежної перешкоди (у хвиликах)	Тип заповнення прорізів, не нижче	Тип протипожежного тамбур-шлюзу, не нижче
Стіни	3	REI 45	2	2
Перегородки	2	EI 15	3	2
Перекриття	3	REI 45	2	1

Таблиця 9.8 – Протипожежні відстані між житловими, громадськими, адміністративно-побутовими будинками промислових підприємств, гаражами, а також до виробничих будинків і споруд

Ступінь вогнестійкості будинку	Відстані при ступені вогнестійкості будинків, м		
	I, II	III	IV, V
III	8/9	8/12	10/15

В приміщенні, де знаходиться обладнання приводного двигуна змінного струму, встановлено 1 вогнегасник ВП-5 [16].

ВИСНОВКИ

У цій бакалаврській роботі виконано комплекс заходів з модернізації стенда для дослідження електропривода позиціювання (сервопривода) із застосуванням енкодерів на основі мікроконтролерної платформи Arduino, що виконує функції пристрою керування.

Важливим аспектом є можливість розширення функціоналу стенда шляхом впровадження інформаційно-вимірювальної системи, яка забезпечує зняття статичних та динамічних характеристик роботи електропривода позиціювання.

Розроблене програмне забезпечення не передбачає збереження налаштувань та поточної позиції в енергонезалежній пам'яті, що призводить до втрати цих даних при вимкненні або скиданні контролера. Програма керуючого контролера забезпечує можливість зміни налаштувань, таких як швидкість переміщення, зона нечутливості, параметри регулятора, окрім заданого значення координати.

Розроблено механізм автоматичного калібрування та пошуку нульової точки, що підвищує точність позиціювання. Також синтезовано комп'ютерні моделі, які дозволяють віддалено налаштовувати як програмне, так і апаратне забезпечення стенда, забезпечуючи гнучкість та зручність у роботі з пристроєм.

У роботі в повному обсязі виконано комплекс проектних завдань, зокрема розроблено структурну та електричну принципову схему лабораторної установки з детальним описом їх принципу роботи. Було здійснено розрахунок та підбір необхідних елементів для побудови схеми.

Обрано мікроконтролер для системи керування, а також розроблено алгоритм роботи програми.

Отримані результати підтверджено практичною реалізацією та апробацією роботи стенда. Запропонований стенд є корисним навчальним інструментом для студентів освітньої програми «Електромеханічні системи автоматизації» при вивченні курсу «Спеціальні електричні машини».

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Енкодери. Класифікація. – [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://stl-grupp.com/lika.html> ;
2. Алгоритм роботи енкодерів. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://tutorial.cytron.io/2012/01/17/quadrature-encoder/>;
3. Arduino IDE – [Електронний ресурс]. - Режим доступу: https://biblprog.org.ua/ua/arduino_ide/;
4. Arduino UNO. – [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://doc.arduino.ua/ru/hardware/Uno>;
5. LCD 1602. – [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/LCD160G032A.html>;
6. Драйвер L298N. – [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://ardushop.in.ua/arduino/l298n-stepper-motor-driver-for-arduino>;
7. Система керування серводвигуном - [Електронний ресурс]. - Режим доступу: http://util.oem.se/pdf/Electromen_EM-115_DC_motor_control_1159756-500630.pdf;
8. Технічні характеристики серводвигуна. – [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://www.printerbrain.xyz/epson-dfx-8000/carriage-motor-controldrive-circuit.html>;
9. Методичні вказівки до виконання розділу з охорони праці в кваліфікаційних роботах здобувачів освітнього ступеня бакалавра галузі знань 14 – «Електрична інженерія» / Уклад.: С. В. Дембіцька, І. М. Кобилянська, О. В. Кобилянський. – Вінниця: ВНТУ, 2022. – 77 с.
10. ДСТУ ОHSAS 18002:2015 URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0061774-15#Text>
11. ДСТУ ISO 45001:2019 URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0502774-19#Text>
12. ДБН В.2.5-28:2018. Природне і штучне освітлення. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=79885

13. ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. URL: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>

14. ДСТУ 8829:2019. Пожежовибухонебезпечність речовин і матеріалів. Номенклатура показників і методи їхнього визначення. Класифікація. URL: <https://www.alutal.com.ua/wp-content/uploads/2021/02/dstu-8829-2019-1.pdf>

15. ДБН В.1.1-7:2016. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. URL: http://www.poliplast.ua/doc/dbn_v.1.1-7-2002.pdf

16. Наказ МВС України «Про затвердження Правил експлуатації та типових норм належності вогнегасників». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0225-18#Text>

ДОДАТОК А

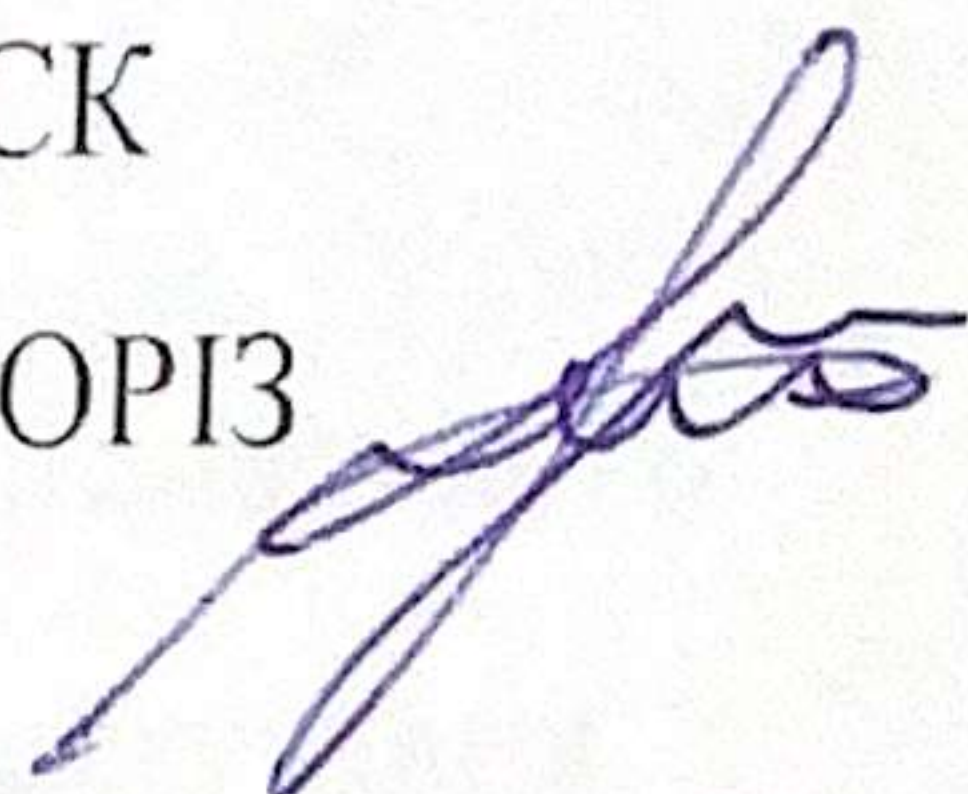
Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет
факультет електроенергетики та електромеханіки

ЗАТВЕРДЖЕНО

Завідувач кафедри КЕМСК

к.т.н., доц. Микола МОШНОРІЗ

“4” березня 2025р.



ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на бакалаврську кваліфікаційну роботу

ЛАБОРАТОРНИЙ СТЕНД ДЛЯ ІМІТАЦІЇ РОБОТИ
АВТОМАТИЧНИХ СИСТЕМ ОСВІТЛЕННЯ ТА ВЕНТИЛЯЦІЇ

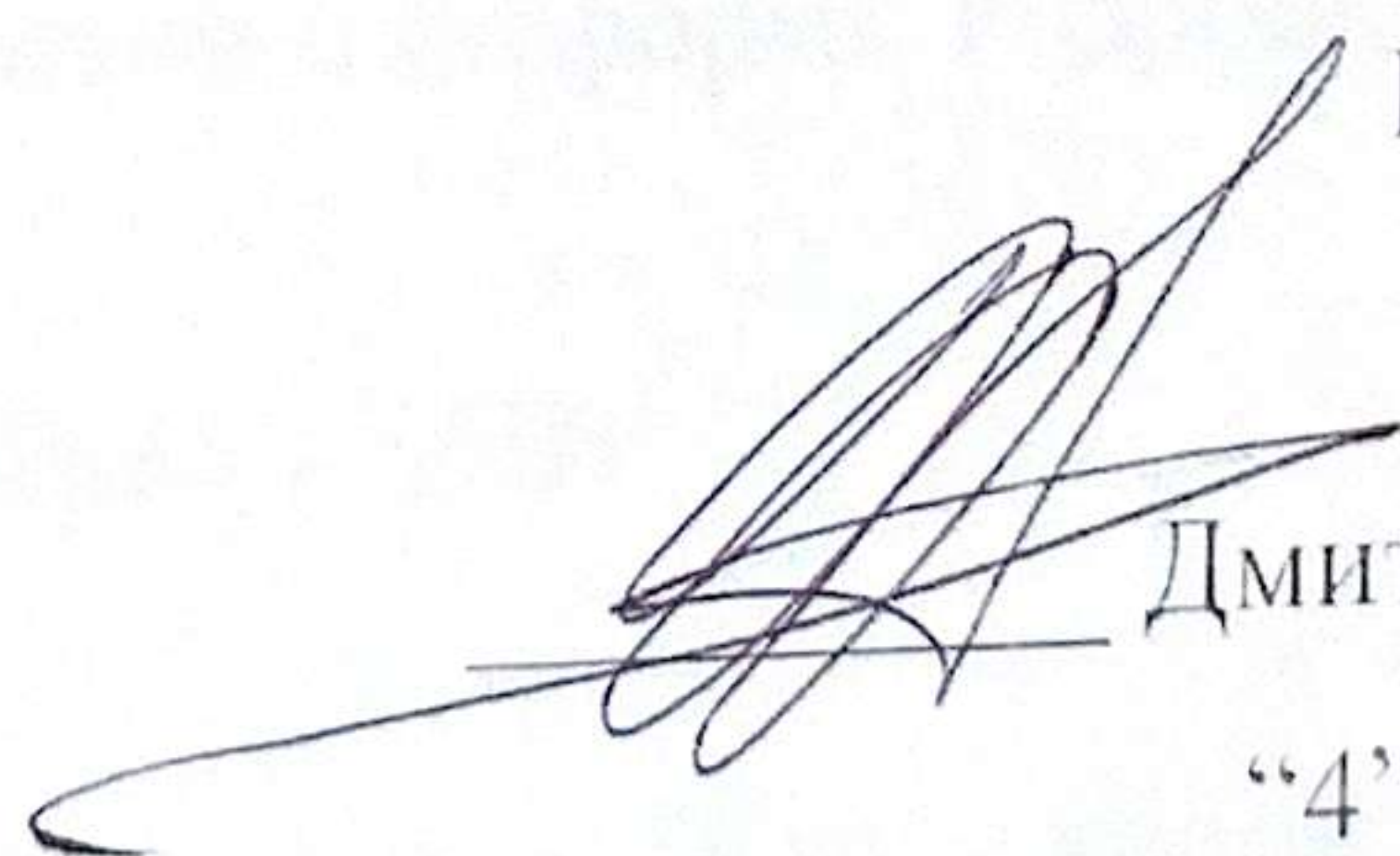
08-24.БКР.027.00.000 ТЗ

Керівник роботи

доцент

Дмитро ПРОЦЕНКО

“4” березня 2025 р.

Виконавець: ст. гр. ЕМСА-23мс

Вадим КРАВЕЦЬ

“4” березня 2025 р.



1 Загальні відомості

Повне найменування розробки – «Модернізація лабораторного стенда для дослідження сервопривода постійного струму».

Скорочене найменування розробки – «Лабораторний стенд».

Замовник – кафедра Комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів Вінницького національного технічного університету.

2 Підстави для розробки

Індивідуальне завдання та наказ ректора Вінницького національного технічного університету про затвердження тем кваліфікаційного проектування.

3 Призначення розробки і галузь використання

Лабораторний стенд призначений для вивчення основ програмування та технології роботи сервоприводу постійного струму.

4 Вимоги до розробки

Лабораторний стенд призначений для експлуатації всередині приміщень. Всі підключення і перемикання необхідно виконувати після зняття напруги на пристрою.

5 Комплектація розробки

Лабораторний стенд складається з системи керування на основі контролера ARDUINO UNO, драйвера L298N, двигуна постійного струму з енкадером, які змонтовані на монтажній платформі. Розробка є унікальною.

6 Технічні характеристики

Повна потужність електродвигуна - 55Вт.

