

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 перший (бакалаврський)

Розробка макету робототехнічної колісної мобільної платформи
(тема)

Виконав:
студент IV курсу, групи АКТАКІТ-20-3
Чимбарьов Іван Володимирович
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 151 Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми Освітньо-професійна

Освітня програма Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології
(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Євсєєв В.В.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри _____
(підпис)

Невлюдов І.Ш.
(прізвище, ініціали)

2024 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(код і повна назва)

Тип програми Освітньо-професійна

Освітня програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

«____» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Чимбарьову Івану Володимировичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка макету робототехнічної колісної мобільної платформи

затверджена наказом університету від 03.06.2024 р. № 544 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 19 06 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи 3.1 Напруга акумулятора = 12 В; 3.2 Напруга з перетворювача = 5 В; 3.3 Струм = 1,5 А; 3.4 Передатне число редуктора = 35; 3.5 Лінійна швидкість мобільної платформи = 1 м/с; 3.6 Освітленість приміщення = 397,4 Люкс.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі 4.1 Аналіз технічного завдання; 4.2 Вступ; 4.3 Аналіз сучасних мобільних платформ; 4.4 Розробка структури управління мобільною платформою; 4.5 Розробка програмного забезпечення системи управління мобільною платформою; 4.6 Висновки.

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). – с. Формату 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	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз сучасних мобільних платформ	10.04.2024	виконано
2	Вибір технічних складових	13.04.2024	виконано
3	Розробка макету мобільної платформи	24.05.2024	виконано
4	Розробка системи керування мобільною платформою	26.05.2024	виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	01.06.2024	виконано
6	Подання роботи на рецензію	11.06.2024	виконано
7	Подання роботи на підпис зав.кафедри	16.06.2024	

Дата видачі завдання 01 04 2024 р.

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____
(підпис)

Професор Євсєєв В.В
(посада, прізвище, ініціали)

Я, як студент(ка) ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надавав(ла) і не одержував(ла) недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

"11" червня 2024 р.

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized Cyrillic letters 'ЧВ' enclosed in a circle, with a long horizontal stroke extending to the right.

Чимбарьов І. В.

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 77 с., 7 табл., 34 рис., 3 дод., 25 джерел.

МОБІЛЬНА ПЛАТФОРМА, СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ, РАДІОПЕРЕДАЧА.

Мета кваліфікаційної роботи – підвищення корисного навантаження мобільної платформи за рахунок розробки системи керування та макету мобільної робототехнічної платформи.

Об'єкт проєктування – процес керування робототехнічною колісною мобільною платформою.

Предмет розробки – методи програмного та апаратного забезпечення системи керування макетом мобільної платформи.

У кваліфікаційній роботі проведено аналіз існуючих мобільних платформ за типом їх рушія, програмним забезпеченням та технічними складовими. За результатами аналізу підібрано апаратні модулі та створено макет мобільної платформи з керуванням на радіоуправлінні.

Створено програму керування мобільною платформою, яка, завдяки відкритості архітектури, дозволить в подальшому доповнювати макет та оснащувати його різними додатковими модулями.

Проведено випробування мобільної платформи в умовах навантаженості та здійснено спроби транспортування вантажу по ділянкам з різним нахилом. Окрім цього розраховано швидкість руху та час заряду акумулятора, за результатами яких значення, отримані на практиці, підтвердились.

ABSTRACT

The explanatory note contains: 76 p., 7 tables, 33 drawings, 3 pp, 25 sources.

MOBILE PLATFORM, CONTROL SYSTEM, RADIOTRANSMISSION.

The purpose of the qualification work is to increase the payload of the mobile platform by developing a control system and a model of a mobile robotic platform.

Development's object – the process of controlling a robotic wheeled mobile platform.

Subject of development – methods of software and hardware of the mobile platform layout control system.

The qualification work analysed existing mobile platforms by type of engine, software, and technical components. Based on the results of the analysis, hardware modules were selected and a model of a mobile platform with radio control was created.

A mobile platform control program was created, which, due to the open architecture, will allow further supplementing the layout and equipping it with various additional modules.

The mobile platform was tested under load conditions and attempts were made to transport the cargo over areas with different slopes. In addition, the driving speed and battery charging time were calculated, and the results confirmed the values obtained in practice.

