

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій  
(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та  
робототехніки  
(повна назва)

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**Пояснювальна записка**

рівень вищої освіти другий (магістерський)

Вдосконалення системи керування безпілотним мобільним роботом з  
використанням резервування та дублювання основних функцій  
(тема)

Виконав:

здобувач 2 року навчання,  
групи КТРСм-24-1

Ілля КОВАЛЕНКО  
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 174 Автоматизація,  
комп'ютерно інтегровані технології та  
робототехніка  
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Комп'ютеризовані та  
робототехнічні системи  
(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Сергій НОВОСЕЛОВ  
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри КІТАР

(підпис)

2025 р.

Ігор НЕВЛЮДОВ

(прізвище, ініціали)

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет \_\_\_\_\_ АКТ \_\_\_\_\_

Кафедра \_\_\_\_\_ КІТАР \_\_\_\_\_

Рівень вищої освіти \_\_\_\_\_ другий (магістерський) \_\_\_\_\_

Спеціальність \_\_\_\_\_ 174 Автоматизація, комп'ютерно інтегровані технології та  
робототехніка \_\_\_\_\_

(код і повна назва)

Тип програми \_\_\_\_\_ освітньо-професійна \_\_\_\_\_

Освітня програма \_\_\_\_\_ Комп'ютеризовані та робототехнічні системи \_\_\_\_\_  
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ**  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві \_\_\_\_\_ Коваленко Іллі Сергійовичу \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи \_\_Вдосконалення системи керування безпілотним мобільним роботом з використанням резервування та дублювання основних функцій

Затверджена наказом університету від 10.11.2025 р. № 1018Ст

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 26.12.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи \_\_\_\_\_

3.1 Структурна схема роботи системи керування; \_\_\_\_\_

3.2 Макет системи розроблявся в програмі Matlab Simulink; \_\_\_\_\_

3.3 Написання коду і моделювання системи проводилося за допомогою онлайн-сервісу  
Tinkercad \_\_\_\_\_

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі \_\_\_\_\_

4.1 Вступ \_\_\_\_\_

4.2 Методи підвищення ефективності управління \_\_\_\_\_

4.3 Проблеми при управлінні транспортними засобами та їх види \_\_\_\_\_

4.4 Існуючі системи керування транспортними засобами \_\_\_\_\_

4.5 Розроблення структурної схеми системи керування транспортним засобом \_\_\_\_\_

4.6 Моделювання роботи системи керування транспортним засобом \_\_\_\_\_

4.7 Висновки та перелік джерел посилань \_\_\_\_\_

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри)

Демонстраційний матеріал представлений у форматі презентації PowerPoint (\*.ppt. ) – 16 арк., ф А4

---

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1 )

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Строк / терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз сучасного стану систем безпілотного керування транспортними засобами	01.09.25-09.09.25	Виконано
2	Методи підвищення ефективності управління	09.09.25-15.09.25	Виконано
3	Проблеми при управлінні транспортними засобами та їх види	15.09.25-10.10.25	Виконано
4	Аналіз існуючих систем керування	10.10.25-15.11.25	Виконано
5	Розроблення структурної схеми системи керування транспортним засобом	15.11.25-03.12.25	Виконано
6	Моделювання роботи системи керування транспортним засобом	03.12.25-10.12.25	Виконано
7	Розробка програмного забезпечення системи керування транспортним засобом	10.12.25-16.12.25	Виконано
8	Оформлення пояснювальної записки	17.12.25	Виконано
9	Подання роботи на перевірку щодо дотримання академічної доброчесності	18.12.25	Виконано
10	Подання роботи на рецензію	19.12.25	Виконано
11	Подання роботи на підпис зав. Кафедри	22.12.25	Виконано
12	Подання кваліфікаційної роботи в ЕК	24.12.25	Виконано

Дата видачі завдання 01.09.2025 р.

Здобувач \_\_\_\_\_  
(підпис)

Ілля КОВАЛЕНКО

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

проф. Сергій НОВОСЕЛОВ  
(посада, власне ім'я, прізвище)

Я, Коваленко Ілля Сергійович, як здобувач вищої освіти ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу з академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Я не використовував штучний інтелект для підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

"19" грудня 2025 р.



Коваленко І.С.

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 60 с., 42 рис., 3 дод. 22 джерел посилання.

### БЕЗПІЛОТНИЙ ТРАНСПОРТНИЙ ЗАСІБ, СИСТЕМА КЕРУВАННЯ, НАДІЙНІСТЬ

Мета кваліфікаційної роботи – підвищення ефективності системи керування безпілотним мобільним роботом з використанням резервування та дублювання основних функцій.

Об'єкт дослідження – процес дистанційного керування рухом транспортного засобу.

Предмет дослідження – мехатронний модуль для віддаленої взаємодії з транспортним засобом.

В роботі було розглянуто методи підвищення ефективності управління та проблеми при управлінні транспортними засобами, їх види. Було проведено аналіз існуючих рішень, розглянуто існуючі системи керування транспортними засобами. У практичній частині було розроблено структурну схему роботи системи, а також побудовано її макет та змодельовано його роботу.

Результати роботи відповідають Цілям сталого розвитку 9: «Промисловість, інновації та інфраструктура».

Результати роботи можуть використовуватися при розробленні систем дистанційного керування транспортних засобів, підвищення керованості транспортних засобів. Розроблені моделі та програмне забезпечення можуть застосовуватись у навчальному процесі під час підготовки фахівців зі спеціальності 174 Автоматизація, комп'ютерно інтегровані технології та робототехніка. Основні результати дослідження опубліковані у науковій статті.

## **ABSTRACT**

Explanatory note: 60 p., 42 fig., 3 add., 22 sources.

### **UNMANNED VEHICLE, CONTROL SYSTEM, RELIABILITY**

The purpose of the qualification work is to increase the efficiency of the control system of an unmanned mobile robot using redundancy and duplication of basic functions.

The object of the study is the control system of an unmanned mobile robot.

The subject of the study is a mechatronic module for remote interaction with a vehicle.

The work considered methods for increasing control efficiency; problems in controlling vehicles and their types; existing solutions were analyzed; existing vehicle control systems were considered; a structural diagram of the system was developed; a system model was built and its operation was simulated.

The results of the work correspond to Sustainable Development Goals 9: "Industry, Innovation and Infrastructure",

The results of the work can be used in the development of remote control systems for vehicles, improving the controllability of vehicles. The developed models and software can be used in the educational process during the training of specialists in the specialty 174 Automation, Computer Integrated Technologies and Robotics. The main results of the study are published in a scientific article.

## ЗМІСТ

Перелік скорочень.....	8
Вступ.....	9
1 Аналіз предметної області .....	11
1.1 Методи підвищення ефективності управління .....	11
1.2 Проблеми при управлінні транспортними засобами та їх види .....	15
1.3 Існуючі рішення.....	20
1.4 Висновки до розділу 1.....	27
2 Аналіз існуючих систем керування .....	28
2.1 Гідравлічні системи керування .....	28
2.2 Електричні системи керування.....	30
2.3 Розробка структурної схеми системи керування .....	45
2.4 Висновки до розділу 2.....	46
3 Моделювання системи дистанційного керування транспортним засобом .....	47
3.1 Опис макета .....	47
3.2 Принцип роботи моделі.....	51
3.3 Принцип роботи коду.....	57
3.4 Висновки до розділу 3.....	68
4 Охорона праці.....	69
4.1 Заходи безпеки під час гуманітарного розмінування .....	69
4.2 Заходи безпеки при суцільному розмінуванні.....	70
4.3 Заходи безпеки при розкопуванні боєприпасів.....	72
Висновки.....	76
Перелік джерел посилання.....	77
Додаток А Висвітлення результатів у публікаціях.....	80
Додаток Б Лістинг програми для роботи макета системи.....	90
Додаток В Демонстраційний матеріал.....	94

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

TЗ – транспортний засіб;

ASR – система протипробуксовки;

CSMA – множинний доступ з контролем несучої та виявленням колізій;

ESR – електронна система стабілізації;

IEEE – інститут інженерів з електротехніки та електроніки;

LTE – стандарт мобільного бездротового зв'язку;

MAC – управління доступом до середовища.

UGV – безпілотний транспортний засіб;

V2I – технологія зв'язку між транспортними засобами та дорожньою інфраструктурою;

V2V – технологія зв'язку між автомобілями;

WiMAX – всевітня сумісність для мікрохвильового доступу;

## ВСТУП

В останні роки попит на гусеничні машини значно зріс. Порівняно з колісними машинами, гусеничні машини мають низку переваг, таких як їхня прохідність, особливо по бездоріжжю, хороше зчеплення з землею та швидка маневреність. Це пов'язано з тим, що збільшення поверхні контакту з землею покращує плавучість та мобільність транспортного засобу на нерівній місцевості. Ці переваги підвищують попит на гусеничні машини не лише для військових цілей, але й у цивільних застосуваннях, які потребують маневреності, прохідності та надійності, таких як: сільське господарство, лісове господарство, гірничодобувна промисловість, позашляховий транспорт та промисловість. Крім того, безпілотні гусеничні машини стають популярними в робототехнічних застосуваннях, таких як пошуково-рятувальні операції, розвідка та спостереження, розмінування.

Ключову роль також відіграє система керування. Стійкість до зовнішніх чинників, а також відмовостійкість апаратного та програмного забезпечення впливають на якість виконання завдань. У випадку гуманітарного розмінування будь-яка відмова системи керування може призвести до втрати техніки.

Актуальність роботи – вдосконалення мехатронної системи дистанційного керування за допомогою якої оператор знаходячись у безпечному місці може виконувати гуманітарне розмінування без ризиків для життя.

Мета кваліфікаційної роботи – підвищення ефективності системи керування безпілотним мобільним роботом з використанням резервування та дублювання основних функцій.

Об'єкт дослідження – процес дистанційного керування рухом транспортного засобу.

Предмет дослідження – мехатронний модуль для віддаленої взаємодії з транспортним засобом.

Для досягнення поставленої мети роботи були визначені такі завдання:

- провести аналіз методів дистанційного управління транспортними засобами різних типів;
- розробити структурну схему макету;
- провести аналіз переваг та недоліків існуючих методів дистанційного керування;
- розробити робочу схему для моделювання роботи системи;
- розробити код для роботи системи керування;
- оформити кваліфікаційну роботу згідно рекомендаціям [1] – [2], а також ДСТУ 3008:2015 [3].

# 1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

## 1.1 Методи підвищення ефективності управління

Протягом останніх двох десятиліть в автомобільній галузі відбулося багато досягнень завдяки посиленню співпраці між підсистемами транспортних засобів, які традиційно проектувалися окремо. Мережі зв'язку транспортних засобів, недорогі датчики та надійні мехатронні приводи відіграють важливу роль у цій новій тенденції, дозволяючи інженерам проектувати автомобіль як єдину мехатронну систему. Цей новий кооперативний підхід створює надмірності в проблемах керування. Наявність різних приводів разом із перехресним зв'язком між поперечною та обертальною динамікою призвела до появи інтегрованих алгоритмів керування транспортним засобом. Ці алгоритми можуть використовувати пов'язану динаміку в цілому, що призводить до покращення продуктивності порівняно з випадком вирішення менших, орієнтованих на одну задачу проблем, таких як контроль тяги та керування підвіскою, окремо.

Надмірність керування в наземних транспортних засобах можна спостерігати, наприклад, у керуванні швидкістю ризькування (обертання транспортного засобу навколо осі  $z$ ). Швидкість ризькування можна регулювати за допомогою як систем рульового керування, так і систем керування тягою: транспортний засіб може регулювати свою швидкість ризькування, змінюючи величину поздовжніх сил тяги на різних колесах, використовуючи свої електродвигуни в колесах.

Іншим способом зміни швидкості ризькування є вхідне керування кермом. Хоча в минулому було доступне лише керування передніми колесами, а обсяг кермування був механічно обмежений, технології керування по проводах та керування всіма колесами нещодавно стали можливими та доступними завдяки

впровадженню надійних, недорогих виконавчих механізмів та стратегій керування.

Активне керування підвіскою також є ще одним каналом керування, який став можливим завдяки впровадженню передових виконавчих механізмів та методів керування. Як правило, надлишковість виконавчих механізмів виявляється та використовується шляхом додавання спеціальних алгоритмів після того, як проблема проектування контролера вирішена та впроваджена. Успіх цих доповнень залежить насамперед від кваліфікації та досвіду персоналу.

Виконання цих алгоритмів зазвичай розпочинається на основі умов експлуатації, а їхній внесок у загальну стійкість задачі важко виміряти за наявності змінної в часі динаміки та невизначеностей. Тому важливим завданням використання цих надмірностей є пошук структурованих методів, які можна реалізувати для широкого кола задач керування транспортним засобом.

«Розподіл керування» можна визначити як систематичний спосіб розподілу загального зусилля керування між надлишковими виконавчими механізмами. Він широко використовується в управлінні польотом для визначення відхилень керуючих поверхонь на основі загального віртуального вхідного сигналу керування, що генерується контролером високого рівня [4].

Уникнення перешкод є дуже важливим і складним завданням у телекеруванні транспортними засобами в складних середовищах, яке вимагає сильних навичок керування та високого когнітивного рівня оператора. Задачі уникнення перешкод можна розділити на три типи.

Перший базується на зворотному зв'язку по силах, який моделює інформацію про навколишнє середовище, а саме інформацію про перешкоду, як силу відштовхування, а інформацію про ціль як силу тяжіння, щоб уникнути перешкоди. Ця ситуація схожа на ідею моделювання штучної функції потенційного поля в плануванні траєкторії, яка вимагає геніального методу проектування функції відштовхування, щоб успішно уникнути перешкоди через потенційну нестабільність між оператором і силою взаємодії.

Другий – це метод уникнення перешкод, заснований на віртуальному гаптичному обмеженні, який базується на інформації про навколишнє середовище та очікуваній траєкторії, і застосовує відповідні обмеження в просторі маневрування ведучого та веденого пристроїв для уникнення перешкод. Цей метод вимагає маневрування оператора та додаткових маневрових зусиль для досягнення безколізійного руху веденої сторони [5].

Коли йдеться про роботу з параметричними невизначеностями в динамічних моделях транспортних засобів, існують два загальні підходи до синтезу контролерів. Перший – це теорія робузного керування (РК), яка спрямована на стабілізацію замкненої системи за найгіршого випадку невизначеностей параметрів моделі з фіксованими законами керування.

Другий підхід базується на методі адаптивного керування (АК), який пропонує стратегії керування, скориговані в режимі реального часу і може запропонувати дві переваги над РК. По-перше, метод РК вимагає попереднього знання меж невизначених параметрів моделі, тоді як АК не спирається на таку інформацію та здатний інтелектуально ідентифікувати та вивчати параметри моделі в режимі реального часу. По-друге, масштабні параметричні невизначеності можуть призвести до консервативних законів керування при синтезі РК.

Така консервативність може призвести до надмірно великих зусиль керування та/або недостатньої продуктивності, що може бути непридатним для системи керування за траєкторією руху. Навпаки, структура АК не має цього недоліку. У цьому відношенні безліч дослідницьких зусиль зосереджені на розробці контролерів, що слідують за траєкторією руху, з використанням теорії АК. Також для синтезу контролерів, що слідують за траєкторією, використовувалася модель адаптивного керування. Зовсім недавно механізми адаптації на основі Ляпунова були поєднані з різними емерджентними методами керування за траєкторією, що призвело до розробки адаптивного контролера, керованого даними, адаптивного прогнозуючого контролера з моделлю,

адаптивного компенсатора зворотного ходу рульового керування та інших (рис. 1.1) [6].

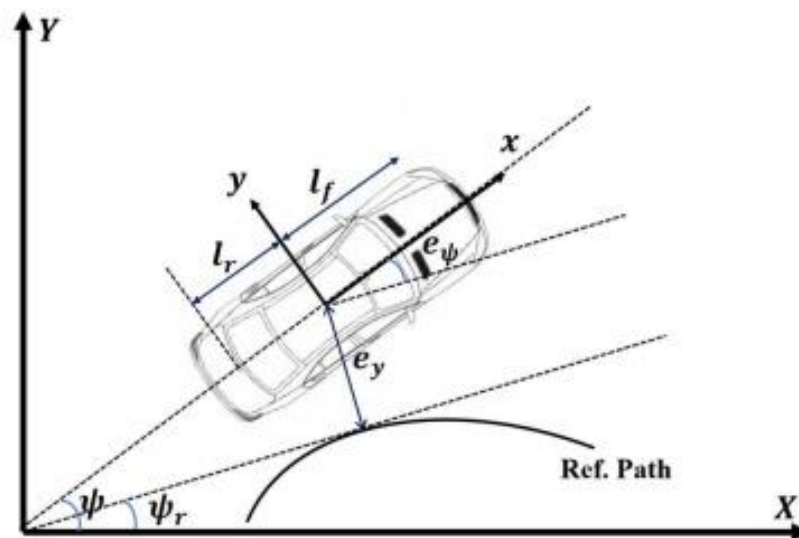


Рисунок 1.1 – Кінематика слідування за траєкторією

Безпілотні наземні транспортні засоби високої мобільності повинні мати можливість перетину місцевості з низькою несучою здатністю ґрунту або низьким коефіцієнтом зчеплення, а також долати перешкоди на місцевості, такі як канали, насипи, колоди, стіни, бордюри тощо. Їх типові експлуатаційні швидкості коливаються від 1 до 5 км/год, а максимальні швидкості досягають 8–12 км/год. Найпоширенішими системами передач у безпілотних транспортних засобах високої мобільності є гумові стрічкові гусеничні системи або колісні системи.

Гусеничні системи, що використовуються у безпілотних транспортних засобах, забезпечують низький тиск на ґрунт, проте їхнім головним недоліком є значний опір руху, спричинений високим споживанням енергії гумовою стрічкою на вигин та значним опором повороту. Альтернативним варіантом є колісні системи, які демонструють низький опір коченню та меншу масу порівняно з гусеничними системами.

Для високомобільних безпілотних наземних транспортних засобів вагою понад 300 кг часто використовуються гідростатичні системи приводу, оскільки вони дозволяють безступінчасто регулювати швидкість та забезпечують стійкість до перевантаження та перегріву. Вони також відзначаються великою гнучкістю у компонованні системи приводу та дозволяють використовувати низькошвидкісні/висококрутні гідростатичні двигуни, які можна монтувати безпосередньо на колеса або зірочки [7].

## 1.2 Проблеми при управлінні транспортним засобом та їх види

На тлі потреби в економії робочої сили та заміні людської праці в небезпечних середовищах, останніми роками було розроблено багато безпілотних апаратів, таких як автоматично керовані апарати, безпілотні літальні апарати та автономні підводні апарати. Ці безпілотні апарати працюють у місці без втручання людини. Враховуючи таку характеристику, вони повинні бути достатньо стійкими, щоб продовжувати свою рух автономно навіть у разі відмови виконавчих механізмів.

Одним із методів досягнення стійкості вважається відмовостійке керування, яке використовує резервні виконавчі механізми, розташовані таким чином, що кілька виконавчих механізмів впливають на одну дію, так що навіть якщо один виконавчий механізм вийде з ладу, керування можна підтримувати за допомогою інших виконавчих механізмів.