7 Джерела розробки

1. Система керування серводвигуном - [Електронний ресурс]. - Режим доступу: http://util.oem.se/pdf/Electromen_EM-115_DC_motor_control_1159756-500630.pdf.

8 Елементна база

Пристрій керування ARDUINO UNO.

9 Конструктивне виконання

Лабораторний стенд виконано на монтажній платформі розміром 290х440мм. Обладнання розміщено відкрито. Система керування стендом ззовні через гвинтові затискачі.

10 Показники технологічності

Обладнання виконується контролері ARDUINO UNO.

11 Стадії і етапи розробки

Стадії і етапи розробки	Термін виконання
Основна частина пояснювальної записки	06.05.2025р
Графічна частина	20.05.2025р

12 Технічне обслуговування і ремонт

Технічне обслуговування здійснюється інженерами та лаборантами кафедри. Технічний огляд пристрою здійснюється мінімум два рази на рік на початку семестрів.

13 Живлення системи автоматизації

Живлення системи автоматизації повинно бути виконане однофазною напругою 0,23 кВ 50Гц.

ДОДАТОК Б

ІЛЮСТРАТИВНІ МАТЕРІАЛИ

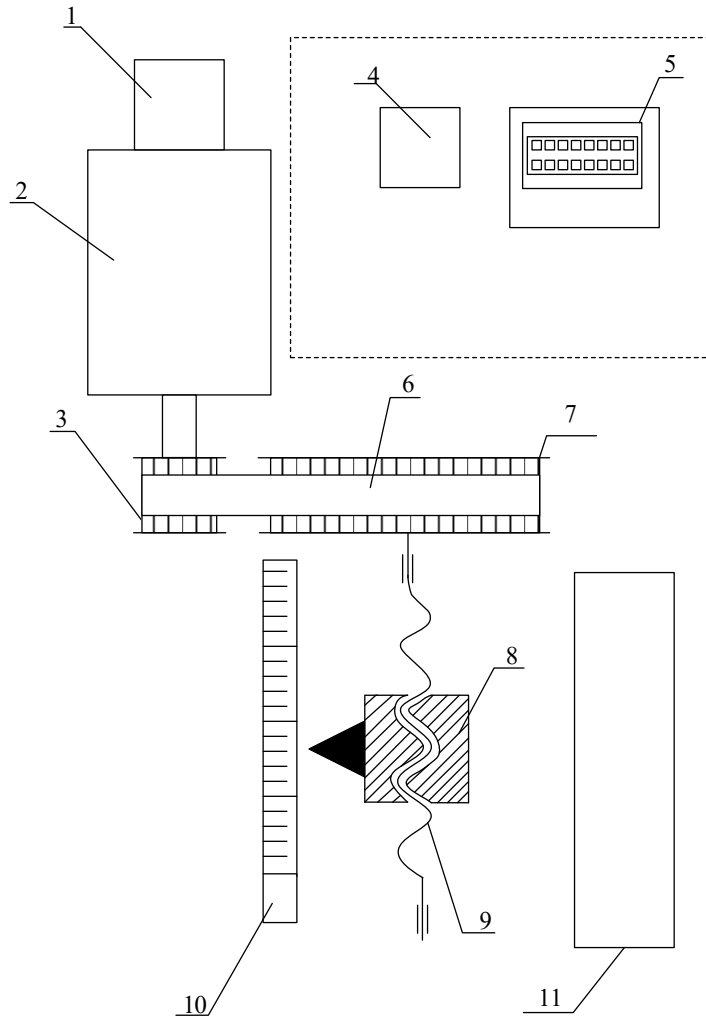


Рисунок 1.9 – Схема розташування елементів стенда сервоприводу постійного струму

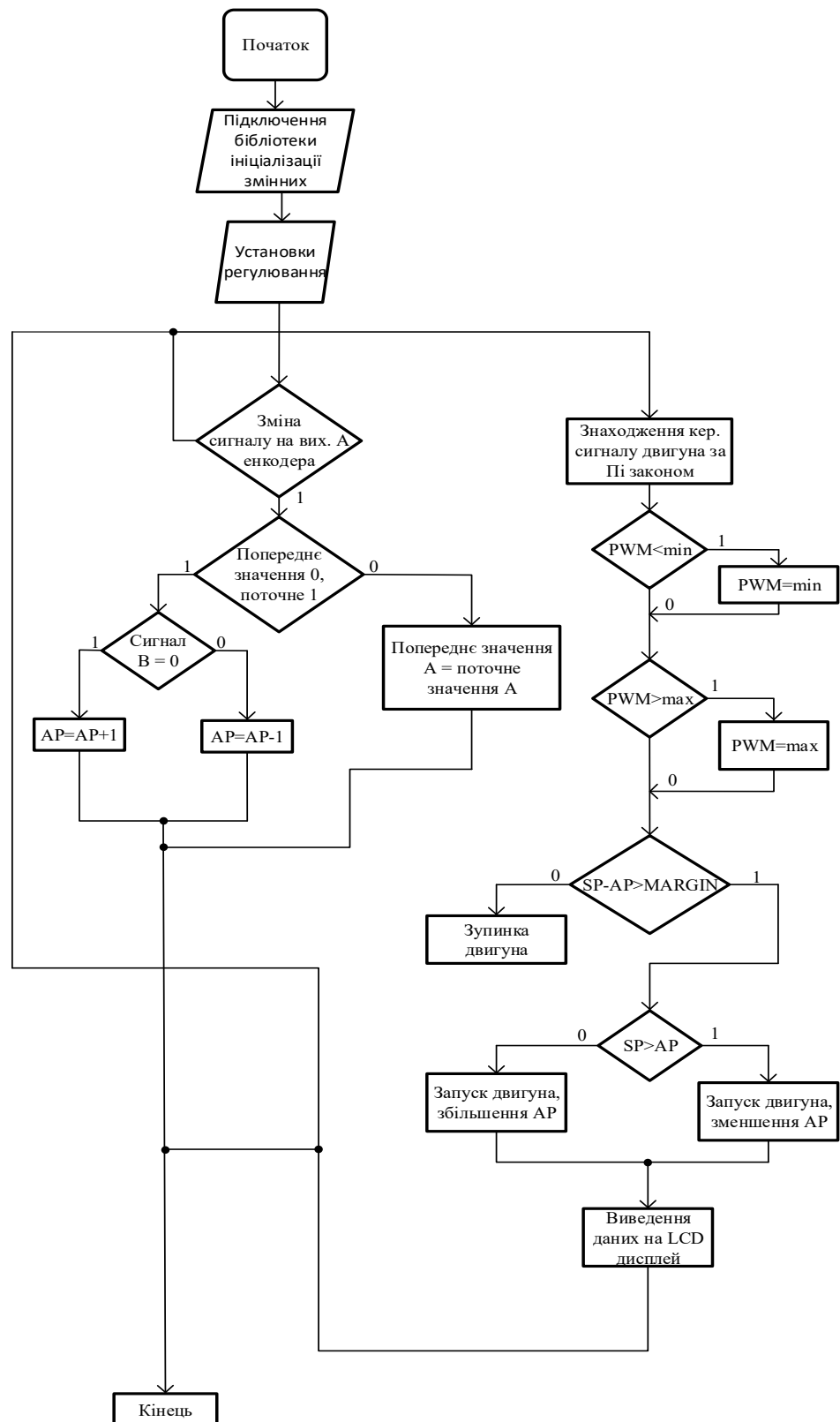


Рисунок 4.2 – Алгоритм роботи програми

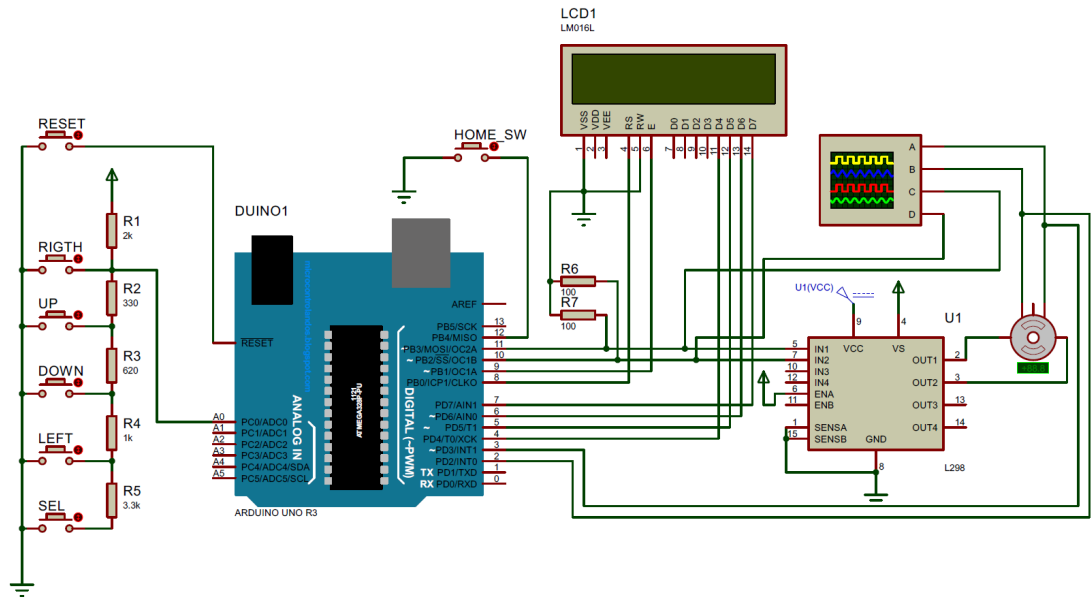


Рисунок 4.3 – Модель сервопривода в середовищі Proteus

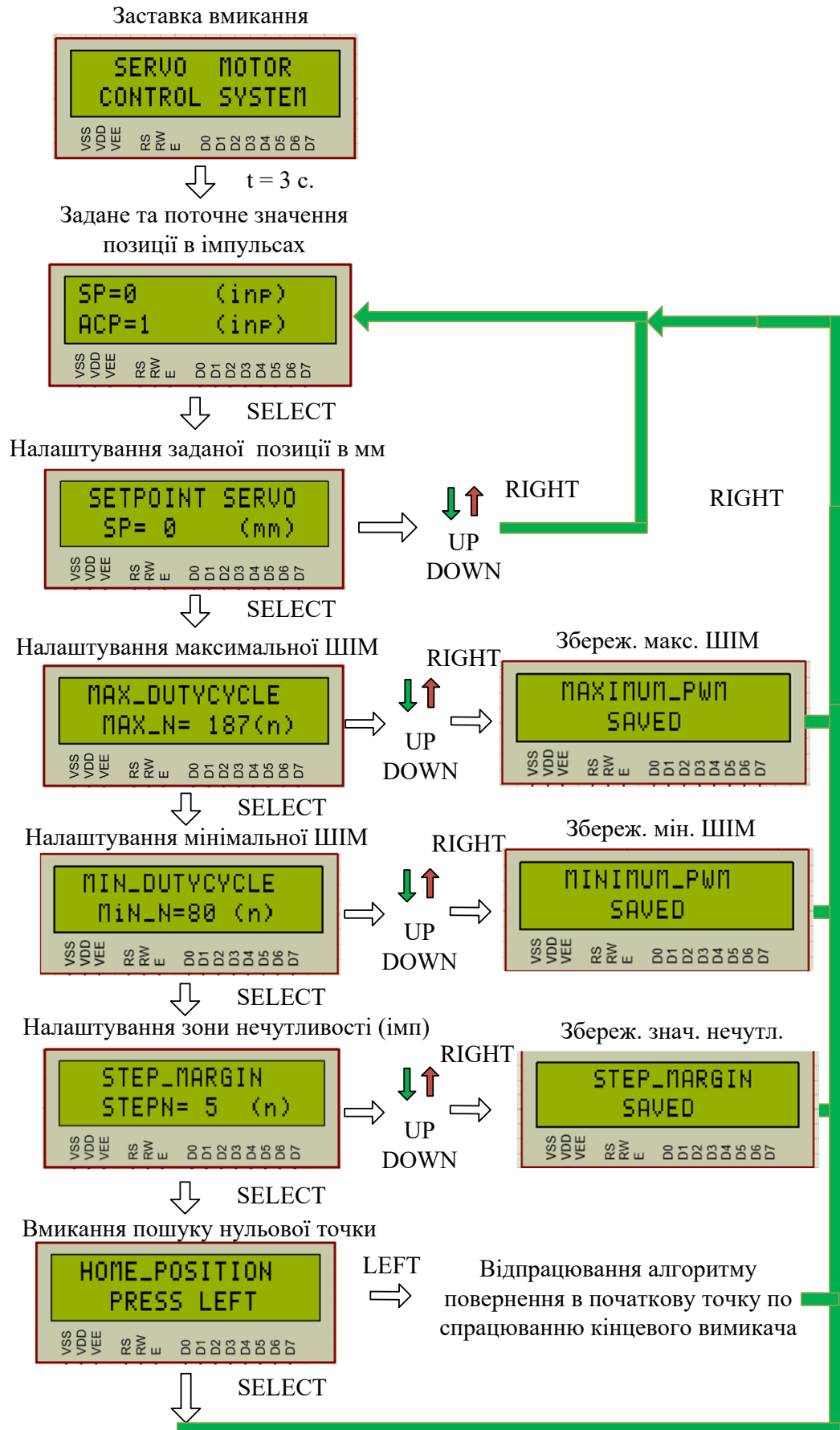


Рисунок 4.5 – Діаграма налаштувань сервопривода