ЗМІСТ

Скорочення	9
Вступ.....	10
1 Аналіз сучасних мобільних платформ.....	12
1.1 Аналіз способів переміщення мобільних платформ	12
1.2 Аналіз технічних засобів керування мобільними платформами ...	16
1.3 Аналіз програмних засобів мобільних платформ.....	19
2 Розробка структури управління.....	22
2.1 Розробка загальної структурної схеми мобільної платформи	22
2.2 Вибір апаратних модулів.....	23
2.3 Розробка схеми підключення компонентів модуля управління	33
2.4 Розробка та збирання ходової частини	37
3 Розробка системи управління мобільною платформою.....	42
3.1 Вибір середовища розробки.....	42
3.2 Розробка загального алгоритму.....	43
3.3 Розробка алгоритму передачі даних між двома пристроями	50
3.4 Проведення експерименту	52
3.5 Дослідження стійкості АСУ за алгебраїчними критеріями	53
3.6 Охорона праці.....	56
Висновки	59
Перелік джерел посилань	61
Додаток А Загальна схема керування мобільною платформою.....	64
Додаток Б Програма керування мобільною платформою	65

Додаток В Демонстраційний матеріал у вигляді презентації.....	76
---	----

СКОРОЧЕННЯ

- АСУ – автоматизована система управління;
ЕОМ – електронно-обчислювальна машина;
ОС – операційна система;
ШИМ – широтно-імпульсна модуляція;
IDE – integrated development environment;
SLAM – simultaneous localization and mapping;
UART – universal asynchronous receiver-transmitter.

ВСТУП

На сьогоднішній день однією з ключових технологій Четвертої промислової революції (Industry 4.0) є автономні мобільні роботи, які використовуються у багатьох галузях людської діяльності. Ціль сталого розвитку 11 "Сталий розвиток місьць та громад", а саме п. 11.5 Зменшити негативний вплив забруднюючих речовин, у т. ч. на довкілля місьць, шляхом використання інноваційних технологій.

Взагалі автономна мобільна платформа – це самокерована машина, яка може пересуватись та виконувати іншу роботу автоматично або автоматизовано. Вони можуть бути виконані на базі одноплатних комп'ютерів чи плат мікроконтролерів з використанням вимірювальних пристроїв (датчиків), перетворювачів та актюаторів [1].

Основними причинами широкого розповсюдження мобільних платформ є їх модульність, можливість програмування та наявність готових відкритих операційних систем, що дозволяють створювати роботів з будь-якою спеціалізацією [2].

Окрім різноманітності програмного забезпечення, мобільні платформи можуть класифікуватись за середовищем їх переміщення, як, наприклад, наземні, повітряні, водні.

Перший вид роботів вважається найпопулярнішим через широке різноманіття наявних способів зчеплення з поверхнею: колісні, гусеничні, повзаючі та крокуючі. Таким чином розширюється область можливого застосування роботів, залежно від середовища та специфіки виконуваної роботи [3].

Серед існуючих мобільних платформ найбільш простими, з точки зору їх проектування та ціни, можна вважати колісні, тому мета атестаційної роботи – це створення макету власної робототехнічної колісної мобільної платформи з реалізацією системи управління.

Мета кваліфікаційної роботи – підвищення корисного навантаження мобільної платформи за рахунок розробки макету мобільної робототехнічної платформи.

Об'єкт проєктування – процес керування робототехнічною колісною мобільною платформою.

Предмет розробки – методи програмного та апаратного забезпечення системи керування макетом мобільної платформи.

Для вирішення поставленої задачі слід виконати наступні завдання:

- аналіз найбільш популярних сучасних мобільних платформ;
- розробка структури ходової частини робота;
- розробка структурної схеми управління;
- розробка програмного забезпечення для керування мобільною платформою;
- реалізація макету та його випробування.

Атестаційна робота виконана згідно ДСТУ 3008-15 [4], та керуючись навчальним посібником з дипломного проєкту [5] та методичними вказівками [6].

