

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**Сумський державний університет**  
Факультет електроніки та інформаційних технологій  
Кафедра комп'ютеризованих систем управління

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри КСУ

Петро ЛЕОНТЬЄВ

\_\_\_\_\_ 15 грудня \_\_\_\_\_ 2023 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
на здобуття освітнього ступеня магістр

зі спеціальності 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології  
освітньо-професійної програми

«Комп'ютеризовані системи управління та робототехніка»

на тему: «Енергозберігаючі алгоритми керування переміщення мобільного  
робота»

Здобувача групи СУ.м-21

Понамарьов Ярослав Олександрович

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання  
ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

\_\_\_\_\_ ПОНАМАРЬОВ Ярослав

(підпис)

Керівник доцент, кандидат технічних наук, Георгій КУЛІНЧЕНКО

(посада, науковий ступінь, вчене звання, ім'я ПРІЗВИЩЕ)

\_\_\_\_\_ (підпис)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
Факультет електроніки та інформаційних технологій  
Кафедра комп'ютеризованих систем управління

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри

\_\_\_\_\_ Леонт'єв П.В.

\_\_\_\_\_ 2023 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу магістра здобувачу вищої освіти  
Понамарьову Ярославу Олександровичу

1. Тема кваліфікаційної роботи: Енергозберігаючі алгоритми керування переміщення мобільного робота.  
Затверджено наказом ректора університету. № 1097-VI від 09.10.2023.
2. Термін здавання студентом закінченого проекту “15” грудня 2023 р.
3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи: звіт з переддипломної практики, наукові публікації, статті, технічна документація тощо.
4. Зміст кваліфікаційної роботи (питання, що підлягають розробленню): аналіз предметної області, енергозберігаючі алгоритми керування переміщення мобільного робота, основні схеми та принципи побудови системи «Мобільний робот для складських робіт», математична модель руху мобільного робота, математична модель електроприводу мобільного робота, моделювання в середовищі MATLAB/Simulink, SCADA-система.
5. Перелік графічних матеріалів: 34 рисунка, 1 таблиця.
6. Календарний план виконання роботи

Номер етапу	Зміст етапу проектування	Термін виконання
1	Зробити аналіз завдання кафедри. Скласти технічне завдання. Підібрати та проаналізувати літературу і першоджерела.	06.12.2023 – 08.12.2023
2	Зробити конструктивно-технологічний аналіз предметної області.	09.12.2023 – 10.12.2023
3	Розробити основні схеми та принципи системи	10.12.2023 – 11.12.2023
4	Розробити математичні моделі	12.12.2023 – 13.12.2023

5	Промоделювати електропривод мобільного робота	14.12.2023 – 15.12.2023
6	Розробити SCADA-системи	15.12.2023
7	Оформити дипломний проект та супровідну документації	15.12.2023

7. Дата видачі завдання “07” листопада 2023р.

Керівник проекту:  
Доцент, кандидат технічних наук:

Кулінченко Г.В.

Здобувач:  
студент групи СУ.м-21

Понамарьов Я.О.

## РЕФЕРАТ

Понамарьов Ярослав Олександрович. Енергозберігаючі алгоритми керування переміщення мобільного робота. Кваліфікаційна магістерська робота. Сумський державний університет. Суми, 2023 р.

Проект містить 69 аркушів пояснювальної записки, 34 рисунка, 1 таблиця. При виконанні проекту було використано 19 літературних джерел.

Даний проект спрямований на створення і опис енергозберігаючих алгоритмів керування переміщення мобільного робота. Розроблено технічне завдання. Розроблено основні технічні креслення та алгоритми роботи. Метою роботи є оцінка можливостей оптимізації електропривода мобільного робота. Ця мета досягається шляхом розробки моделей та побудови регуляторів.

Для досягнення поставлених завдань будуть використані такі методи: аналіз наукової літератури, вивчення технічних характеристик мобільних роботів, розробка математичних моделей та моделювання за допомогою програмного забезпечення..

В ході проекту розроблені математичні моделі руху мобільного робота та безколекторного двигуна постійного струму.

У середовищі MATLAB/Simulink розроблені схеми руху мобільного робота, електропривода мобільного робота та їх комбінація.

В середовищі Zenon була розроблена SCADA-система.

В заключенні зроблені висновки про досягнення студента під час виконання магістерського дипломного проекту.

Результати дослідження можуть бути використані для покращення концепцій та розробок мобільних роботів, а також вирішення актуальних завдань у сфері автономних систем та штучного інтелекту.

Ключові слова: «Сумський державний університет», робокар, електропривод, технологічний процес, контролер, система керування, датчик, структурна схема, алгоритми, керування, енергозбереження, мобільний робот.

## ABSTRACT

Ponamarov Yaroslav Oleksandrovich. Energy-saving algorithms for controlling the movement of a mobile robot. Qualifying master's thesis. Sumy State University. Sumy, 2023.

The project contains 69 pages of explanatory note, 34 figures, 1 table. In the course of the project, 19 literary sources were used.

This project is aimed at creating and describing energy-saving algorithms for controlling the movement of a mobile robot. The technical task was developed. Basic technical drawings and algorithms have been developed. The aim of the work is to evaluate the possibilities of optimizing the electric drive of a mobile robot. This goal is achieved by developing models and building regulators.

The following methods will be used to achieve the objectives: analysis of scientific literature, study of technical characteristics of mobile robots, development of mathematical models and simulation using software.

In the course of the project, mathematical models of the movement of a mobile robot and a DC motor were developed.

In the MATLAB/Simulink environment, schemes for the movement of a mobile robot, a mobile robot electric drive and their combination were developed.

A SCADA system was developed in the Zenon environment.

In conclusion, the conclusions about the student's achievements during the master's thesis project are drawn.

The results of the study can be used to improve the concepts and developments of mobile robots, as well as to solve current problems in the field of autonomous systems and artificial intelligence.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
Факультет електроніки та інформаційних технологій  
Кафедра комп'ютеризованих систем управління

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА  
до кваліфікаційної роботи магістра  
Енергозберігаючі алгоритми керування переміщення мобільного робота

Керівник проекту:

Доцент, кандидат технічних наук:

Кулінченко Г.В.

Виконав:

студент групи СУ.м-21

Понамарьов Я.О.

## ЗМІСТ

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	3
ВСТУП.....	4
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ.....	6
1.1.Аналіз існуючих рішень.....	6
РОЗДІЛ 2 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ.....	20
2.1 Опис власних контурів керування.....	20
2.2 Постановка задачі до дослідження.....	35
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ.....	38
3.1 Математична модель руху робокару.....	41
3.2 Математична модель VLDC.....	42
РОЗДІЛ 4 МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА МОБІЛЬНОГО РОБОТА ...	45
4.1 Обґрунтування підстав для моделювання.....	45
4.2 Синтез системи.....	47
4.3 Налаштування регулятора.....	52
4.4 Синтез системи керування із ПД-регулятором.....	57
РОЗДІЛ 5 ПОБУДОВА SCADA СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ МОБІЛЬНИМ РОБОТОМ.....	60
5.1 Що таке SCADA та навіщо вона портібна в цьому проекті.....	60
5.2 Вибір програмного забезпечення.....	63
5.3 SCADA-система.....	64
ВИСНОВКИ.....	66
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	67



## СПИСОК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

СУ – система управління

САУ – система автоматичного управління

МК – мікроконтролер

Д – давач

ВМ – виконавчий механізм

ПЗ – програмне забезпечення

ПЛК – програмований логічний контролер

СА – схема автоматизації

КК – контур керування

ДПТ – двигун постійного струму

МП – мікропроцесор

АКБ – акумулятор

АЕП – автоматизований електропривод

АМР – автономний мобільний робот

## ВСТУП

Великий обсяг робіт у промисловості включає вантажно-розвантажувальні та транспортно-складські операції. Ефективність виконання цих завдань залежить від рівня їх механізації та автоматизації. У останні роки для досягнення цих цілей все частіше використовуються засоби робототехніки.

Вантажно-розвантажувальні та транспортно-складські роботи відрізняються великою різноманітністю виконуваних операцій. Вироби та вантажі, які переміщуються, відрізняються масою, розміром, формою і жорсткістю. При автоматизації та механізації цих видів робіт важливо враховувати, що вони проводяться в умовах обмеженого простору виробничих цехів, камер і складських приміщень. Таким чином, засоби робототехніки, які використовуються для цих завдань, повинні бути компактними і не займати значну виробничу площу.

Для виконання вантажно-розвантажувальних і транспортно-складських робіт в автоматичному режимі потрібні транспортні роботи. Для їх впровадження необхідна висока ступінь автоматизації транспортно складської системи.

Робокари є прикладом універсального автоматизованого транспортного засобу, який можна використовувати для транспортування оброблюваних заготовок і інших вантажів в гнучких виробничих системах різного технічного призначення та розробка якого описана в даному проекті.

Одним із ключових завдань, що постають перед інженерами та проектувальниками сучасних технічних систем, є розробка ефективного алгоритму управління електроприводом та оптимізація його роботи з метою ефективного використання електроенергії. Це особливо актуально для мобільних роботів, де електропривід виступає як ключовий елемент, забезпечуючи їхні рухові можливості.

За мету проекту ставиться аналіз роботи електроприводу мобільного робота. Як результат роботи необхідно вдосконалити існуючу систему керування

електроприводом для того щоб досягти максимально можливої економії заряду батареї.

## РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

### 1.1. Аналіз існуючих рішень

Що таке робот? Оксфордський словник англійської мови дає таке визначення: "Машина, здатна автоматично виконувати складну серію дій, особливо запрограмованих комп'ютером".

У цьому визначенні присутні кілька цікавих аспектів:

"Виконання дій автоматично" визначає ключовий елемент у сфері робототехніки та інших простіших механізмів, що вважаються автоматами. Відмінність між роботом і звичайним автоматом, таким як посудомийна машина, полягає в тлумаченні "складної серії дій". Чи можна вважати прання одягу складною серією дій? А політ літака на автопілоті? Чи вважається приготування хліба складним завданням? Для всіх цих сценаріїв існують машини, які опиняються на межі між автоматами та роботами.

"Запрограмований комп'ютером" є ще одним ключовим елементом робота, оскільки деякі автомати програмуються механічно і виявляють невелику гнучкість. З іншого боку, комп'ютери стали невід'ємною частиною нашого оточення, ускладнюючи використання цього критерію для відрізнення робота від інших механізмів.

Важливим елементом роботів, який не згадується у визначенні, є використання датчиків. Більшість автоматів не мають сенсорів і не можуть адаптувати свої дії до навколишнього середовища. Датчики - це те, що дозволяє роботам виконувати нескладні завдання.

Роботів можна класифікувати відповідно до середовища, в якому вони функціонують. Зазвичай виділяють стаціонарних та мобільних роботів. Ці два види роботів працюють у різних робочих середовищах і вимагають відмінних

характеристик. Стаціонарні роботи, головним чином, представляють собою промислові маніпулятори, які оперують у чітко визначеному середовищі, спеціально пристосованому для їхньої роботи. Ці пристрої виконують конкретні повторювані завдання, такі як зварювання чи фарбування деталей на автомобільних заводах. З розвитком сенсорів і систем взаємодії між людиною та роботом, стаціонарні маніпулятори все частіше використовуються в менш контрольованих умовах, таких як високоточна хірургія.

У відмінну від стаціонарних, мобільні роботи зобов'язані пересуватися та виконувати завдання у просторах, що є великими, погано визначеними і не адаптованими спеціально для їхньої роботи. Їм необхідно вирішувати ситуації, які не мають точного передбачення і що змінюються в часі. Такі середовища можуть включати непередбачувані об'єкти, такі як люди і тварини. До прикладів мобільних робіт відносяться роботи-пилососи та безпілотні автомобілі.

Чіткої роздільної лінії між завданнями, які виконують стаціонарні та мобільні роботи, не існує - існує можливість взаємодії людей із промисловими роботами, і мобільні роботи можуть бути обмежені в руху по рейках, - проте зручно розглядати ці два класи як принципово різні. Особливо, стаціонарні роботи прикріплені до стійкої опори на землі, що дозволяє їм визначати своє положення на підставі внутрішнього стану, в той час як мобільні роботи повинні користуватися своїм сприйняттям навколишнього середовища для визначення свого місцезнаходження.

Існує три основних середовища для мобільних робіт, які вимагають значно різних принципів проектування через різноманітність механізмів руху: водне (для підводних досліджень), наземне (автомобілі) і повітряне (дрони). Знову ж таки, класифікація не є абсолютною, наприклад, існують роботи-амфібії, що вміють пересуватися як у воді, так і по землі. Роботи, призначені для цих трьох середовищ, можуть бути розділені на підкласи: наземні роботи можуть мати ноги, колеса або гусениці, а повітряні - легкі, як повітряні кулі, або важкі, як літаки, які в свою чергу поділяються на літальні апарати з фіксованим крилом і гвинтокрилі (гелікоптери).

Роботи можна класифікувати в залежності від області їх використання та виконуваних завдань (рис. 1.1). Промислові роботи працюють у чітко визначеному середовищі, виконуючи завдання виробництва. Саме промислові роботи вважаються першими роботами, оскільки їхнє розроблення передбачало чітко визначене середовище. З іншого боку, сервісні роботи надають допомогу людям у виконанні різноманітних завдань. Це охоплює домашні роботи, такі як пилососи, транспортні роботи, наприклад, безпілотні автомобілі, а також програми в області оборони, такі як розвідувальні ракети. В медицині також спостерігається зростаюче використання роботів у сферах хірургії, реабілітації та навчання. Для цих новітніх областей використання необхідні вдосконалені сенсори та тісніша взаємодія з користувачем.

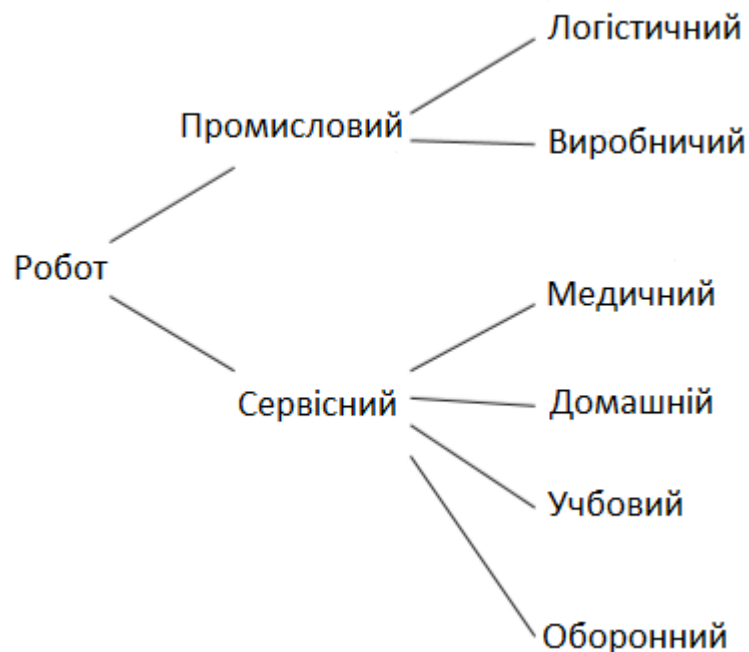


Рисунок 1.1 – Класифікація роботів за сферою застосування

Першими роботами були промислові роботи, які замінили людей, що виконували прості повторювані завдання. Заводські конвеєри можуть працювати без присутності людини, в чітко визначеному середовищі, де робот повинен виконувати завдання у визначеному порядку, діючи на об'єкти, точно розміщені перед ним.

Спочатку мобільні роботи були створені для виконання простих завдань. У сучасній епохі роботи широко доступні завдяки вдалому розвитку технологій, що дозволяють створювати економічні роботи, які вміють рухатися в захищеному об'єктами просторі. Багато автономних мобільних роботів призначені для надання підтримки фахівцям, що працюють у структурованих середовищах, таких як склади. Наприклад, Husky A200 є цікавим екземпляром (рис. 1.2). Навіть на високоструктурованих заводах робот ділить середовище з людьми, що вимагає надзвичайно надійного зондування.

Можливо, найпопулярнішим автономним мобільним роботом на сьогодні є безпілотний автомобіль. Створення їх є надзвичайно складним завданням через складне, невизначене середовище на дорогах та високі вимоги до безпеки.



Рисунок 1.2 – Husky A200 - мобільна роботизована платформа, призначена для автономного виконання логістичних завдань на будівельних майданчиках.

Велика частина сучасних досліджень і розробок у галузі робототехніки акцентується на тому щоб зробити роботів більш автономними, за допомогою вдосконалення сенсорів і забезпечення більш інтелектуального управління. Вдосконалені сенсори можуть розпізнавати деталі в більш складних ситуаціях, і

для ефективного вирішення таких завдань управління поведінкою робота повинно бути вкрай гнучким і адаптивним. Особливий акцент приділяється дослідженням області зору, оскільки камери стають більш доступними, а отримана ними інформація вкрай багата. Виділяються зусилля для зроблення систем більш гнучкими, щоб вони могли вчитися від людей або адаптуватися до нових ситуацій[1].

Мобільні роботи знаходять широке застосування у різноманітних сферах, включаючи виробничі об'єкти (такі як автоматизовані керовані транспортні засоби та робокари), військові операції (зокрема безпілотні наземні розвідувальні машини), охорону здоров'я (наприклад, доставка фармацевтичних препаратів), пошук і порятунок, охорону та в домашньому оточенні (наприклад, для прибирання підлоги та стрижки газонів).



Рисунок 1.3 – Мобільний робот під час складських робіт

Мобільні роботи часто функціонують на великих об'єктах, використовуючи різноманітні методи для локалізації та навігації. Підходи варіюють від тих, де об'єкт повністю відображається на карті, а маршрути плануються заздалегідь, до тих, де датчики надають інформацію про прохідні зони, а транспортні засоби динамічно визначають свої поточні позиції і маршрути на основі розпізнаних



об'єктів у навколишньому середовищі. Маркери, розташовані в робочій зоні, можуть бути розпізнані датчиками на транспортних засобах, що дозволяє точно визначати їхню локалізацію за допомогою тріангуляції та полегшує навігацію. Інші датчики на борту транспортного засобу виявляють перешкоди чи неочікувані об'єкти на шляху транспортного засобу і можуть спланувати об'їзд, перш ніж повернутися до заздалегідь запланованого маршруту. Також важливо визначати положення та орієнтацію (позу) мобільного робота, і існує ряд розроблених методів для отримання цієї інформації. Найпоширенішим підходом є використання одометрії, яку доповнюють сенсорні вимірювання, такі як лазери, системи радіочастотної ідентифікації (RFID), двовимірні штрих-коди (наприклад, QR-коди), камери і так далі. Більш вдосконалені системи використовують алгоритми, які виконують завдання локалізації та навігації одночасно. Ці системи часто відомі як алгоритми SLAM (Simultaneous Localization And Mapping - одночасна локалізація та мапування).