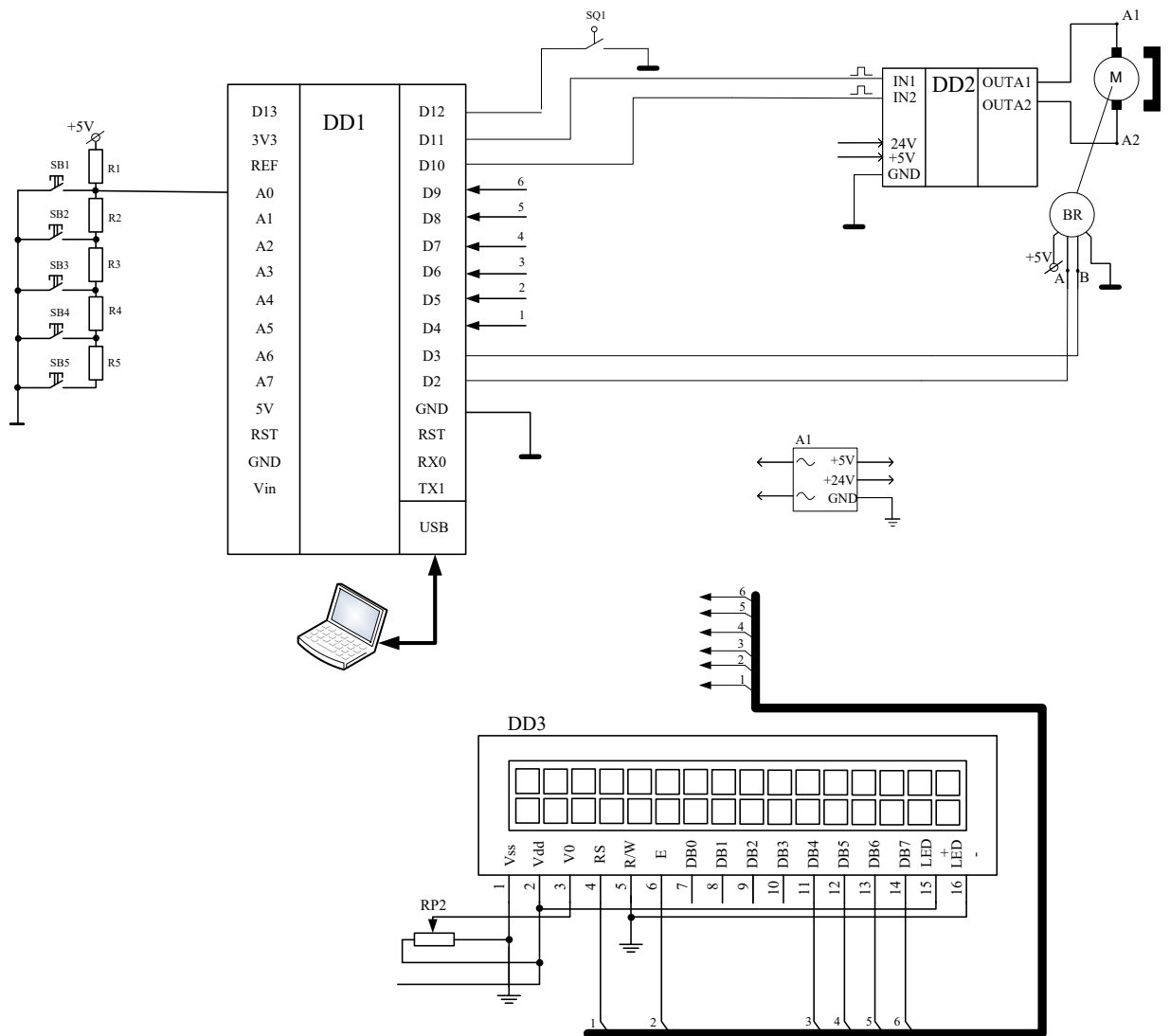


Рисунок 5.5 - Схема електрична принципова стенда

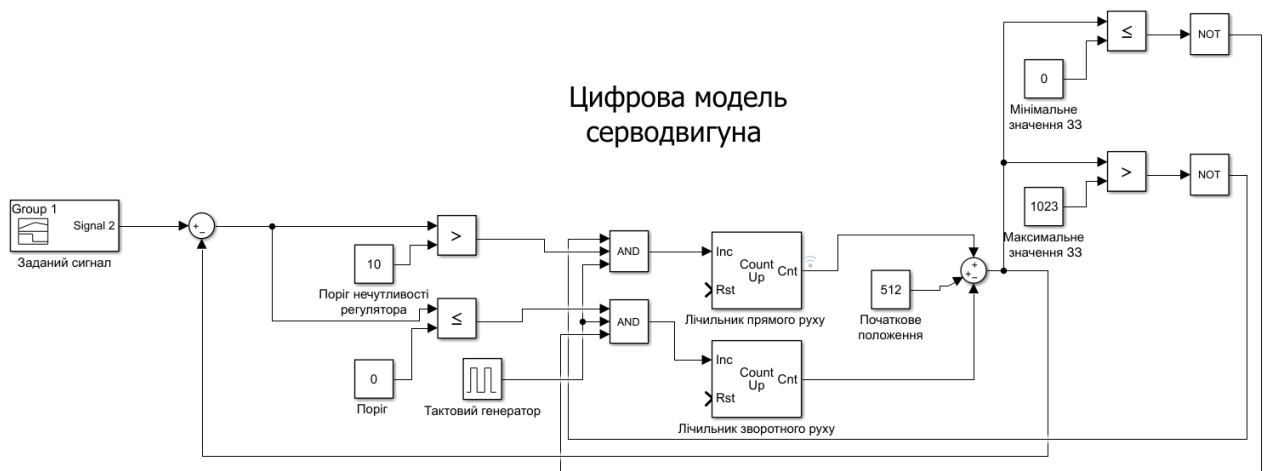


Рисунок 7.1 – Цифрова модель сервопривод

ДОДАТОК В

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Модернізація лабораторного стенда для дослідження сервопривода постійного струму

Тип роботи: бакалаврська кваліфікаційна робота

Підрозділ: кафедра КЕМСК, ФЕЕЕМ, гр. ЕМСА-23мс

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism **8,72 %**

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

☐ Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту

☐ У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.