1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МОБІЛЬНИХ ПЛАТФОРМ

1.1 Аналіз способів переміщення мобільних платформ

Однією зі значущих складових мобільних роботів, як можна дізнатися з назви, є їх засоби переміщення. Вони заздалегідь вирішують сферу використання та робоче середовище цих роботів. Наприклад, гусеничний рушій має більшу площу контакту з ґрунтом, ніж колісний, що забезпечує йому рівномірне розподілення ваги та зменшення занурення, вслід чого нижчу ймовірність буксування. Проте варто зауважити, що краще зчеплення з поверхнею не гарантує повну прохідність по складному рельєфу або подолання перешкод, на яке здатні крокуючі роботи. Таким чином, кожна має свої недоліки та переваги.

Розглянемо найпопулярніші засоби переміщення автономних мобільних платформ і проведемо аналіз серед наведених моделей кожного типу: всеспрямована автономна мобільна платформа СТР300-7 від компанії RoboCT (рис. 1.1) [7], гусенична мобільна платформа “Crawler”, розроблена RoboTech (рис. 1.2) [8], крокуюча мобільна платформа Unitree Go1 від Edu4industry [9].

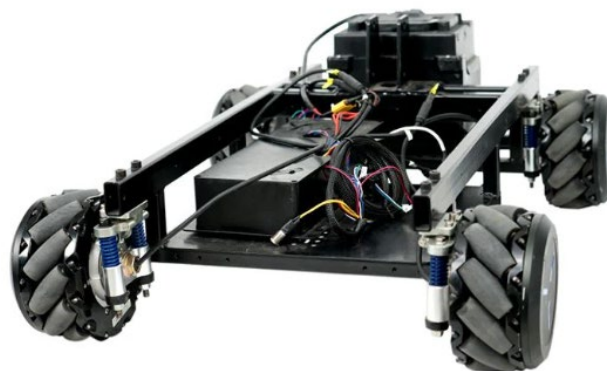


Рисунок 1.1 – Колісна мобільна платформа СТР300-7 RoboCT [7]

Наведена вище платформа рухається за допомогою колісного рушія та має специфічну будову – шведське колесо, або, як його ще називають, колесо Ілона. Його конструкція характерно відрізняється наявністю рухомих роликів під певним кутом (45°) на усій площині, що контактує з поверхнею. Причиною, по якій воно використане у даній конструкції, слід вважати відсутність механізму повороту колеса на шасі. Навпаки – колесо фіксоване, за винятком його рухомості по осі амортизаторів.

Розворот цієї платформи виконується залежно від напрямку та швидкості кожного окремого колеса. Результируюча комбінація всіх цих сил створює загальний вектор сили в будь-якому бажаному напрямку, що дозволяє платформі вільно переміщуватись в напрямку вектору сили без розвороту коліс, що підходить для переміщення в обмеженому просторі [10].

Головним недоліком цієї мобільної платформи є мала швидкість у зв'язку з використанням коліс, що потребують гарного зчеплення з поверхнею, також бажано використовувати разом з двигуном з високим обертальним моментом.

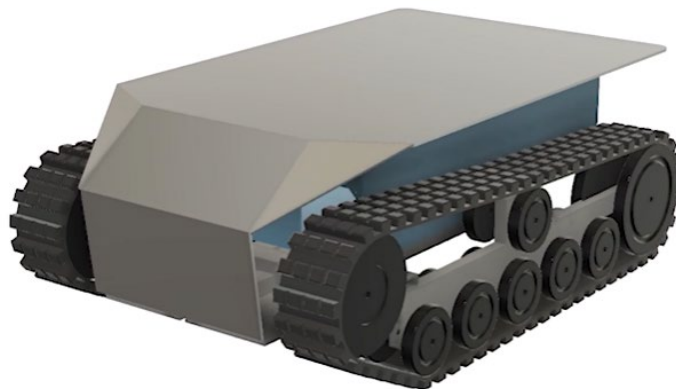


Рисунок 1.2 – Мобільна платформа на гусеничному рушії Crawler [8]

Мобільний робот Crawler, розроблений компанією RoboTech, виконано на базі гусеничного рушія. За конфігурацією конструкція відноситься до простих, з двома опорними катками з обох сторін. Каток, що попереду та має зубці, є ведучим. Також наявний натяжний каток зверху.

Наведена роботизована мобільна платформа призначена для роботи на бездоріжжі. Низький центр тяжіння та міцна конструкція забезпечує необхідне зчеплення для проходження у складних умовах. Розробниками заявлено, що головна спеціалізація їх платформи є сільськогосподарською, але при бажанні можна доповнити її маніпулятором.