Локалізація і навігація комерційних роботів все ще зазвичай здійснюється за допомогою дротяного наведення, де індукція зчитується з електрифікованих дротів, вмонтованих у підлогу. Однак зараз більш поширеним є визначення місцезнаходження за допомогою методів лазерної тріангуляції, в яких лазер, що обертається, вимірює дальність і азимут до настінних відбивачів. Підлогові мітки або магніти є розширенням дротяного наведення, яке використовує вбудовані в підлогу магніти для локалізації КТЗ біля магніту і виправлення помилок одометрії, які накопичуються між магнітами. Дротове наведення було розширено до наведення на магнітній та хімічній стрічці.[2].

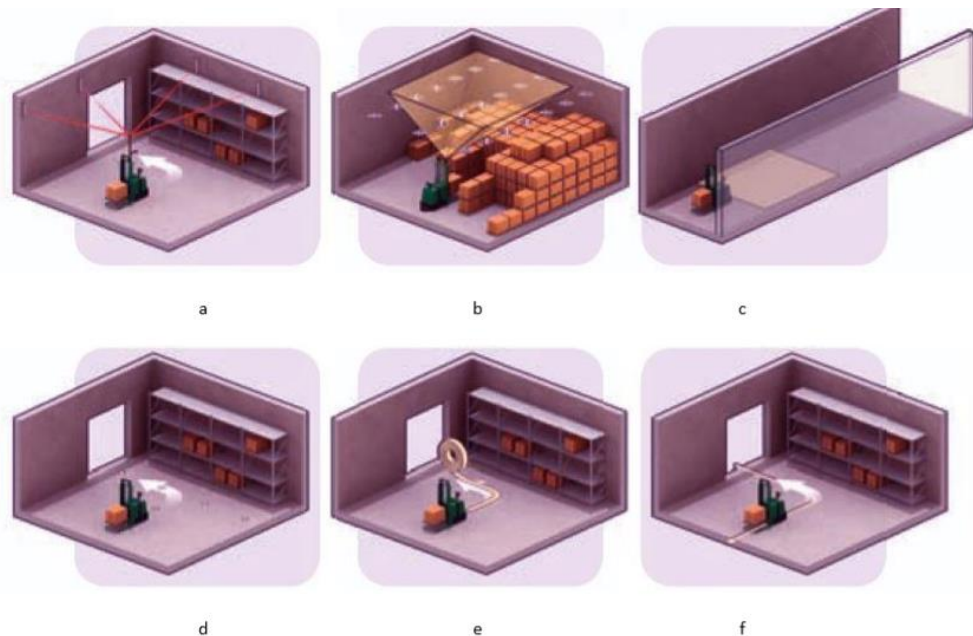


Рисунок 1.4 – Різні методи локалізації робочарів, що використовуються сьогодні:

- а) лазерна тріангуляція, б) штрих-коди на стелі, в) діапазон або стеження за стіною, г) підлогові плями/магніти, д) магнітна стрічка та е) індуктивний дріт.

Механічна структура мобільного робота повинна бути ефективною для виконання завдань та досягання поставлених цілей. Система управління складається з трьох основних компонентів[3]: сприйняття, обробки та пізнання, а також виконавчої діяльності. Система сприйняття надає інформацію про оточуюче середовище, самого робота і взаємодію між роботом і середовищем. Ця інформація обробляється, і відповідні команди передаються виконавчим механізмам, що відповідають за рух механічної конструкції. Після визначення оточення, напрямку руху, місця призначення чи завдання, когнітивна архітектура робота формує план шляху, який робот повинен пройти для досягнення мети. Таким чином, когнітивний рівень робота виступає як частина процесу прийняття рішень і виконання, що дозволяє роботу досягати високорівневих цілей. З урахуванням інформації від датчиків і задачі робота система пізнання і управління вирішує, як діяти і які кроки вживати для досягнення визначених цілей. Додатково, система управління відповідає за координацію всіх вхідних даних і планування руху робота, забезпечуючи його правильне переміщення.

Ключовим елементом в керуванні мобільним роботом є навігація. Задача полягає в тому, щоб робот міг пересуватися від одного місця до іншого у відомому або невідомому середовищі, використовуючи інформацію з датчиків для досягнення поставлених цілей. Це передбачає, що робот повинен опиратися на інші аспекти, такі як сприйняття (використання датчиків для отримання важливих даних), локалізація (визначення свого місця та конфігурації), пізнання (розв'язання завдань для досягнення цілей) і управління рухом (розрахунок вхідних сил для керування механізмами та досягнення бажаної траєкторії). В більшості випадків мобільний робот не може просто перейти прямим шляхом від початкової позиції до кінцевої точки, що вимагає використання методів планування руху.

Забезпечення достатньої інформації про розташування робота має визначальне значення для його навігації. Таким чином, методи локалізації стають ключовим елементом у процесі навігації. Крім того, для успішної навігації мобільного робота потрібні додаткові навички. Перша з них - планування траєкторії. Друга важлива навичка - уникнення перешкод. Це грає критичну роль у плануванні траєкторії, сприяючи уникненню можливих зіткнень.

Дані з датчиків можуть модулювати траєкторію руху робота для уникнення зіткнень. Для об'їзду перешкод доведено ефективність цілої низки методів. Розрахунковий рух робота є функцією як показань датчиків робота, так і його цільового положення та розташування відносно цільового положення. Алгоритми об'їзду перешкод спираються на існування глобальної карти і точне знання роботом свого місця розташування відносно карти.

Для ефективної навігації робот повинен точно визначити своє розташування на робочому полі. Таким чином, ключовими аспектами навігації робота є локалізація, сприйняття та керування рухом.

Планування маршруту пов'язане з пошуком оптимального шляху для того, щоб забезпечити мобільному роботу безперешкодний доступ до заданої цілі, дозволяючи йому пройти через перешкоди від початкової конфігурації до

фінальної. При цьому не враховуються часові параметри, такі як швидкість та прискорення. Більш комплексним дослідженням, що включає в себе більш широкі цілі, є планування траєкторії.

Планування траєкторії включає в себе визначення силових впливів (керування  $u(t)$ ), які будуть застосовані до виконавчих механізмів, з метою забезпечення руху робота по траєкторії  $q(t)$ . Ця траєкторія призначена для ефективного переміщення робота від початкової конфігурації до кінцевої, уникаючи перешкод. При плануванні траєкторії враховуються динаміка та фізичні характеристики робота, враховується часова еволюція руху і обчислюються необхідні сили для досягнення цього руху. Більшість методів планування шляху і траєкторії спільно враховують ці аспекти. Відстеження траєкторії та слідування за траєкторією також є важливою частиною планування руху. Їх також можна вважати частиною керування рухом.

Сучасна практика в галузі полягає у розгляді координації як автономної проблеми, яку вирішується під час програмування транспортних засобів. Існують кілька причин, які підтримують такий підхід, включаючи аспекти безпеки та потребу в збереженні стабільного ритму виробництва.

Було виконано значну роботу у напрямку планування та координації дій численних мобільних транспортних засобів. У випадку промислових робочих, координація зазвичай здійснюється централізовано, і оптимальні маршрути можуть бути розраховані в автономному режимі, оскільки вони залишаються сталими тривалий час. Проте з появою мобільних роботів у менш структурованих середовищах, де їх завдання не завжди заздалегідь відомі, планування та координація стають складнішими. Хоча існують методи, які ґрунтуються на централізованих обчисленнях, розподілені підходи стають все більш популярними через обчислювальну складність централізованих методів.

Децентралізовані методи зазвичай базуються на агентах і можуть використовувати просторові та часові зони, в межах кожної з яких розраховуються окремі плани. Прикладом зонного підходу є дослідження Дігані та ін. [4], де використовується

двошарова архітектура. Перший рівень розділяє робочу область на сектори та використовує алгоритм топологічного пошуку для визначення шляхів між секторами. Другий рівень відповідає за планування маршрутів всередині кожного сектора та розраховує фактичні траєкторії для кожного транспортного засобу, враховуючи можливі конфлікти на перехрестях.

Інший подібний підхід застосовують Херреро-Перез та Мартінез-Барбера[5], де також присутні два рівні. Один відповідає за децентралізоване планування навігації, а інший - за централізований розподіл завдань та управління дорожнім рухом. Для управління трафіком використовується декомпозиція робочої зони на основі зон, тоді як для розподілу завдань використовується механізм аукціону, що дозволяє робочокару брати участь у торгах на виконання завдань. Поведінка робочокару моделюється у вигляді планів мережі Петрі. Система була успішно впроваджена і функціонує в реальному заводському середовищі, при цьому особлива увага приділяється точним маневрам стикування, які плануються та виконуються за допомогою спеціальної процедури.

Інший підхід до розподілу завдань та вирішення конфліктів полягає у використанні часових вікон для пошуку маршрутів-кандидатів та перевірки їхньої виконуваності. Цей метод використовує централізований алгоритм для розробки динамічного планування маршрутів для об'єкта, який включає кілька робочарів і враховує кількість активних місій та їхні пріоритети. Алгоритм вирішує конфлікти часових вікон ітеративно, додаючи нові часові вікна до тих пір, поки не виникне перекриття або перекриття станеться на першому відрізку шляху, що свідчить про те, що обраний маршрут є недосяжним. Метод був успішно впроваджений на різних виробництвах.

Прогнозування руху поблизу мобільних роботів стає ключовим аспектом для забезпечення безпеки та ефективності їх функціонування. Метод планування шляху, відомий як "динамічні штучні потенційні поля", дозволяє роботам безпечно навігувати у високодинамічному середовищі, навіть якщо перешкоди рухаються із

вищою швидкістю, ніж сам мобільний робот. Цей метод, який був протестований лише в симуляції, показує на 100% кращі результати для тих же сценаріїв порівняно із системами, що не використовують прогнозування. Додатково, для динамічних середовищ використовують алгоритми штучного потенційного поля, які дозволяють мобільним роботам "відштовхувати" статичні та динамічні перешкоди, якщо їх розглядати як протилежно заряджені магніти, та динамічно регулювати їхню швидкість.

Ангерер, Пулі, та Айлетт[6] розглядають використання ієрархічної мультиагентної системи для динамічної реконфігурації мобільних роботів на автомобільному заводі для виконання різноманітних завдань, що виникають у зв'язку з особливостями кожного окремого настроюваного транспортного засобу. Їх система включає в себе поведінкову магістраль, яка функціонує з фіксованою швидкістю. Магістраль використовує онтологію для опису об'єктів та їх розташування на заводі, а також набір завдань, які можуть бути виконані системою. Система може динамічно створювати нових агентів для виконання завдань, які виникають при зміні навколишнього середовища. Ці агенти ґрунтуються на відомих можливостях системи. Дії мають як передумови, так і постумови, що дозволяє перевіряти нову (заплановану) дію перед її виконанням і під час виконання. Хоча систему, в принципі, можна використовувати як для стаціонарних, так і для мобільних роботів, вона була розроблена і протестована в автомобільній галузі, де мобільні роботи переміщують компоненти між робочими станціями і сховищами.

Мобільні роботи, в основі своїй, використовують електропривод.

Електроприводом називається електромеханічна система, яка перетворює електричну енергію в механічну і здійснює керування рухом виконуючого органу робочої машини.

Основні функції автоматизованого електроприводу (АЕП)[7]:

1. Управління процесами запуску, гальмування та реверсу визначається функцією керування, яку можуть виконувати розімкнуті системи автоматичного електроприводу (АЕП). У ході керування відбувається грубий контроль за струмом, при цьому жорсткість механічних характеристик не перевищує природних обмежень. На сьогодні ця група АЕП є найбільш розповсюдженою.
2. Підтримання зазначених значень регульованих координат, таких як струм, швидкість, положення, потужність і т.д., з високою точністю у статиці і динаміці представляє собою функцію стабілізації. Цю функцію може виконати виключно замкнута система автоматичного електроприводу (АЕП). Основною регульованою величиною є та, що виступає основним об'єктом зворотного зв'язку.
3. Відстеження за змінюваними вхідними сигналами (функція слідкування) є завданням, яке може бути реалізоване лише в замкнутих системах. Сучасні системи слідкування, як правило, включають три контури.
4. Відпрацьовування завдання, яке змінюється згідно програми (функція програмного керування).
5. Вибір доцільних режимів роботи АЕП (функція адаптації). Завдання може бути виконано в замкнутих системах.
6. Автоматизоване управління комплексами машин та механізмів, які об'єднані загальним технологічним процесом.

Енергосбереження в мобільних роботах визначається як критичний аспект, оскільки впливає на їхню продуктивність та діапазон автономії. Забезпечення довготривалої роботи без необхідності частого підзаряджання або заміни батарей стає визначальним чинником для багатьох застосувань, таких як робототехніка у важкодоступних місцях, медичні роботи або дослідницькі місії.

Зменшення споживання енергії в мобільних роботах може включати в себе оптимізацію алгоритмів руху, використання ефективних систем передачі даних, а також розвиток енергоефективних електроприводів. Це не лише підвищує

тривалість автономної роботи, але також робить їх більш стійкими та ефективними в різних умовах експлуатації.

Як один із прикладів енергозберігаючих алгоритмів можна розглянути роботу «Energy-Saving Algorithm Considering Cornering Resistance of a Four-Wheel Independent Drive Electric Vehicle With Vehicle-to-Vehicle (V2V) Information»[8]. У цьому дослідженні пропонується алгоритм економії енергії руху в автономному транспортному засобі на основі технології " vehicle-to-vehicle". Економія енергії руху транспортного засобу може бути досягнута за рахунок зменшення непотрібних гальмувань та прискорень, що виникають в умовах дорожнього затору, а також за рахунок зменшення опору, спричиненого внутрішніми факторами транспортного засобу. Алгоритм, запропонований у цьому дослідженні, визначає опір на поворотах, один із внутрішніх факторів опору автомобіля під час руху, через кут повороту керма. Після цього входи керування транспортним засобом коригуються для зменшення опору при проходженні поворотів. Зокрема, оскільки цільовий транспортний засіб має бути повнопривідним, існує багато значень вхідних сигналів керування, таких як кут повороту керма та момент рискання. Для того, щоб одночасно отримати бажані ходові якості та мінімізувати енергію руху в таких умовах, вхідні величини оптимально розподіляються за допомогою предиктивного керування моделлю (MPC). Крім того, ваговий коефіцієнт для MPC для отримання відповідних керуючих впливів обирається з урахуванням прогнозованого опору на поворотах.

Також можливо відмітити роботу «Energy Saving Control Approach for Trajectory Tracking of Autonomous Mobile Robots»[9]. У цій роботі представлено адаптивний енергозберігаючий підхід до керування замкненою формою  $H_2$  для розв'язання нелінійної задачі відстеження траєкторії автономних мобільних роботів (AMP). В цьому дослідженні було розроблено аналітичну адаптивну нелінійну схему управління для відстеження траєкторії автономних мобільних колісних роботів. Запропонована конструкція адаптивного керування складається з адаптивного скасовуючого члена, який використовується для скасування нелінійної складової



помилки відстеження, та оптимального керуючого члена для мінімізації енергоспоживання при відстеженні бажаних траєкторій. Основними перевагами запропонованого підходу є: замкнений підхід, проста структура закону керування, легка реалізація та економія енергії завдяки відстеженню траєкторії керованого АМР. Важко математично отримати це адаптивне  $H_2$ -рішення замкненої форми для АМР. Тому за допомогою серії математичних аналізів динаміки похибки відстеження траєкторії керованих АМР проблему відстеження траєкторії АМР можна перетворити безпосередньо на розв'язувану задачу і знайти адаптивний нелінійний оптимальний регулятор, який має надзвичайно просту форму і енергозберігаючі властивості. Результати моделювання показують, що запропонований метод адаптивного нелінійного керування забезпечує багатообіцяючу ефективність відстеження траєкторії для WMR, оскільки помилки відстеження швидко збігаються до нуля, коли з'являється велика кількість невизначеностей моделювання.

## РОЗДІЛ 2 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

### 2.1 Опис власних контурів керування

Як було сказано в минулому розділі, сучасні мобільні роботи використовують електропривод, і вибір методу може бути різним. Зараз, завдяки прогресу в області комутаційної мікросхемотехніки, безколекторні електродвигуни постійного струму (БДПС) стають все більш поширеними. БДПС відзначаються високою ефективністю, низьким рівнем шуму та вібрацій, жорсткою механічною характеристикою, а також довгим терміном служби.

За структурою та кінематичною схемою мобільні роботи можна класифікувати на кілька типів:

1. Класична чотириколісна з рульовим приводом.
2. Триколісна, де переднє колесо виконує функції ведучого та рульового (аналогічно дитячому велосипеду).
3. Одновісна, де відсутній рульовий привід, а зміна напрямку руху відбувається за рахунок різниці швидкостей руху ведучих коліс, розташованих по боках.

Остання конфігурація має значущі переваги порівняно з іншими, забезпечуючи симетрію руху вперед і назад, а також мінімальні радіуси повороту, включаючи можливість розвороту на місці.

Управління мобільним роботом може бути оцінене за допомогою різноманітних критеріїв, які відображають якість його роботи та взаємодії з оточуючим середовищем. Деякі основні критерії управління мобільним роботом включають:

1. **Точність відстеження траєкторії:** Визначає, наскільки точно робот слідує за зазначеною траєкторією. Висока точність важлива для завдань, де потрібна навігація.

2. **Стійкість та витривалість:** Оцінює, наскільки добре робот витримує зміни у середовищі, різні умови дороги та інші фактори, що можуть впливати на його роботу.
3. **Швидкість реакції:** Вказує на швидкість, з якою робот реагує на команди чи зміни в оточенні. Важливо для ситуацій, де потрібна оперативність.
4. **Енергоефективність:** Оцінює, наскільки ефективно робот використовує свою енергію. Енергозбереження важливо для подовження тривалості його роботи.
5. **Прохідність:** Визначає, наскільки добре робот пристосовується до різних типів доріг, перешкод, та рельєфів.
6. **Безпека:** Оцінює, наскільки робот уникатиме конфліктів з оточенням та має захист від аварій.
7. **Комунікація:** Перевіряє ефективність системи зв'язку робота з іншими системами чи операторами.

Ці критерії можуть використовуватися для комплексної оцінки ефективності управління мобільним роботом в різних умовах та завданнях.

Основний критерій на якій ми будемо спиратися при розробці алгоритмів системи це критерій енергоефективності.

Створено експериментальну кінематичну модель автономного мобільного робота, зовнішній вигляд якого представлено на рис. 2.1.