☐ У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.
Експертна комісія:

Зав. кафедри КЕМСК Мошноріз М.М.

(прізвище, ініціали, посада)

(підпис)

Гарант ОП Мошноріз М.М.

(прізвище, ініціали, посада)

(підпис)

Особа, відповідальна за перевірку _____

Паянок

О.А.

(підпис)

(прізвище,

ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник _____

(підпис)

Проценко Д.П.

(прізвище, ініціали, посада)

Здобувач _____

(підпис)

Кравець В.О.

(прізвище, ініціали)

ДОДАТОК Г

Лістинг програми мікроконтролера

```

//*****
// Підключення бібліотек та ініціалізація змінних
//*****
#include <EEPROM.h>
#include<util/delay.h>
#include<LiquidCrystal.h>
LiquidCrystal lcd(8, 9, 4, 5, 6, 7);
int stepStatus = 0, adc_key_in = 0, lcd_key = 0;
byte sensorStatusA = 0;
byte oldSensorStatusA = 0;
byte sensorStatusB = 0, Menu = 0, count;
unsigned long dutyCycle = 0;
signed long setPoint = 0, setPoint_D = 0;
signed long actualPoint = 0;
signed long readByte = 0;
unsigned long millisNow = 0;
byte MIN_DUTYCYCLE; // Значення мінімальної ШІМ (60)
byte MAX_DUTYCYCLE; // Значення максимальної ШІМ (180)
byte STEP_MARGIN; //Зона нечутливості (4)
byte enable_write_position = 0, enable_position = 0, enable_home;
//*****
// Установки змінних і налаштувань
//*****
#define btnRIGHT 0// коди кнопки вправо
#define btnUP 1// коди кнопки вверх
#define btnDOWN 2// коди кнопки вниз
#define btnLEFT 3// коди кнопки вліво
#define btnSELECT 4// коди кнопки вибір
#define btnNONE 5// пусто
#define SENSOR_A 3 // піни підключення енкодера
#define SENSOR_B 2
#define MOTOR_DIRECTION 10 //ШІМ піни підключення драйвера двигуна
#define MOTOR_PWM 11
#define HOME_SW 12 //Кінцевий вимикач
#define P_FRACTION 1.9 //Пропорційний коефіцієнт 0.001 - 10.0 (1.5)
#define CALIBR 96 // кількість імпульсів на 1 мм
//*****
// Функція зчитування кнопок
//*****
int read_LCD_buttons()
{
    adc_key_in = analogRead(0);
    if (adc_key_in > 1000) return btnNONE;
    if (adc_key_in < 50) return btnRIGHT;
    if (adc_key_in < 250) return btnUP;

```

```

if (adc_key_in < 450) return btnDOWN;\

if (adc_key_in < 650) return btnLEFT;
if (adc_key_in < 850) return btnSELECT;
return btnNONE;
}
//*****
//          Функція запису long в eeprom
//*****
//This function will write a 4 byte (32bit) long to the eeprom at
//the specified address to address + 3.
void EEPROMWritelong(int address, long value)
{
    byte four = (value & 0xFF);
    byte three = ((value >> 8) & 0xFF);
    byte two = ((value >> 16) & 0xFF);
    byte one = ((value >> 24) & 0xFF);
    //Write the 4 bytes into the eeprom memory.
    EEPROM.write(address, four);
    EEPROM.write(address + 1, three);
    EEPROM.write(address + 2, two);
    EEPROM.write(address + 3, one);
}
//*****
//          Функція читання long з eeprom
//*****
//This function will return a 4 byte (32bit) long from the eeprom
//at the specified address to address + 3.
long EEPROMReadlong(long address)
{
    //Read the 4 bytes from the eeprom memory.
    long four = EEPROM.read(address);
    long three = EEPROM.read(address + 1);
    long two = EEPROM.read(address + 2);
    long one = EEPROM.read(address + 3);
    //Return the recomposed long by using bitshift.
    return ((four << 0) & 0xFF) + ((three << 8) & 0xFFFF) + ((two << 16) & 0xFFFFFFF) +
    ((one << 24) & 0xFFFFFFFF);
}
//*****
//Функція установок
//*****
void setup() {
    pinMode(HOME_SW, INPUT_PULLUP); // вхід кінцевого вимикача +5В
    MIN_DUTYCYCLE = EEPROM.read(1); // читаем настройки
    MAX_DUTYCYCLE = EEPROM.read(2); // читаем настройки
    STEP_MARGIN = EEPROM.read(3); // читаем настройки
    actualPoint = EEPROMReadlong(4); // читаем настройки початкової позиції
    setPoint = actualPoint; // задане значення = поточному збереженому
    setPoint_D = setPoint / CALIBR;
}