Крокуюча мобільна платформа Unitree Go1 від Edu4industry наведена на рисунку 1.3.



Рисунок 1.3 – Крокуюча роботизована платформа Unitree Go1 [9]

Наступна мобільна платформа демонструє реалізацію крокуючого павукоподібного рушія на чотирьох ногах. Такий тип роботів претендує на найбільшу маневреність при використанні на дуже складному рельєфі. Здатні забезпечувати балансування при нахилі за будь-якою віссю та підйом по сходах завдяки високій адаптивності до оточуючого середовища [11]. Використовуючи інтелектуальну систему бокового зору Go1 може рухатись біля людини на визначеній відстані задля безпечної взаємодії і запобігання аварії при зштовхуванні.

За наведеним описом розробників, Go1 може використовуватися у складі лабораторного обладнання мобільної робототехніки або для наукових досліджень, відстеження об'єктів та ін. Також ця платформа підходить як основа для створення прототипів перспективних систем, наприклад, для охоронних цілей [9].

Проаналізуємо характеристики трьох наведених мобільних платформ та занесемо результати до таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Порівняння характеристик мобільних платформ різних рушіїв

Характеристика	СТР300-7	Crawler	Unitree Go1
Рушій	Колісний (шведське колесо)	Гусеничний	Крокуючий
Максимальне корисне навантаження	300 кг	80 кг	Від 3 до 10 кг
Вага	57 кг	70 кг	~12 кг
Макс. швидкість	≤ 1 м/с	1,1 м/с	3,5-5 м/с
Розміри	815 мм × 613 мм × 330 мм	1000 мм × 600 мм × 370 мм	580 мм × 290 мм × 220 мм
Акумулятор	20 А·ч, 24 В	35 А·ч, 24 В	~25 А·ч, 24 В
Час безперервної роботи	8 год	2 год	-
Двигуни	Електродвигун невідомий	2х BLDC HUB, 500 Вт, 24 В	Електродвигун невідомий
Прохідність	З використанням звичайного колеса – висока	Висока	Висока

Згідно проведеного аналізу можна прийти до висновку, що найбільш проста та економічно вигідна мобільна платформа для виробництва – колісна. Вона здатна забезпечити високу прохідність у будь-якому середовищі при використанні звичайного колеса, але потребує розробки іншого механізму маневрування.

Крокуючий робот більш мобільний, проте для розробки його шасі і корпусу, зі збереженням вантажопідйомних властивостей, потрібно брати до уваги гідравлічну систему амортизації, без якої така платформа, виконана у більших

масштабах, не зможе зберігати рівновагу. Також головним недоліком цього типу кінематики можна назвати низьку швидкість при подоланні відносно рівної поверхні.

Гусеничний рушій загалом має аналогічні переваги з колісним, однак, він все ж гарантує більше зчеплення з поверхнею та вищу прохідність: будь то ґрунтові дороги чи гладка поверхня. При відносно малій швидкості можна побачити значне споживання електроенергії, що прямо впливає на час безперервної роботи. Тому можна зробити висновок, що вона має бути оснащена більш ємнісним акумулятором.

Загалом отримані дані дозволяють усебічно і повно побачити нюанси, які слід врахувати при виборі способу переміщення розроблюваної мобільної платформи. Колісні платформи більше підходять для швидкого переміщення на рівних та відносно рівних поверхнях, гусеничні – для прокладання шляху у складних умовах, а крокові – для точного позиціонування в обмеженому просторі. Залежно від конкретних вимог і умов експлуатації, може бути вигідним використання одного з типів платформ або їх комбінації для оптимального рішення завдання переміщення розроблюваного пристрою.

1.2 Аналіз технічних засобів керування мобільними платформами

Технічні засоби керування можна віднести до однієї зі складових автономних мобільних платформ – системи керування. Вона є головним централізованим органом, до якого надходять дані з датчиків; де оброблюється інформація, що надходить, та звідки виходять управляючі сигнали до виконавчих пристроїв. Серед самих простих випадків у розробці мобільних роботів прийнято використовувати готові одноплатні комп'ютери або плати мікроконтролерів, яких існує велике різноманіття. Алгоритми керування знаходяться та реалізуються у середовищі програмних засобів, які сумісні з використаним пристроєм, у числі котрих до того ж присутні умонтовані засоби керування рухом, наприклад, шина вхідних сигналів,

до якої надходить інформація з інших пристроїв та вихідних сигналів, які, за наявності ШІМ на платі, дозволяють керувати електродвигунами [11].