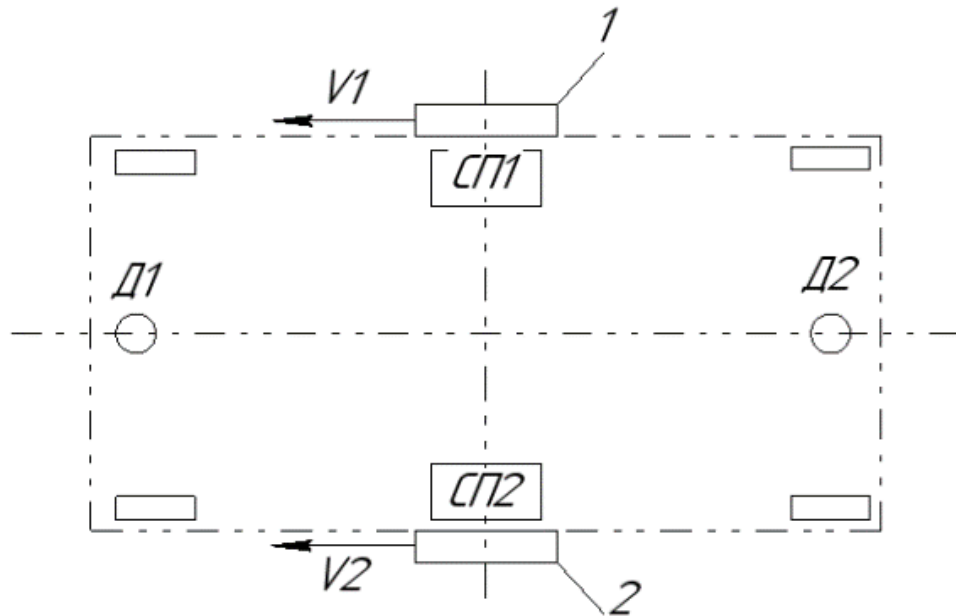


Рисунок 2.1 – Експериментальна кінематична модель автономного мобільного робота

Тягові колеса 1 і 2, з індивідуальними силовими приводами СП1 та СП2, розташовані на осі симетрії з обох боків. Чотири опорні (флюгерні) колеса встановлені по кутах. Давачі траси Д1 і Д2 розміщені спереду і ззаду вздовж осі симетрії, що видають сигнал, пропорційний величині відхилення датчика від траси.

Керування рухом здійснюється бортовою системою програмного керування, яка функціонує на двох рівнях. На верхньому, програмному рівні реалізовані такі завдання:

1. Управління силовими приводами (визначення напрямку та швидкості руху);
2. Вибір напрямку руху на розгалуженнях траси;
3. Управління приводом вантажно-розвантажувального пристрою;
4. Фіксація вантажу під час руху;
5. Управління приводами гальм.

На нижньому рівні – система стеження, яка відповідає за те щоб робочар рухався в межах траси шляху, регулюючи силові приводи відповідно до сигналів датчика траси.

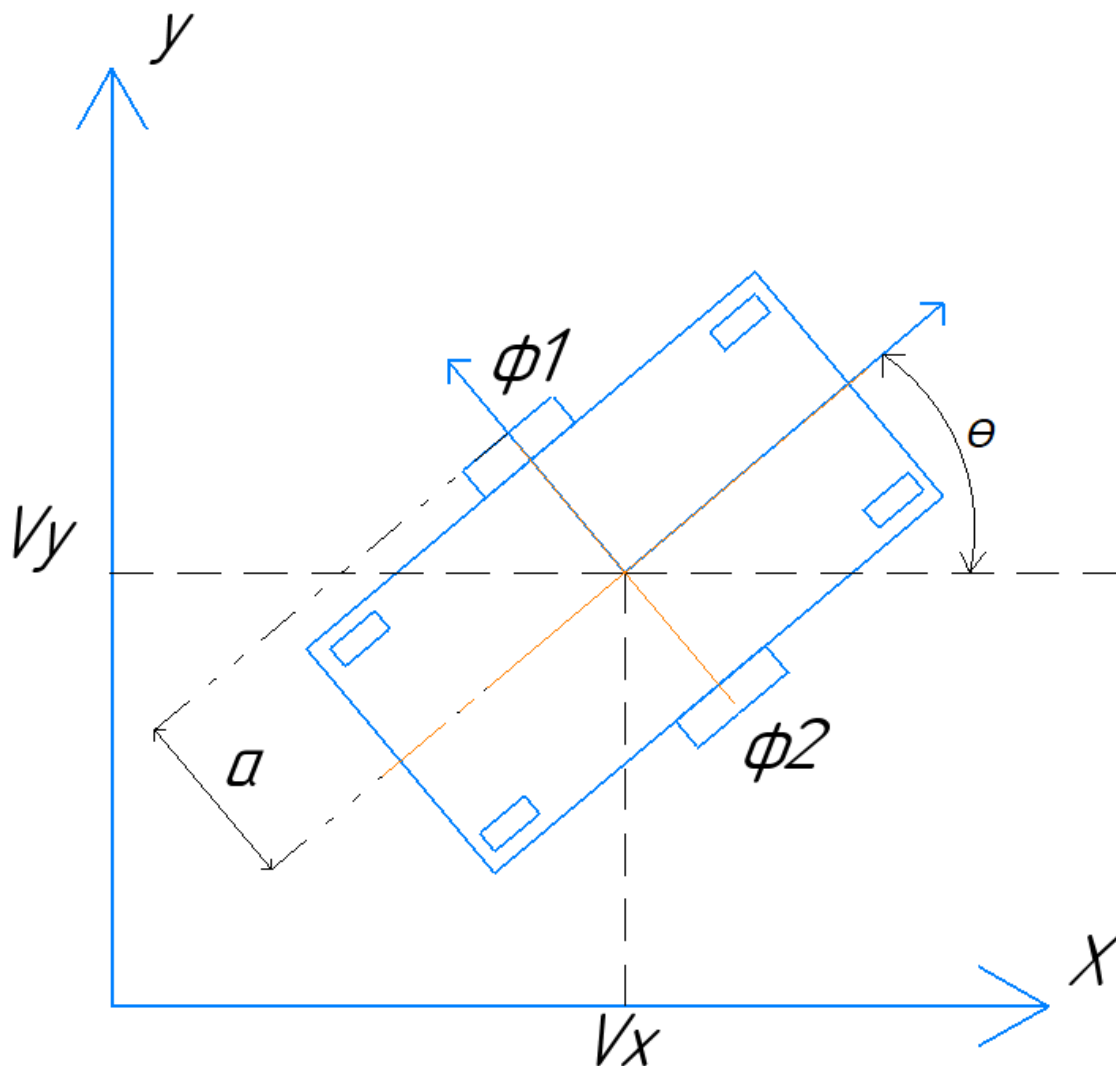


Рисунок 2.2 – Кінематика руху мобільного робота (робокара)

Де:

- $\Theta$  – кутова швидкість повороту корпусу мобільного робота
- $V_x$  – координата центра мобільного робота по  $x$
- $V_y$  – координата центра мобільного робота по  $y$
- $\varphi_1, \varphi_2$  – кутова швидкість коліс
- $a$  – відстань від центра мобільного робота до одного з ведучих коліс

Хоча використання безколекторних електродвигунів постійного струму (БДПС) в тяговому електроприводі існує протягом тривалого часу, їх широке поширення настало лише завдяки прогресу в області керуючої комутаційної

мікросхемотехніки. Використання мікропроцесорних засобів керування грає важливу роль у досягненні високих рівнів енергоефективності та впровадженні переваг використання БДПС в умовах живлення від акумуляторної батареї (АКБ).

Функціонування BLDC здійснюється завдяки блоку керування, який змінює частоту обертання двигуна шляхом комутації обмоток двигуна через польові МОП-транзистори, що утворюють Н-міст – інвертор (рис. 2.3). Необхідна частота обертання двигуна отримується в результаті подачі керуючого сигналу на затвори ключових транзисторів  $Q_1 - Q_6$  з використанням широтно-імпульсної модуляції (ШІМ).

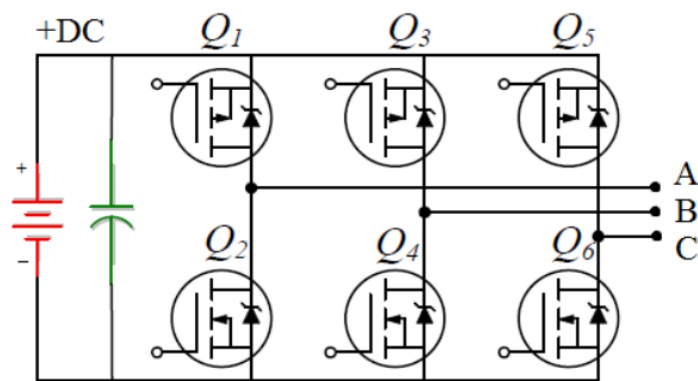


Рисунок 2.3 – Схема Н – моста – інвертора

Для ефективної комутації обмоток у необхідні моменти часу необхідно постійно визначати положення ротора відносно вектора магнітного поля статора. За цією метою використовуються датчики положення ротора (ДПР). Для функціонування ДПР використовуються енкодери, трансформаторні, індуктивні, ємнісні та фотоелектричні датчики положення. На сучасному етапі найбільш поширені схеми ДПР, що базуються на датчиках Холла. Використання енкодерів у ролі ДПР передбачає проведення певної числової обробки, що вимагає непродуктивних витрат часу.

У випадку побудови ДПР з використанням давачів Холла, їх розміщують у просторі із зміщенням 120 градусів один від другого, аналогічно розміщенню котушок статора (Рис. 2.4).

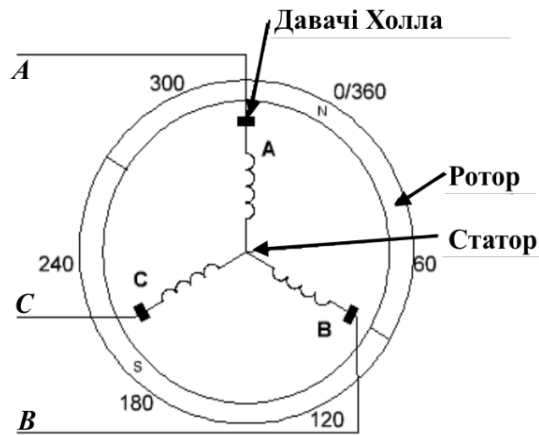


Рисунок 2.4 – Розміщення давачів Холла

Відповідно до поточного положення ротора, кожні 1/6 періоду його обертання, здійснюється чергове переключення обмоток двигуна та відбувається стрибкоподібне переміщення поля статора.

Порядок переключення ключів відповідно до сигналів давачів наведено у Таблиці 1.

Таблиця 1 - Відповідність стану давачів Холла та включення ключів інвертора.

Положення	Давачі Холла			Фази двигуна					
				А		В		С	
	А	В	С	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>5</sub>	S <sub>6</sub>
<b>0 / 360</b>	0	0	1	0	0	0	1	1	0
<b>60</b>	1	0	1	1	0	0	1	0	0
<b>120</b>	1	0	0	1	0	0	0	0	1
<b>180</b>	1	1	0	0	0	1	0	0	1
<b>240</b>	0	1	0	0	1	1	0	0	0
<b>300</b>	0	1	1	0	1	0	0	1	0

Для забезпечення потужності на валу двигуна і досягнення необхідної швидкості руху по маршруту, в системі керування електроприводом використовуються

зворотні зв'язки по струму і швидкості двигуна. Структурна схема керування режимами роботи БДПС представлена на рис. 2.5.

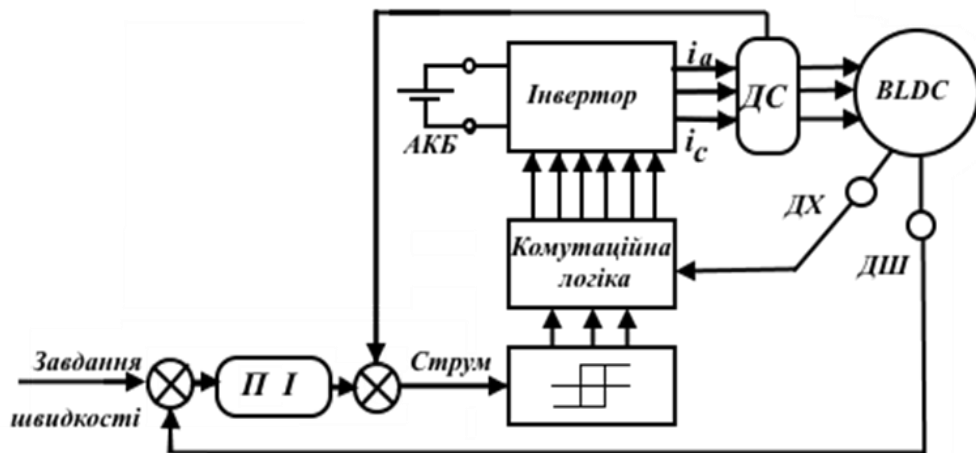


Рисунок 2.5 – Структурна схема керування режимами роботи двигуна BLDC

Де:

- АКБ – акумуляторна батарея;
- ДС– давач струму;
- ДХ – давач Холла;
- ДШ – давач швидкості;
- BLDC – безколекторний двигун;
- ПІ – ПІ – регулятор



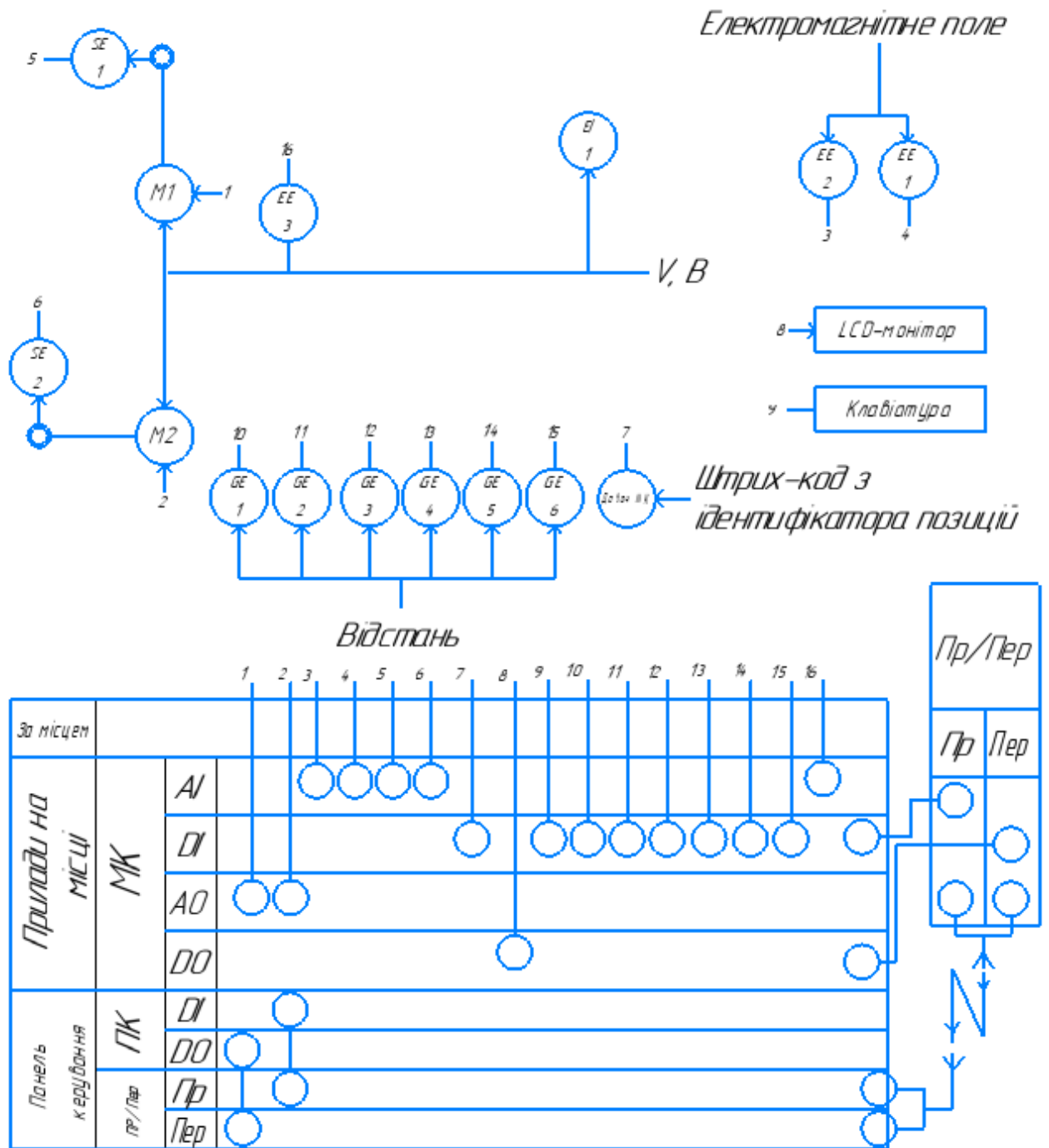


Рисунок 2.6 – Загальна функціональна схема автоматизації мобільного робота

Зі схеми вище (Рисунок 2.7) можна описати основні функціональні задачі керування мобільним роботом:

1. Керування траєкторією руху робокару.
2. Керування швидкістю робокару
3. Позиціонування робокару

4. Контур контролю джерела живлення
5. Контур зв'язку із пунктом керування

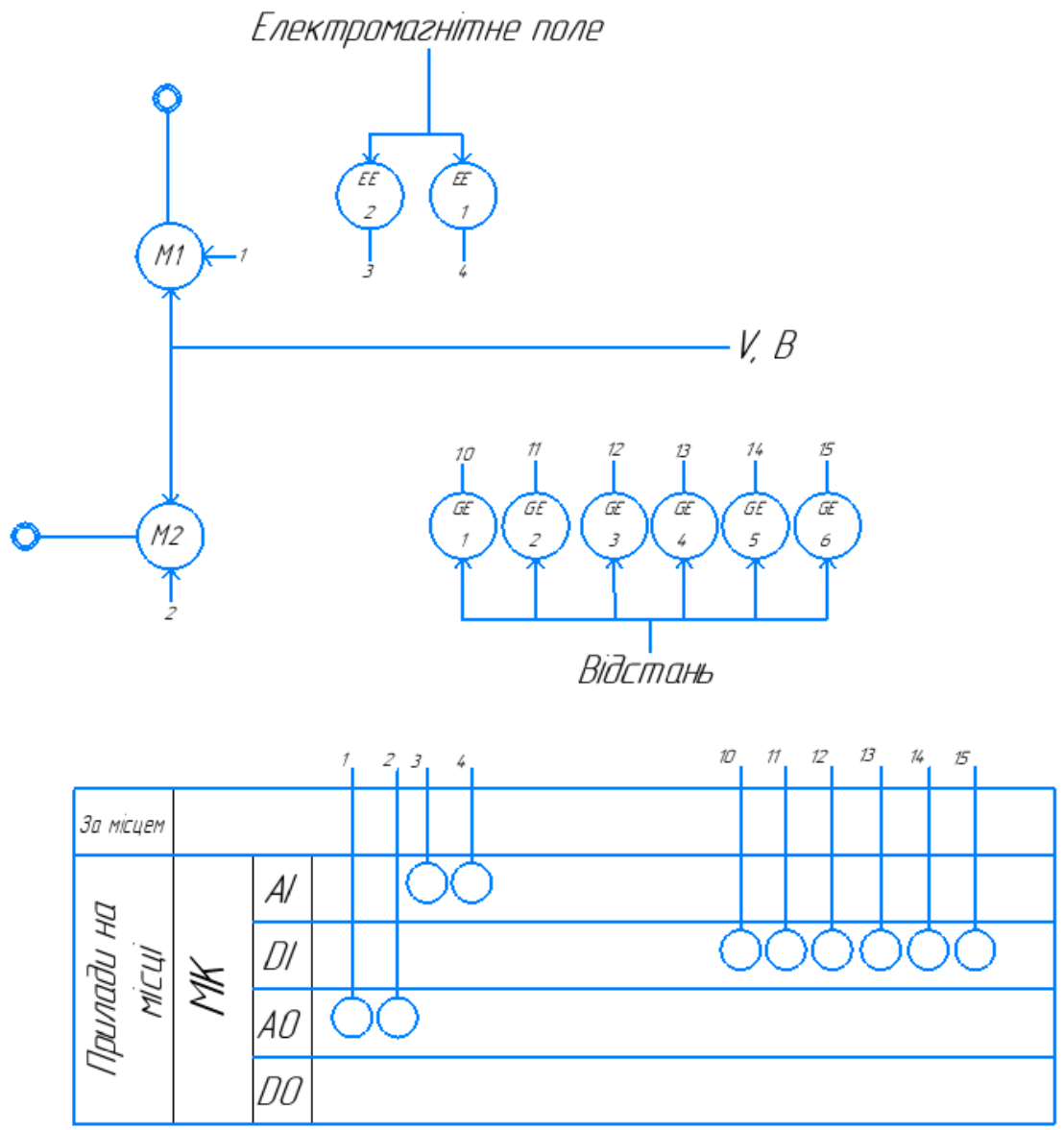


Рисунок 2.7 – Контур керування траєкторією руху робота

Управління траєкторією руху робота забезпечує його переміщення у напрямках "вперед", "вправо" і "вліво", а також гарантує уникнення перешкод на шляху руху.