```

```

analogWrite(MOTOR_PWM, 0); // Зупинка двигуна
delay(100);
attachInterrupt(0, change_sensor_A, CHANGE); // Вмикання переривань для сигналів
енкодера
attachInterrupt(1, change_sensor_B, CHANGE);
sensorStatusA = digitalRead(SENSOR_A); // Початкові рівні сигналів енодера
sensorStatusB = digitalRead(SENSOR_B);
pinMode(MOTOR_DIRECTION, OUTPUT); // Налаштування входів-виходів
pinMode(MOTOR_PWM, OUTPUT);
analogWrite(MOTOR_PWM, 0);
analogWrite(MOTOR_DIRECTION, 0);
lcd.begin(16, 2); // Запуск та виведення на екран
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print(" SERVO MOTOR "); // інформаційного повідомлення
lcd.setCursor(1, 1);
lcd.print("CONTROL SYSTEM");
delay (3000); // на 3 секунди
lcd.clear();
}
//*****
// Функція визначення положення ротора
//*****
void change_step() {
  sensorStatusA = digitalRead(SENSOR_A);
  if ((oldSensorStatusA == LOW) && (sensorStatusA == HIGH)) {
    if (sensorStatusB == 0) {
      actualPoint++;
    }
    else {
      actualPoint--;
    }
  }
  oldSensorStatusA = sensorStatusA;
}
//*****
void change_sensor_A() { // Вимірювання за сигналом А 1 раз на період
  change_step();
}
//*****
void change_sensor_B() { // За сигналом В тільки поточне зчитування
  sensorStatusB = digitalRead(SENSOR_B);
}
//*****
// Основний цикл
//*****
void loop() {
  lcd_key = read_LCD_buttons(); // перебираємо меню при натисканні кнопки SELECT
  if (lcd_key == btnSELECT) {
    Menu++;
    lcd.clear();
  }
}

```

```

if (Menu != 0) LCD_out(); //Якщо обрано не основне меню вивод прискорений
if (Menu == 0 && (millis() - millisNow) > 500) { // На головному меню вивод раз в
0,5с.
    millisNow = millis();
    LCD_out();
}
//Визначення напруги що подається на двигун
//*****
dutyCycle = (double)(abs(setPoint - actualPoint)) * (double)P_FRACTION; // П-
регулювання
if (dutyCycle < MIN_DUTYCYCLE) { // Мінімальне обмеження керуючого сигналу
    dutyCycle = MIN_DUTYCYCLE;
}
if (dutyCycle > MAX_DUTYCYCLE) { // Максимальне обмеження керуючого сигналу
    dutyCycle = MAX_DUTYCYCLE;
}
// Якщо поточне і задане значення зрівноважені
//*****
if (abs(setPoint - actualPoint) < STEP_MARGIN) { //Обмеження по чутливості
керуючого сигналу
    analogWrite(MOTOR_PWM, 0); // Зупиняємо двигун
    analogWrite(MOTOR_DIRECTION, 0);
    count++; // якщо відрацьована введена позиція та пройшов час
    if (enable_write_position == 1 && count == 10) {
        EEPROMWritelong(4, actualPoint); // записуємо поточну позицію
        count = 0;
        enable_write_position = 0;
    }
    if (enable_home == 1) { // якщо включено пошук поч. точки
        while (digitalRead(HOME_SW) == 0) { // рухаємось до нуля
            analogWrite(MOTOR_DIRECTION, 0); //поки не спрацює кінцевик
            analogWrite(MOTOR_PWM, 120); // на понижений швидкості
        }
        actualPoint = 0; // все зануляємо
        setPoint = 0;
        setPoint_D = 0;
        enable_home = 0;
        EEPROMWritelong(4, actualPoint); // і записуємо
        lcd.clear();
    }
}
//*****
else {
    if (actualPoint < setPoint) { // проста реверсивна логіка
        analogWrite(MOTOR_DIRECTION, dutyCycle);
        analogWrite(MOTOR_PWM, 0);
    }
    if (actualPoint > setPoint) {
        analogWrite(MOTOR_DIRECTION, 0);
        analogWrite(MOTOR_PWM, dutyCycle);
    }
}

```

```

    }
}
//*****
//          Виведення повідомлень на екрані
//*****
void LCD_out() {
    // Головне меню
    //*****
    if (Menu == 0) {
        if (enable_position) {
            setPoint = setPoint_D * CALIBR;
            enable_position = 0;
        }
        lcd.setCursor(0, 0);
        lcd.print("SP="); // Виведення заданої кількості імпульсів
        lcd.setCursor(3, 0);
        lcd.print(setPoint);
        if (setPoint / 10 == 0) {
            lcd.setCursor(4, 0);
            lcd.print(" ");
        }
        if (setPoint / 100 == 0) {
            lcd.setCursor(5, 0);
            lcd.print(" ");
        }
        lcd.setCursor(9, 0);
        lcd.print("(inp)");
        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.print("ACP="); // Виведення поточного положення в імпульсах
        lcd.setCursor(4, 1);
        lcd.print(abs(actualPoint));
        if (actualPoint / 10 == 0) {
            lcd.setCursor(5, 1);
            lcd.print(" ");
        }
        if (actualPoint / 100 == 0) {
            lcd.setCursor(6, 1);
            lcd.print(" ");
        }
        if (actualPoint / 1000 == 0) {
            lcd.setCursor(7, 1);
            lcd.print(" ");
        }
        lcd.setCursor(9, 1);
        lcd.print("(inp)");
        delay (250);
    }
    // Меню задання заданого значення
    //*****
    if (Menu == 1) {
        lcd.setCursor(0, 0);

```

```

lcd.print(" SETPOINT SERVO "); //Повідомлення
lcd.setCursor(2, 1);
lcd.print("SP=");
lcd.setCursor(11, 1);
lcd.print("(mm)");
lcd.setCursor(6, 1);
lcd.print(setPoint_D);
if (setPoint_D / 10 == 0) {
  lcd.setCursor(7, 1);
  lcd.print(" ");
}
if (setPoint_D / 100 == 0) {
  lcd.setCursor(8, 1);
  lcd.print(" ");
}
if (setPoint_D / 1000 == 0) {
  lcd.setCursor(9, 1);
  lcd.print(" ");
}
delay (200);
lcd_key = read_LCD_buttons(); // Керування збільшенням чи зменшенням уставки
if (lcd_key == btnUP)setPoint_D++;
if (lcd_key == btnDOWN)setPoint_D--;
if (setPoint_D < 0)setPoint_D = 0; // мінімум
if (setPoint_D > 170)setPoint_D = 170; //максимум
if (lcd_key == btnRIGHT) {
  Menu = 0;
  enable_write_position = 1;
  enable_position = 1;
  lcd.clear();
}
}
// Меню налаштування мінімальної швидкості
//*****
if (Menu == 2) {
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print(" MIN_DUTYCYCLE"); // print a simple message
  lcd.setCursor(2, 1);
  lcd.print("MiN_N="); // print a simple message
  lcd.setCursor(11, 1);
  lcd.print("(n)"); // print a simple message
  lcd.setCursor(8, 1);
  lcd.print(MIN_DUTYCYCLE);
  if (MIN_DUTYCYCLE / 10 == 0) {
    lcd.setCursor(9, 1);
    lcd.print(" ");
  }
  if (MIN_DUTYCYCLE / 100 == 0) {
    lcd.setCursor(10, 1);
    lcd.print(" ");
  }
}