Приклад найбільш розповсюдженого пристрою керування на основі плати мікроконтролерів зображено на рисунку 1.4.

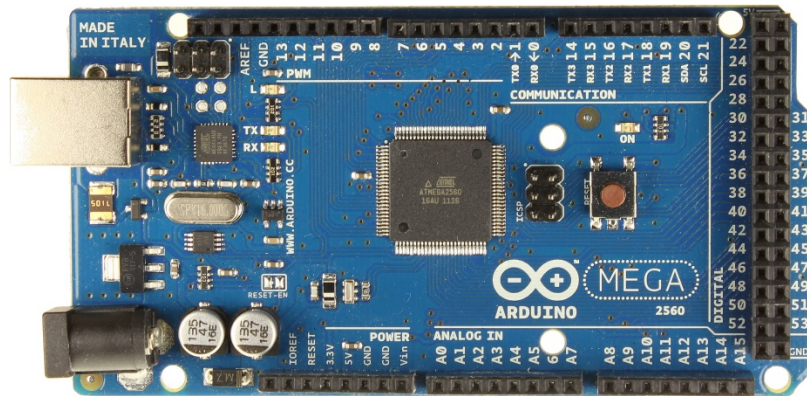


Рисунок 1.4 – Плата мікроконтролерів Arduino Mega 2560 [12]

Arduino Mega 2560 – це пристрій на основі мікроконтролеру ATmega2560, що має 54 цифрових та 16 аналогових виходів, деякі з котрих можуть використовувати ШІМ. Велика кількість пінів дозволяє підключити будь-які датчики, а також наявність послідовного периферійного інтерфейсу SPI дає можливість сполучувати декілька мікроконтролерів для створення більш складної системи керування.

Плата сумісна з середовищем розробки ArduinoIDE, де можна програмувати алгоритм роботи систем майбутньої мобільної платформи або іншого засобу.

Пристрій керування у вигляді плати мікроконтролерів – не єдиний технічний засіб, що забезпечує виконання управління мобільною платформою. Для можливості здійснення ручного управління існують радіоприймачі, що дозволяють розподілити підключення кожного вузла платформи до окремих каналів (рис. 1.5).



Рисунок 1.5 – 6-канальний радіоприймач FlySky FS-IA6B AFHDS 2A [13]

Наступний засіб дозволяє розпізнавати предмети та надавати оператору інформацію щодо оточення мобільної платформи. Оброблені дані з зображень можуть передаватись до пристрою, що виконує функцію керування, залежно від чого останній буде модель середовища і місце платформи у ньому, або відповідні у алгоритмі дій реакції. Наприклад, модуль з камерою може працювати разом з ультразвуковим датчиком вимірювання відстані, чим забезпечує більш повну та точну картину середовища, у якому знаходиться робот. Оброблені дані про предмети чи людей отримуються головним керуючим пристроєм, котрий, за наявності описаної програмно функції обминання перешкод, виконає дію для запобігання аварії.

Наявність у складі мобільної платформи системи комп'ютерного зору може бути використано як для ручного керування, так і для автономності: роботи, що займаються розвідкою місцевості, важкої або небезпечної для людини, дуже часто мають її.

Прикладом описаного модулю за специфікою використання можна вважати ESP32-CAM (рис. 1.6). Цю плату можна використовувати з безліччю проектів та Arduino. Це закінчений модуль із вбудованим мікроконтролером, завдяки якому він може працювати незалежно. Окрім наявності Wi-Fi + Bluetooth також має вбудовану відеокамеру і слот microSD для зберігання [6].



Рисунок 1.6 – Плата ESP32-CAM з камерою OV2640, WiFi + Bluetooth [14]

Наведена вище інформація стосувалась здебільшого автоматизованих мобільних платформ, тобто таких, що можуть керуватись оператором або виконувати операції під контролем людини. Для систем, що вважаються автономними, важлива наявність інтелектуального управління, здійснюваного більш складними системами, у яких використані методи одночасної навігації та складання мапи SLAM у поєднанні з функціями розпізнавання, планування дій, виконання та управління цілями.