Система містить:

1. електрокабель наведення, розміщений під підлогою уздовж необхідної траєкторії руху;

2. два датчики електромагнітного поля, встановлені на днище робота;
3. два тягових приводів;
4. шість датчиків відстані;
5. МК.

Якщо робот відхиляється від заданого маршруту по кабелю, зміна положення робота впливає на електричну ємність датчиків електромагнітного поля (ЕЕ). У результаті цього контролер надсилає сигнали приводам для коригування траєкторії, доки сигнали з датчиків не досягнуть необхідного значення, відповідного рухові робота вздовж електричного кабелю.

У випадку, якщо датчики відстані сигналізують про наявність перешкоди на небезпечній відстані, робот вживає заходів для уникнення перешкоди. Якщо можливо, робот виправляє траєкторію так, щоб уникнути перешкоди. У випадку неможливості уникнення робот зупиняється та очікує, поки перешкода буде видалена.

При виконанні повороту наліво, правий двигун працює у напрямку переднього ходу, а лівий - у напрямку заднього ходу; при русі направо - лівий двигун працює у напрямку переднього ходу, а правий - у напрямку заднього ходу.

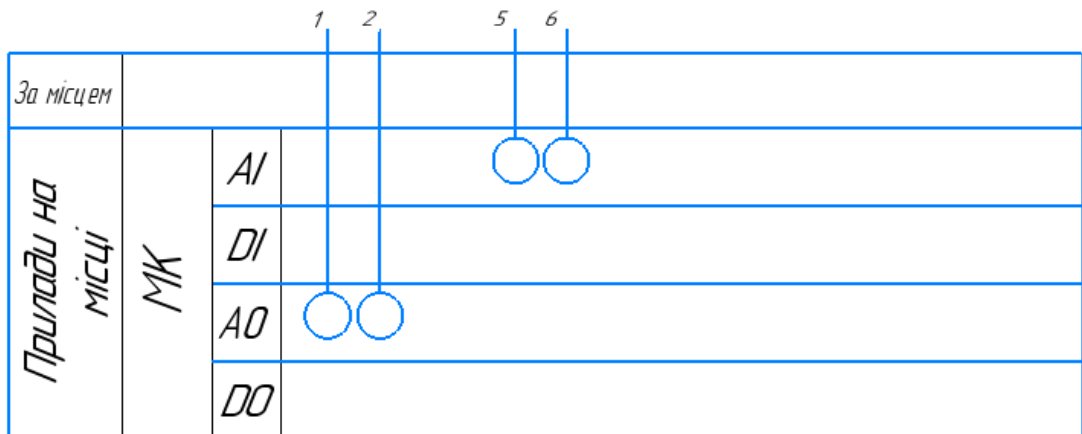
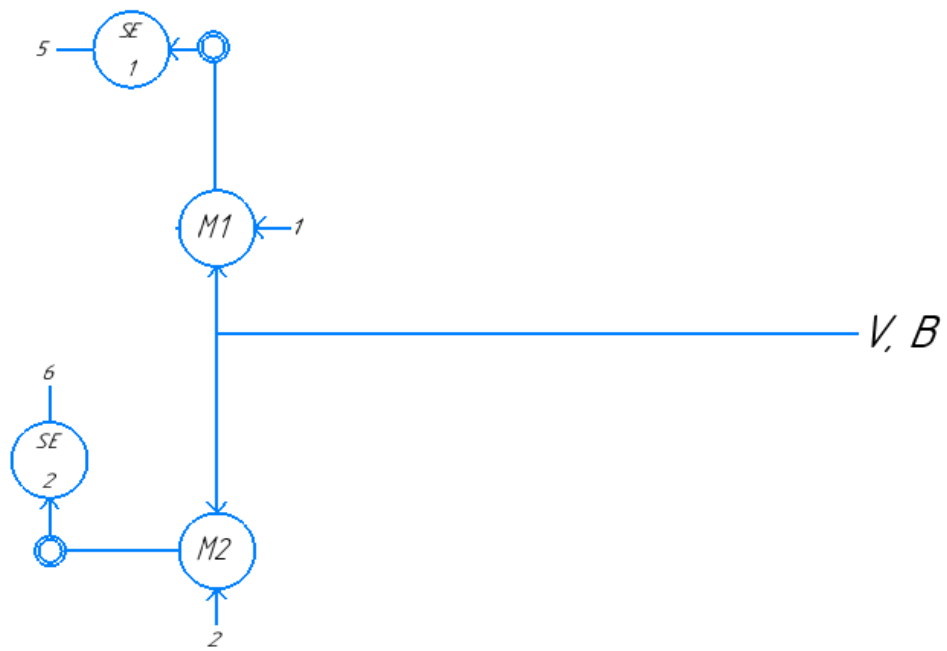


Рисунок 2.8 – Контур керування швидкістю робокару

Система керування швидкістю робокару керує швидкістю робокару.

Система містить:

1. два тяглових двигуна;
2. два давачі швидкості;
3. МК.

Давач швидкості знімає показання швидкості та передає на МК, МК корегує керуючий сигнал на привод так щоб швидкість дорівнювала швидкості заданої.

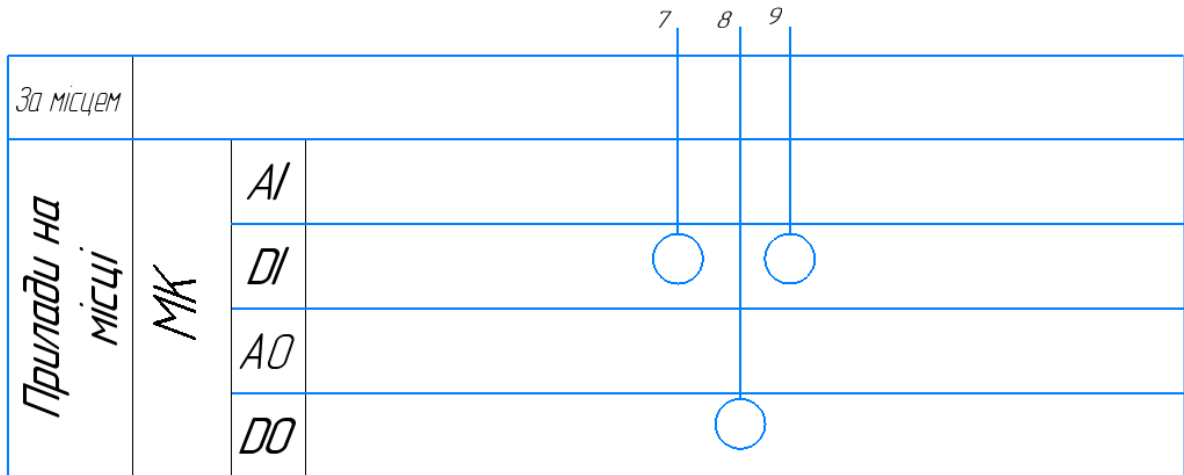
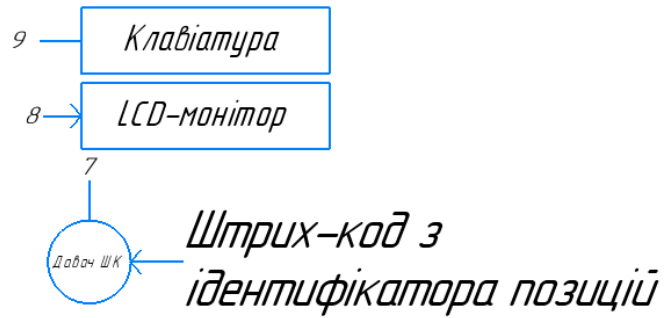


Рисунок 2.9 – Контур позиціонування робокару

Система позиціонування складається із:

1. ідентифікаторів позицій зупинки або повороту робокару;
2. клавіатури;
3. LCD-монітора;
4. мікроконтролера;
5. давача для зчитування коду позиції.

Рух робокара забезпечується його приводом. Ідентифікатори в формі пластин, на яких відображено штрих-код, розташовані біля потенційних точок зупинки чи повороту робокара. Коди для необхідних позицій зупинки вводяться за допомогою консолі. Коли датчик зчитує відповідний штрих-код, він висилає сигнал мікроконтролеру (МК), який, у свою чергу, активує привід. Робокар здійснює поворот або зупиняється, залишаючись у даній позиції до моменту введення коду для нової позиції.

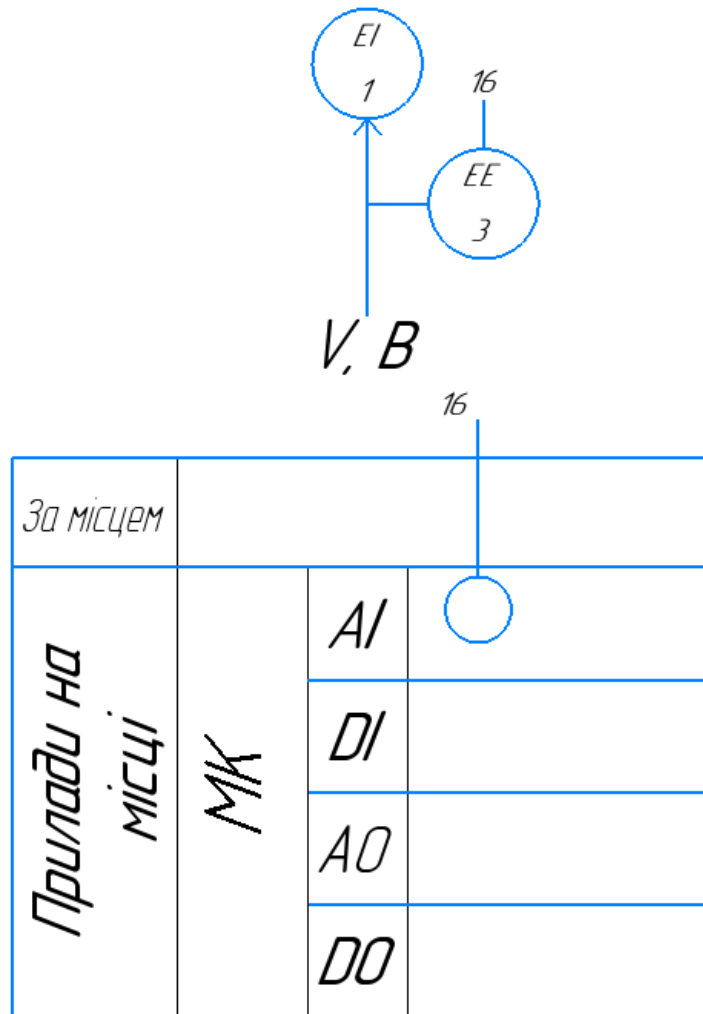


Рисунок 2.10 – Контур акумулятора

Система моніторингу заряду акумулятора включає в себе індикатор рівня заряду акумулятора, розташований так, щоб його можна було легко відслідковувати, а також вольтметр, який передає показання на мікроконтролер.

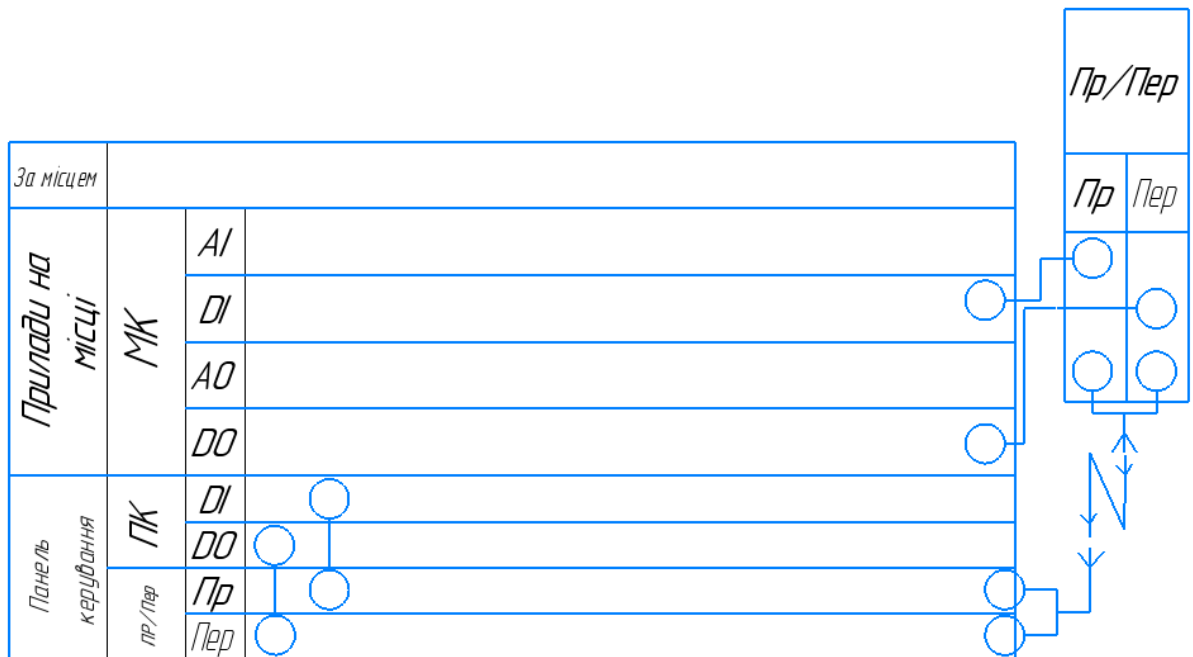


Рисунок 2.11 – Контур зв'язку із пунктом керування

Система зв'язку із пунктом керування складається із двох передавачів-приймачів, які забезпечують зв'язок робочара із пунктом керування.

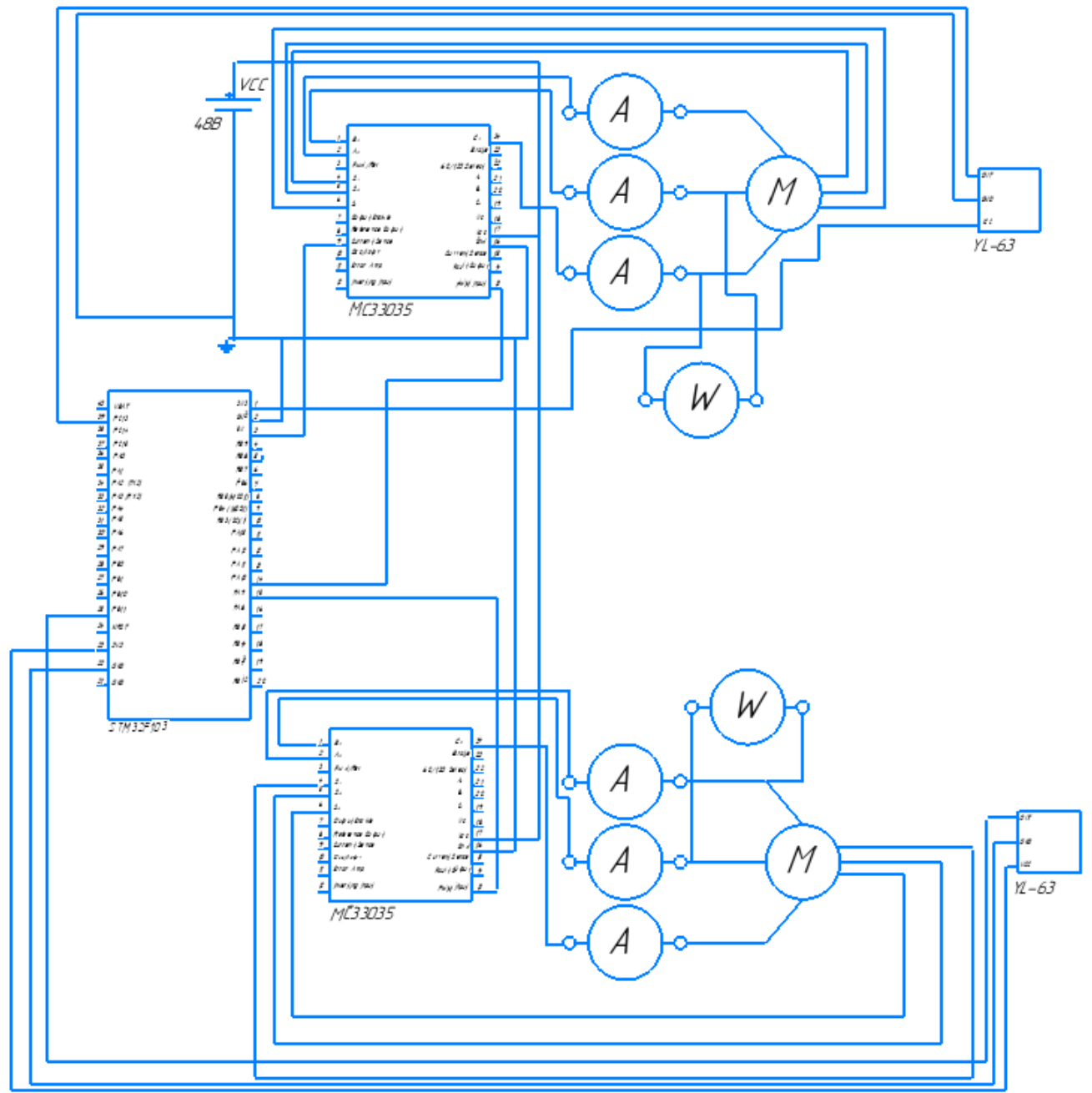


Рисунок 2.12 – Схема принципова електроприводу мобільного робота

Відповідно до поставлених завдань досліджень, модель електроприводу робота будується на основі цієї структурної схеми. Оскільки завдання моделювання електроприводу робота спрямовані на аналіз динаміки його механічних параметрів, то принципи побудови моделі для цих досліджень відрізняються від відомих моделей, які розглядають особливості конструкції двигуна BLDC або режими комутації обмоток.