З іншого боку, також досліджувалися методи виявлення відмов виконавчих механізмів та проактивного використання виявлених аномалій для усунення відмов. Наприклад, запропоновано метод змішувача керування, який розраховує розподіл вхідних сигналів шляхом розв'язання одночасних рівнянь таким чином, щоб вихід виконавчого механізму став рівним до та після відмови, а також метод, який має кілька контролерів, розроблених для заздалегідь визначених режимів відмов, та перемикає їх відповідним чином, коли виникає

відмова. Однак, коли виникає відмова, яку не можуть виявити датчики, наприклад, у випадку, якщо механізм зв'язку, з'єднаний з двигуном, застрягає через зовнішню силу, необхідно створити окремий детектор відмов, який виявляє відмову за допомогою сигналів, що надходять від керованого об'єкта [8].

Безпілотні наземні гусеничні транспортні засоби стикаються з численними труднощами. Ці труднощі включають труднощі у вимірюванні ковзання гусениці по ґрунту, складну нелінійну динаміку та вплив невизначених зовнішніх збурень. Через ці фактори традиційні методи керування мають труднощі з точним відстеженням бажаної траєкторії. Для вирішення цих проблем вкрай важливо розробити та оптимізувати індивідуальні методи керування безпілотним транспортним засобом шляхом інтеграції сенсорних технологій та передових стратегій керування, тим самим підвищуючи точність та надійність відстеження траєкторії [9].

У системах контролю пробуксовки коліс обов'язково потрібно виявляти швидкість транспортного засобу для розрахунку коефіцієнта пробуксовки коліс (рис. 1.2). Однією з поширених і найважливіших проблем у протипробуксовочному контролі та контролі тяги є вимірювання оцінки швидкості транспортного засобу відносно землі в режимі реального часу.

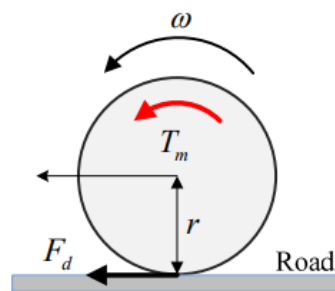


Рисунок 1.2 – Динаміка обертання колеса

Оскільки швидкість транспортного засобу завжди є основою для розрахунку пробуксовки коліс, швидкість транспортного засобу слід оцінювати за допомогою доступних вимірювань датчиків, щоб уникнути збільшення витрат. За допомогою метода фільтрації Калмана на основі нечітких правил, що

використовує додатковий акселерометр для доповнення до датчика швидкості на колесі, і його ефективність була перевірена за допомогою експериментів з використанням реального транспортного засобу. Одним з методів також є адаптивний нелінійний підхід фільтрації для оцінки швидкості транспортного засобу, використовуючи лише вимірювані швидкості коліс. Також існує ‘ використання нелінійних спостерігачів для оцінки як поперечної, так і поздовжньої швидкості автомобільних транспортних засобів. Оскільки необхідно використовувати модель тертя шин об дорогу, вона не є практичною для реального застосування на транспортних засобах [10].

Завдання систем керування полягає в запобіганні надмірній диференціації швидкості. У цьому випадку кінематична невідповідність та необхідність варіації швидкості коліс виникають лише під час повороту транспортного засобу. Це явище можна відносно легко включити в алгоритми керування, враховуючи роботу системи рульового керування. Однак, безпілотні транспортні засоби повинні рухатися по пересіченій місцевості з низькими швидкостями і, крім того, не можуть використовувати інерційні сили для подолання перешкод, як це роблять високошвидкісні транспортні засоби. Для подолання перешкод та руху по пересіченій місцевості необхідний постійний розвиток значних сил тяги на всіх колесах. Це вимагає диференціації швидкості коліс для підтримки оптимального ковзання для кожного колеса. Проблемою є висока кінематична невідповідність спричинена випадковими нерівностями місцевості та перешкодами, яку стандартні системи контролю ковзання не можуть компенсувати. Підвищення мобільності на місцевості та можливостей подолання перешкод вимагає індивідуального контролю ковзання коліс, незважаючи на значну різницю в швидкості між ними.

Аналізуючи можливості керування швидкістю обертання гідравлічних двигунів, виділяються дві групи рішень: системи, що використовують зовнішню гальмівну систему, та системи з активним дроселюванням потоку. Системи, що базуються на зовнішніх гальмівних системах, широко використовуються в

сучасних автомобілях, відомі як системи протипробуксовки (ASR) та електронні системи зменшення пробуксовки (ESR). Вони є стандартним обладнанням у більшості легкових автомобілів і добре працюють у дорожніх умовах (зазвичай: відсутність перешкод на дорозі, високі швидкості руху, хороша вантажопідйомність та зчеплення з дорогою). Крім того, водій керує автомобілем зсередини, безпосередньо відчуючи його поведінку та маючи можливість реагувати на неї. В автомобілях це, перш за все, системи безпеки, а не рішення для подолання перешкод і, зрештою, мобільності на дорозі. Безпілотні наземні транспортні засоби здебільшого рухаються на дуже низьких швидкостях, долаючи великі перешкоди на місцевості, часто в умовах обмеженого зчеплення з дорогою та вантажопідйомності. Крім того, вони керуються дистанційно. Тому використання рішень, подібних до ASR/ESR, для безпілотних наземних транспортних засобів слід розглядати як одну з можливостей. Для машин і транспортних засобів, оснащених гідростатичними системами приводу, подібного ефекту зниження швидкості обертання коліс і, відповідно, контролю їхнього пробуксовування можна досягти за допомогою систем з активним дроселюванням потоку. Однак впровадження дроселюючих елементів призводить до падіння ефективності системи приводу та значного збільшення споживання енергії.

Однією з проблем моделювання системи контролю пробуксовки є вибір методу активаційної дії. Наразі в автомобільних системах безпеки широко використовуються регулятори, що використовують нечітку логіку. Дуже перспективний спосіб моделювання передбачає використання штучного інтелекту. Цей метод дозволяє моделювати складні явища за допомогою відносно простих математичних функцій. Вони характеризуються досить високою надійністю, тоді як внутрішню роботу системи можна описати як чорну скриньку, в якій ми не маємо певного впливу на метод роботи, лише на вихідний сигнал.

Іншим підходом є моделювання з використанням звичайних математичних функцій, таких як логістична функція: сигмоїдальне рівняння, тангенс, обмежена експонента, експонента. Такі характеристики, незважаючи на певні обмеження у формуванні ходу функцій, мають досить важливі особливості, такі як можливість аналітичної перевірки моделі або можливість параметричного впливу безпосередньо на форму функції активації.

Рульове керування Аккермана, диференціальне рульове керування та ковзне рульове керування є найпоширенішими механізмами рульового керування для більшості колісних та гусеничних наземних транспортних засобів. Рульове керування Аккермана має багато переваг, таких як хороша поперечна стійкість, низьке енергоспоживання, але також має недоліки, такі як низька маневреність та вимога до чітко визначеної механічної підсистеми рульового керування. Диференціальне рульове керування завжди використовується для транспортних засобів з двома колесами. Воно може забезпечити високу маневреність з нульовим радіусом повороту та має просту конфігурацію рульового керування. Однак, він не має сильного зчеплення та мобільності на пересіченій та пухкій місцевості, його рідко використовують для руху на відкритій місцевості. Як і диференціальне рульове керування двома колесами, ковзне рульове керування має різні переваги, такі як хороша маневреність, швидша реакція, простіша та міцніша механічна структура, крім того, транспортний засіб також може мати більше місця для службового обладнання. Завдяки сильному зчепленню, високій мобільності та іншим значним перевагам, транспортні засоби з ковзним кермом більше підходять для пересування по всій місцевості, особливо для бездоріжжя.

На відміну від транспортних засобів з керуванням Аккермана, транспортні засоби з ковзним кермом не потребують спеціальної підсистеми механічного рульового керування та керуються шляхом незалежної зміни швидкостей правого та лівого коліс або гусениць. Коли колеса або гусениці з обох боків обертаються з однаковою швидкістю, транспортний засіб рухається прямо

вперед, тоді як тільки колесо або гусениця з одного боку обертаються повільніше або швидше, транспортний засіб може бути змушений обертатися навколо осі, яка знаходиться зовні або всередині транспортного засобу. Під час руху всі колеса або гусениці залишаються паралельними поздовжній осі транспортного засобу, а поворот транспортного засобу вимагає прослизання коліс або гусениць. Порівняно з іншими типами транспортних засобів, він може виконувати повороти з нульовим радіусом і забезпечувати більше тягове зусилля. За цих обставин колеса та гусениці транспортного засобу з ковзанням котяться та ковзають одночасно, що може ускладнити точну розробку відповідних кінематичних або динамічних моделей для опису руху. Більше того, оскільки неможливо передбачити точний рух лише на основі його керуючих вхідних даних, кінематика ковзання не є простою [11].

### 1.3 Існуючі рішення

Для дистанційного керування транспортним засобом з використанням технологій V2I або V2V (рис. 1.3) необхідно використовувати бездротові засоби зв'язку. Однак бездротовий зв'язок пов'язаний з більшими затримками зв'язку та втратою пакетів порівняно з дротовими засобами зв'язку. Загальновідомо, що включення комунікаційної мережі до замкнутої системи може призвести до погіршення продуктивності системи або нестабільності через властиві затримки передачі. Загалом, вплив часових затримок у замкнутих системах може нагадувати вплив зниження частоти дискретизації, оскільки контролер отримує старі дані.

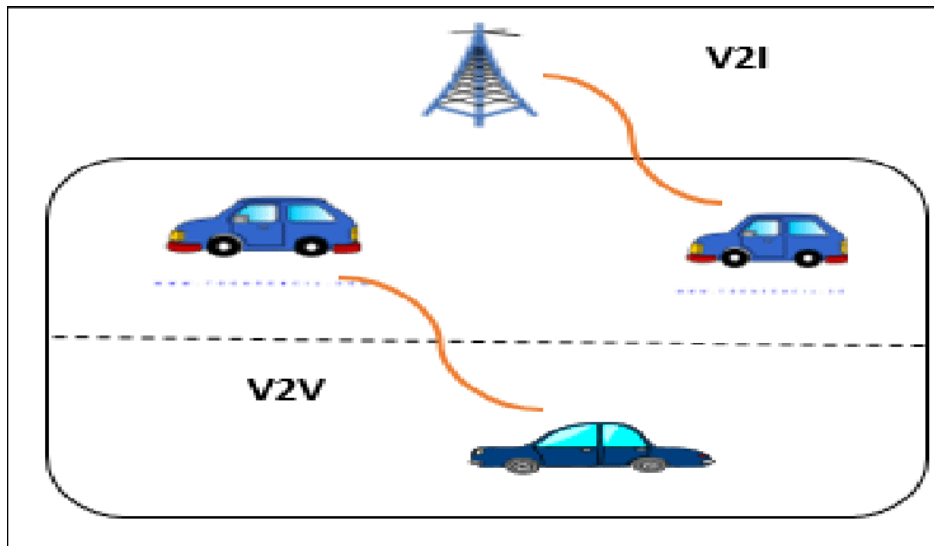


Рисунок 1.3 – Технології V2I та V2V

Незважаючи на те, що існують метрики для кількісної оцінки цих негативних впливів у частотній області та часовій області, це все ще становить проблему та залишається предметом активних досліджень.

Для дистанційного керування транспортним засобом за допомогою віддаленої системи потрібен бездротовий інтерфейс. Доступні варіанти бездротового з'єднання представлені у вигляді стандарту 802.11, встановленого Інститутом інженерів з електротехніки та електроніки (IEEE), Всесвітньої сумісності для мікрохвильового доступу (WiMAX), також встановленого IEEE, та старіших версій Long Term Evolution (LTE). Оскільки WiMAX вимагає стаціонарних вузлів, а LTE лише нещодавно запровадив зв'язок між пристроями для цілей V2V разом із 5G, вони або не підходять, або ще недостатньо розвинені для прямого зв'язку на коротких відстанях. Стандарт 802.11р використовується переважно для V2X. Для реалізації таких видів зв'язку стандарт 802.11р налаштований на роботу з сімома каналами 20 МГц (шістьма службовими каналами та одним каналом керування) у діапазоні 5,9 ГГц та може досягати швидкості передачі даних 27 Мбіт/с у межах необхідного робочого діапазону 1 км.

Хоча стандарт 802.11p є досить сталим, він не позбавлений власного набору недоліків, а саме проблеми прихованого терміналу та можливості необмежених затримок під час використання множинного доступу/уникнення колізій з визначенням несучої (CSMA/CA) на рівні керування доступом до середовища (MAC). Проблема прихованого терміналу виникає, коли два вузли, що є частиною однієї мережі, не знаходяться в межах досяжності зв'язку один з одним. Це означає, що вони не можуть визначити, чи передає повідомлення інший вузол, перш ніж спробувати передати своє повідомлення, що призводить до колізії на вузлі-отримувачі. Можливість необмежених затримок виникає в результаті того, що пристрій, який використовує CSMA/CA, очікує вільного каналу, перш ніж надсилати своє повідомлення. Якщо канал постійно зайнятий, повідомлення ніколи не матиме можливості бути надісланим.

Будь-яка мережа має певну форму затримки між надсиланням пакета та його отриманням на іншому кінці. У бездротовій мережі затримка, яку відчуває пакет, походить не з одного джерела, а скоріше є комбінацією багатьох менших затримок з різних ділянок мережі (рис. 1.4).

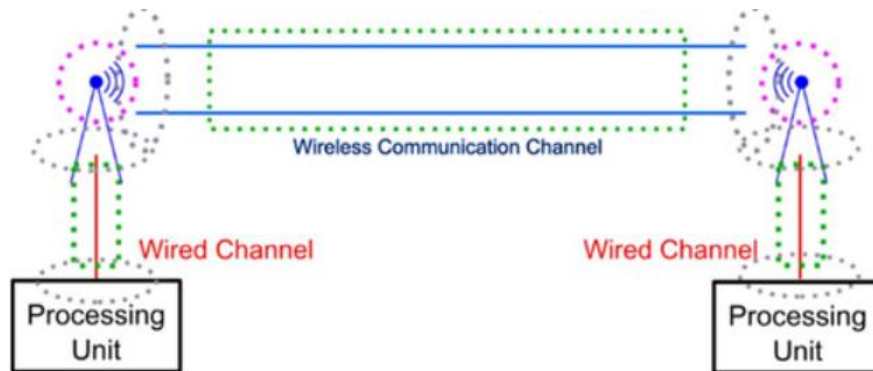


Рисунок 1.4 – Затримки в мережі бездротового зв'язку

Безпілотний транспортний засіб здатний працювати самостійно або на основі команд, що надаються йому дистанційно, в будь-якому середовищі. Однак, основними проблемами експлуатації транспортного засобу є його надійність та збої, пов'язані з системою керування, живленням та зв'язком.

Передача даних для руху та роботи безпілотного транспортного засобу з дистанційним оператором є основною проблемою, через яку сигнал зв'язку послаблюється. Ще однією проблемою експлуатації транспортних засобів є безпека в міських умовах.

Передача сигналу зв'язку через радіочастотну систему краща, ніж через інфрачервону з багатьох причин. По-перше, сигнали через радіочастотну систему можуть поширюватися на більші території, що робить її придатною для застосувань на великі відстані. Крім того, інфрачервона система здебільшого працює в режимі прямої видимості, а радіочастотні сигнали можуть поширюватися навіть за наявності перешкод між передавачем і приймачем. По-друге, радіочастотна передача є сильнішою та надійнішою за інфрачервону систему. Радіочастотний зв'язок використовує певну частоту, на відміну від інфрачервоних сигналів, на які впливають інші джерела інфрачервоного випромінювання.

Якщо керування безпілотним транспортним засобом здійснюється за допомогою мобільного зв'язку, необхідно забезпечити покриття з достатнім рівнем сигналу для його безперебійної і надійної роботи [12].

Системи керування всіма сучасними безпілотними транспортними засобами спираються на електроніку. Це означає необхідність джерел електричної енергії в кожній конструкції. Залежно від складності задачі керування, джерело живлення необхідно відповідно підбирати. Найбільше споживання енергії роботами пов'язане з функціями пересування та маніпуляції. Тому часто використовується перетворення енергії з джерела живлення основних рушійних сил на джерело електроенергії, яке відповідає вимогам системи керування.

Також в якості джерел енергії для безпілотних транспортних засобів широко використовуються акумуляторні батареї, виготовлені з різних матеріалів. Для найкращої продуктивності потрібна мала вага, висока моментальна струмовіддача та висока ємність. Напруга батареї також є

важливим параметром, оскільки втрати потужності зростають квадратично пропорційно до струму; підвищення напруги дозволяє зменшити струм, і таким чином значно зменшує втрати потужності та перерізи провідників, зберігаючи при цьому ту саму потужність. Однак, слід зазначити, що електроніка керування зазвичай вимагає низьковольтного джерела живлення. В таких випадках використовуються перетворювачі енергії [13].

Також однією з ключових проблем для телекерованих безпілотних транспортних засобів є прохідність місцевості. Зокрема, м'які поверхні з певним ступенем шорсткості, такі як реголіт, створюють унікальні труднощі для навігації транспортних засобів через поздовжнє прослизання, спричинене взаємодією гусениці з місцевістю. Також проблемою при керуванні на схилі є зміщення гусениць відносно напрямку руху через м'який ґрунт. Для покращення навігації та забезпечення точного керування безпілотним транспортним засобом оператор повинен знати про викликане прослизання та застосовувати відповідні команди через двосторонню систему телекерування. Телеприсутність оператора дозволяє проактивно та своєчасно змінювати вхідні дані керування, оптимізувати прохідність місцевості та стабільність транспортного засобу, а також відмінну продуктивність відстеження команд. Таким чином, тактильний зворотний зв'язок може бути хорошим підходом для забезпечення усвідомлення прослизання в безпілотних транспортних засобах з телекеруванням, оскільки важко виявити прослизання лише за допомогою відеозворотнього зв'язку.

Однак мережеві затримки в каналі зв'язку між оператором та транспортним засобом можуть суттєво вплинути на телеприсутність, погіршуючи точність інтеграції замкнутого циклу, необхідної для своєчасного реагування на зміни навколишнього середовища. Ці затримки можуть призвести до погіршення продуктивності та прозорості, що може дестабілізувати систему, особливо коли канал зв'язку стає непасивним, навіть з невеликими затримками в часі. Тим часом, поріг для невеликих затримок, що викликають нестабільність, варіюється залежно від конкретної динаміки системи та застосування системи. Щоб

вирішити проблеми, що виникають через затримку в низькошвидкісних телекерованих безпілотних транспортних засобах, що зазнають індукованого поздовжнього прослизання, дослідники зосередилися на різних підходах, включаючи стратегії на основі пасивності, енергії та управління. На рис. 1.5 зображено, як різні ступені телеприсутності та прохідності місцевості корелюють із загальною продуктивністю телекерованого безпілотного транспортного засобу [14].