1.3 Аналіз програмних засобів мобільних платформ

Злагоджена робота таких компонентів структури мобільних роботів, як засоби переміщення, керування, живлення та програмні, можлива лише при наявному середовищі розробки або операційній системі, що здатна надавати користувачу інструменти для написання програми керування, створення інтерфейсу взаємодії з пристроєм, відстежувати його положення, відобразити параметри та ін.

Залежно від обладнання, програмні засоби можна поділити загалом на дві категорії: інтегроване середовище розробки та операційні системи. Різниця між ними полягає у тому, що перше є програмним забезпеченням, призначеним для встановлення на операційну систему; тобто, якщо таким чином програмується

мобільна платформа, це означає, що зміна конфігурації коду відбувається на окремому пристрої. З операційними системами, що інтегровані в керуючий мобільною платформою одноплатний комп'ютер, ситуація інакша: це, фактично, EOM. Якщо розділити ці два типи програмних засобів за цільовим обладнанням, IDE розроблені лише для програмування визначених розробниками мікроконтролерів, а операційні системи сумісні з комп'ютерами певної архітектури.

До найбільш використовуваних серед означених типів можна віднести ROS (Операційна система роботів), Raspbian та Arduino IDE.

ROS – це набір програмних бібліотек та інструментів з відкритим вихідним кодом, які допомагають створювати додатки для роботів. Ця операційна система забезпечує апаратну абстракцію, контроль периферійних пристроїв, реалізацію функцій, які часто використовуються, передачу повідомлень між процесами та управління пакетами. Її бібліотека орієнтована на Unix-подібні системи. Окрім зазначених можливостей ROS дозволяє користуватись готовими методами SLAM, планування та моделювання. До переваг цієї операційної системи можна віднести [15]:

- легка інтегрованість з іншими платформами програмного забезпечення для роботів;
- незалежні бібліотеки. Кращою моделлю розробки є написання ROS-незалежних бібліотек із чистими функціональними інтерфейсами;
- фреймворк працює на багатьох сучасних мовах програмування: Python, C++ та Lisp, а Java та Lua;
- має вбудоване середовище модульного/інтеграційного тестування, що дає змогу легко перевіряти нове обладнання.

Схожим програмним засобом є Raspberry Pi OS (Raspbian), яка позиціонується розробниками, як безкоштовна операційна система на основі Debian. Оптимізована для обладнання Raspberry Pi і рекомендована операційна система для звичайного використання на цих одноплатних комп'ютерах. До складу ОС входить програмне забезпечення в зручному форматі для легкого встановлення

на комп'ютер. Продовжує активно розвиватись і підтримуватись розробниками задля поліпшення стабільності та продуктивності при роботі [16].

Arduino IDE – це інтегроване середовище розробки, призначене спеціально для програмування мікроконтролерів та Arduino-сумісних плат. ПЗ являє собою редактор програмного коду з функціями перевірки та завантаження написаного. Наявний менеджер API-бібліотек, доступних до встановлення, чим значно полегшують роботу з типовими приладами, як, наприклад серводвигуни, LED-екрани тощо [17].

Підводячи висновки, можна сказати, що вибір програмних засобів залежить безпосередньо від вибору пристрою керування. Для розробки більш простих програм керування мобільними платформами може використовуватись Arduino IDE. Робота з графічним інтерфейсом, хмарними сервісами та технологіями глобального позиціювання потребує більш гнучкої системи, з наявними програмними засобами на базі ОС, з чим краще і зручніше працювати, використовуючи одноплатний комп'ютер.

2 РОЗРОБКА СТРУКТУРИ УПРАВЛІННЯ

2.1 Розробка загальної структурної схеми мобільної платформи

Згідно аналізу головних складових мобільних платформ у попередньому розділі, було визначено вимоги, за якими складено схему та обрано необхідні за частини. Структурно макет буде складатись з пристрою управління у вигляді плати мікроконтролерів, що повинен керувати електродвигунами через драйвери.