## 2.2 Постановка задачі до дослідження

Ефективне використання електроенергії шляхом побудови ефективного алгоритму роботи електроприводу та оптимізації його – це одне з найважливіших завдань, які стоять перед інженерами та проектувальниками сучасних технічних систем. Зокрема, це завдання є актуальним для мобільних роботів, де електропривід є ключовим елементом, що забезпечує їх рух.

Технологічне завдання для робокару формулюється[10] як здійснення рухів платформи по заданій траєкторії у певній системі координат із стабільними параметрами рух та заданими прискореннями і гальмуваннями.

Організація руху мобільного засобу визначається ефективним забезпеченням необхідного тягового моменту, враховуючи такі вимоги: [11]:

1. Забезпечення тягового зусилля транспортного засобу в широкому діапазоні змін швидкості від мінімальних до максимальних значень.
2. Забезпечення високого ККД в області змін тягового зусилля та швидкості переміщення.
3. Забезпечення високого ККД режиму гальмування.
4. Мінімізація масо-габаритних показників.
5. Забезпечення високої питомої потужності.

Сенс оптимізації енергоспоживання при русі робокара в тому, щоб найефективніше налаштувати динаміку роботи робокара в різних режимах роботи (при цьому особливо звертати увагу на режим розгону і гальмування).

Одним із ключових аспектів оптимізації електроприводу є розробка ефективного алгоритму роботи. У результаті, створення ефективного алгоритму роботи електроприводу та його оптимізація дозволить не тільки зменшити витрати на електроенергію, а й підвищити продуктивність та надійність електроприводу мобільного роботу (робокару).

Для досягнення максимальної ефективності використання електроенергії необхідно:

- провести дослідження режимів електроприводу;
- оптимізувати алгоритм управління ним.

Використання математичних моделей та комп'ютерного моделювання може суттєво полегшити це завдання, дозволяючи проводити експерименти та оцінювати результати на ранніх стадіях проектування. Моделювання дозволяє визначити оптимальні параметри електроприводу, а також розробити оптимальні алгоритми керування електроприводом робота.

Режим розгону та гальмування є важливими аспектами роботи робота, тому що їх правильне налаштування дозволяє досягти оптимальної швидкості та точності переміщення, а також підвищити безпеку під час руху. Однак для досягнення максимальної ефективності необхідно враховувати безліч факторів, таких як маса робота, стан дорожнього покриття, наявність перешкод на шляху руху та багато інших.

Крім того, важливим аспектом оптимізації є розробка вибір ефективних алгоритмів керування рухом робота, які дозволять забезпечити максимальну точність та швидкість руху. Для цього необхідно враховувати особливості конструкції робота, тип електроприводу, що використовується, та інші фактори.

По заданій траєкторії потрібно сформулювати тахограму руху за прискоренням та при цьому дивитися за споживаним струмом.

Отже, якщо підсумувати все написане вище та описати все коротко та без зайвих слів постановка задач на дослідження така:

1. Розробити математичні моделі руху мобільного робота та безколекторного двигуна постійного струму (BLDC).
2. На основі математичних моделей, скласти схему моделі для дослідження у середовищі MATLAB/Simulink.

3. За допомогою моделі за траєкторією сформувати тахограму руху за прискоренням без перерегулювань при цьому слідкуючи за споживаним струмом.
4. Відпрацювати різні режими роботи електропривода доти доки споживання струму не буде мінімально можливим.
5. Представити результати моделювання в магістерській роботі.

## РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ

Створення будь-якої автоматичної системи управління розпочинається з дослідження об'єкта управління, включаючи принцип його функціонування, режими роботи, можливі методи управління, а також його статичні та динамічні характеристики. Головною метою вивчення об'єкта є встановлення його математичної моделі, що представляє собою формалізований опис його роботи. Це завдання зазвичай вирішується на етапі передпроектних досліджень і розробок.

Весь процес формування математичної моделі можна розділити на наступні ключові етапи:

1. Виділення об'єкта моделювання з його оточення.
2. Вибір типу моделі (статична чи динамічна) і методу розробки (аналітичний чи експериментальний).
3. Створення моделі в загальному форматі.
4. Визначення параметрів моделі.
5. Перевірка адекватності моделі порівняно з реальним об'єктом.

Математична модель об'єкта керування включає математичний опис взаємозв'язків між основними змінними (регульовані вихідні змінні, керовані впливи та обурення) і враховує обмеження, які на них накладаються. При розробці математичних моделей важливо прагнути до отримання максимально простих, типових форм моделей, забезпечуючи при цьому необхідну точність у їхньому описі. Проте вимоги до простоти та точності моделі можуть бути суперечливими. У процесі розроблення моделей доводиться знаходити компромісні рішення між точністю та повнотою моделі з одного боку та її простотою і вартістю розроблення з іншого.

Математичні моделі можна розділити на два види: статичні та динамічні.

Статичні моделі описують усталені режими роботи, коли сигнали і регульовані величини залишаються постійними, незмінними. Для опису статички зазвичай використовують алгебраїчні рівняння.

Динамічні моделі описують перехідні режими роботи. Вони можуть представлятися в різних видах:

1. Системи диференціальних або операторних рівнянь першого порядку;
2. Одне диференціальне або операторне рівняння більш високого порядку;
3. Передавальні функції;
4. Структурні схеми;
5. Матричний опис у просторі станів тощо.

З динамічних моделей легко отримати статичні. Достатньо використати похідні (або оператор Лапласа) які дорівнюють нулю.

Можна виділити два підходи до визначення математичної моделі: аналітичний та експериментальний.

Аналітичний метод ґрунтується на проведенні аналізу фізичних процесів, що відбуваються в об'єкті. Використовується в ситуаціях, коли фізичні процеси в об'єкті є добре вивченими, а закони, що їх описують, відомі, і коли ці процеси можуть бути кількісно описані.

Експериментальний підхід використовується у випадках, коли немає наявної інформації або коли аналітично складно отримати модель. У цьому випадку основна інформація про об'єкт або процес дослідження здобувається шляхом прямих вимірювань на ньому. Крім того, експериментальний підхід застосовується для перевірки адекватності аналітично отриманої моделі.

В цій роботі для побудови математичної моделі мобільного робота (робокара) буде використовуватися аналітичний метод.

Метод аналізу базується на використанні фізичних законів, які регулюють хід процесів у досліджуваному об'єкті. Для простих об'єктів, де протікає лише один елементарний процес, математичною моделлю може бути запис рівняння, що точно описує цей процес.

Для складних об'єктів, в яких відбуваються різноманітні фізичні процеси, визначення математичної моделі може бути реалізовано в наступній послідовності:

1. Виділяється об'єкт із оточуючого середовища, проводиться детальне вивчення його фізичної суті та процесів, що в ньому відбуваються.
2. Визначається призначення об'єкта, а також формулюються цілі та завдання для управління.
3. Опреділяються змінні (координати), що визначають якість роботи (вихідні, регульовані змінні).
4. Встановлюються змінні (координати), зміна яких найбільше впливає на якість роботи об'єкта (можливі керовані впливи та обурення).
5. Виявляються та формулюються залежності між вихідними координатами та критеріями якості, а також між вихідними координатами та можливими керованими впливами і збуреннями, проводиться математичний опис роботи об'єкта. При цьому складний об'єкт можна зручно поділити на елементарні складові частини з описом зв'язків між ними. Декомпозиція об'єкта може відбуватися як за структурою пристроїв та компонентів, що входять у склад об'єкта, так і за фізичною сутністю процесів, що відбуваються в ньому. Аналізуючи процеси в окремих елементах, визначають математичні моделі їхніх структур, які представляють собою відображення фізичних законів, що регулюють ці процеси. При цьому необхідно враховувати взаємозв'язки між елементами структури та гарантувати їхню взаємодію відповідно до фізичних характеристик сигналів та їхніх розмірностей.
6. Визначають номенклатуру та параметри управлінських впливів, обмеження, що застосовуються до них, а також фактори, що впливають на стан об'єкта.
7. За отриманою структурою та математичними моделями елементів, використовуючи метод виключення проміжних змінних, визначають залежності між вихідними змінними, сигналами управління та факторами, що впливають на систему. Ці залежності є математичною моделлю об'єкта.
8. Проводять розрахунок числових значень параметрів моделі.

9. Проводять оцінку точності моделі та її адекватності до реального об'єкта.

### 3.1 Математична модель руху робота

Кінематична модель мобільного робота (робота) (рис 3.1) і кінематика його руху (рис 3.2) описана в розділі 2.1 тому повторювати їх в цьому розділі я не буду.

Рух робота можна розділити на дві складові: поступальний, спрямований по поздовжній осі симетрії, і обертальний навколо центру. При збігу напрямку поздовжньої осі з напрямком траси поступальний рух не впливатиме на відхилення датчика. Відхилення ж датчика визначатиметься кутовою швидкістю розвороту робота і відмінністю напрямку руху робота від напрямку траси.

Для математичної моделі руху робота можна записати такі рівняння:

$$1. V_x = (r * \dot{\varphi}_1 + a * \dot{\Theta}) \sin \Theta$$

$$2. V_y = -(r * \dot{\varphi}_2 - a * \dot{\Theta}) \cos \Theta$$

$$3. \dot{\Theta} = \frac{r * \dot{\varphi}_2 - r * \dot{\varphi}_1}{2a}$$

$$4. V_{\text{Ц}} = \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} * r$$

$$5. S_p = V_{\text{Ц}} * t$$

Де:

- $\Theta$  – кутова швидкість повороту корпусу мобільного робота (рад/с)
- $V_x$  – координата центра мобільного робота по x
- $V_y$  – координата центра мобільного робота по y
- $\varphi_1, \varphi_2$  – кутова швидкість коліс (рад/с)
- $a$  – відстань від центра мобільного робота до одного з ведучих коліс (290 см)
- $r$  – радіус колеса (5 см)

- $V_{ц}$  – лінійна швидкість руху центра мобільного робота (м/с)
- $S_p$  – відстань, яку робот пройшов (м)
- $t$  – час (с)

### 3.2 Математична модель BLDC

Безколекторний електродвигун постійного струму (BLDC) складається з трьох обмоток на статорі та ротора з нерухомими магнітами. Математична модель BLDC може бути розроблена аналогічно трифазній синхронній машині. Завдяки встановленому на роторі постійному магніту, динамічні характеристики трошки відрізняються. Вплив потоку з ротора залежить від матеріалу магніту, що призводить до характерного насичення магнітного потоку. Як і для звичайних трифазних двигунів, конструкція BLDC живиться від джерела трифазної напруги, яке може бути не лише синусоїдальним. Форма хвилі, така як прямокутна або інша, може використовуватися, за умови, що пікова напруга не перевищує максимальну межу напруги двигуна. Подібно до цього, модель обмотки якоря для двигуна BLDC виражається наступним чином:

$$\begin{bmatrix} V_a = Ri_a + L \frac{di_a}{dt} + e_a \\ V_b = Ri_b + L \frac{di_b}{dt} + e_b \\ V_c = Ri_c + L \frac{di_c}{dt} + e_c \end{bmatrix}$$

Де:

1.  $L$  – самоіндукція якоря (Гн);
2.  $R$  – опір якоря (Ом);
3.  $V_a, V_b, V_c$  – фазна напруга (В);
4.  $i_a, i_b, i_c$  – вхідний струм двигуна (А);
5.  $e_a, e_b, e_c$  – зворотна ЕРС двигуна (В).



У 3-фазному двигуні BLDC зворотна ЕРС пов'язана з функцією положення ротора, а зворотна ЕРС кожної фази має різницю фазових кутів  $120^\circ$ , тому рівняння кожної фази повинно бути наступним:

$$\begin{bmatrix} e_a = K_w f(\theta_\varepsilon) \omega \\ e_b = K_w f(\theta_\varepsilon - 2\pi/3) \omega \\ e_c = K_w f(\theta_\varepsilon + 2\pi/3) \omega \end{bmatrix}$$

Де:

1.  $K_w$  – постійна зворотної ЕРС однієї фази (В/рад.с<sup>-1</sup>);
2.  $\theta_\varepsilon$  – електричний кут ротора (° ел.);
3.  $\omega$  – частота обертання ротора (рад.с<sup>-1</sup>).

Електричний кут ротора дорівнює механічному куту ротора, помноженому на кількість пар полюсів  $p$ :

$$\theta_\varepsilon = \frac{p}{2} \theta_m$$

Де:

$\theta_m$  – механічний кут ротора (рад)

Загальний вихідний крутний момент може бути представлений як сума крутних моментів кожної фази. Наступне рівняння представляє загальний вихідний крутний момент:

$$T_e = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega}$$

Де:

$T_e$  – загальний крутний момент на виході (Нм).

Рівняння механічної частини виглядає наступним чином:

$$T_e - T_l = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega$$

Де:

1.  $T_1$  – момент навантаження (Нм);
2.  $J$  – інерція ротора і сполученого вала ( $\text{кг}\cdot\text{м}^2$ );
3.  $B$  – стала тертя ( $\text{Нмс}\cdot\text{рад}^{-1}$ ).

Отже, під час практики було розроблено дві математичні моделі, які передбачається використовувати під час моделювання в рамках магістерського проекту.

## РОЗДІЛ 4 МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА МОБІЛЬНОГО РОБОТА

### 4.1 Обґрунтування підстав для моделювання

Електропривод мобільного робота являє собою складний об'єкт через кілька факторів, які взаємодіють між собою, створюючи технічні та управлінські виклики.

Різноманіття двигунів і систем передачі: Залежно від конкретного мобільного робота можуть використовуватися різні типи електричних двигунів, такі як DC-мотори, крокові двигуни або безколекторні двигуни. Кожен із них має свої унікальні характеристики та вимоги до керування.

Різноманітність сенсорів і зворотного зв'язку: Для ефективного управління мобільним роботом необхідні різні сенсори, як-от датчики відстані, гіроскопи, акселерометри та компаси. Інтеграція та обробка даних від цих сенсорів для ухвалення рішень і управління рухом становлять технічний виклик.

Складність управління: Управління мобільним роботом вимагає розроблення складних алгоритмів і стратегій для забезпечення точності, стабільності та енергоефективності. Крім того, управління має враховувати динамічне оточення і забезпечувати адаптивність до мінливих умов.

Енергоспоживання і джерело живлення: Вибір і оптимізація джерела живлення для забезпечення ефективної роботи мобільного робота є складними завданнями. Робота з енергоощадними технологіями, управління зарядом акумуляторів і управління енергоспоживанням - все це вимагає уважного проєктування.

Непередбачуваність довкілля: Мобільні роботи часто стикаються з різними умовами довкілля, такими як нерівності поверхні, перешкоди, зміни освітленості та навіть зміни температури. Алгоритми управління мають бути спроектовані з урахуванням цих факторів.

Дослідження і розробка ефективних систем управління для електроприводу мобільних роботів вимагає комплексного підходу, що об'єднує знання з області мехатроніки, електроніки, програмування і робототехніки.

Нормальний алгоритм управління електроприводом мобільного робота є критичним елементом для забезпечення ефективної та безпечної роботи. Ось кілька аспектів, чому такий алгоритм необхідний:

- Точність і стабільність руху: Електроприводи мобільних роботів відповідають за рух та маневрування в різних умовах. Нормальний алгоритм управління забезпечує точний і стабільний рух, що критично важливо, особливо в завданнях, пов'язаних з навігацією в навколишньому середовищі.
- Адаптивність до змінних умов: Мобільні роботи можуть зіткнутися з різними перешкодами, змінювати швидкість, піддаватися впливу зовнішніх факторів і т.д. Нормальний алгоритм управління повинен бути здатний адаптуватися до змінних умов і забезпечувати безпечний рух робота.
- Енергоефективність: Електроприводи мобільних роботів часто працюють від обмеженого джерела живлення, такого як акумулятор. Ефективний алгоритм управління може оптимізувати енергоспоживання, що збільшить тривалість роботи і знизить потребу у частих зарядках.
- Здатність до автономної роботи: Для багатьох мобільних роботів важлива можливість автономного функціонування без постійного втручання оператора. Нормальний алгоритм управління дозволяє роботу самостійно приймати рішення на основі даних від сенсорів і виконувати завдання в різних сценаріях.
- Дотримання безпеки: Електроприводи мобільних роботів часто взаємодіють з оточуючим простором, включаючи людей та інші об'єкти. Нормальний алгоритм управління повинен передбачати заходи безпеки, такі як уникання

зіткнень, запобігання потраплянню в небезпечні зони та дотримання стандартів безпеки.

Отже, нормальний алгоритм управління електроприводом мобільного робота є основою для його ефективної та надійної роботи в різних умовах і сценаріях використання.

Параметри об'єкта дослідження будуть такі:

- Швидкість руху мобільного робота
- Кутова швидкість коліс
- Крутний момент мобільного робота
- Координати мобільного робота в просторі
- Час
- Відстань пройдена мобільним роботом
- Вживаний електроприводом мобільного робота струм

Для того щоб подивитися вплив параметрів на об'єкт потрібно зробити імітаційне моделювання в середовищі MATLAB/Simulink.

## 4.2 Синтез системи

За математичною моделлю руху робота (мобільного робота) (розділ 3.1) було складено схему в Simulink.