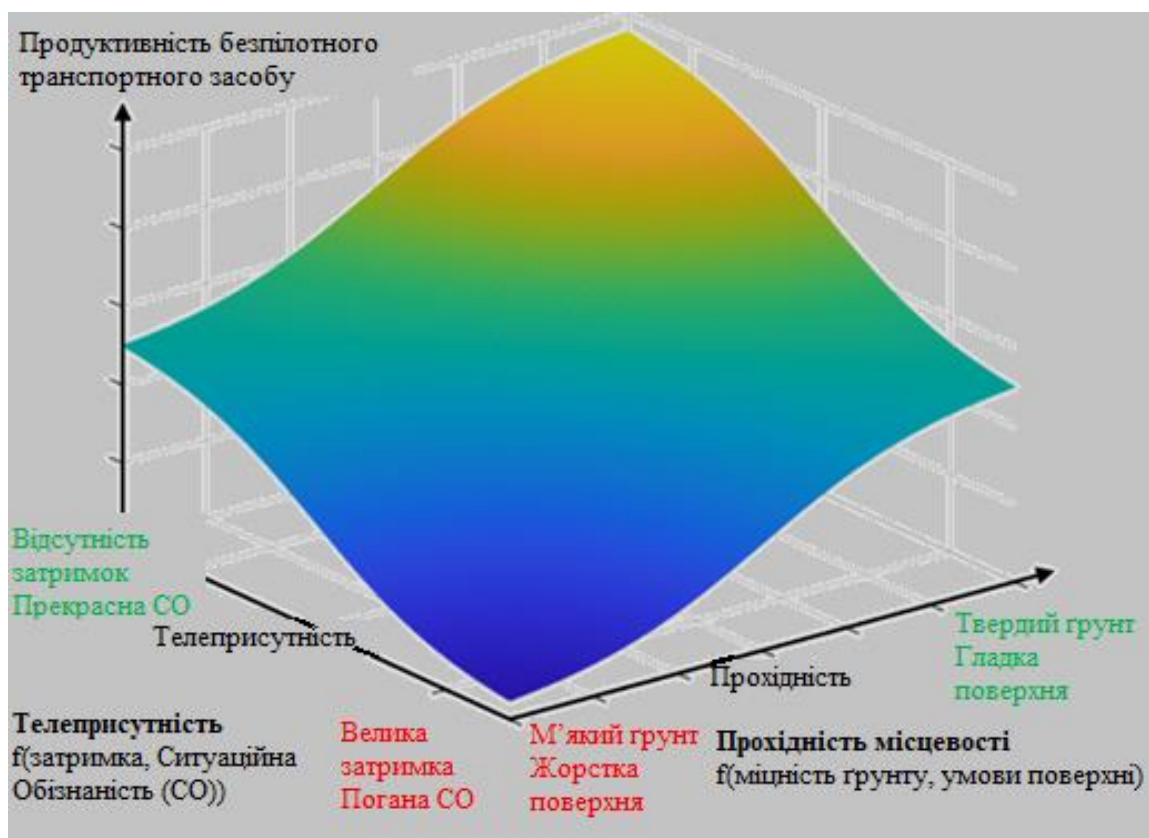


Рисунок 1.5 – Вплив властивостей місцевості і затримок на продуктивність відстеження команд телекерованого безпілотного транспортного засобу.

Але труднощі роботи з дистанційно керованим транспортним засобом зумовлені не тільки системою керування і живлення та взаємодією транспортного засобу з навколишньою місцевістю, а й особливостями конструкції і побудови самого транспортного засобу. Наприклад, гідравлічна

система (рис. 1.6) – невід’ємна частина безпілотного транспортного засобу. З її допомогою в дію приводяться робочі органи, а також і гідравлічні двигуни. Але гідравлічна сервосистема може не до кінця виконувати своє призначення через різні фактори: стисливість оливи, еластичні трубопроводи, затримки при спрацюванні гідравлічних клапанів, нелінійне тертя, непостійність навантажень. Також гідравлічна система керування робочими органами є “повільною”. Вона не може в конкретний момент часу одразу ж передати зусилля на робочий орган через вищеперелічені фактори. Даний факт є перешкодою при керуванні транспортним засобом і потребує, щоб усі вищеперелічені особливості були враховані при створенні алгоритму керування безпілотним транспортним засобом. Слід враховувати, що всі ці фактори посилюються при роботі транспортного засобу в складних умовах.

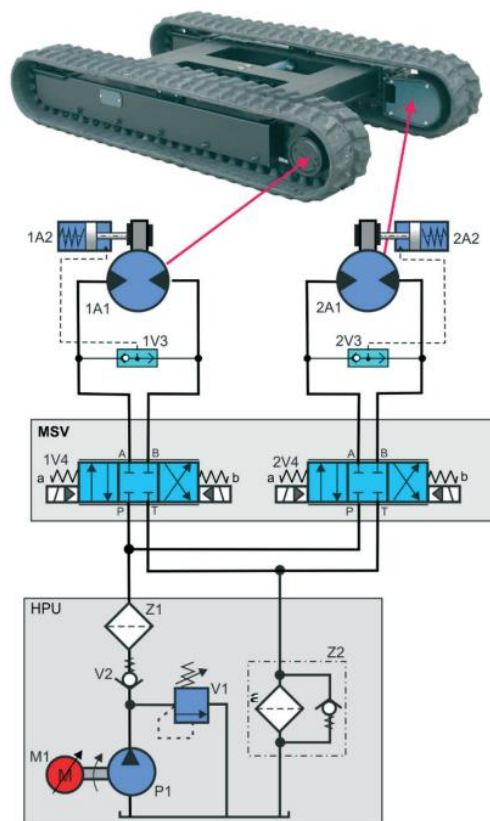


Рисунок 1.6 – Схема звичайної системи керування гідравлічним приводом гусеничної ходової частини [15].

#### 1.4 Висновки до розділу 1

У даному розділі було розглянуто методи керування безпілотним транспортним засобом, труднощі які виникають у процесі керування та практичні рішення, які на даний час використовуються у подібних машинах.

Можна зробити висновок, що адаптивна система керування найбільше універсальна, гнучка і найменше залежить від впливу невизначених параметрів моделі. Тому в сучасних транспортних засобах переважно використання саме такого типу системи керування.

Основні труднощі при експлуатації безпілотного транспортного засобу, в основному, пов'язані, окрім системи керування, зі зв'язком, живленням та побудовою його трансмісії.

На даний час велика кількість спеціалістів та розробників намагаються вирішувати ці проблеми різними способами, залежно від конкретної сфери застосування транспортного засобу, що проектується. Тому універсального їх рішення немає, все залежить від того, в яких умовах буде експлуатуватися транспортний засіб і які функції виконуватиме.

## 2 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ

### 2.1 Гідравлічні системи керування

Гідростатична трансмісія має багато переваг перед механічною повіднею. Одна з них – спрощення механічного розведення машиною. Це дозволяє виграти в надійності, тому що часто при великому навантаженні на машину кардани не витримують і доводиться ремонтувати транспортний засіб. За рахунок спрощення механічного розведення вдається також звільнити місце для додаткового обладнання. Використання гідростатичної трансмісії може дозволити повністю прибрати вали й мости, замінивши їх насосною системою і гідромоторами з редукторами, вбудованими прямо в повідні зірочки.

Серце системи – гідравлічні насоси, які приводяться в дію двигуном внутрішнього згоряння. В сучасних гусеничних транспортних засобах часто використовуються декілька насосів, щоб забезпечити продуктивність в різних режимах роботи. Насоси забирають робочу рідину з гідравлічного бака, який служить резервуаром и забезпечує охолодження і очищення оливи [16].

У гідравлічному насосі механічна енергія перетворюється на гідравлічну, тобто отримується у вигляді потоку оливи високого тиску. Далі цей потік від насоса проходить через трансмісійний трубопровід до гідравлічного двигуна. У двигуні гідравлічна енергія перетворюється на механічну, отже, у швидкість обертання та крутний момент, що отримуються від двигуна. Також потік високого тиску приводить в дію гідроциліндри, які пов'язані з робочими органами спеціального транспортного засобу.

Залежно від конструктивних особливостей, існують такі види гідравлічних насосів:

- аксіально-поршневі;
- шестеренні;

– пластинчасті.

Двостороннє незалежне керування повіднею гусеничних машин досягається шляхом регулювання швидкості обертання ведучих коліс з обох сторін. Структура подвійної системи гідростатичного приводу з насосом та гідравлічними двигунами для гусеничних машин показана на рисунку 2.1.

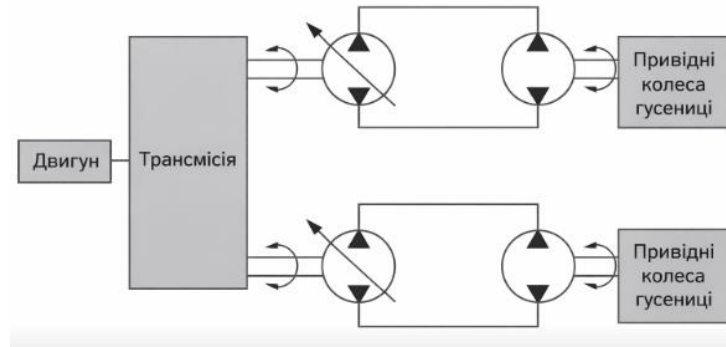


Рисунок 2.1 – Система керування гусеничним транспортним засобом

Дизельний двигун передає потужність на трансмісію, а вихідний вал трансмісії з'єднаний паралельно з двома двонаправленими змінними насосами. Змінні насоси та двигун утворюють замкнутий гідростатичний контур, який через насоси забезпечує швидкість та керування гідродвигунами, а гідродвигуни безпосередньо з'єднані з ведучими колесами гусениць для керування транспортним засобом.

Режим змінного потоку насоса:

$$q_p = x D_p \omega_p - C_{ip} (P_h - P_s) - C_{ep} P_h, \quad (2.1)$$

де  $x$  – коефіцієнт регулювання змінного об'єму насоса;

$D_p$  – змінний об'єм насоса;

$\omega_p$  – вхідна швидкість насоса;

$C_{ip}$  – коефіцієнт внутрішнього витоку насоса;

$P_h$  та  $P_s$  – значення тиску на високій та низькій сторонах відповідно;

$C_{ep}$  – коефіцієнт зовнішнього витоку насоса;

Модель робочого потоку двигуна:

$$q_m = q_p = C_{im}(P_h - P_s) + C_{em}P_h + D_m \frac{d\theta_m}{dt} + \frac{V_0}{\beta_e} \frac{dP_h}{dt}, \quad (2.2)$$

де  $C_{im}$  – коефіцієнт внутрішнього витоку двигуна;

$P_h$  та  $P_s$  – значення тиску на високій та низькій сторонах відповідно;

$C_{em}$  – коефіцієнт зовнішнього витоку двигуна;

$D_m$  – об'єм двигуна;

$\theta_m$  – кут повороту двигуна;

$V_0$  – загальний об'єм сторони високого тиску;

$\beta_e$  – модуль пружності гідравлічної оливи;

Рівняння балансу моменту двигуна та навантаження:

$$D_m(P_h - P_s) = J_m \frac{d^2\theta_m}{dt^2} + B_m \frac{d\theta_m}{dt} + T_l. \quad (2.3)$$

де  $D_m$  – об'єм двигуна;

$P_h$  та  $P_s$  – значення тиску на високій та низькій сторонах відповідно;

$J_m$  – загальна оберտальна інерція двигуна та навантаження;

$\theta_m$  – кут повороту двигуна;

$B_m$  – загальний коефіцієнт в'язкого демпфування двигуна та навантаження;

$T_l$  – зовнішній крутний момент навантаження, що діє на вал двигуна.

## 2.2 Електричні системи керування

Але в силу того, що транспортний засіб буде експлуатуватися в умовах близьких вибухів, це може призвести до пошкодження трубопроводів, які дуже

важко замінити в польових умовах. Тому доцільніше буде застосувати замість гідравлічної повідні ведучих зірочок електричну.

Перевагами електричної повідні є:

- простота передачі електричної енергії до віддалених виконавчих механізмів;
- можливість короткочасної роботи повідні із потужністю, що перевищує номінальну;
- можливість безступінчастого повороту, розгону та супутні їм збільшення середньої швидкості та зручність управління транспортним засобом.

Електрична повідня дозволяє розміщувати виконавчі механізми транспортної машини на великій відстані один від одного. Завдяки цьому спрощується конструкція повідні, внаслідок чого підвищується ККД та економиться місце у кузові шасі [17].

Під час диференціального рульового керування гусеничною машиною зовнішня гусениця ковзає, а внутрішня гусениця прослизає; кінематика рульового керування гусеничною машиною показана на рисунку 2.2.

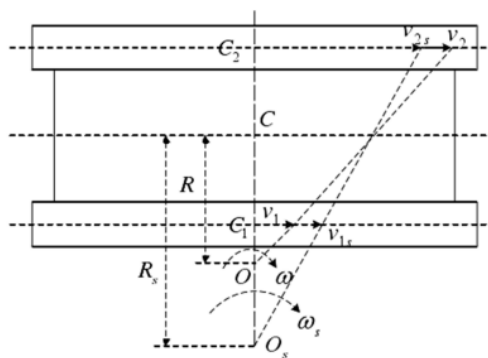


Рисунок 2.2 – Кінематичний аналіз керування гусеничними транспортними засобами

На рисунку 2.2  $V_1$  та  $V_2$  – це теоретичні швидкості руху внутрішньої та зовнішньої гусениць відповідно;  $O$  – теоретичний центр повороту транспортного засобу;  $R$  – теоретичний радіус повороту;  $\omega$  – теоретична кутова швидкість

рульового керування гусеничної машини;  $V_{1s}$  та  $V_{2s}$  – фактичні швидкості руху внутрішньої та зовнішньої гусениць відповідно;  $O_s$  – фактичний центр повороту транспортного засобу;  $R_s$  – фактичний радіус повороту;  $\omega_0$  – фактична кутова швидкість повороту гусеничної машини.

Згідно з теорією Баккера, коефіцієнт ковзання колії під час руху транспортного засобу можна розрахувати за допомогою наступного рівняння:

$$i = - \frac{K/L}{\ln (F/F_{max})}, \quad (2.4)$$

де  $K$  – коефіцієнт деформації ґрунту зсуву;

$L$  – довжина заземлення гусениці;

$F$  – сила зчеплення.

Фактичні швидкості внутрішньої та зовнішньої гусениць можна виразити як:

$$\begin{cases} v_{1s} = r\omega_1(1 + i_1) \\ v_{2s} = r\omega_2(1 + i_2) \end{cases} \quad (2.5)$$

де  $\omega_1$  – кутова швидкість обертання внутрішнього ведучого колеса;

$\omega_2$  – кутова швидкості обертання зовнішнього ведучого колеса;

$r$  – радіус ведучого колеса.

Фактичний радіус повороту становить:

$$R_s = \frac{B}{2} \cdot \frac{v_{2s} + v_{1s}}{v_{2s} - v_{1s}}, \quad (2.6)$$

де  $v_{1s}$  – фактична швидкість внутрішньої гусениці;

$v_{2s}$  – фактична швидкість зовнішньої гусениці;

$B$  – ширина гусениці.

Тангенціальна швидкість центру мас вздовж траєкторії руху керма дорівнює:

$$v_{CS} = \frac{v_{1s} + v_{2s}}{2}, \quad (2.7)$$

де  $v_{1s}$  – фактична швидкість внутрішньої гусениці;

$v_{2s}$  – фактична швидкість зовнішньої гусениці.

Кутова швидкість повороту керма становить:

$$W = \frac{v_{2s} - v_{1s}}{B}. \quad (2.8)$$

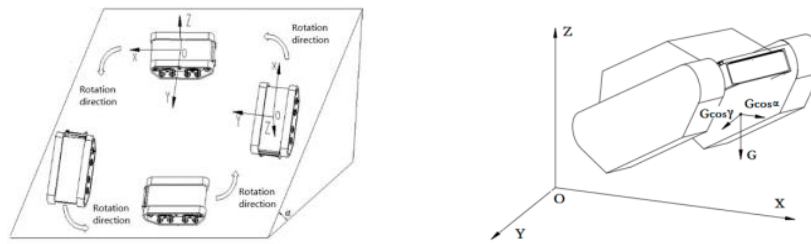
де  $v_{1s}$  – фактична швидкість внутрішньої гусениці;

$v_{2s}$  – фактична швидкість зовнішньої гусениці;

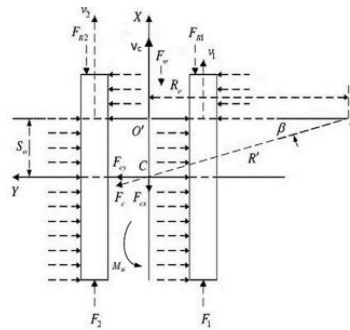
$B$  – ширина гусениці.

Керування гусеничними транспортними засобами на схилах можна розділити на чотири типові умови, як показано на рисунку 2.3, а. На процес керування гусеничною машиною впливають нахил ґрунту, рушійна сила, сила опору та відцентрова сила. Схема просторового керування гусеничними транспортними засобами показана на рисунку 2.3, б, а схему аналізу динаміки керування представлено на рисунку 2.3, в.

На рисунку 2.3, б прийняті наступні позначення:  $O - XYZ$  – система координат положення, що базується на корпусі гусеничного транспортного засобу; нехай кут осі  $OY$  гусеничного транспортного засобу відносно горизонтальної площини дорівнює  $\gamma$ , кут осі  $OX$  відносно горизонтальної площини дорівнює  $\alpha$ ;  $G$  – вага всього транспортного засобу, а складові сили  $G$  на осях  $OX$ ,  $OY$  –  $G\cos\alpha$  та  $G\cos\gamma$ .



а) умови керування на похилій поверхні; б) сила тяжіння та напрямки складових частин;



в) схема зусилля на землі

Рисунок 2.3 – Типові умови керування гусеничних транспортних засобів.

На рисунку 2.3, в позначено:  $F_1$  та  $F_2$  – рушійні сили гусениць з обох боків;  $F_{R1}$  та  $F_{R2}$  – опір коченню гусениць;  $M_\mu$  – момент опору керуванню;  $R_e$  – відстань від центру рульового керування до центральної лінії транспортного засобу (вісь  $X$ ).  $R_0$  – відстань від центру площини транспортного засобу (точка  $C$ ) до центру рульового керування ( $O$ );  $S_0$  – поздовжнє зміщення центру рульового керування;  $\beta$  – кут між напрямком відцентрової сили транспортного засобу та віссю  $Y$ ;  $h$  – висота центру мас. Вирази для рушійної сили та опору коченню з обох боків:

$$F_1 = \begin{cases} 0.5\varphi G \cdot \cos \gamma \frac{T_1 i \eta}{r} > 0.5\varphi G \cdot \cos \gamma \\ \frac{T_1 i \eta}{r} \frac{T_1 i \eta}{r} \leq 0.5\varphi G \cdot \cos \gamma \end{cases}, \quad (2.9)$$

$$F_2 = \begin{cases} 0.5\varphi G \cdot \cos \gamma \frac{T_2 i \eta}{r} > 0.5\varphi G \cdot \cos \gamma \\ \frac{T_2 i \eta}{r} \frac{T_2 i \eta}{r} \leq 0.5\varphi G \cdot \cos \gamma \end{cases}, \quad (2.10)$$

- де  $\varphi$  – коефіцієнт зчеплення з ґрунтом;  
 $G$  – вага транспортного засобу;  
 $\cos\gamma$  – кут осі ОУ;  
 $T_1$  та  $T_2$  – це крутний момент двигуна з обох боків відповідно;  
 $i$  – передавальний коефіцієнт бокової передачі;  
 $\eta$  – коефіцієнт передачі від двигуна до гусениці, де  $\eta = 0,941(0,97 - 0,03v)$ ;  
 $r$  – радіус ведучого колеса.

$$F_{R1} = F_{R2} = \frac{fG \cos \alpha}{2}, \quad (2.11)$$

- де  $f$  – коефіцієнт опору коченню;  
 $G$  – вага транспортного засобу;  
 $\cos\alpha$  – кут осі ОХ.  
 Поздовжня та поперечна складові відцентрової сили:

$$\begin{cases} F_{cx} = mR'^{w^2} \sin \beta \\ F_{cy} = mR'^{w^2} \cos \beta \end{cases} \quad (2.12)$$

- де  $m$  – маса транспортного засобу;  
 $R'^{w^2}$  – радіус колеса;  
 $\beta$  – кут між напрямком відцентрової сили транспортного засобу та віссю  
 У.