```

```

delay (150);
lcd_key = read_LCD_buttons(); // read the buttons
if (lcd_key == btnUP) MIN_DUTYCYCLE = MIN_DUTYCYCLE + 1;
if (lcd_key == btnDOWN) MIN_DUTYCYCLE = MIN_DUTYCYCLE - 1;
if (MIN_DUTYCYCLE < 20) MIN_DUTYCYCLE = 20;
if (MIN_DUTYCYCLE > 255) MIN_DUTYCYCLE = 254;
if (lcd_key == btnRIGHT) {
    EEPROM.write(1, MIN_DUTYCYCLE);
    lcd.clear();
    lcd.print(" MINIMUM_PWM "); // print a simple message
    lcd.setCursor(5, 1);
    lcd.print("SAVED"); // print a simple message
    delay (2000);
    Menu = 0;
    lcd.clear();
}
}
// Меню налаштування максимальної швидкості
//*****
if (Menu == 3) {
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print(" MAX_DUTYCYCLE"); // print a simple message
    lcd.setCursor(2, 1);
    lcd.print("MAX_N= "); // print a simple message
    lcd.setCursor(12, 1);
    lcd.print("(n)"); // print a simple message
    lcd.setCursor(9, 1);
    lcd.print(MAX_DUTYCYCLE);
    if (MAX_DUTYCYCLE / 10 == 0) {
        lcd.setCursor(10, 1);
        lcd.print(" ");
    }
    if (MAX_DUTYCYCLE / 100 == 0) {
        lcd.setCursor(11, 1);
        lcd.print(" ");
    }
    delay (300);
    lcd_key = read_LCD_buttons(); // read the buttons
    if (lcd_key == btnUP) MAX_DUTYCYCLE = MAX_DUTYCYCLE + 1;
    if (lcd_key == btnDOWN) MAX_DUTYCYCLE = MAX_DUTYCYCLE - 1;
    if (MAX_DUTYCYCLE < 20) MAX_DUTYCYCLE = 100;
    if (MAX_DUTYCYCLE > 255) MAX_DUTYCYCLE = 255;
    if (lcd_key == btnRIGHT) {
        EEPROM.write(2, MAX_DUTYCYCLE);
        lcd.clear();
        lcd.print(" MAXIMUM_PWM "); // print a simple message
        lcd.setCursor(5, 1);
        lcd.print("SAVED"); // print a simple message
        delay (2000);
        Menu = 0;
        lcd.clear();
    }
}

```

```

    }
  }
  // Меню налаштування зони нечутливості
  //*****
  if (Menu == 4) {
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print(" STEP_MARGIN "); // print a simple message
    lcd.setCursor(2, 1);
    lcd.print("STEPN= "); // print a simple message
    lcd.setCursor(12, 1);
    lcd.print("(n)"); // print a simple message
    lcd.setCursor(9, 1);
    lcd.print(STEP_MARGIN);
    if (STEP_MARGIN / 10 == 0) {
      lcd.setCursor(10, 1);
      lcd.print(" ");
    }
    if (STEP_MARGIN / 100 == 0) {
      lcd.setCursor(11, 1);
      lcd.print(" ");
    }
  }
  delay (300);
  lcd_key = read_LCD_buttons(); // read the buttons
  if (lcd_key == btnUP) STEP_MARGIN = STEP_MARGIN + 1;
  if (lcd_key == btnDOWN) STEP_MARGIN = STEP_MARGIN - 1;
  if (STEP_MARGIN < 1) STEP_MARGIN = 1;
  if (STEP_MARGIN > 255) STEP_MARGIN = 255;
  if (lcd_key == btnRIGHT) {
    EEPROM.write(3, STEP_MARGIN);
    lcd.clear();
    lcd.print(" STEP_MARGIN"); // print a simple message
    lcd.setCursor(5, 1);
    lcd.print("SAVED"); // print a simple message
    delay (2000);
    Menu = 0;
    lcd.clear();
  }
}
// Меню для налаштування нульової точки
//*****
if (Menu == 5) {
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print(" HOME_POSITION "); // print a simple message
  lcd.setCursor(2, 1);
  lcd.print(" PRESS LEFT"); // print a simple message
  delay (300);
  lcd_key = read_LCD_buttons(); // read the buttons
  if (lcd_key == btnLEFT) {
    enable_home = 1;
    Menu = 0;
    lcd.clear();
  }
}

```

```
    }  
  }  
  //*****  
  if (Menu == 6) {  
    Menu = 1;  
    lcd.clear();  
    delay (200);  
  }  
}
```

ДОДАТОК В

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Модернізація лабораторного стенда для дослідження сервопривода постійного струму

Тип роботи: бакалаврська кваліфікаційна робота

Підрозділ: кафедра КЕМСК, ФЕЕЕМ, гр. ЕМСА-23мс

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism **8,72 %**

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

☐ Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту

☐ У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.

☐ У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

Зав. кафедри КЕМСК Мошноріз М.М.

(прізвище, ініціали, посада)

Гарант ОП

Мошноріз М.М.

(прізвище, ініціали, посада)

(підпис)

(підпис)

Особа, відповідальна за перевірку

(підпис)

Паянок О.А.

(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник

(підпис)

Проценко Д.П.

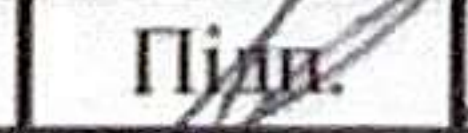
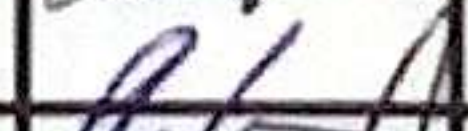
(прізвище, ініціали, посада)

Здобувач

(підпис)

Кравець В.О.

(прізвище, ініціали)

					08-24.БДР.027.00.000				
					МОДЕРНІЗАЦІЯ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ СЕРВОПРИВОДА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	Літера		Маса	Масштаб
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата			У		
Розробив		Кравець В.		20.05					
Перевірів		Проценко Д.		20.05					
Т. контр.									
Рецензент		Рибоненко О.		10.06		Аркуш		Аркушів	
Н.контр.		Падячок О.		03.06		ВНТУ, ЕМСА-23мс			
Затв.		Мошноріз М.		03.06					