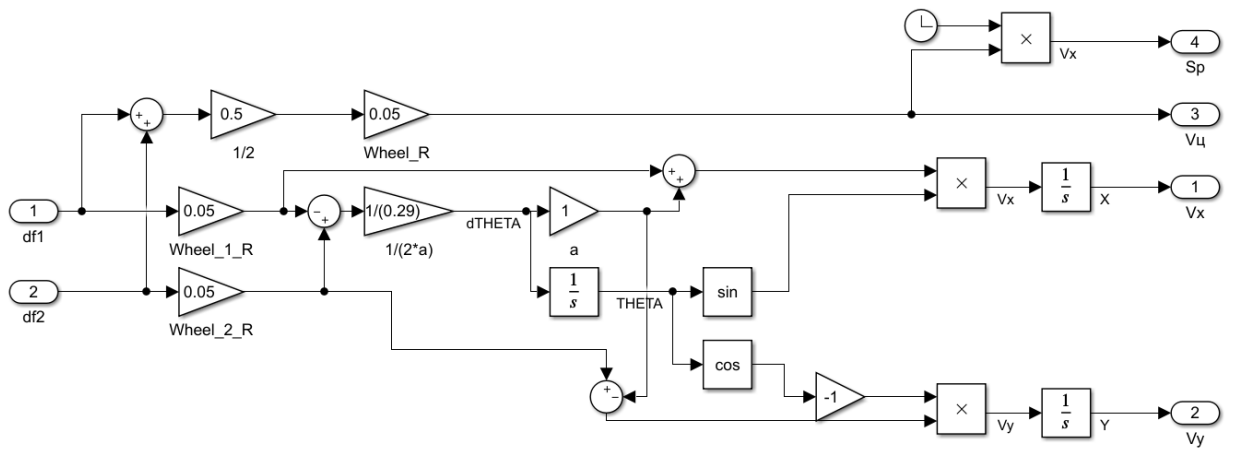


Рисунок 4.1 – Модель руху робота в Simulink

Була складена в Simulink схема електропривода мобільного робота:

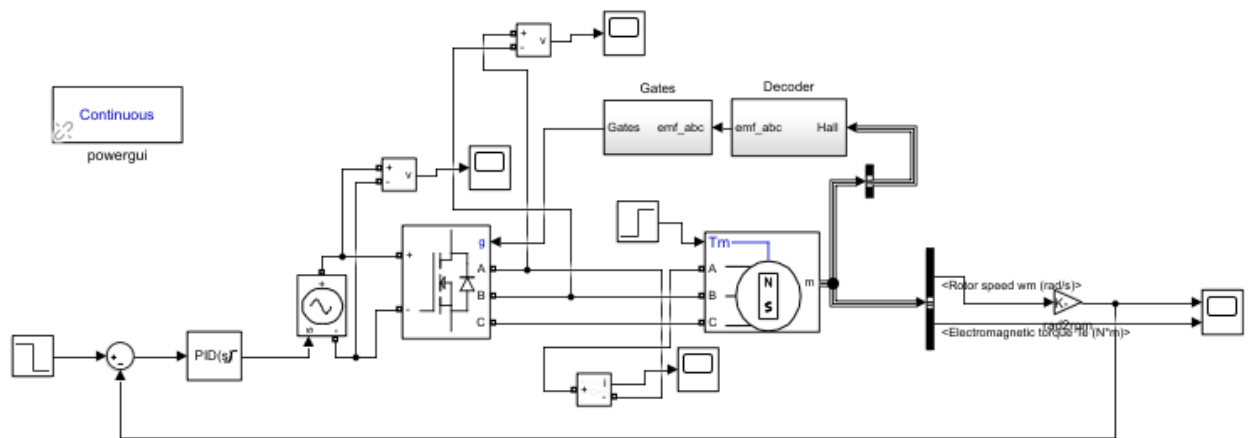


Рисунок 4.2 – Модель електропривода мобільного робота в Simulink

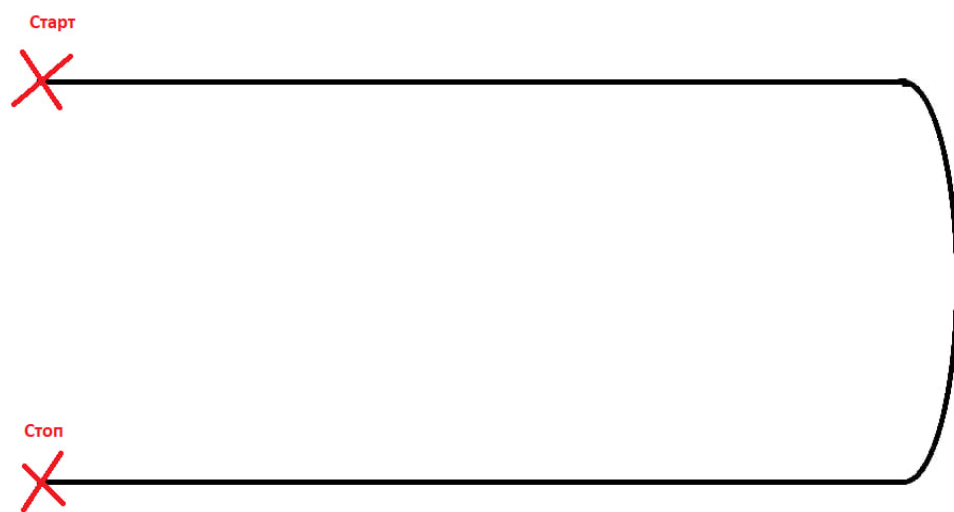


Рисунок 4.3 – Траєкторія руху робота

Вище можна бачити траєкторію по якій буде рухатися мобільний робот. Він повинен почати рухатися по прямій, через деякий час повернути в праву сторону та рухатися по трохи напівколоподібній траєкторії та повернути наліво де знову рухатися по прямій доки не доїде до тієї точки яка буде напроти початкової.

Якщо доповнити схему руху робота електроприводом то буде готова модель для дослідження електропривода мобільного робота.

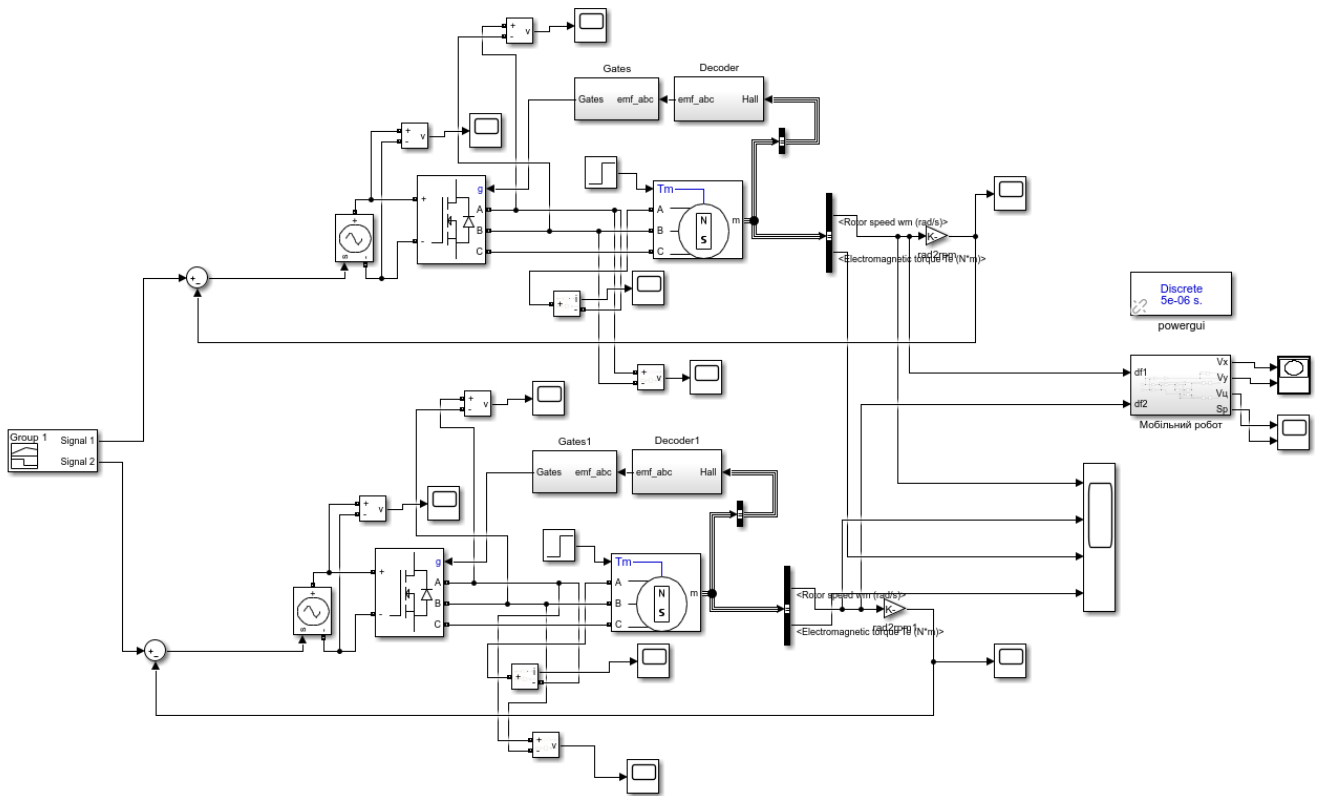


Рисунок 4.4 – Модель для дослідження електропривода мобільного робота в Simulink

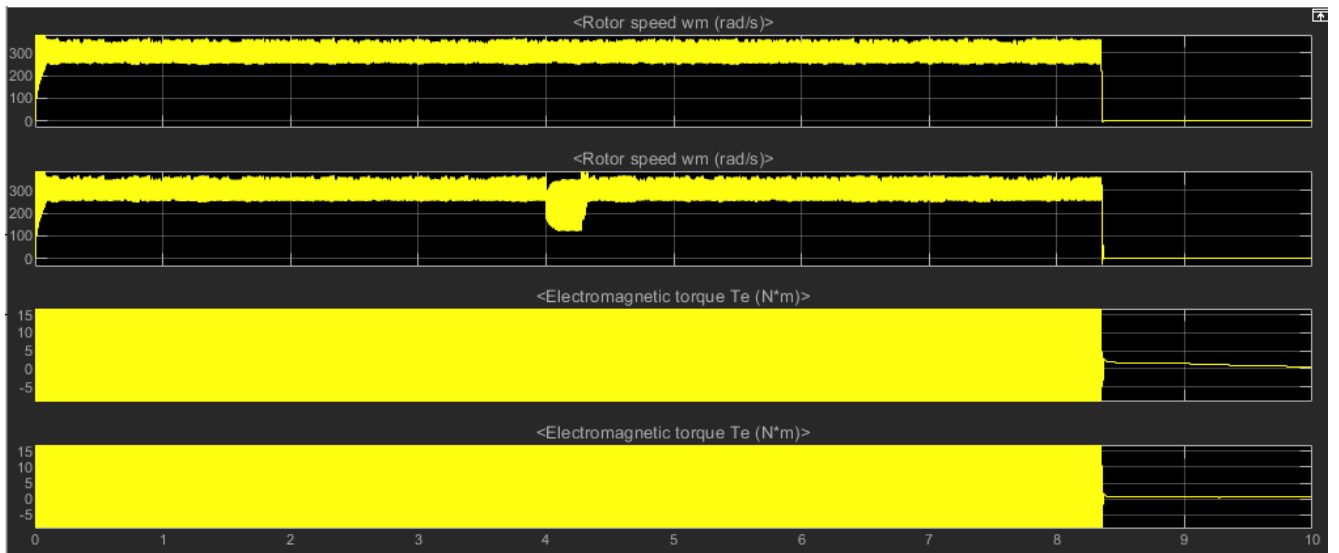


Рисунок 4.5 – Кутова швидкість (рад/с) та крутний момент (Нм) правого та лівого двигуна

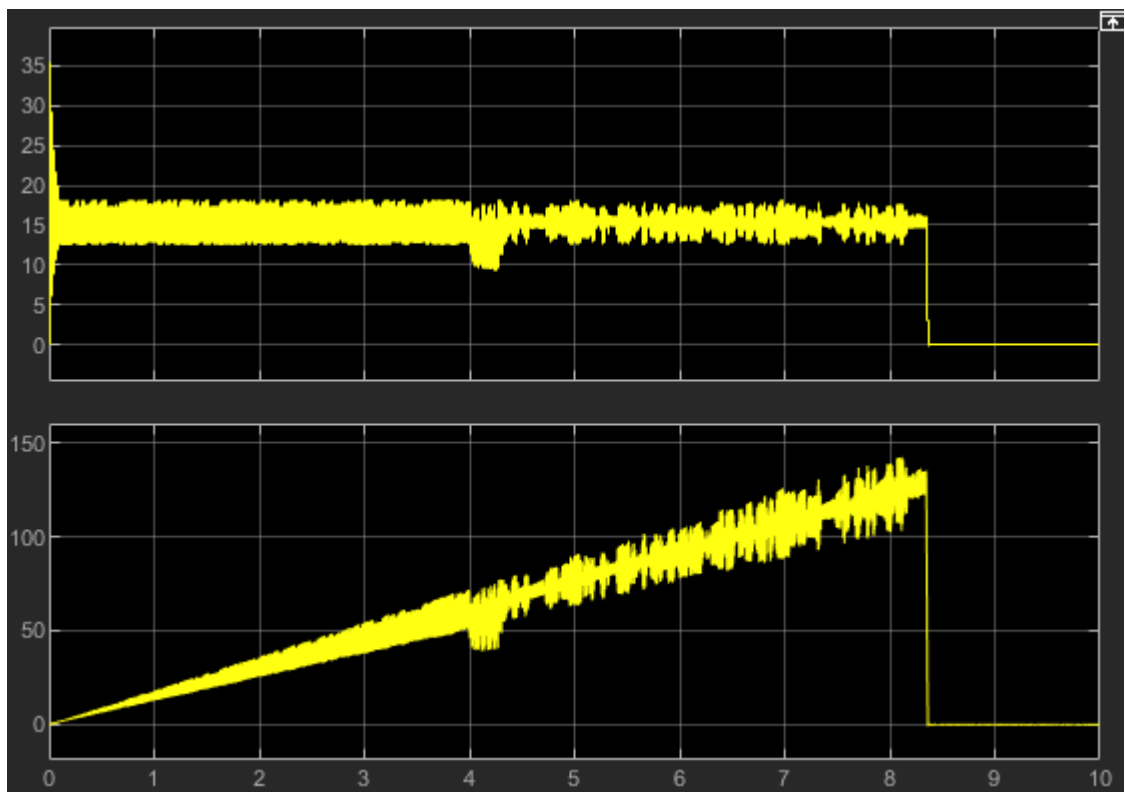


Рисунок 4.6 – Швидкість (м/с) та пройдена за 10 секунд відстань (м) мобільного робота



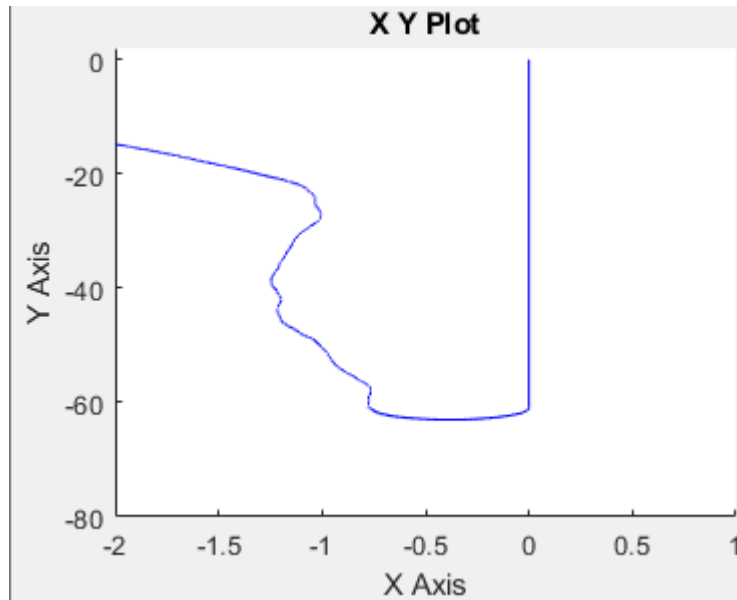


Рисунок 4.7 – Траекторія руху робота

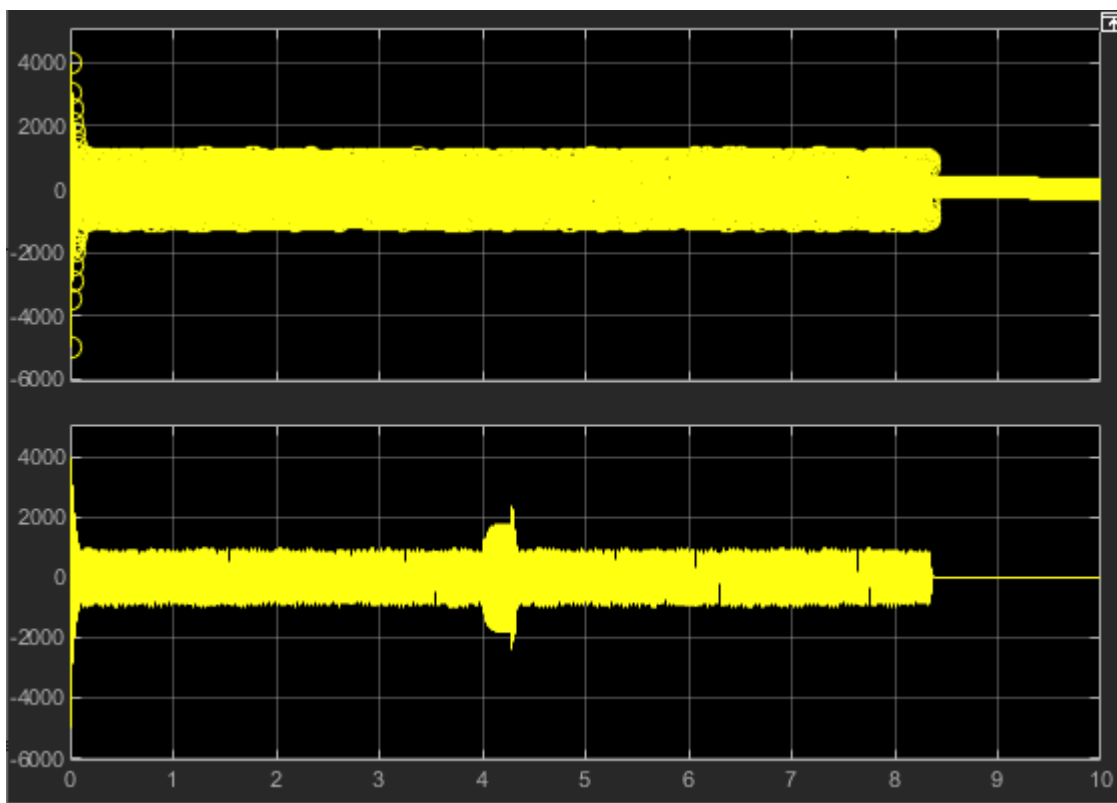


Рисунок 4.8 – Вживаний струм (А) правого та лівого електропривода

Як можна побачити – результати невтішні, неефективні та мене зовсім не влаштовують.

Для того щоб покращити роботу системи потрібно туди поставити регулятор та налаштувати його.

### 4.3 Налаштування регулятора

Регулятор потрібен в системі для:

- Зменшення коливань в системі.
- Більш плавного керування електроприводами мобільного робота.
- Більше плавне керування переміщенням та позиціонуванням мобільного робота.
- Із минулих пунктів впливає ще один, останній за номер але не за значенням – зменшення енергоспоживання електроенергії із акумуляторної батареї зі сторони електропривода.

Додано ПІД-регулятор до моделі (рис. 4.9).