Поздовжнє зміщення центру рульового керування становить:

$$S_o = \frac{LF_{cy}}{2\psi G \cdot \cos \alpha}, \quad (2.13)$$

- де  $L$  – довжина заземлення гусениці;

$F_{cy}$  – поперечна складова відцентрової сили;

$\psi$  – коефіцієнт бокового кріплення;

$G$  – вага транспортного засобу з повним навантаженням;

$\cos\alpha$  – кут осі ОХ.

Момент опору кермовому управлінню можна виразити як:

$$M_{\mu} = \frac{1}{4} \mu G \cdot \cos \alpha \cdot L \left[ 1 - \left( \frac{2S_0}{L} \right)^2 \right], \quad (2.14)$$

де  $G$  – вага транспортного засобу з повним навантаженням;

$\cos\alpha$  – кут осі ОХ;

$L$  – довжина заземлення гусениці;

$S_0$  – поздовжнє зміщення центру рульового керування.

Коефіцієнт опору кермування можна розрахувати за емпіричною формулою Ніфті:

$$\mu = \frac{\mu_{max}}{0.925 + 0.15\rho} (\rho \geq 0.5), \quad (2.15)$$

де  $\rho$  – це відносний радіус повороту колеса,  $\rho = R/V$ .

З рівняння динамічної рівноваги гусеничного транспортного засобу рушійну силу обох колій можна виразити як [18]:

$$\begin{cases} F_2 + F_1 - (F_{R1} + F_{R2} + F_w \pm G \cdot \sin \alpha) - F_{cx} = m\dot{v}_c \\ (F_2 - F_1) \frac{B}{2} + (F_{R1} - F_{R2}) \frac{B}{2} - M_{\mu} = J\dot{\omega} \end{cases} \quad (2.16)$$

де  $F_1, F_2$  – рушійні сили;

$F_{R1}, F_{R2}, F_w$  – опори коченню;

$G$  – вага транспортного засобу з повним навантаженням;

$\sin\alpha$  – кут осі ОХ.

$F_{cx}$  – поздовжня складова відцентрової сили;

$m$  – маса транспортного засобу;

$\dot{v}_c$  – швидкість внутрішньої гусениці;

$B$  – ширина гусениці.

$M_\mu$  – момент опору керуванню;

$J$  – обертальна інерція двигуна та навантаження;

$\dot{\omega}$  – кутова швидкість.

Під час створення кінематичної моделі гусеничного транспортного засобу необхідно враховувати фактичні характеристики руху гусеничних транспортних засобів. На відміну від руху ідеального твердого тіла, гусеничні транспортні засоби демонструють складні явища ковзання під час процесів повороту.

Під час повороту гусеничного транспортного засобу допускається обмежене бічне ковзання, при цьому кут ковзання  $\beta$  визначається як кут між поздовжньою віссю транспортного засобу та напрямком швидкості. Коли відбувається бічне ковзання, у системі координат транспортного засобу з'являється бічна швидкість. Припустимо, що  $D$  – це відстань зміщення напрямку руху транспортного засобу, спричинена ковзанням гусениці під час диференціального рульового керування. Центр мас збігається з геометричним центром транспортного засобу.

Схему руху транспортного засобу показано на рисунку 2.4. Коли відбувається ковзання, фактичні лінійні швидкості лівої та правої ведучих зірочок становлять:

$$v_L = r\Omega_L(1 - \Theta_L) \quad (2.17)$$

$$v_R = r\Omega_R(1 - \Theta_R) \quad (2.18)$$

де  $r$  – радіус колеса;

$\Omega_L$  та  $\Omega_R$  – кутові швидкості лівої та правої гусениць;

$\Theta_L$  та  $\Theta_R$  – коефіцієнти ковзання лівої та правої гусениць.

Коефіцієнт ковзання  $\Theta$  являє собою різницю між фактичною лінійною швидкістю та ідеальною лінійною швидкістю в точці контакту гусениці з землею:

$$\theta = \frac{r\Omega - v}{r\Omega} \quad (2.18)$$

де  $v$  – фактична лінійна швидкість;

$r\Omega$  – ідеальна лінійна швидкість.

Швидкість у напрямку  $X$  у системі координат тіла транспортного засобу така:

$$v_x = \frac{v_L + v_R}{2} = \frac{r}{2} [(1 - \theta_L)\Omega_L + (1 - \theta_R)\Omega_R], \quad (2.19)$$

де  $v_L, v_R$  – фактична лінійна швидкості лівої та правої ведучих зірочок;

$r$  – радіус колеса;

$\Theta_L$  та  $\Theta_R$  – коефіцієнти ковзання лівої та правої гусениць;

$\Omega_L$  та  $\Omega_R$  – кутові швидкості лівої та правої гусениць.

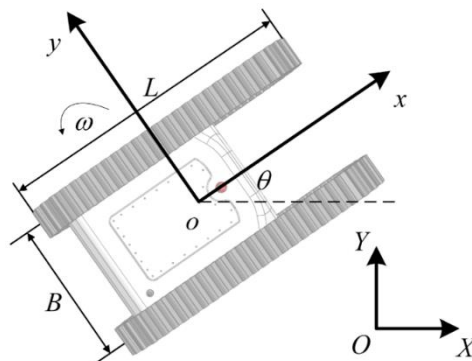


Рисунок 2.4 – Схема руху транспортного засобу

Кутова швидкість обертання транспортного засобу виражається наступним чином:

$$w = \frac{v_R - v_L}{B} = \frac{r}{B} [(1 - \theta_R)\Omega_R + (1 - \theta_L)\Omega_L], \quad (2.20)$$

де  $v_L, v_R$  – фактична лінійна швидкості лівої та правої ведучих зірочок;

$B$  – відстань між лівою і правою гусеницями;

$r$  – радіус колеса;

$\Theta_L$  та  $\Theta_R$  – коефіцієнти ковзання лівої та правої гусениць;

$\Omega_L$  та  $\Omega_R$  – кутові швидкості лівої та правої гусениць.

Враховуючи бічне ковзання, бічна швидкість транспортного засобу складається з двох компонентів: один – це бічний компонент –  $D$ , спричинений обертанням транспортного засобу, де знак мінус вказує на напрямок назовні, а інший – компонент  $v_x \tan \beta$ , спричинений бічним ковзанням.

$$D = \frac{L a_y}{2 \gamma t g} \cos \beta, \quad (2.21)$$

$$a_y = \frac{v^2}{R'} \sin \beta, \quad (2.22)$$

$$R' = \frac{\sqrt{v_x^2 + v_y^2}}{|w|} = \frac{B}{2 \cos \beta} \frac{\Omega_L(1 - \theta_L) + \Omega_R(1 - \theta_R)}{\Omega_L(1 - \theta_L) - \Omega_R(1 - \theta_R)}, \quad (2.23)$$

де  $L$  – характерна довжина контакту гусениці з ґрунтом;

$a_y$  – доцентрове прискорення;

$\gamma_t$  – коефіцієнт тертя між гусеницею та ґрунтом;

$\beta$  – кут ковзання;

$R'$  – миттєвий радіус повороту;

$B$  – відстань між лівою і правою гусеницями;

$\Omega_L$  та  $\Omega_R$  – кутові швидкості лівої та правої гусениць;

$\Theta_L$  та  $\Theta_R$  – коефіцієнти ковзання лівої та правої гусениць.

$$v_y = -D + v_x \tan \beta, \quad (2.24)$$

де  $D$  – відстань зміщення напрямку руху транспортного засобу, спричинена ковзанням;

$v_x$  – швидкість у напрямку  $X$ ;

$\beta$  – кут ковзання.

Перетворення між системою координат тіла та глобальною системою координат досягається за допомогою матриці обертання:

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix}, \quad (2.25)$$

де  $\Theta$  – коефіцієнт ковзання;

$v_x$  – швидкість у напрямку  $X$ ;

$v_y$  – швидкість у напрямку  $Y$ .

Неголономне рівняння обмеження для транспортного засобу у глобальній системі координат можна виразити наступним чином:

$$-\dot{X} \sin \theta + \dot{Y} \cos \theta + Dw = v_x \tan \beta, \quad (2.26)$$

де  $\dot{X}$  – лінійна швидкість вздовж глобальної осі  $X$ ;

$\dot{Y}$  – лінійна швидкість вздовж глобальної осі  $Y$ ;

$\theta$  – кут повороту;

$D$  – відстань зміщення напрямку руху транспортного засобу, спричинена ковзанням;

$w$  – кутова швидкість обертання транспортного засобу;

$v_x$  – швидкість у напрямку X;

$\beta$  – кут ковзання.

За неголономних обмежень глобальні рівняння руху транспортного засобу мають такий вигляд:

$$\begin{cases} \dot{X} = v_x \cos \theta + Dw \sin \theta - v_x \sin \theta \tan \beta \\ \dot{Y} = v_x \sin \theta - Dw \cos \theta + v_x \cos \theta \tan \beta, \\ \ddot{\Theta} = w \end{cases} \quad (2.27)$$

де  $v_x$  – швидкість у напрямку X;

$\theta$  – кут повороту;

$D$  – відстань зміщення напрямку руху транспортного засобу, спричинена ковзанням;

$\Theta$  – коефіцієнт ковзання;

$w$  – кутова швидкість обертання.

Рушійна сила гусениці транспортного засобу забезпечується двигунами.

Рушійна сила гусениці в системі координат тіла виражається наступним чином:

$$F_{dx} = \frac{1}{2r} (\tau_L + \tau_R), \quad (2.28)$$

де  $r$  – еквівалентний радіус системи приводу;

$\tau_L, \tau_R$  – крутні моменти, що видаються лівим та правим двигунами.

Під час роботи транспортного засобу сила тертя пропорційна нормальній силі та протилежна напрямку руху:

$$F_{rLx} = -\frac{1}{2} \gamma_t m g \frac{v_x - \frac{B}{2}w}{|v_x - \frac{B}{2}w| + \epsilon}, F_{rLy} = -\frac{1}{2} \gamma_t m g \frac{v_y}{|v_x - \frac{B}{2}w| + \epsilon} \quad (2.29)$$

$$F_{rRx} = -\frac{1}{2} \gamma_t m g \frac{v_x + \frac{B}{2}w}{|v_x + \frac{B}{2}w| + \epsilon}, F_{rRy} = -\frac{1}{2} \gamma_t m g \frac{v_y}{|v_x + \frac{B}{2}w| + \epsilon}, \quad (2.30)$$

де  $r$  – еквівалентний радіус системи приводу;  
 $\gamma_t$  – коефіцієнт тертя між гусеницею та ґрунтом;  
 $m$  – маса транспортного засобу;  
 $g$  – прискорення вільного падіння;  
 $v_x$  – швидкість у напрямку  $X$ ;  
 $B$  – відстань між двома гусеницями;  
 $\omega$  – кутова швидкість обертання;  
 $\epsilon$  – дуже мале додатне число, яке використовується, щоб уникнути ділення на нуль.

Загальні сили тертя в системі координат тіла становлять:

$$F_{rx} = F_{rLx} + F_{rRx}, F_{ry} = F_{rLy} + F_{rRy}, \quad (2.31)$$

де  $F_{rLx}, F_{rRx}$  – сила тертя лівої та правої гусениць;

Під час керування сила бокового ковзання пропорційна куту ковзання та діє вздовж осі  $y$  кузова транспортного засобу:

$$F_1 = 2 \sin(\omega) \gamma_t D \frac{mg}{L}, \quad (2.32)$$

де  $\omega$  – кутова швидкість обертання;

$\gamma_t$  – коефіцієнт тертя між гусеницею та ґрунтом;

$D$  – відстань зміщення напрямку руху транспортного засобу, спричинена ковзанням;

$m$  – маса транспортного засобу;

$g$  – прискорення вільного падіння;

$L$  – характерна довжина контакту гусениці з ґрунтом.

Згідно з другим законом Ньютона та з урахуванням сил інерції в обертовій системі координат, динамічні рівняння для транспортного засобу мають такий вигляд:

$$\begin{cases} M(\dot{v}_x - v_y w) = F_{dx} - F_{rx} \\ M(\dot{v}_y - v_x w) = -F_{ry} + F_l, \\ I\dot{\omega} = \tau_d - \tau_f - \tau_s \end{cases} \quad (2.33)$$

де  $M$  – маса транспортного засобу;

$\dot{v}_x$  – поздовжнє прискорення;

$\dot{v}_y$  – поперечне прискорення;

$v_x$  – швидкість у напрямку  $X$ ;

$v_y$  – швидкість у напрямку  $Y$ ;

$w$  – кутова швидкість обертання;

$F_{rLx}$ ,  $F_{rRx}$  – сила тертя лівої та правої гусениць;

$F_l$  – сила бокової реакції ґрунту на гусениці;

$\dot{\omega}$  – кутове прискорення;

$I$  – момент інерції транспортного засобу навколо вертикальної осі.

Рушійний крутний момент:

$$\tau_d = \frac{r}{B} (\tau_R - \tau_L) \quad (2.34)$$

де  $r$  – радіус колеса;

$B$  – відстань між двома гусеницями;

$\tau_L$ ,  $\tau_R$  – крутні моменти, що видаються лівим та правим двигунами.

Крутний момент тертя:

$$\tau_f = \frac{B}{2} (F_{rRx} - F_{rLx}) \quad (2.35)$$

де  $B$  – відстань між двома гусеницями;  
 $F_{rLx}, F_{rRx}$  – сила тертя лівої та правої гусениць.  
 Крутний момент бокового ковзання:

$$\tau_s = F_l \cdot D = 2 \sin(\omega) \gamma_t D^2 \frac{mg}{L} \quad (2.36)$$

де  $w$  – кутова швидкість обертання;  
 $\gamma_t$  – коефіцієнт тертя між гусеницею та ґрунтом;  
 $D$  – відстань зміщення напрямку руху транспортного засобу, спричинена ковзанням;  
 $m$  – маса транспортного засобу;  
 $g$  – прискорення вільного падіння;  
 $L$  – характерна довжина контакту гусениці з ґрунтом.  
 Переставляючи вищезазначені рівняння, отримуємо наступне [19]:

$$\begin{cases} \dot{u}_x = \frac{1}{M} \left[ \frac{\tau_R + \tau_L}{2r} - (F_{rRx} + F_{rLx}) \right] + v_y w \\ \dot{u}_y = \frac{1}{M} \left[ 2 \sin(\omega) \gamma_t D^2 \frac{mg}{L} - (F_{rRy} - F_{rLy}) \right] - v_x w \\ \dot{\omega} = \frac{1}{I} \left[ \frac{r(\tau_R - \tau_L)}{B} - \frac{B}{2} (F_{rRx} - F_{rLx}) \right] - 2 \sin(\omega) \gamma_t D^2 \frac{mg}{L} \end{cases} \quad (2.37)$$

де  $M$  – маса транспортного засобу;  
 $\tau_L, \tau_R$  – крутні моменти, що видаються лівим та правим двигунами;  
 $r$  – радіус колеса;  
 $v_x$  – швидкість у напрямку  $X$ ;  
 $v_y$  – швидкість у напрямку  $Y$ ;  
 $w$  – кутова швидкість обертання;  
 $\gamma_t$  – коефіцієнт тертя між гусеницею та ґрунтом;  
 $D$  – відстань зміщення напрямку руху транспортного засобу, спричинена ковзанням;

$m$  – маса транспортного засобу;

$g$  – прискорення вільного падіння;

$L$  – характерна довжина контакту гусениці з ґрунтом;

$F_{rLx}$ ,  $F_{rRx}$ ,  $F_{rLy}$ ,  $F_{rRy}$  – сила тертя лівої та правої гусениць;

$I$  – момент інерції.

### 2.3 Розробка структурної схеми системи керування

Далі розглянемо структурну схему роботи перемикання модуля руху (драйвера двигуна) транспортного засобу з основного на резервний рис. 2.5.

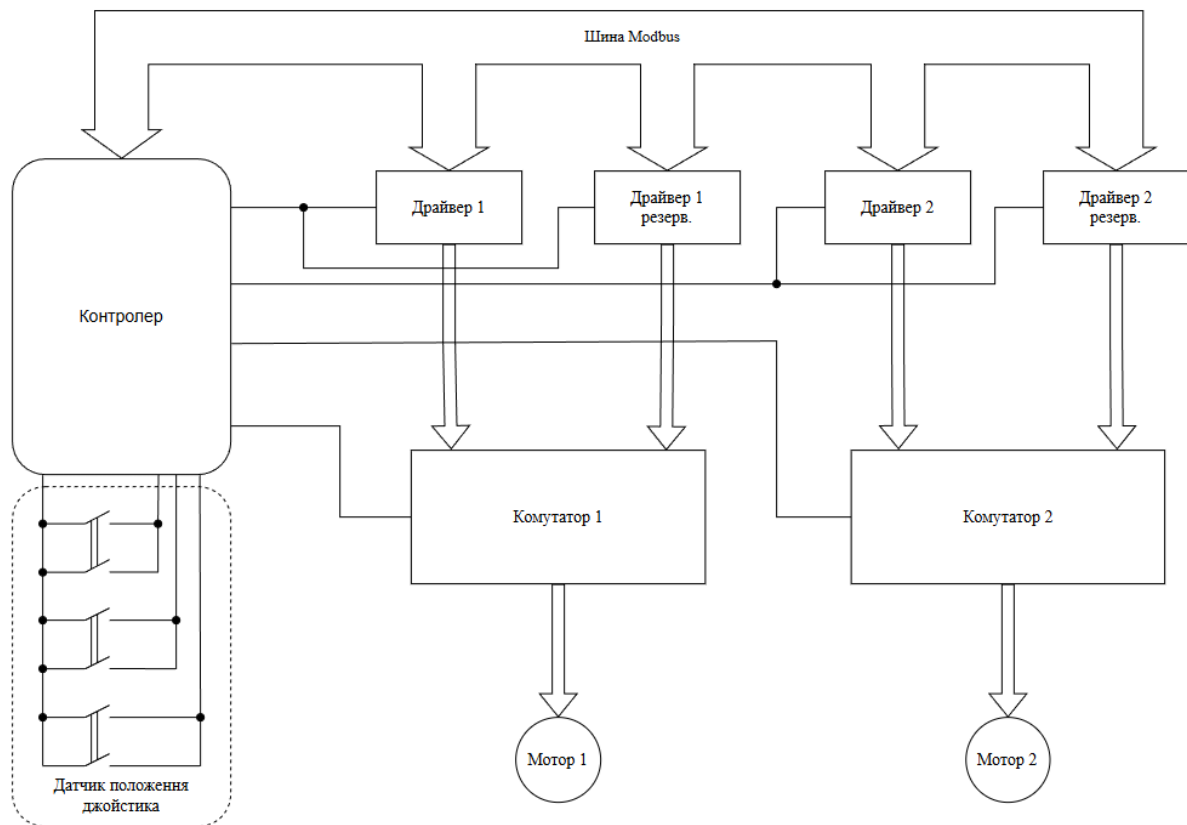


Рисунок 2.5 – Структурна схема включення резервних драйверів

Контролер мехатронного модуля має постійний зв'язок з основними і резервними драйверами через шину Modbus та безперервно опитує їх. Якщо в якийсь момент часу контролер не отримає сигналу-відповіді від основного

драйвера, він активує вихід, який вмикає комутатор або інший ключ, який перемикає двигун з основного драйвера на резервний. Оскільки датчик положення виконано у вигляді групи звичайних кінцевих вимикачів, для їх дублювання буде достатньо паралельно встановити ще по одному вимикачу по центру та з кожної сторони.