Зв'язок оператора з мобільною платформою відбуватиметься через радіоприймач, підключений до головного керуючого пристрою. Приймач повинен мати декілька каналів, які будуть відповідати за певну функцію, що виконуватимуть пристрої.

Окрім зазначеного, для забезпечення автономного живлення на макеті передбачається джерело живлення з достатнім запасом ємності для кількох годин безперервної роботи.

Варто зауважити, що електродвигуни, як головні виконавчі пристрої забезпечення мобільності, мають відповідати певним характеристикам потужності та напруги, що споживається, у зв'язку з чим потрібно обирати попередньо згадане джерело живлення.

Наявні мікроелектронні компоненти, як, наприклад, Arduino, мають іншу напругу живлення, аніж електродвигуни, тому важливо використання понижуючого перетворювача напруги.

На рисунку 2.1 зображено структурну схему макету з зазначеними пристроями.

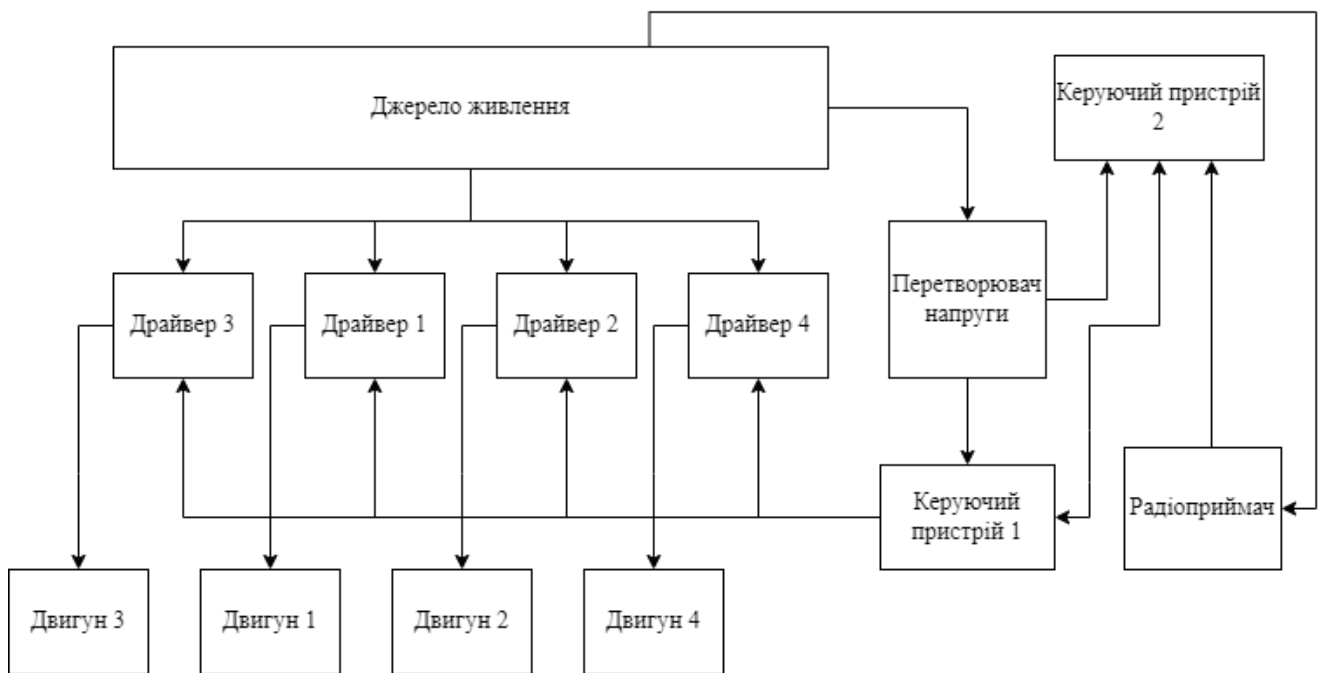


Рисунок 2.1 – Структурна схема макету мобільної платформи

2.2 Вибір апаратних модулів

Попередньо проведений аналіз та склад мобільної платформи за структурною схемою дає можливість перейти до вибору апаратних модулів. Основним елементом, що означено керуючим пристроєм, вирішено використати плату мікроконтролерів Arduino Nano (рис. 2.2). Головною причиною вибору саме цієї плати є її малі габарити при збереженні потенціалу плати типу Uno, яка при розміщенні на щитку займала би забагато вільного простору, маючи при цьому ті самі функції, той самий мікроконтролер ATmega328P, але меншу кількість портів вводу/виводу. Ще однією причиною вибору саме цього пристрою можна назвати його порівняно нижчу ціну, ніж аналог з більшою кількістю портів та додатковими інтерфейсами, що зменшує втрати у випадку, коли розроблюваний макет може зазнати пошкоджень під час виконання роботи в складних умовах.