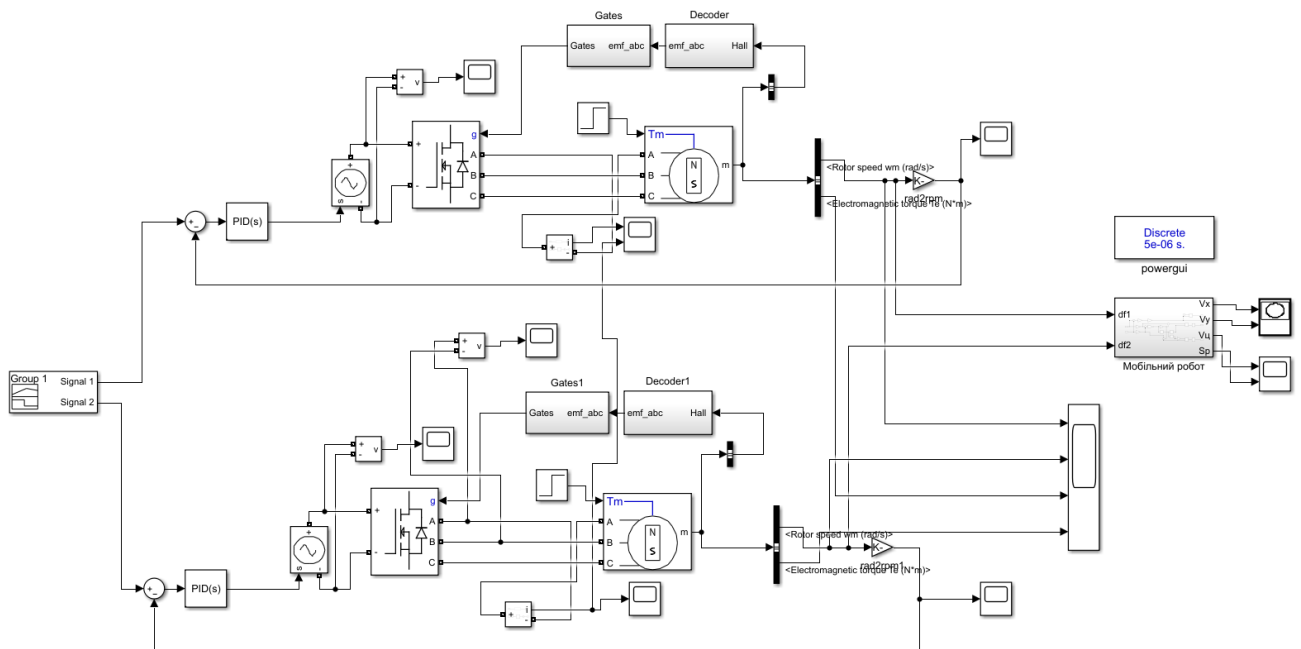


Рисунок 4.9 – Модель для дослідження електропривода мобільного робота в Simulink (із ПІД регулятором)

Регулятор із пропорційно-інтегрально-диференціальним впливом (ПІД) – це пристрій, який використовується в керуючих ланцюгах із зворотнім зв'язком. Застосовується в автоматичних системах управління для генерації керуючого сигналу з метою досягнення необхідної точності та покращення якості перехідного процесу.

Регулятор ПІД формує керуючий сигнал, який є сумою трьох компонентів:

1. Перший компонент пропорційний різниці між вхідним сигналом і сигналом зворотнього зв'язку (сигналом неузгодження).
2. Другий компонент є інтегралом сигналу неузгодження.
3. Третій – похідним від сигналу неузгодження.

ПІД-регулятор - один із найпоширеніших автоматичних регуляторів. Він настільки універсальний, що застосовується практично скрізь, де потрібне автоматичне керування.

Яормула ПІД регулятора та його складових:

- $u(t) = P(t) + I(t) + D(t)$
- $P(t) = K_p * e(t)$
- $I(t) = I(t - 1) + K_i * e(t)$
- $D(t) = K_d * \{e(t) - e(t - 1)\}$

Де:

- $u(t)$  - наша Функція;
- $P$  - пропорційна складова;
- $I$  - інтегральна складова;
- $D$  - диференціальна складова;
- $e(t)$  - поточна помилка;

- $K_p$  - пропорційний коефіцієнт;
- $K_i$  - інтегральний коефіцієнт;
- $K_d$  - диференціальний коефіцієнт;

Необхідно провести налаштування ПІД-регулятора.

Є багато методів налаштування але в цій роботі використано метод Зіглера-Нікольса. Для початку були підібрані значення коефіцієнту при якому система буде виведена на межу стійкості, та будуть наявні незгасаючі коливання.

Методом експериментального підбору отримаємо наступні значення  $P$ -коефіцієнту (Рис. 4.3), попередньо прибравши вплив інтегральної та диференційної складової.

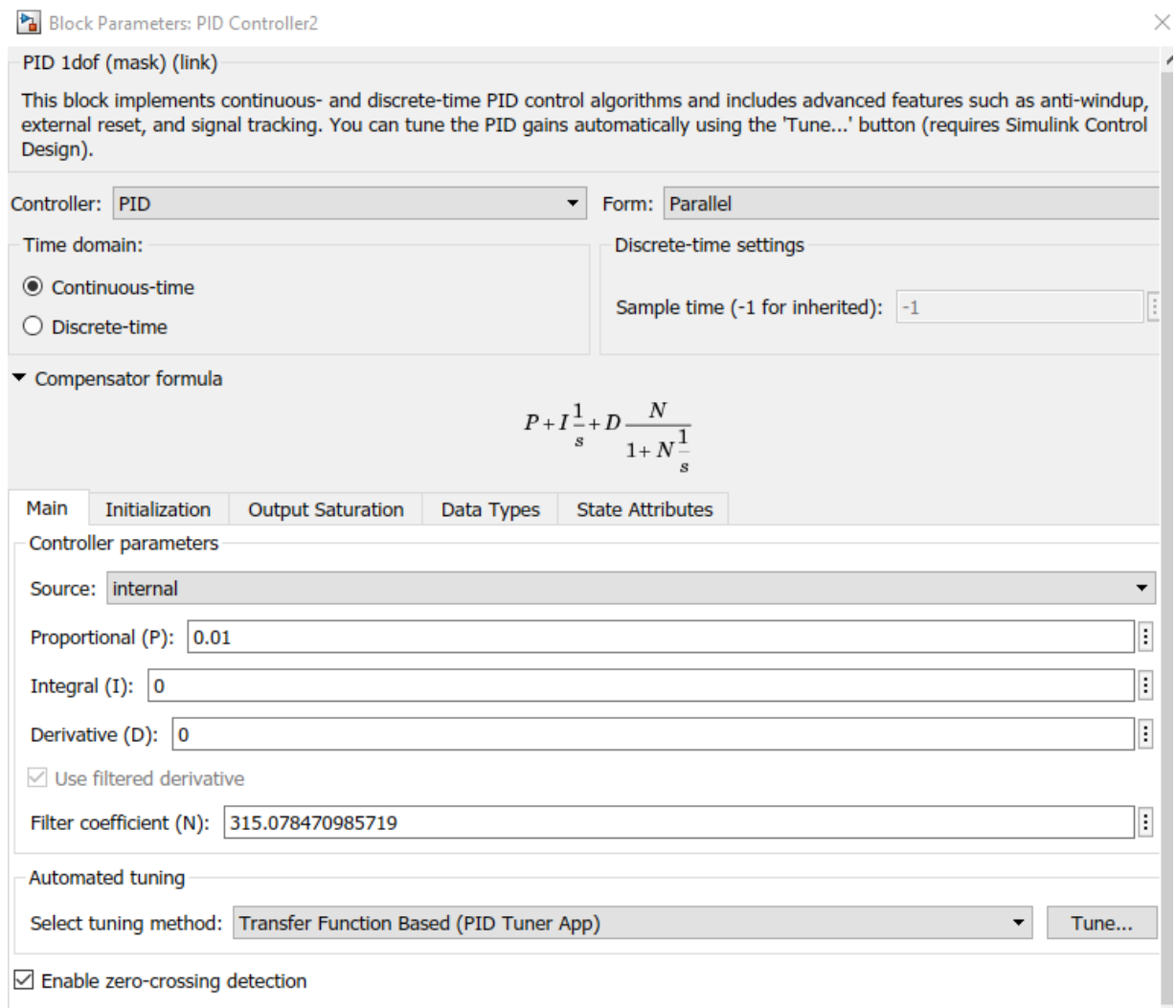


Рисунок 4.10 – Налаштування регулятора

Реакція системи зображена нижче:

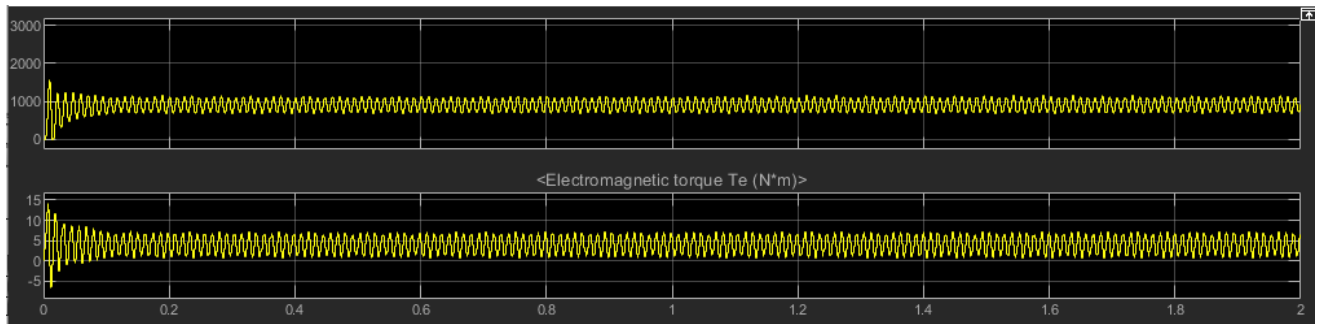


Рисунок 4.11 – Реакція системи

Підбравши П-коефіцієнт ( $K_u$ ) та розрахувавши період коливань ( $T_u$ ) який становить 0,011, розраховано значення для інших складових регулятора відносно наступних рівнянь:

Пропорційна складова:  $K_p = 0,6 * K_u = 0,006$

Інтегральна складова:  $K_i = 2 * K_p / T_u = 1,09$

Диференціальна складова:  $K_d * T_u / 8 = 0.00000825$

Блок ПД-регулятора із розрахованими коефіцієнтами зображено нижче:

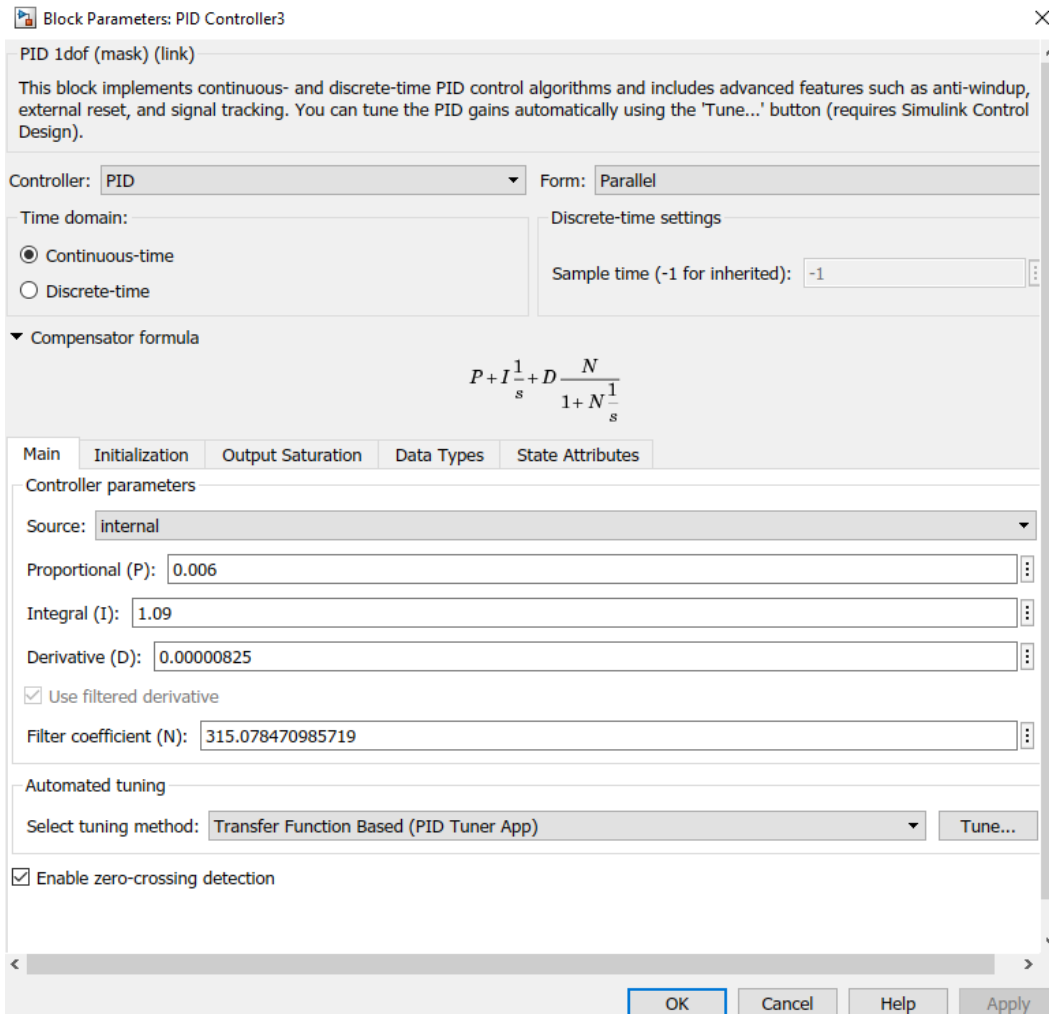


Рисунок 4.12 – Блок ПД-регулятора із розрахованими за методом Циглера-Нікольса коефіцієнтами

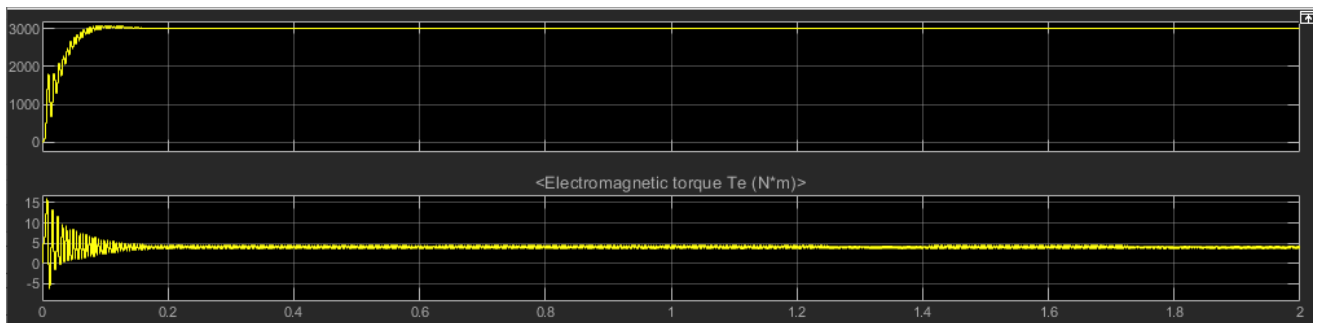


Рисунок 4.13– Графік реакції системи з ПД-регулятором

#### 4.4 Синтез системи керування із ПД-регулятором

Модель із ПД-регулятором зображна на рис. 4.9.

Встановлення ПД-регулятора повпливало на нашу систему наступним чином:

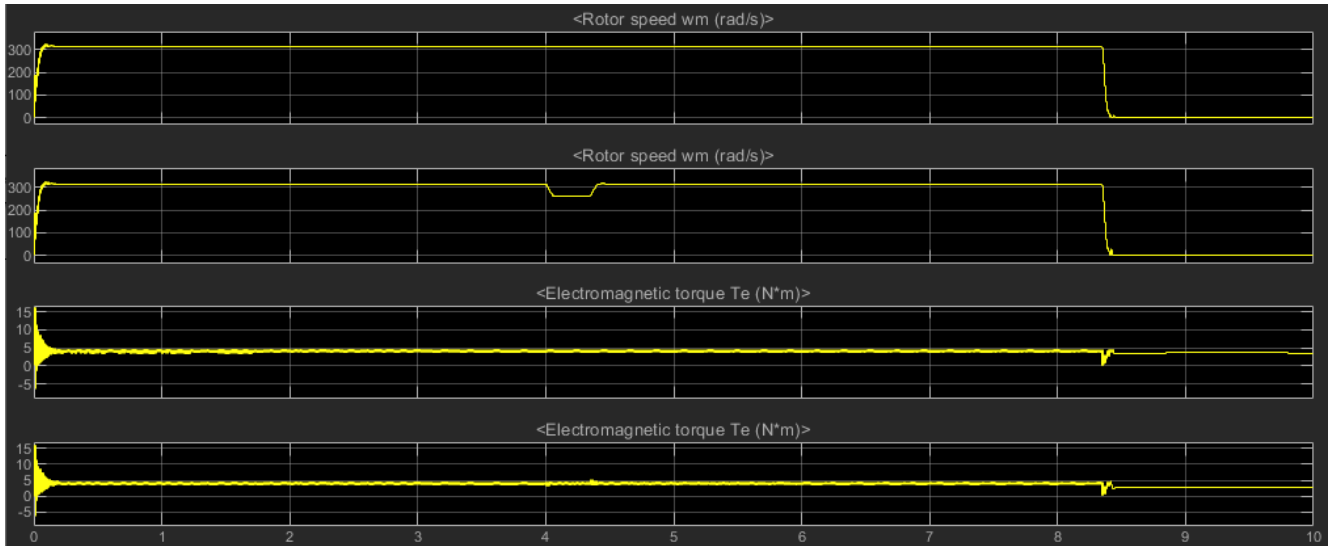


Рисунок 4.14 – Кутова швидкість (рад/с) та крутний момент (Нм) правого та лівого двигуна в системі із ПД-регулятором

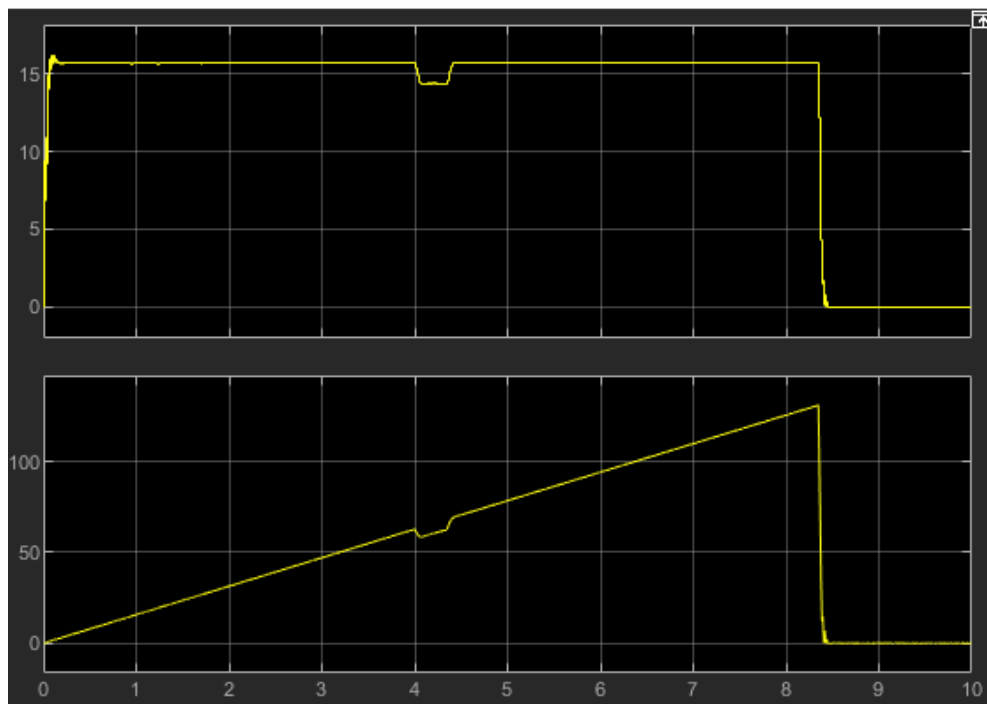


Рисунок 4.15 – Швидкість (м/с) та пройдена за 10 секунд відстань (м) мобільного робота в системі із ПД-регулятором