За допомогою Modbus протоколу постійно опитуються основні та резервні драйвери. Якщо контролер отримує відповідь від основних драйверів, то система працює в штатному режимі. Якщо ж відповідь від основного драйвера не отримана, то контролер посилає керуючий сигнал на комутатор який перемикає з основного на резервний драйвер. Якщо ж відповідь від резервного драйвера також не отримана, то контролер сигналізує про несправність драйвера і робить аварійну зупинку [20].

## 2.4 Висновки до розділу 2

У даному розділі були розглянуті найбільш перспективні у даний час типи трансмісій, а також закономірності руху транспортного засобу у складних умовах.

Для майбутнього проекту було обрано електричний тип трансмісії, а також розроблений попередній алгоритм роботи системи управління транспортним засобом на основі принципів адаптивного керування. Підвищена надійність цієї системи зумовлена використанням метода дублювання її вузлів.

## 3 МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ДИСТАНЦІЙНОГО КЕРУВАННЯ ТРАНСПОРТНИМ ЗАСОБОМ

### 3.1 Опис макета

Моделювання системи керування проводилося у програмному середовищі Matlab Simulink.

Matlab – це інтерактивна система, в якій основним елементом даних є масив. Це дозволяє вирішувати різні завдання, пов'язані з технічними обчисленнями, особливо в яких використовуються матриці та вектори, у кілька разів швидше, ніж при написанні програм з використанням "скалярних" мов програмування, таких як Сі або Фортран.

Matlab розвивався протягом кількох років, орієнтуючись на різних користувачів. В університетському середовищі, він був стандартним інструментом для роботи в різних галузях математики, машинобудування та науки. У промисловості, Matlab – це інструмент для високопродуктивних досліджень, розробок та аналізу даних.

Simulink, супутня програма Matlab, – це інтерактивна система для моделювання нелінійних динамічних систем. Вона являє собою середовище, кероване мишею, яке дозволяє моделювати процес шляхом перетягування блоків діаграм на екрані та їх маніпуляцією. Simulink працює з лінійними, нелінійними, безперервними, дискретними, багатовимірними системами.

За отриманою структурною схемою системи керування побудуємо макет для моделювання роботи системи (рис. 3.1).

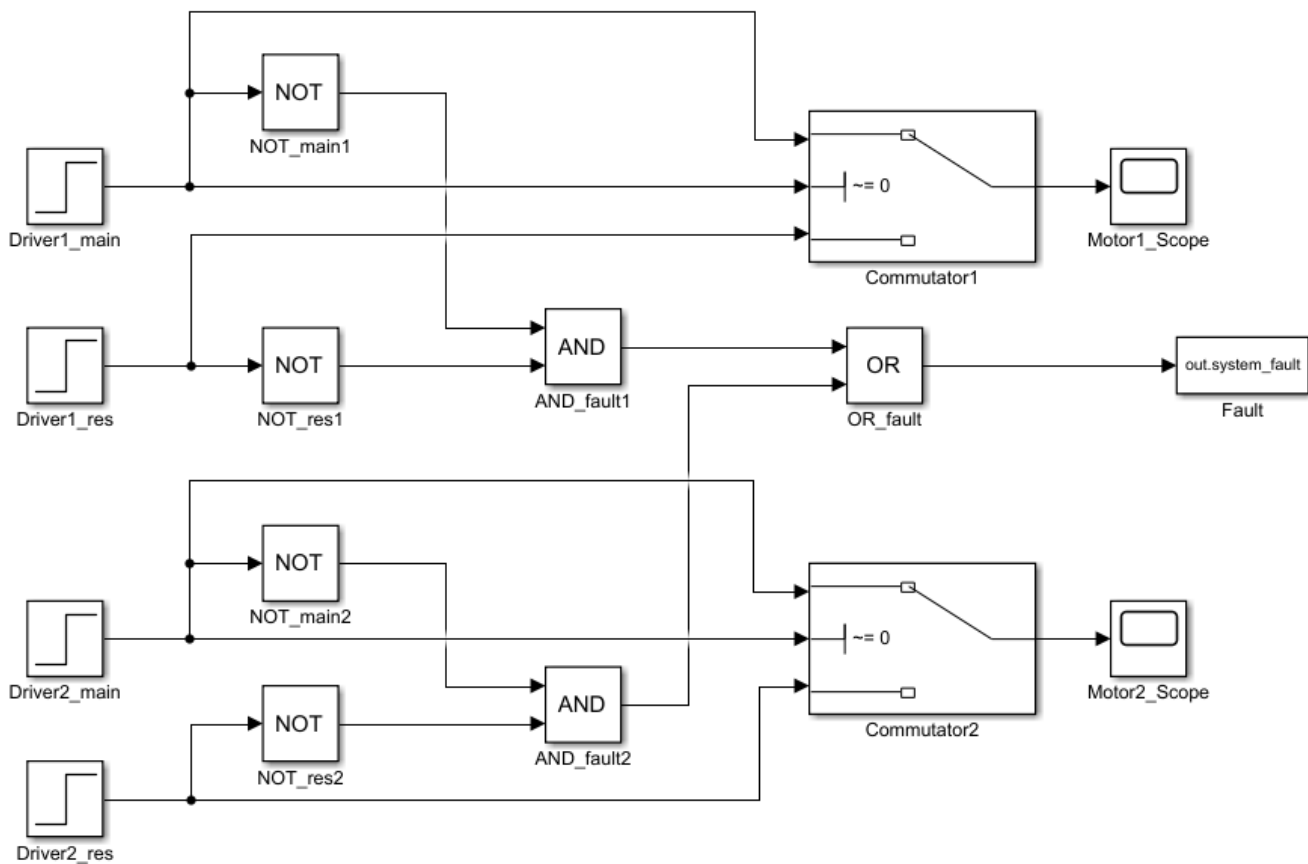


Рисунок 3.1 – Схема для моделювання роботи системи

У цій схемі блоки Driver1, Driver2 імітують сигнали від основних драйверів (рис. 3.2, а), а Driver1\_res, Driver2\_res від резервних (рис. 3.2, б).

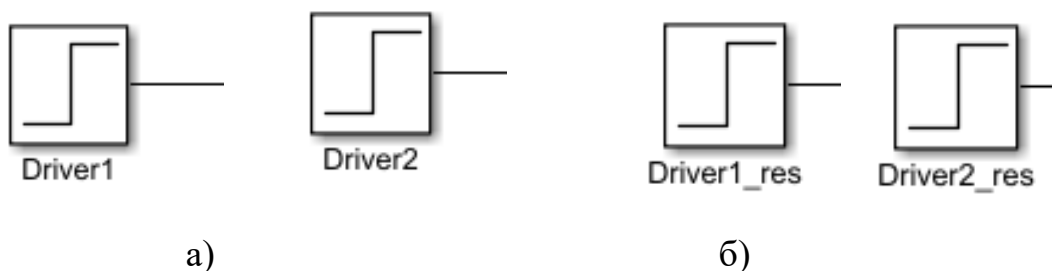


Рисунок 3.2 – Блоки Driver1, Driver2 (а); Блоки Driver1\_res, Driver2\_res (б)

Блоки Commutator1 і Commutator2 (рис. 3.3) при отриманні керуючого сигналу перемикають двигуни з основних драйверів на резервні.

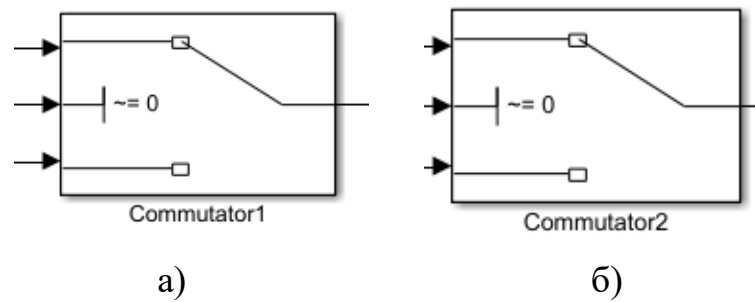


Рисунок 3.3 – Блоки Commutator1 і Commutator2

Блоки Motor1\_Scope і Motor2\_Scope (рис. 3.4) імітують тягові двигуни. Рисунок 3.8 – 3.10 відображають їх роботу.

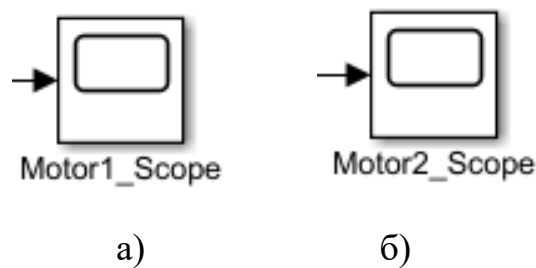


Рисунок 3.4 – Блоки Motor1\_Scope і Motor2\_Scope

Логічні блоки NOT, AND і OR виконують допоміжну функцію. Вони виявляють момент, коли обидва драйвери (і основний, і резервний) виходять з ладу. В цей момент система видає сповіщення про помилку.

Блоки NOT\_main1, NOT\_main2 (рис. 3.5) інвертують сигнали, отримані від основних драйверів. Якщо на вхід такого блоку надходить 1 – драйвер працює справно, якщо 0 – помилка драйвера. Якщо драйвер справний, на виході блока присутній сигнал низького рівня, якщо драйвер виходить з ладу – сигнал високого рівня. Блоки NOT\_res1, NOT\_res2 виконують аналогічну функцію, але для резервних драйверів.



### 3.2 Принцип роботи моделі

Роботу системи будемо розбирати з моменту, коли всі вузли справні і працюють в штатному режимі. При цьому драйвери подають сигнали на комутатори і двигуни під'єднані до основних драйверів. Розглянемо роботу однієї з повідней двигунів, принцип роботи другої аналогічний.

В штатному режимі драйвер видає сигнал високого рівня, комутатор, отримуючи цей сигнал, утримує двигун під'єднаним до основного драйвера. Якщо основний драйвер виходить з ладу, то комутатор отримує сигнал низького рівня, перемикає контакти і під'єднує двигун до резервного драйвера.

Після цього робота двигуна продовжується з використанням резервного драйвера. Після усунення несправності в основному драйвері або його заміни він знову почне видавати сигнал високого рівня і комутатор під'єднає двигун саме до нього.

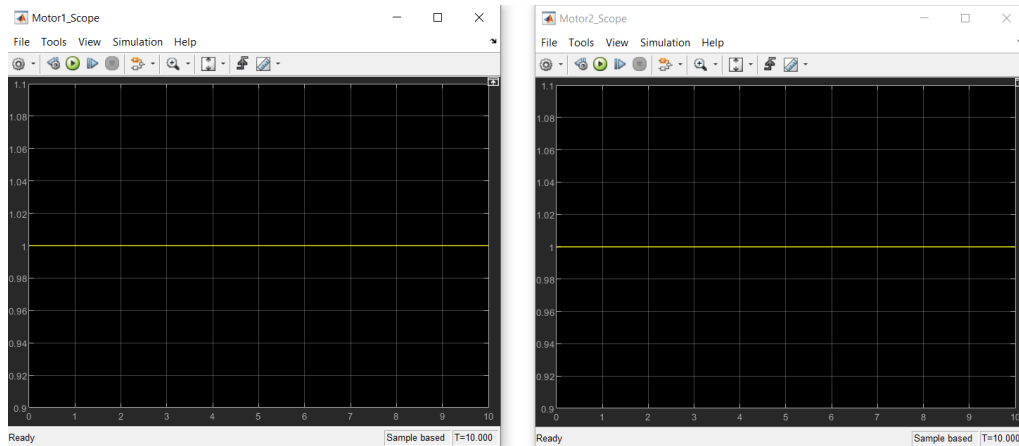
Якщо до усунення несправності основного драйвера вийде з ладу і резервний, то їх низькі вихідні сигнали, інвертуючись блоками NOT, надходять до блоку AND, який перевіряє, чи обидва драйвери вийшли з ладу. Далі сигнал високого рівня надійде до блоку OR, де відбувається поєднання аварійних сигналів з обох повідней і система видасть помилку.

Штатна робота системи відновиться тоді, коли будуть усунені несправності хоча б в одному з драйверів.

Під час виходу з ладу основного драйвера і перемикання двигуна на резервний відбудеться його короткочасна зупинка, пов'язана з затримкою при перемиканні контактів комутатора. Але вона буде тривати менше секунди і не матиме відчутного впливу на рух транспортного засобу.

На даний момент розроблені безконтактні комутатори на основі польових транзисторів, які дозволяють перемикати силові контури майже миттєво. Крім швидкості, у таких комутаторів є ще одна перевага – це відсутність механічних контактів, що суттєво підвищує надійність пристрою комутації.

Результат моделювання при справних основних драйверах зображено на рисунку 3.8.



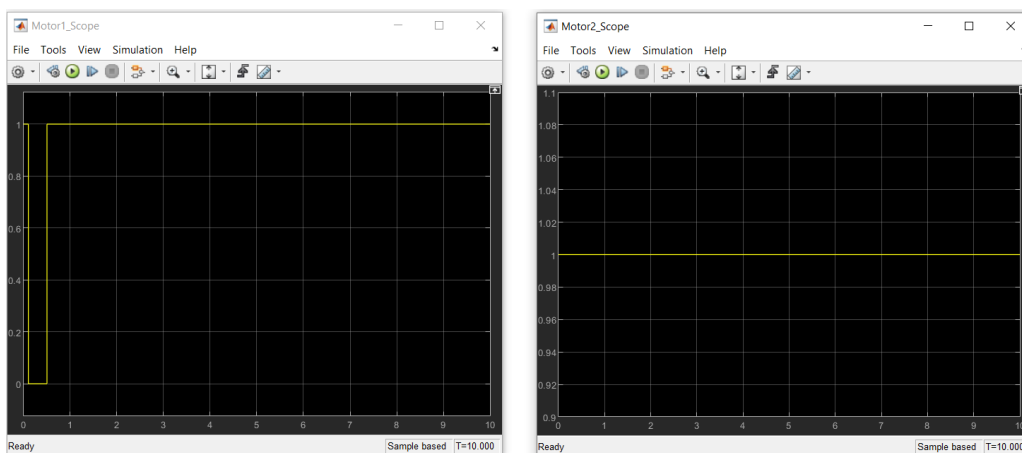
а)

б)

Рисунок 3.8 – Обидва драйвера двигуна 1 (а) і двигуна 2 (б) працюють справно

На рисунку 3.8 пряма лінія без провалів означає, що драйвери працювали справно передаючи сигнали на двигуни, без включення резервних драйверів.

Результат моделювання при несправному основному драйвері зображено на рисунку 3.9.



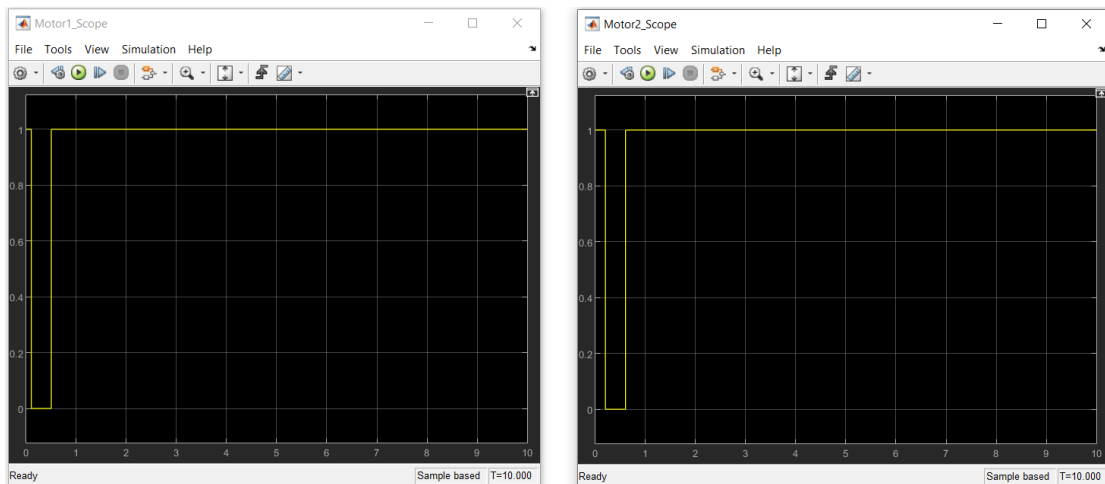
а)

б)

Рисунок 3.9 – Несправний драйвер двигуна 1 (а), та працюючий драйвер двигуна 2 (б)

На рисунку 3.9, а бачимо спочатку штатну роботу драйвера двигуна 1 але потім його відмову і переключення на резервний. У свою чергу драйвер двигуна 2 працює справно.

Результат моделювання при обох несправних драйверах зображено на рисунку 3.10.



а)

б)

Рисунок 3.10 – Несправний драйвер двигуна 1 (а), та несправний драйвер двигуна 2 (б)

На рисунку 3.10 зображено відмову обох основних драйверів першого та другого двигунів, та одразу ж включення резервних.

Розрахуємо передавальну функцію системи. Позначимо вхідні сигнали для першого двигуна:

- $m_1(t)$  – сигнал від першого драйвера;
- $r_1(t)$  – сигнал від першого резервного драйвера;
- $G_1(s) = \frac{K_1}{\tau_1 s + 1}$ .

Аналогічно для другого двигуна:

- $m_2(t)$  – сигнал від другого драйвера;
- $r_2(t)$  – сигнал від другого резервного драйвера;
- $G_2(s) = \frac{K_2}{\tau_2 s + 1}$ .

Тоді сигнал резервування першого двигуна:

$$u_1(t) = m_1(t) + r_1(t)(1 - m_1(t)) \quad (3.1)$$

де  $m_1(t)$  – сигнал від першого драйвера;  
 $r_1(t)$  – сигнал від першого резервного драйвера.

Спростимо:

$$u_1(t) = m_1(t) + r_1(t) - m_1(t)r_1(t) \quad (3.2)$$

де  $m_1(t)$  – сигнал від першого драйвера;  
 $r_1(t)$  – сигнал від першого резервного драйвера.

Тоді сигнал резервування другого двигуна:

$$u_2(t) = m_2(t) + r_2(t) - m_2(t)r_2(t) \quad (3.3)$$

де  $m_2(t)$  – сигнал від другого драйвера;  
 $r_2(t)$  – сигнал від другого резервного драйвера.

За допомогою перетворення Лапласа:

$$U_i(s) = L\{u_i(t)\}, Y_i(s) = L\{y_i(t)\} \quad (3.4)$$

де  $u_i(t)$  – вхід відповідного каналу;  
 $y_i(t)$  – вихід відповідного каналу.

Далі маємо зв'язок між входом та виходом:

$$Y_1(s) = G_1(s)U_1(s) \quad (3.5)$$

де  $G_1(s)$  – передавальна функція ланки;

$U_1(s)$  – вхідний сигнал у  $s$ -області.

$$G_1(s) = \frac{K_1}{\tau_1 s + 1} \quad (3.5)$$

де  $K_1$  – коефіцієнт підсилення;

$\tau_1(s)$  – стала часу.

Підставивши вираз (3.2) у вираз (3.5) маємо остаточну передавальну функцію:

$$Y_1(s) = G_1(s)(m_1(t) + r_1(t) - m_1(t)r_1(t)) \quad (3.6)$$

де  $G_1(s)$  – передавальна функція ланки;

$m_1(t)$  – сигнал від першого драйвера;

$r_1(t)$  – сигнал від першого резервного драйвера.

Аналогічно для другого двигуна:

$$Y_2(s) = G_2(s)(m_2(t) + r_2(t) - m_2(t)r_2(t)) \quad (3.7)$$

де  $G_2(s)$  – передавальна функція ланки;

$m_2(t)$  – сигнал від другого драйвера;

$r_2(t)$  – сигнал від другого резервного драйвера.

Схема підключення компонентів системи виглядає наступним чином (рис. 3.11). Розробка і моделювання роботи схеми проводилось за допомогою онлайн-сервісу Tinkercad. Вона імітує помилку драйверів двигуна за допомогою перемикачів. За допомогою цього здійснюється керування моторами.

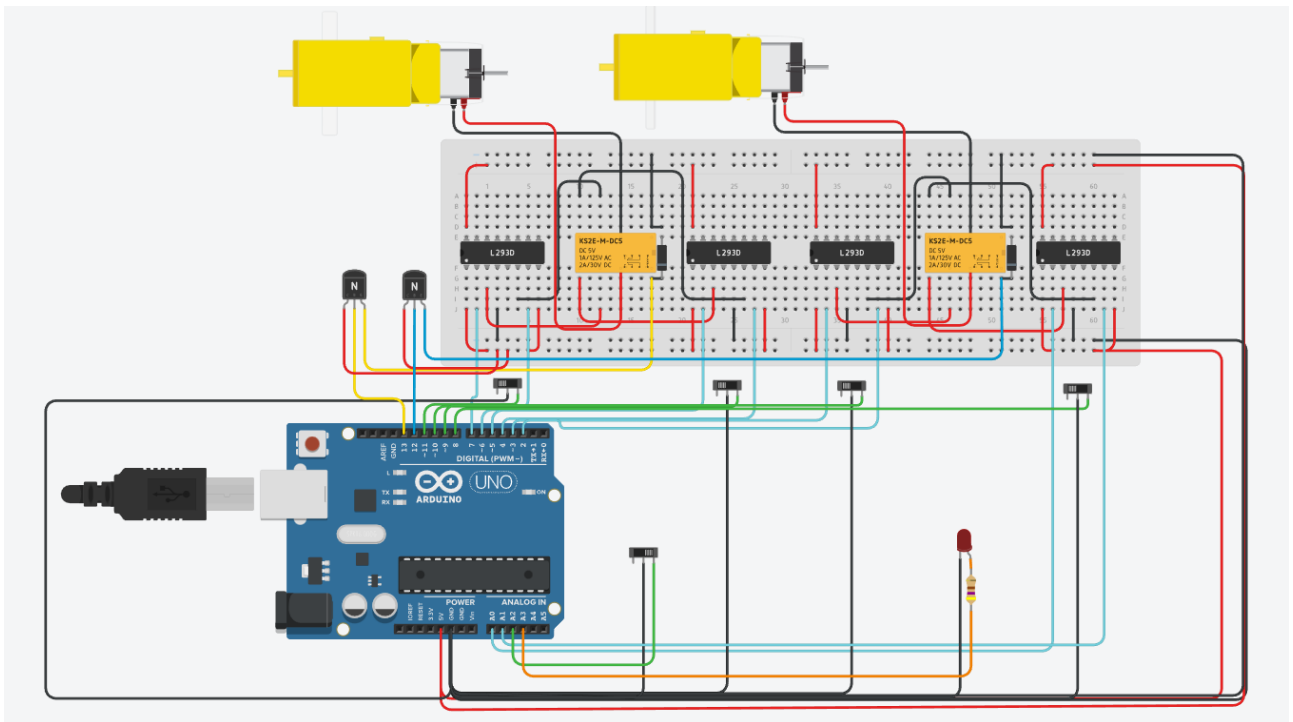


Рисунок 3.11 – Схема підключення компонентів системи

Основним компонентом системи є мікроконтролер Arduino Uno, який запрограмовано відповідно до принципу роботи системи. Виконавчими механізмами є два електродвигуни і два електромагнітних двополюсних реле. Контролер керує цими моторами за допомогою драйверів. Кожен мотор керується двома драйверами – одним основним і резервним. Лампа розжарювання слугує індикатором несправної роботи двигуна. Перемикачі, як було сказано раніше слугують імітацією помилки роботи драйвера. Також ще один перемикач слугує імітацією сигналу від джойстика про запуск моторів.

При відмові основного драйвера електродвигуна, контролер подає сигнал на електромагнітне реле яке замикає контакти і переключає електродвигун на резервний драйвер. Якщо основний драйвер електродвигуна починає відповідати, електромагнітне реле переключає електродвигун назад на основний драйвер. Якщо відмовляє резервний драйвер, а основний продовжує роботу в штатному режимі, система також продовжує роботу в штатному режимі. Якщо ж відмовили обидва драйвери і основний, і резервний контролер зупиняє двигун і запалюється індикаторний світлодіод. При заміні будь-якого драйвера чи при

поновленні його роботи, електромеханічне реле підключає мотор до цього драйвера.

### 3.3 Принцип роботи коду

У першому блоці коду (рис. 3.12) знаходяться оголошення змінних. У рядку `int SW_START = A2` позначаємо підключення перемикача який імітує сигнала джойстика до піна A2 Arduino. У рядках `int SW_M1_MAIN = 11`, `int SW_M1_RES = 10` відбувається підключення перемикачів, що імітують помилку основного і резервного драйверів першого мотора. Далі у рядках `int SW_M2_MAIN = 9`, `int SW_M2_RES = 8` робимо те саме але для основного і резервного драйверів мотора 2. Рядки `int RELAY_M1 = 13`, `int RELAY_M2 = 12` означають підключення електромагнітних двополюсних реле до пінів Arduino. Далі йде підключення входних пінів основних (`int M1_MAIN_IN1 = 7`, `int M1_MAIN_IN2 = 6`) і резервних (`int M1_RES_IN1 = 5`, `int M1_RES_IN2 = 4`) драйверів першого мотора. Те ж саме і для другого мотора (основні – `int M2_MAIN_IN1 = 3`, `int M2_MAIN_IN2 = 2`; резервні – `int M2_RES_IN1 = A0`, `int M2_RES_IN2 = A1`). У рядку `int LED_STOP = A3` відбувається підключення до контролера індикаторного світлодіода, який сигналізує про помилку.

```
int SW_START    = A2;
int SW_M1_MAIN  = 11;
int SW_M1_RES   = 10;
int SW_M2_MAIN  = 9;
int SW_M2_RES   = 8;

int RELAY_M1    = 13;
int RELAY_M2    = 12;

int M1_MAIN_IN1 = 7;
int M1_MAIN_IN2 = 6;
int M1_RES_IN1  = 5;
int M1_RES_IN2  = 4;

int M2_MAIN_IN1 = 3;
int M2_MAIN_IN2 = 2;
int M2_RES_IN1  = A0;
int M2_RES_IN2  = A1;

int LED_STOP    = A3;
```

Рисунок 3.12 – Перший блок коду

Наступним блоком коду є функції руху мотора (рис. 3.13). Функція `void motorStop()` – це зупинка електромотора, `void motorForward()` – рух першого електромотора, `motorForwardInverted` – рух другого електромотора.

```
void motorStop(int in1, int in2) {
    digitalWrite(in1, LOW);
    digitalWrite(in2, LOW);
}

void motorForward(int in1, int in2) {
    digitalWrite(in1, HIGH);
    digitalWrite(in2, LOW);
}

void motorForwardInverted(int in1, int in2) {
    digitalWrite(in1, LOW);
    digitalWrite(in2, HIGH);
}
```

Рисунок 3.13 – Другий блок коду

У третьому блоці коду (рис. 3.14 – рис. 3.15) знаходиться функція `void setup()`, у якій за допомогою команди `pinMode` встановлюємо піни як входи для перемикачів і як виходи для електромагнітних реле `pinMode(RELAY_M1, OUTPUT)`, моторів `pinMode(M1_MAIN_IN1, OUTPUT)` та індикатора несправності `pinMode(LED_STOP, OUTPUT)`. Також вказуємо, що на старті мотори нерухомі `motorStop(M1_MAIN_IN1, M1_MAIN_IN2)`, `motorStop(M1_RES_IN1, M1_RES_IN2)`, вимкнені електромагнітні реле `digitalWrite(RELAY_M1, LOW)`, `digitalWrite(RELAY_M2, LOW)` і індикатор помилки теж неактивний `digitalWrite(LED_STOP, LOW)`.

```

void setup() {
  pinMode(SW_START,      INPUT_PULLUP);
  pinMode(SW_M1_MAIN,    INPUT_PULLUP);
  pinMode(SW_M1_RES,     INPUT_PULLUP);
  pinMode(SW_M2_MAIN,    INPUT_PULLUP);
  pinMode(SW_M2_RES,     INPUT_PULLUP);

  pinMode(RELAY_M1,     OUTPUT);
  pinMode(RELAY_M2,     OUTPUT);

  pinMode(M1_MAIN_IN1,  OUTPUT);
  pinMode(M1_MAIN_IN2,  OUTPUT);
  pinMode(M1_RES_IN1,   OUTPUT);
  pinMode(M1_RES_IN2,   OUTPUT);

```

Рисунок 3.14 – Третій блок коду (реле і мотори)

```

  pinMode(M2_MAIN_IN1,  OUTPUT);
  pinMode(M2_MAIN_IN2,  OUTPUT);
  pinMode(M2_RES_IN1,   OUTPUT);
  pinMode(M2_RES_IN2,   OUTPUT);

  pinMode(LED_STOP,     OUTPUT);

  motorStop(M1_MAIN_IN1, M1_MAIN_IN2);
  motorStop(M1_RES_IN1,  M1_RES_IN2);
  motorStop(M2_MAIN_IN1, M2_MAIN_IN2);
  motorStop(M2_RES_IN1,  M2_RES_IN2);

  digitalWrite(RELAY_M1, LOW);
  digitalWrite(RELAY_M2, LOW);
  digitalWrite(LED_STOP, LOW);
}

```

Рисунок 3.15 – Третій блок коду (зупинка моторів, реле і індикатор)

Далі йде основний цикл програми (рис. 3.16). У циклі `if(SW_START)` перевіряється умова активації головного вимикача. Тобто якщо вимикач не натиснуто, система зупиняє роботу моторів і гасить індикатор. Але якщо вимикач натиснуто, двигуни запускаються.

```

if (digitalRead(SW_START) == HIGH) {
  motorStop(M1_MAIN_IN1, M1_MAIN_IN2);
  motorStop(M1_RES_IN1, M1_RES_IN2);
  motorStop(M2_MAIN_IN1, M2_MAIN_IN2);
  motorStop(M2_RES_IN1, M2_RES_IN2);
  digitalWrite(LED_STOP, LOW);
  return;
}

```

Рисунок 3.16 – Перевірка головного вимикача

Далі перевіряється стан перемикачів першого електромотора. Тут логіка роботи коду ідентична як для першого електромотору, так і для другого (рис. 3.17 – рис. 3.18). Оператор `digitalRead(SW_M1_MAIN)` зчитує натискання перемикача основного драйвера першого мотора. Якщо `swM1Main == true`, то основний перемикач першого електромотора увімкнено. Далі перевіряється така ж умова і для резервного перемикач першого електромотора. Команда `m1Stopped = false` показує що перший електромотор зупинений. Використовується для вимкнення індикатора помилки.

```

bool swM1Main = digitalRead(SW_M1_MAIN) == LOW;
bool swM1Res  = digitalRead(SW_M1_RES)  == LOW;
bool m1Stopped = false;

```

Рисунок 3.17 – Зчитування станів перемикачів першого електромотора

```

bool swM2Main = digitalRead(SW_M2_MAIN) == LOW;
bool swM2Res  = digitalRead(SW_M2_RES)  == LOW;
bool m2Stopped = false;

```

Рисунок 3.18 – Зчитування станів перемикачів другого електромотора

У наступному циклі відбувається керування електродвигуном (рис. 3.19 – рис. 3.20). За допомогою логічного І, умова виконується тільки тоді коли увімкнені обидва вимикачі основного і резервного драйверів першого

електромотора. Оператор `motorStop(M1_MAIN_IN1, M1_MAIN_IN2)` вимикає основний драйвер, а `motorStop(M1_RES_IN1, M1_RES_IN2)` вимикає резервний. Команда `digitalWrite(RELAY_M1, LOW)` вимикає реле першого електродвигуна.

```
if (swM1Main && swM1Res) {
  motorStop(M1_MAIN_IN1, M1_MAIN_IN2);
  motorStop(M1_RES_IN1, M1_RES_IN2);
  delay(20);
  digitalWrite(RELAY_M1, LOW);
  m1Stopped = true;
}
```

Рисунок 3.19 – Зупинка першого електромотора

```
if (swM2Main && swM2Res) {
  motorStop(M2_MAIN_IN1, M2_MAIN_IN2);
  motorStop(M2_RES_IN1, M2_RES_IN2);
  delay(20);
  digitalWrite(RELAY_M2, LOW);
  m2Stopped = true;
}
```

Рисунок 3.20 – Зупинка другого електромотора

Далі розглядається умова ввімкнення перемикача основного драйвера електромотора при тому, що перемикач резервного драйвера не ввімкнений (рис. 3.21). Оператор `motorStop(M1_MAIN_IN1, M1_MAIN_IN2)` вимикає основний драйвер, далі команда `digitalWrite(RELAY_M1, HIGH)` перемикає живлення на резервний драйвер. Зупинка резервного драйвера перед його запуском за допомогою `motorStop(M1_RES_IN1, M1_RES_IN2)` і сам запуск першого електродвигуна через резервний драйвер за допомогою оператора `motorForward(M1_RES_IN1, M1_RES_IN2)`. Результат роботи цього блоку команд – перепід'єднання двигуна від основного драйвера до резервного.

```

else if (swM1Main && !swM1Res) {
    motorStop(M1_MAIN_IN1, M1_MAIN_IN2);
    delay(20);
    digitalWrite(RELAY_M1, HIGH);
    delay(50);
    motorStop(M1_RES_IN1, M1_RES_IN2);
    delay(10);
    motorForward(M1_RES_IN1, M1_RES_IN2);
}

```

Рисунок 3.21 – Перемикання роботи першого електродвигуна з основного драйвера на резервний

На рисунку 3.22 показано аналогічний блок команд для другого електродвигуна.

```

else if (swM2Main && !swM2Res) {
    motorStop(M2_MAIN_IN1, M2_MAIN_IN2);
    delay(20);
    digitalWrite(RELAY_M2, HIGH);
    delay(50);
    motorStop(M2_RES_IN1, M2_RES_IN2);
    delay(10);
    motorForward(M2_RES_IN1, M2_RES_IN2);
}

```

Рисунок 3.22 – Перемикання роботи другого електродвигуна з основного драйвера на резервний

У цій частині коду реалізується логіка повторної відповіді основного драйвера після його відмови (рис. 3.23 – рис. 3.24). В такому випадку оператор `motorStop(M1_RES_IN1, M1_RES_IN2)` зупиняє роботу резервного драйвера, далі команда `digitalWrite(RELAY_M1, LOW)` вимикає реле і двигун під'єднується до основного драйвера, а оператор `motorForward(M1_MAIN_IN1, M1_MAIN_IN2)` запускає його вже через основний драйвер. Таким чином

реалізується перемикання електродвигуна з резервного драйвера на основний після усунення несправності або заміни основного драйвера.

```
else if (!swM1Main) {
    motorStop(M1_RES_IN1, M1_RES_IN2);
    delay(20);
    digitalWrite(RELAY_M1, LOW);
    delay(50);
    motorStop(M1_MAIN_IN1, M1_MAIN_IN2);
    delay(10);
    motorForward(M1_MAIN_IN1, M1_MAIN_IN2);
}
```

Рисунок 3.23 – Відновлення роботи основного драйвера першого електромотора

```
else if (!swM2Main) {
    motorStop(M2_RES_IN1, M2_RES_IN2);
    delay(20);
    digitalWrite(RELAY_M2, LOW);
    delay(50);
    motorStop(M2_MAIN_IN1, M2_MAIN_IN2);
    delay(10);
    motorForward(M2_MAIN_IN1, M2_MAIN_IN2);
}
```

Рисунок 3.24 – Відновлення роботи основного драйвера другого електромотора

В останній частині кода реалізується керування індикаторним світлодіодом для відображення помилки роботи системи (рис. 3.25). За допомогою логічного АБО якщо хоча б один електромотор зупиняється, оператор `digitalWrite(LED_STOP, HIGH)` запалює індикаторну лампочку. Команда `digitalWrite(LED_STOP, LOW)` вимикає лампочку якщо електромотор працює.

```

if (m1Stopped || m2Stopped) {
  digitalWrite(LED_STOP, HIGH);
} else {
  digitalWrite(LED_STOP, LOW);
}

```

Рисунок 3.25 – Керування індикаторною лампочкою

Результати роботи програми при імітації помилок всіх драйверів електродвигунів зображено на рис. 3.26 – рис. 3.31. Повний код програми представлено у додатку Б.