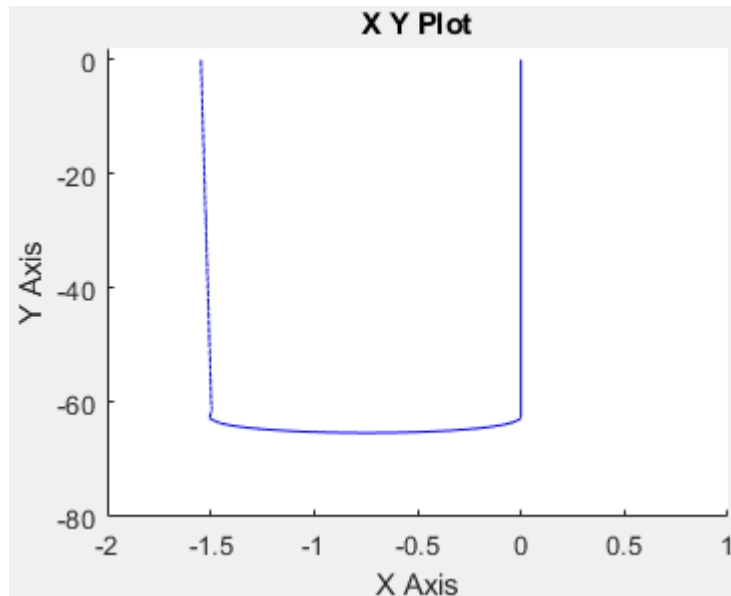


Рисунок 4.16 – Траекторія руху робота в системі із ПД-регулятором

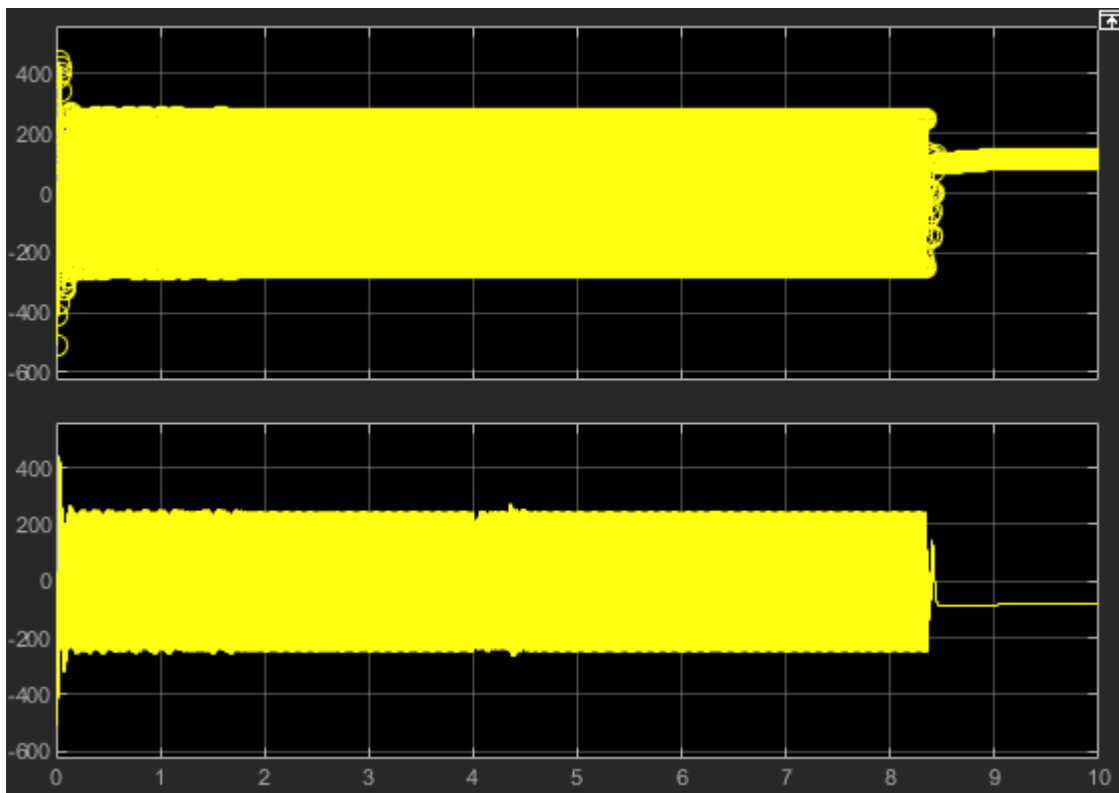


Рисунок 4.17 – Вживаний струм (А) правого та лівого електропривода в системі із ПД-регулятором

Отже, за допомогою встановки ПД-регулятора ми добилися поставлених цілей, а саме:

- Зменьнили колибання в системі



- Більш плавно керуємо електроприводами мобільного робота.
- Більше плавно керуємо переміщенням та позиціонуванням мобільного робота.
- І саме головне – зменшили енергоспоживання електроенергії із акумуляторної батареї зі сторони електроприводів.

Отже, мета роботи була виконана.

## РОЗДІЛ 5 ПОБУДОВА SCADA СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ МОБІЛЬНИМ РОБОТОМ

### 5.1 Що таке SCADA та навіщо вона потрібна в цьому проекті

Більшість автоматизованих систем керування технологічними процесами вимагають участі людини у процесі управління. Це обумовлено кількома факторами. В першу чергу, не завжди можна розробити алгоритм керування, який би гарантував повністю автоматизовану систему управління. Часто буває недостатньо інформації про стан об'єкта управління, або в процесі управління можуть виникати непередбачувані ситуації, які не можуть бути вирішені існуючою системою автоматизації. Крім того, навіть для традиційних і добре вивчених задач автоматичного регулювання (стабілізації, програмування і слідування) та дискретного управління періодичними процесами, для яких існують надійні алгоритми і програми управління, виникає необхідність в коригуванні їх роботи.

У будь-якому випадку важливо встановити взаємозв'язок, який забезпечує можливість контролювання стану процесу та системи з боку людини, а також надає можливість втрутитися в управління процесом. Це означає, що в системі керування повинен бути забезпечений інтерфейс людина-машина. Термін "машина" у цьому контексті вказує на всі технічні засоби, що беруть участь у вимірюванні, контролі, сигналізації та управлінні, тоді як термін "людина" вказує на оператора-технолога, який має безпосередню участь у процесі управління. Отже, людина стає активним учасником у процесі керування, і вона виступає як частина цієї системи (автоматизованої системи керування технологічними процесами). Людина приймає ключові рішення у процесі управління, а інтерфейс людина-машина інтегрований у автоматизоване робоче місце оператора.

Для невеликих процесів можливо використовувати кнопки, перемикачі та різні індикатори в якості елементів людино-машинного інтерфейсу. Однак у більшості

технологічних процесів вимагається значна кількість відображувальних та керуючих елементів, а також самописців та елементів сигналізації. У таких випадках використовують операторські панелі (також відомі як панелі оператора). Це компактні мікропроцесорні пристрої із текстовим або графічним дисплеєм для відображення інформації, а також кнопок або сенсорних екранів для управління. Передня частина цих панелей захищена від пилу, бруду та вологи, що дозволяє оператору керувати процесом безпосередньо біля об'єкта. Для захисту інших частин панелі її розміщують у спеціальному щиті.

Для реалізації роботи людино-машинного інтерфейсу необхідно забезпечити двосторонній обмін даними:

- збирати інформацію про стан технологічного устаткування і значень технологічних параметрів;
- передавати команди оператора в зворотному напрямку.

SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition — система диспетчерського управління та збору даних) — програмний комплекс, призначений для розробки або забезпечення операцій систем збору, обробки, відображення та архівування інформації про моніторинг або управління конкретним об'єктом. SCADA може входити в склад автоматизованих систем контролю технологічних процесів (АСК ТП), автоматизованих систем контролю об'єктів енергетики (АСКОЕ), систем екологічного моніторингу, наукових експериментів, автоматизації будівель і т.д.

SCADA-системи застосовуються в різних галузях економіки, де необхідно надавати операторам контроль над технологічними процесами в режимі реального часу.

Більшість програм SCADA/HMI володіють стандартним комплексом функціональних можливостей для виконання завдань автоматизованих робочих місць (АРМ):

- отримання інформації про технологічні параметри, яка передається в реальному часі з контролерів та засобів віддаленого введення/виведення;
- візуальне відображення стану технологічного процесу і устаткування у зручній для сприйняття формі через мнемосхеми;
- додаткова обробка інформації (масштабування, обмеження введення, перевірка коректності і т.д.);
- прийняття команд оператора і їх передача на контролер або засіб віддаленого виведення;
- збереження даних реального часу в архівах і їх візуалізація у вигляді графіків, гістограм і т.д.;
- інформування експлуатаційного та обслуговуючого персоналу про виявлені аварійні події в технологічному процесі та програмно-апаратних засобах;
- реєстрація аварійних подій у контрольованому технологічному процесі та дій персоналу в електронних журналах;
- генерація звітів на основі архівної інформації, тривоги і даних реального часу;
- обмін інформацією з автоматизованими системами керування виробництвом та підприємством в межах інтегрованих систем керування;
- застосування специфічної логіки оброблення даних з використанням вбудованих мов, таких як VBA;
- захист від несанкціонованого доступу до компонентів і файлів;
- створення, запис та зберігання даних у формі рецептів;
- розробка оперативних календарних планів управління устаткуванням.

У даному проекті SCADA-система необхідна для дистанційного керування об'єктом та нагляду за його станом. Основні функції SCADA-системи в цьому проекті включають:

- Забезпечення можливості в режимі реального часу віддалено відслідковувати параметри системи, такі як рівень заряду батареї, швидкість руху робокару, код позиції призначення та позиції відправлення;
- Забезпечення можливості віддалено керувати швидкістю руху та встановлювати код позиції призначення;
- Забезпечення можливості віддалено викликати екстрену зупинку робокару;
- Ведення бази даних реального часу з технологічною інформацією по системі;
- Спрощення обліку документації за допомогою автоматично генерованих звітів щодо ходу технологічного процесу.

## 5.2 Вибір програмного забезпечення

Для створення системи SCADA існує велика кількість спеціальних ПЗ:

- Simatic WinCC;
- Simple Scada;
- Rapid SCADA;
- SCADA KVisionOPC
- SimpLight
- zenon

Із цих п'ятьох програм, для створення SCADA системи я обрав програму zenon.

Основні переваги zenon наступні:

- можливість багатокористувацької розробки;
- висока швидкодія;
- велика гнучкість;

- висока надійність;
- ефективність і масштабованість (можна змінити і розширити свою систему, не переробляючи раніше створені проекти);
- можливість працювати із пробною версією цієї програми безоплатно.

### 5.3 SCADA-система

Я розробив SCADA-систему керування робокаром.

Мобільний робот керується із пункту керування та зв'язан із ним за допомогою двох передачів-приймачив. Описувати принцип роботи мобільного робота та його контури керування я в цьому розділі не буду, тому-що це вже було зроблено в розділі 2.1.

Нижче можна побачити мнемосхему SCADA-системи керування робокаром.

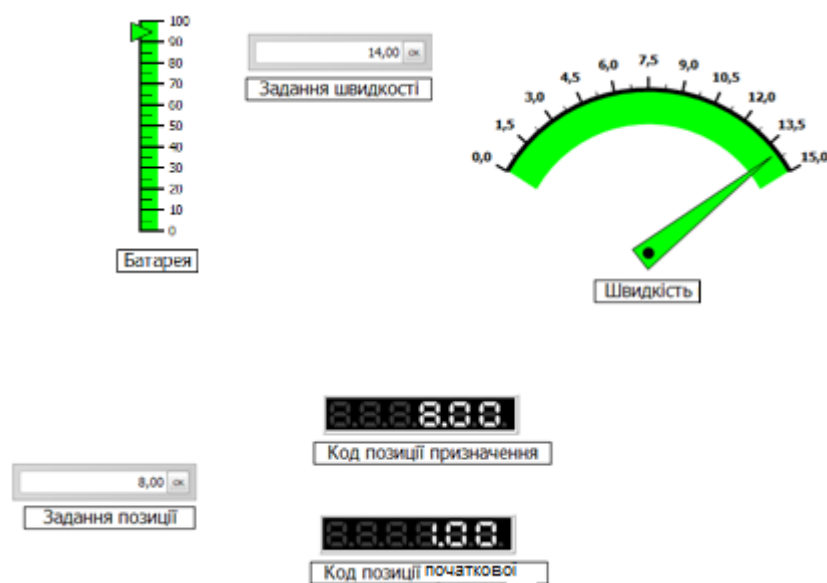


Рисунок 5.1 – Мнемосхема SCADA-системи керування мобільним роботом

За допомогою SCADA-системи оператор має змогу:

1. спостерігати за зарядом батареї;
2. спостерігати за швидкістю робокару;

3. знати код позиції призначення та початкової позиції;
4. задавати швидкість руху робочару та робити екстрену зупинку, якщо це потрібно
5. вводити код позиції віддалено.

## ВИСНОВКИ

Проведено аналіз об'єкта дослідження, а саме розглянута область застосування (для транспортно-складських та вантажо-розважувальних робіт), призначення та характеристики мобільних роботів.

Проведено конструктивно-технологічний аналіз області, в результаті якого складена кінематична схема руху мобільного робота, складена принципова схема електроприводу мобільного робота та описані контури керування мобільним роботом.

Розроблені математичні моделі руху робокара (мобільного робота) та безколекторного двигуна постійного струму (BLDC).

На основі математичних моделей розроблені моделі в середовищі MATLAB/Simulink, на котих відпрацьовувалась робота електропривода та рух мобільного робота (робокара).

За допомогою метода Зіглера-Нікельса було налаштовано ПІД-регулятор та впровадженор в систему. Через це реалізація системи автоматичного керування та оптимізації роботи електроприводу дозволила досягти високої точності руху при мінімізації споживаної енергії.

Для створення SCADA було використаносередовище zenon. За його допомогою розроблено SCADA-систему, яка дозволяє моніторити рівень заряду акумулятора, швидкість, код позиції призначення та початкову позицію. Також можна віддалено встановлювати швидкість та вводити код позиції.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Mordechai Ben-Ari, Francesco Mondada. Elements of Robotics. Cham, Switzerland: Springer, 2018. 324 с. ISBN 978-3-319-62533-1
2. Michel Shneier, Roger Bostelman. Literature Review of Mobile Robots for Manufacturing. NISTIR 8022, 2015.
3. Rubio, F.; Valero, F.; Llopis-Albert, C. A Review of Mobile Robots: Concepts, Methods, Theoretical Framework, and Applications. *Int. J. Adv. Robot. Syst.* 2019, 16, 1729881419839596
4. V. Digani, L. Sabattini, C. Secchi, and C. Fantuzzi, "Towards decentralized coordination of multi robot systems in industrial environments: A hierarchical traffic control strategy," in *Intelligent Computer Communication and Processing (ICCP)*, 2013 IEEE International Conference on, 2013, pp. 209-215.
5. D. Herrero-Perez and H. Martinez-Barbera, "Modeling Distributed Transportation Systems Composed of Flexible Automated Guided Vehicles in Flexible Manufacturing Systems," *Industrial Informatics, IEEE Transactions on*, vol. 6, pp. 166-180, 5/2010.
6. S. Angerer, R. Pooley, and R. Aylett, "MobComm: Using BDI-agents for the reconfiguration of mobile commissioning robots," in *Automation Science and Engineering (CASE)*, 2010 IEEE Conference on, 2010, pp. 822-827.
7. Автоматизований електропривод ч. 2: навчальний посібник для студентів освітньої програми «Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / В.І. Теряєв. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 204 с.
8. CHOI J H, KIM D, EO J S, et al., "Energy-Saving Algorithm Considering Cornering Resistance of a Four-Wheel Independent Drive Electric Vehicle With Vehicle-to-Vehicle (V2V) Information", *IEEE Access*, 10 104398 –407 (2022)

9. Chen, Y.H.; Chen, Y.Y.; Lou, S.J.; Huang, C.J. Energy Saving Control Approach for Trajectory Tracking of Autonomous Mobile Robots. *Intell. Autom. Soft Comput.* 2021, 30, 357–372.
10. Побудова математичної моделі руху робокару / Я. О. Понамарьов, Кулінченко Г.В. // Автоматика, електромеханіка і системи управління : матеріали та програма Міжнародної наукової конференції молодих учених, Суми – Астана, 24–28 квітня 2023 р. / відп. за вип. О. О. Дрозденко. — Суми : СумДУ, 2023. — С. 267.
11. Кулінченко Г. В., Леонтьєв П. В., Левковський О. В., Понамарьов Я.О. Моделювання тягового режиму безколекторного двигуна// *Innovations and prospects of world science. Proceedings of the 6th International scientific and practical conference.* – Vancouver, Canada: Cognum Publishing House, 2022. – P. 209-217
12. Понамарьов Я. О. Автоматизація електроприводу робокару вантажопідйомністю 200 кг : робота на здобуття кваліфікаційного ступеня бакалавра : спец. 151 – автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології / наук. кер. Г. В. Кулінченко. Суми : СумДУ, 2022. 42 с.
13. Narapanahalli S, Mahony NO, Hernandez GV, Campbell S, Riordan D, Walsh J (2019) Autonomous navigation of mobile robots in factory environment. *Procedia Manuf* 38:1524–1531
14. А. А. Видмиш, Л. В. Ярошенко. Основи електропривода. Теорія та практика. Частина 1. / Навчальний посібник. – Вінниця: ВНАУ, 2020. – 387 с.
15. Електропривод робочих машин : підручник / П. О. Василега. – Суми : Сумський державний університет, 2022. – 290 с. ISBN 978-966-657-900-6
16. D. Mohanraj, R. Arul david, R. Verma, K. Sathiyasekar, A. B. Barnawi, B. Chokkalingam, and L. Mihet-Popa, “A review of bldc motor: State of art, advanced control techniques, and applications,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 54 833–54 869, 2022.

- 17.M. A. Shamseldin, R. Barbosa, and I. Jesus, “Optimal Coronavirus Optimization Algorithm Based PID Controller for High Performance Brushless DC Motor,” *Algorithms*, vol. 14, no. 7, p. 193, 2021
- 18.Godfrey, A.J., Sankaranarayanan, V., (2018). A new electric braking system with energy regeneration for a BLDC motor driven electric vehicle. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 21(4), 704-713.
- 19.Bahrami, M.; Mokhtari, H.; Dindar, A. Energy regeneration technique for electric vehicles driven by a brushless DC motor. *IET Power Electron.* 2019, 12, 3397–3402.