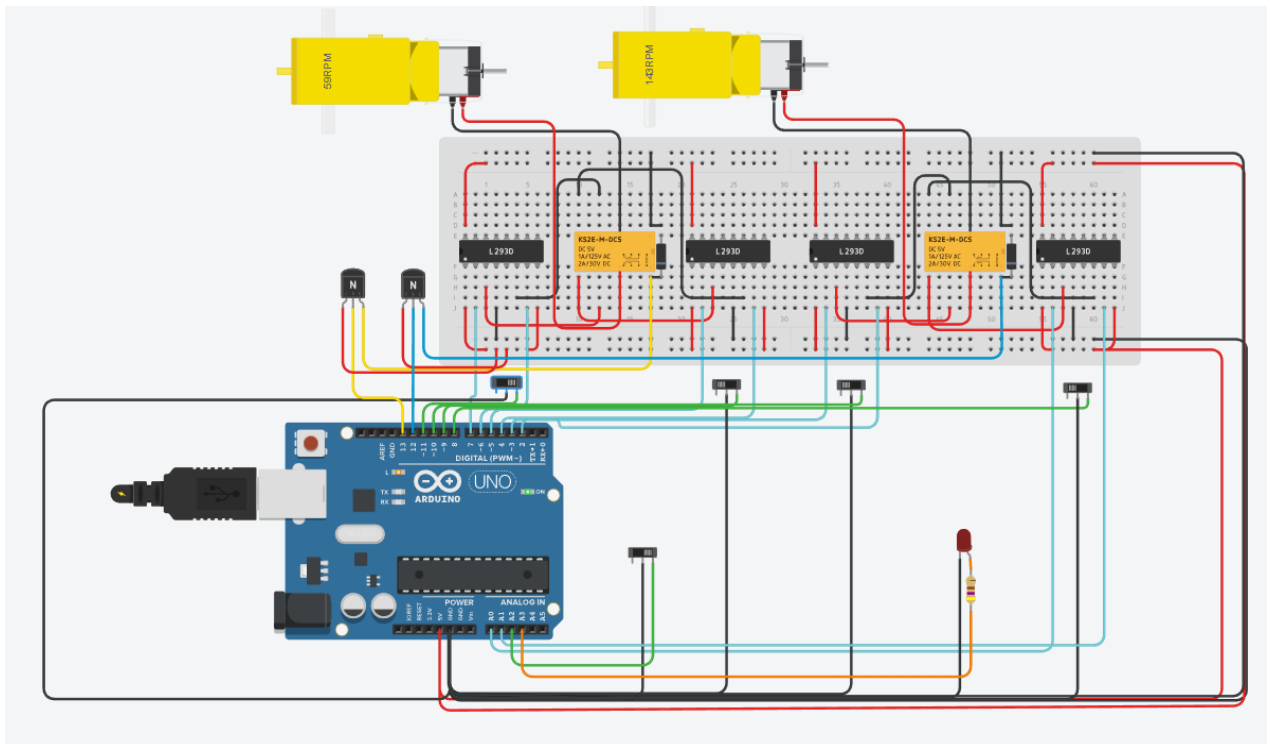


Рисунок 3.26 – Перемикання першого електродвигуна з основного драйвера на резервний

На рисунку 3.26 показано результат роботи схеми при імітації відмови основного драйвера першого двигуна. Після замикання контактів відповідного перемикача спрацьовує реле і перемикає двигун з основного драйвера на резервний.

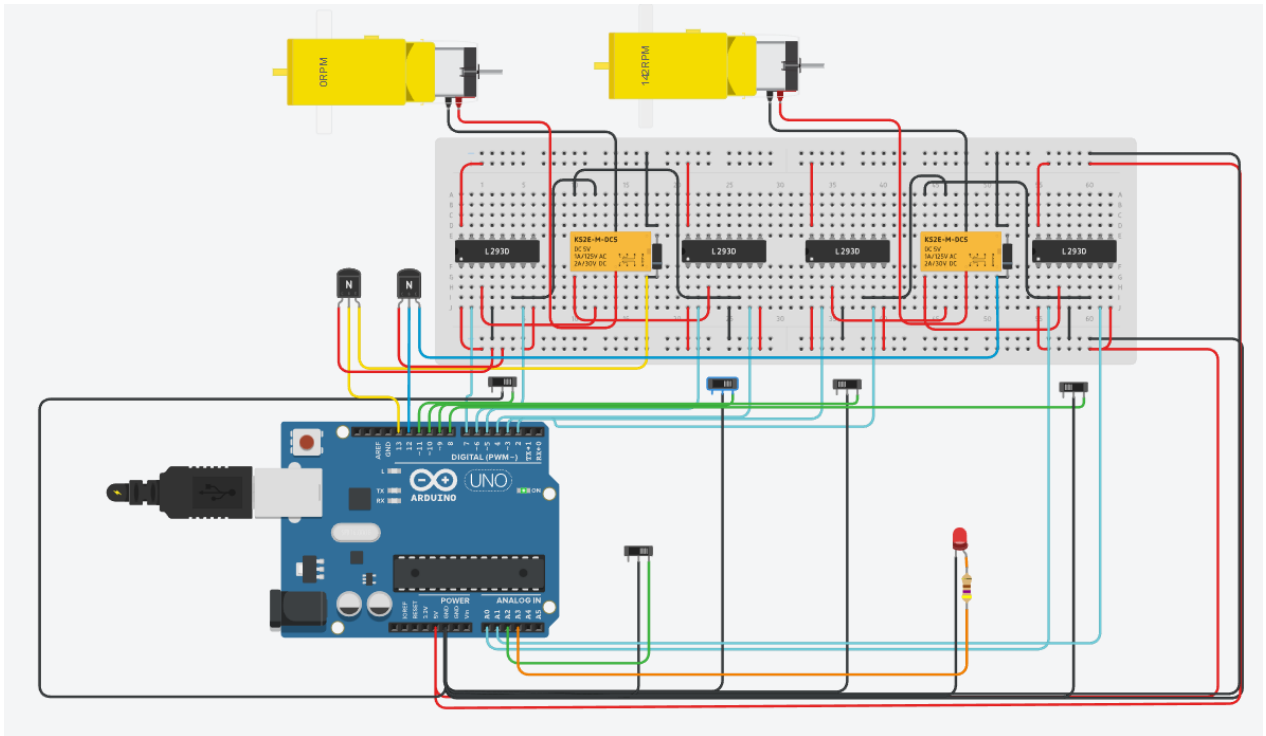


Рисунок 3.27 – Відмова основного і резервного драйверів першого електромотора

На рисунку 3.27 зображена ситуація, коли під час роботи першого двигуна з резервним драйвером останній теж виходить з ладу. Електромотор зупиняється і запалюється індикаторний світлодіод, що сигналізує про несправність.

Рисунок 3.28 ілюструє роботу схеми у разі відновлення працездатності основного драйвера після помилки. При розмиканні контактів відповідного перемикача гасне аварійний світлодіод, вимикається електромагнітне реле, електродвигун знову під'єднується до основного драйвера і продовжує роботу.

На рисунку 3.29 показано ситуацію, аналогічну до зображеної на рисунку 3.26, але для другого електродвигуна. Імітація відмови його основного драйвера призводить до перемикання на резервний.

На рисунку 3.30 зображено стан системи при відмові обох драйверів другого електромотора. Він зупиняється і вмикається аварійний світлодіод.

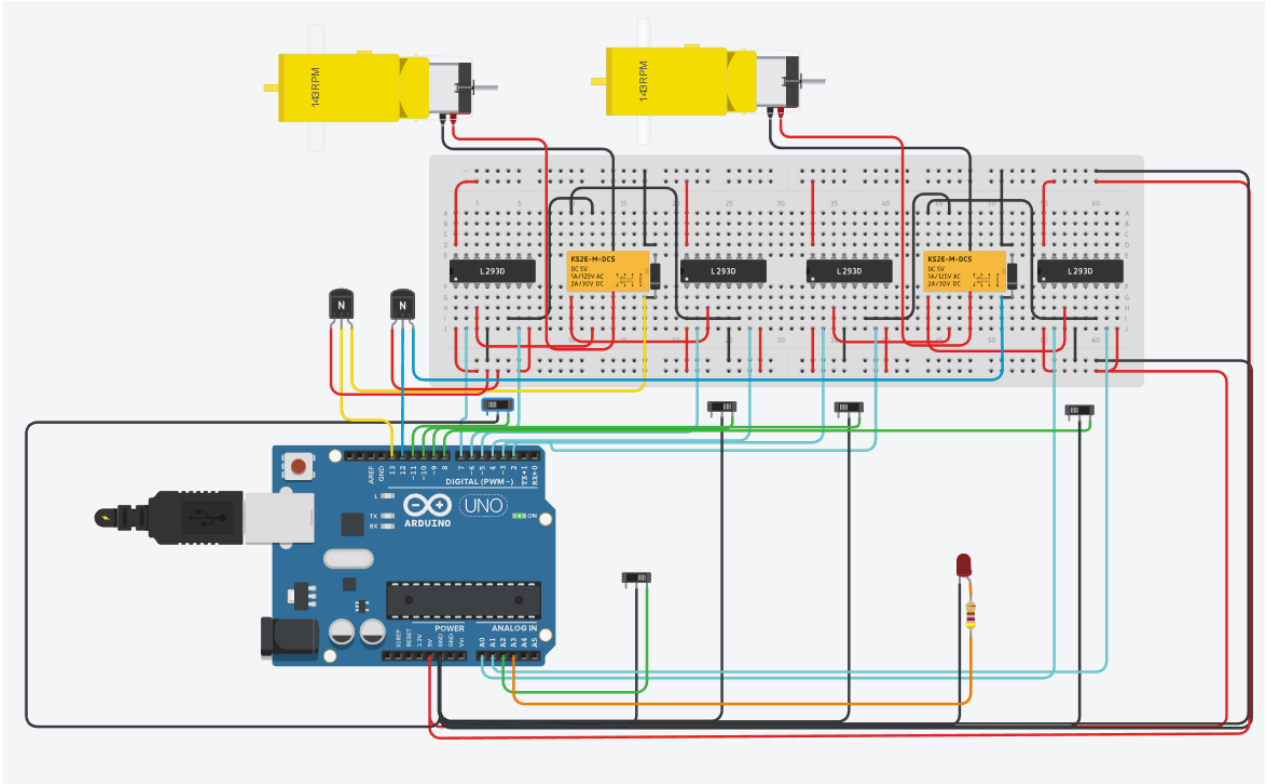


Рисунок 3.28 – Відновлення роботи основного драйвера першого електромотора

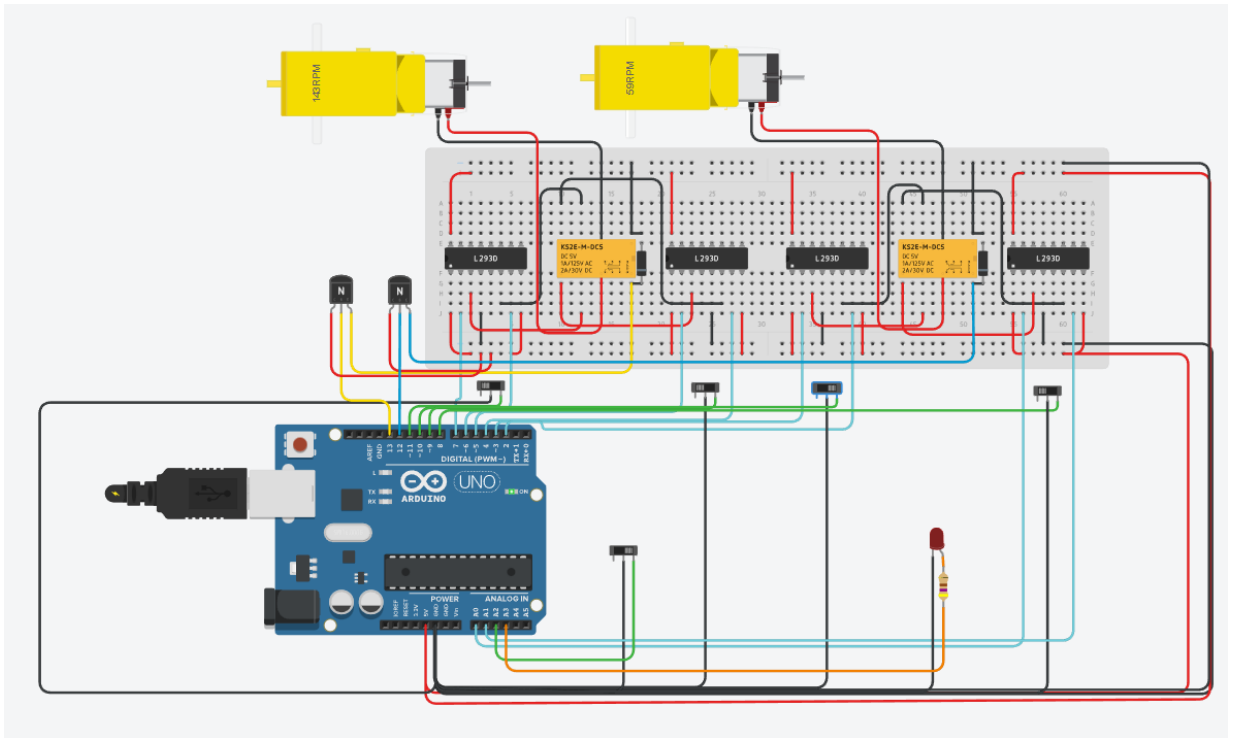


Рисунок 3.29 – Переключення другого електродвигуна з основного драйвера на резервний

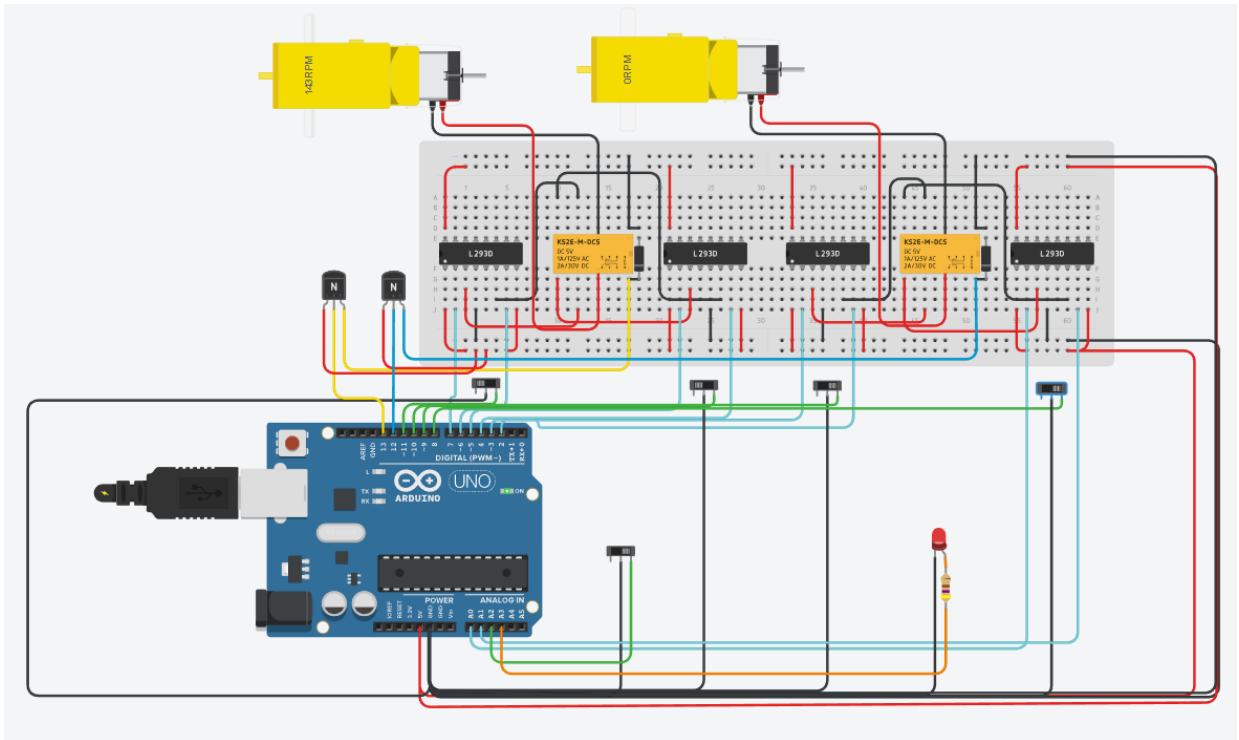


Рисунок 3.30 – Відмова основного і резервного драйверів другого електромотора

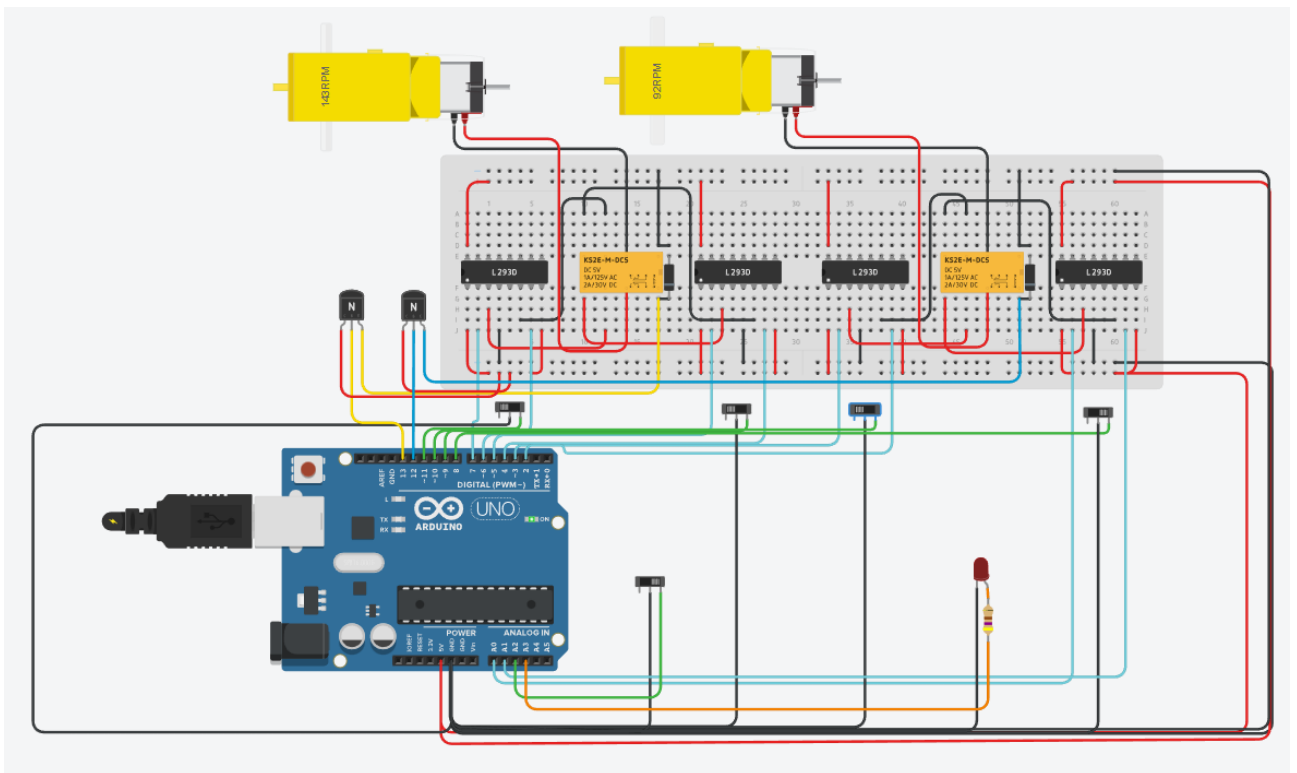


Рисунок 3.31 – Відновлення роботи основного драйвера другого електромотора

Рисунок 3.31 ілюструє вмикання другого двигуна після відновлення працездатності основного драйвера (аналогічно показаному на рисунку 3.28 для першого електромотора).

### 3.4 Висновки до розділу 3

В цьому розділі була описана практична частина проекту. Спочатку алгоритм роботи системи було відпрацьовано у програмі Matlab Simulink. Далі за допомогою онлайн-ресурса Tinkercad була побудована практична схема макета на основі контролера Arduino UNO і розроблений код для нього.

Симуляція роботи схеми разом з програмним кодом показала роботоздатність розробленого алгоритма, що підтверджують наведені скріншоти і графіки.

Систему керування, розроблену в даному проекті, можна використовувати за основу при конструюванні реальних безпілотних транспортних засобів.

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ

### 4.1 Заходи безпеки під час гуманітарного розмінування

З метою запобігання нещасних випадків при знаходженні особового складу на замінованій місцевості або при виявленні вибухонебезпечних предметів необхідно виконувати наступні заходи безпеки:

– при виявленні мін або при підозрі на мінування не можна самостійно намагатися витягувати міну з місця установки або знешкодити її. Добрий професіонал завжди попідкується, щоб встановлена ним міна мала пристрій невитягування та незнешкодження. Таку роботу повинні виконувати сапери. До їх прибуття необхідно загородити або помітити небезпечну ділянку спеціальними знаками з написом «міни», а особовий склад повинен знаходитись на безпечній відстані від мін.

– як правило, на мінних полях встановлюються змішані (протитанкові та протипіхотні) міни. При знаходженні в небезпечній близькості від мін особовий склад може постраждати від вибуху (по збіганню терміну самоліквідації, при спрацюванні від гілок що впали, при сильному пориві вітру і т.д.). В залежності від типу та конструкції осколочних боєприпасів, деякі з них можуть бути небезпечні на відстані до 300 метрів.

– міни знімаються з місця та знешкоджуються тільки в тому випадку, коли по умовах обстановки підрив їх на місці неможливий. При цьому витягування мін з місця установки необхідно виконувати при допомозі саперної «кішки» з безпечної відстані.

– роботи по розмінуванню повинні виконуватись в спеціальному спорядженні (захисному костюмі сапера). Нажаль, такого спорядження, як правило, не має, тому обходяться тільки бронежилетом.

– необхідно пам'ятати, що поставлені міни майстерно маскуються. Для ускладнення їх пошуку міношукачами розсипають велику кількість осколків,

гільз. Для зменшення чутливості собак мінно-розшукової служби міни можуть поливати паливно-мастильними матеріалами, розсипати навколо подрібнену вибухову речовину.

– у випадку виявлення предмету невідомого призначення, забороняється брати його в руки, необхідно припинити роботи та викликати спеціаліста.

– категорично забороняється приносити в розташування військ та зберігати вибухонебезпечні предмети.

– категорично забороняється розряджати, кидати або ударяти по виявленим вибухонебезпечним предметам.

– забороняється стягувати та розбирати руками дротяні загороди, висмикувати проволочку, виявлену на землі, в траві або кущах, тому що біля них можуть бути встановлені міни-сюрпризи натяжної дії. Проволоку необхідно стягувати за допомогою «кішки» з мотузкою довжиною 50 м, знаходячись в укритті.

– місця для розведення вогнищ необхідно перекопати на глибину 40-60 см та перевірити на відсутність вибухонебезпечних предметів щупом або металошукачем.

– рух гусеничної та колісної техніки дозволяється через передній край оборони противника тільки по проходам, попередньо оглянутим саперами. Відхил техніки від визначених маршрутів забороняється.

– категорично забороняється знищення вибухонебезпечних предметів особам, які не мають спеціального на те дозволу-допуску [21].

#### 4.2 Заходи безпеки при суцільному розмінуванні

Відповідальними за дотримання заходів безпеки є командир групи розмінування. При розмінуванні місцевості забороняється:

- допускати скупчення особового складу під час виконання завдання;
- ходити поза проходами і по неперевірених місцевості;

- викручувати підривники з артилерійських снарядів, мінометних мін, гранат,
- авіабомб та інших боєприпасів, що не вибухнули;
- зсувати з місця або забирати дротяні та інші невибухові загородження без попередньої перевірки їх на наявність мін;
- вилучати або випалювати вибухову речовину з боєприпасів, що не вибухнули або неповністю вибухнули;
- розташовувати особовий склад поблизу складів боєприпасів або зібраних під час розмінування мін та інших вибухонебезпечних предметів;
- використовувати не за призначенням вибухові речовини та засоби підривання, боєприпаси, запалювальні й освітлювальні суміші тощо;
- розпалювати вогнища на ділянках місцевості, що підлягають очищенню від ВВП;
- курити під час очищення території від ВВП, транспортуванні та знищенні ВВП;
- приносити в розташування підрозділів будь-які вибухонебезпечні предмети.

Категорично ЗАБОРОНЕНО збирати і зберігати наступні боєприпаси:

- авіаційні бомби, що не вибухнули;
- артилерійські снаряди зі слідами нарізів на ведучому пояску;
- мінометні міни зі слідами удару бойка на капсулі хвостового патрону;
- артилерійські снаряди і мінометні міни з механічними пошкодженнями корпусу або підривників;
- ручні гранати із встановленими запалами, без чек і спускових важелів;
- інженерні міни і підривні заряди з пошкодженим корпусом або підривником, підривником, що не піддається викручуванню, міни з неконтактними підривниками, а також міни встановлені засобами дистанційного мінування.

### 4.3 Заходи безпеки при розкопуванні боєприпасів

На місці відкопування боєприпасу має право знаходитись тільки особовий склад групи розмінування, а також безпосередні і прямі начальники. До виконання завдання допускається особовий склад, який засвоїв заходи безпеки та здав залік.

На поверхні ґрунту місце відкопування повинне мати огорожу (поручні). Інструмент і деталі кріплення забороняється розміщувати ближче 2 метрів від краю відкопування.

Всі транспортні засоби та механізми повинні бути в справному стані. Працювати з несправними механізмами суворо забороняється. Особливу увагу необхідно звертати на справність підйомних механізмів і пристосувань. Троси, канати, гальмівні і стопорні пристрої повинні оглядатися командиром групи розмінування кожного разу перед початком роботи.

На барабані підйомного механізму при опусканні вантажу повинно залишатися не менше трьох витків каната.

Для спуску і підйому людей, котлован повинен бути обладнаний сходами та рятувальними мотузками. Підйом і опускання вантажів виконується тільки по команді старшого розрахунку. Працюючий в забої особовий склад повинен застосовувати тільки встановлений спосіб виконання робіт і тип кріплення.

Обстеження ґрунту за допомогою глибинного металевого щупа проводиться на глибину не більше 1,5м. Щуп занурюється в ґрунт шляхом вдавлювання без будь-яких ударів.

Забороняється стрибати на дно котловану. Вантажі (бадді, грейфери, деталі кріплення) опускаються на дно котловану плавно без поштовхів. Розвантажувати бадді (грейфери) слід, на як можливо, меншій висоті.

Стан кріплення потрібно перевіряти щоразу перед початком роботи та вході виконання роботи. Якщо буде помічено значне вивалювання ґрунту у

котловані або випирання кріплення, слід негайно піднятися на поверхню. Подальшу роботу проводити за вказівкою командира групи розмінування.

Всі виявлені вибухонебезпечні предмети другої категорії знищуються на місці.

Всі роботи з очищення місцевості від ВНП повинні бути закінчені до початку робіт по знищенню. Перед знищенням ВНП необхідно виставити оточення та заблокувати під'їзні шляхи, виставити дорожні знаки з метою запобігання випадковій появі транспортних засобів та особового складу на місці проведення знищення вибухонебезпечних предметів.

При виконанні підривних робіт обов'язково повинен бути присутній медичний персонал.

Знищення вибухонебезпечного предмету проводиться в світлий час доби за узгодженням з представниками органів місцевої влади, органів екологічної безпеки, органів правопорядку, місцевими підрозділами Міністерства з надзвичайних ситуацій, які розташовані поблизу місця знищення ВНП.

Виконанням підривних робіт на обладнаному місці керує командир загону (групи) розмінування.

Проведення підривних робіт вважається однією з найбільш складних і відповідальних операцій, пов'язаних з очищенням території полігонів від ВНП. В день завершення підривних робіт складається акт про їх виконання.

Загальні заходи безпеки при знищенні ВНП:

- всі вибухонебезпечні предмети вважати боєприпасами другої категорії до проведення їх оцінки командиром групи розмінування;
- ретельно перевіряти місцевість навколо вибухонебезпечного предмету, який розміщений на поверхні ґрунту перед початком робіт ще до його знищення;
- не торкатись бойових елементів касетних боєприпасів;
- у випадку відмови спрацювання ВНП під час його знищення, негайно доповідати командирю загону (групи) розмінування;

– електродетонатори у відкриті заряди вставляти лише безпосередньо перед проведенням вибуху за наказом командира групи розмінування, при цьому осіб, не пов'язаних з виконанням вказаної операції, відводити на безпечну відстань від зарядів;

– до закінчення робіт по установці електродетонаторів в заряди і відходу людей на безпечну відстань джерело струму до магістральних дротів не підключати;

– при обладнанні електровибухових мереж передбачати захист їх від дії грозових розрядів;

– перед грозою ділянкові дроти від'єднувати від магістральних, кінці ділянкових дротів розводити в сторони і ретельно ізолювати;

– не розташовувати дроти електровибухових мереж ближче 200 м від електричних станцій, підстанцій, високовольтних ліній, електрифікованих залізниць та потужних радіостанцій;

– приводні ручки від підривних машинок, а також джерела струму зберігати під охороною і видавати фахівцю з розмінування безпосередньо перед проведенням вибуху за наказом (з дозволу) командира групи розмінування;

– перед підключенням малого омметра М-57 до мережі з метою її перевірки на справність, заздалегідь переконатись в його справності та придатності до роботи;

– перевірку електровибухових мереж малим омметром М-57 проводити лише після віддалення всіх саперів на безпечну відстань від місць розташування зарядів;

– кінці магістральних дротів на підривній станції тримати ізольованими із підв'язаними до них бирками, що позначають, від якої групи зарядів йдуть ті або інші дроти;

– перед проведенням вибуху, після відведення всіх саперів на безпечну відстань, подавати команду (сигнал) “Приготуватися”;

- після перевірки виконання попередньої команди подавати команду (сигнал) “Вогонь”;
- при здійсненні групових вибухів перевірку результатів вибуху проводити одному фахівцю з розмінування;
- при відмові спрацювання підривного заряду, відключити кінці магістральних дротів від підривної машинки, ізолювати їх і розводити в сторони, здавати під охорону ручку від підривної машинки і після цього з'ясувати причини відмови;
- підходити до зарядів, що відмовили, дозволяється не раніше чим через 30 хвилин.

Знищення ВВП здійснюється тільки електричним способом.

При знищенні снарядів, мінометних мін та інших вибухонебезпечних предметів, що не вибухнули зсувати їх з місць, змінювати їх положення, в якому вони були виявленні, забороняється.

Знищення вибухонебезпечних предметів, що знаходяться в купах або в ямах, в місцях їх виявлення може проводитись шляхом знищення кожного вибухонебезпечного предмету окремо (з безпечної відстані шляхом вилучення їх на поверхню ґрунту). У виняткових випадках, знищувати ВВП одночасним розміщенням заряду вибухової речовини, який укладений на купу або в яму з вибухонебезпечними предметами.

Переміщення вибухонебезпечних предметів, що не вибухнули, до місць знищення дозволяється проводити тільки за допомогою фала з удавкою довжиною не менше 30 м, а також волокуш, діючи ними з укриття.

По закінченню робіт проводити детальний огляд місць підриву з метою виявлення боєприпасів, що не вибухнули або вибухнули неповністю, і їх елементів, що містять вибухові речовини [22].

## ВИСНОВКИ

У ході виконання кваліфікаційної роботи було проведено аналіз методів підвищення ефективності управління, їх переваги та недоліки.

Було спроектовано систему керування транспортним засобом з використанням резервування і дублювання основних функцій. Було спроектовано структурну схему системи, проведено аналіз переваг та недоліків існуючих методів дистанційного керування. Розглянуто основні моменти, спосіб застосування і принцип роботи системи.

За структурною схемою системи у програмному середовищі Matlab розроблено її модель. Також у цій програмі було проведено моделювання системи. Результат моделювання показує, що схема придатна для використання. Було спроектовано схему системи на базі контролера Arduino UNO. Для контролера була розроблена програма, яка реалізує роботу системи за вищеписаним принципом роботи. Розробка і моделювання роботи схеми проводилось за допомогою онлайн-сервісу Tinkercad. Результат моделювання показує що система працює справно і придатна для використання.

Система керування, розроблена під час виконання кваліфікаційної роботи, може використовуватися для керування гусеничними транспортними засобами спеціального призначення.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Положення про організацію освітнього процесу у ХНУРЕ [електронний ресурс]: Режим доступу: [https://nure.ua/wp-content/uploads/Main\\_Docs\\_NURE/polozhennja-pro-organizaciju-osvitnogoprosesu-v-hnure-2023.pdf](https://nure.ua/wp-content/uploads/Main_Docs_NURE/polozhennja-pro-organizaciju-osvitnogoprosesu-v-hnure-2023.pdf)
2. Методичні вказівки з підготовки та захисту кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка, освітньо-професійних програм: «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» / Упоряд. І. Ш. Невлюдов, Р. В. Артюх, В. В. Безкоровайний, Н. П. Демська, В. В. Євсєєв, О. І. Филипенко, О. М. Цимбал. Харків: ХНУРЕ, 2024. 57 с.
3. Положення про академічну доброчесність [Електронний ресурс]: Наказ ХНУРЕ від 02 лютого 2021 р. No 50. – Режим доступу: [https://nure.ua/wp-content/uploads/Main\\_Docs\\_NURE/polozhennja-pro-akademichnu-dobrochesnist.pdf](https://nure.ua/wp-content/uploads/Main_Docs_NURE/polozhennja-pro-akademichnu-dobrochesnist.pdf)
4. O. Temiz, M. Cakmakci, Y. Yildiz. Integrated vehicle control using adaptive control allocation URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/acs.3601>
5. P. Zhang, T. Ni, Z. Zhao, C. Ren. Unified Human Intention Recognition and Heuristic-Based Trajectory Generation for Haptic Teleoperation of Non-Holonomic Vehicles URL: <https://www.mdpi.com/2075-1702/11/5/528>
6. X. Zhou, Z. Wang, J. Wang. Adaptive Path-Following Control For Ground Vehicles Using A Switching Non-Quadratic Lyapunov Function URL: <https://www.osti.gov/servlets/purl/2251571>
7. M. J. Łopatka, K. Cieřlik, P. Krogul. Research on Terrain Mobility of UGV with Hydrostatic Wheel Drive and Slip Control Systems URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/19/6938>
8. K.Oda, T. Adachi, I. Awaya. Development of Fault-Tolerant Control for

Unmanned Vehicles Using Redundancy Actuators URL:  
<https://www.mhi.com/technology/review/sites/g/files/jwhtju2326/files/tr/pdf/e601/e601090.pdf>

9. S. Wang, J. Guo, Y. Mao. Research on the Model Predictive Trajectory Tracking Control of Unmanned Ground Tracked Vehicles URL:  
<https://www.mdpi.com/2504-446X/7/8/496>

10. K. Nam, Y. Hori, C. Lee. Wheel Slip Control for Improving Traction-Ability and Energy Efficiency of a Personal Electric Vehicle URL:  
<https://www.researchgate.net/publication/281704016>

11. K. Zhou, S. Lei, X. Du. Modelling and dynamic analysis of slippage level for large-scale skid-steered unmanned ground vehicle URL:  
<https://www.nature.com/articles/s41598-022-20262-z>

12. M. Khalfan, A. Al-Habsi. Design and fabrication of unmanned ground surveillance vehicle URL:  
<https://www.jsr.org/index.php/path/article/download/569/278/2032>

13. T. Mikołajczyk, D. Mikołajewski. Energy Sources of Mobile Robot Power Systems: A Systematic Review and Comparison of Efficiency URL:  
<https://www.mdpi.com/2076-3417/13/13/7547>

14. A. Abubakar, Y. Zweiri. Physics-Informed LSTM-Based Delay Compensation Framework for Teleoperated UGVs URL:  
<https://arxiv.org/html/2402.16587v1>

15. C. Zhu, H. Zhang. Robust control of hydraulic tracked vehicle drive system based on quantitative feedback theory URL:  
[https://www.researchgate.net/publication/339441411\\_Robust\\_control\\_of\\_hydraulic\\_tracked\\_vehicle\\_drive\\_system\\_based\\_on\\_quantitative\\_feedback\\_theory](https://www.researchgate.net/publication/339441411_Robust_control_of_hydraulic_tracked_vehicle_drive_system_based_on_quantitative_feedback_theory)

16. Гідравлічні насоси: види та сфера застосування [Електронний ресурс] /— Режим доступу: <https://hydraulic.ua/gidravlichni-nasosi-vidi-ta-sfera-zastosuvannya/>

17. N. Kumar, S. Maity. Condition monitoring of hydraulic transmission system with variable displacement axial piston pump and fixed displacement motor URL: [https://www.researchgate.net/publication/344965738\\_Condition\\_monitoring\\_of\\_hydraulic\\_transmission\\_system\\_with\\_variable\\_displacement\\_axial\\_piston\\_pump\\_and\\_fixed\\_displacement\\_motor](https://www.researchgate.net/publication/344965738_Condition_monitoring_of_hydraulic_transmission_system_with_variable_displacement_axial_piston_pump_and_fixed_displacement_motor)

18. J. Han, F. Wang. A Control Method for the Differential Steering of Tracked Vehicles Driven Independently by a Dual Hydraulic Motor URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/cdbb/1b57e79f0a60b93a6ab36cfa3a6787aac3e1.pdf>

19. X. Yan, D. Wang. Global Fixed-Time Fault-Tolerant Control for Tracked Vehicles with Hierarchical Unknown Input Observers URL: <https://www.mdpi.com/2076-0825/14/7/330>

20. Коваленко І.С. Вдосконалення системи керування безпілотним мобільним роботом з використанням резервування та дублювання основних функцій / І.С. Коваленко Автоматизація та приладобудування («Automation and Development of Electronic Devices») [Електронний ресурс] : збірник студентських наукових статей / Харківський національний університет радіоелектроніки; [редкол.: І.Ш. Невлюдов та ін.]. – Харків : ХНУРЕ, 2023. – Р. 135 – 141.

21. О. Л. Дідур, М. С. Шевченко. Міни: Посібник військовослужбовця ЗСУ, НГУ, ТРО України. 2023. – 228 с. : Режим доступу [https://shron1.chtyvo.org.ua/Didur\\_Oleksandr/Miny\\_iaki\\_vykorystovuiutsia\\_abo\\_mo\\_zhut\\_vykorystovuvatysia\\_viiskamy\\_rosiiskykh\\_zaharbnykiv\\_na\\_sukhopu.pdf](https://shron1.chtyvo.org.ua/Didur_Oleksandr/Miny_iaki_vykorystovuiutsia_abo_mo_zhut_vykorystovuvatysia_viiskamy_rosiiskykh_zaharbnykiv_na_sukhopu.pdf)

22. Об'єднаний навчально-тренувальний центр Командування сил підтримки Збройних сил України. Довідник сапера. 2024. – 118 с. : Режим доступу [https://sprotyvg7.com.ua/wp-content/uploads/2024/07/1\\_ПВП-7-2487.40-8-ДОВ-САПЕРА.pdf](https://sprotyvg7.com.ua/wp-content/uploads/2024/07/1_ПВП-7-2487.40-8-ДОВ-САПЕРА.pdf)