Принцип забезпечення модульності системи управління мобільної платформи та доступності компонентів є головними критеріями, за якими обрано керуючий пристрій та інші частини.

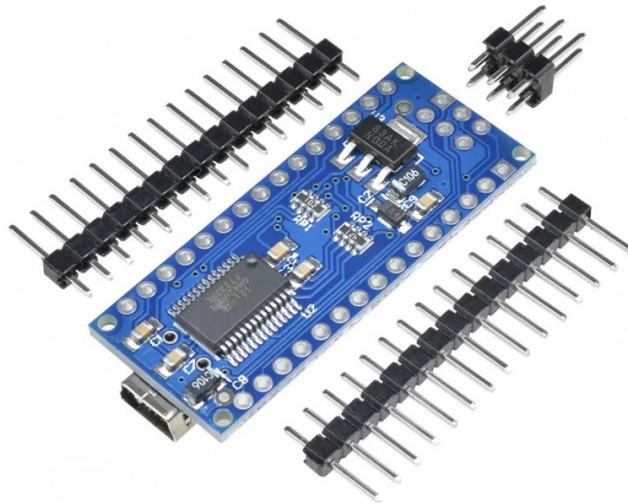


Рисунок 2.2 – Плата мікроконтролерів Arduino Nano [18]

Для полегшення процесу під'єднання контактів та закріплення плати на щиті було використано плату розширення для входів/виходів з клеммами (рис. 2.3). Завдяки їй можна не застосовувати паяльне обладнання для з'єднання дротів та надійно зафіксувати їх.

Характеристики плати наведено у таблиці 2.1.

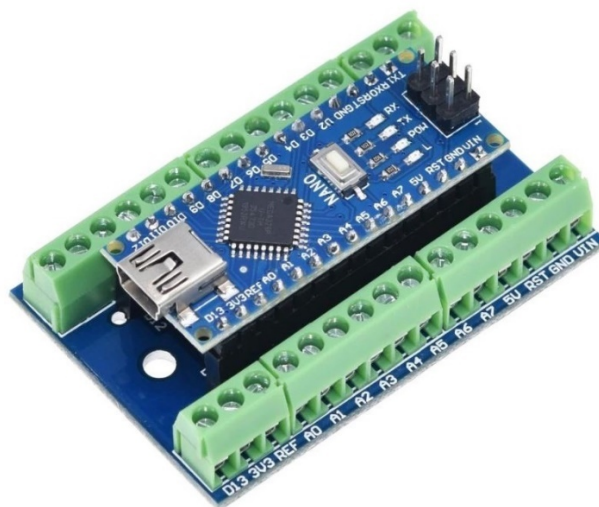


Рисунок 2.3 – Плата розширення для Arduino Nano [19]

Таблиця 2.1 – Характеристики плати мікроконтролерів Arduino Nano

Назва параметру	Характеристика
Мікроконтролер	ATmega328P
Робоча напруга	5 В
Напруга живлення	6-12 В
Тактова частота	16 МГц
Цифрові входи/виходи	14 (6 з них ШІМ)
Аналогові входи	6
Інтерфейси	I2C/TWI, SPI, UART
Flash-пам'ять	32 Кб
Оперативна пам'ять	2 Кб
EEPROM-пам'ять	1 Кб
Розмір	44,6 мм × 17,8 мм × 7 мм

Окрім розміру та відсутності деякої кількості входів, Arduino Nano відрізняється тим, що вона не має власного роз'єму для зовнішнього живлення та використовує mini-USB роз'єм для підключення до комп'ютера.

Живлення плати можливе через USB або за допомогою зовнішнього джерела живлення через пін VIN, у цьому випадку напруга живлення може складати 6-12 В [20].

Для розподілення функцій керування драйверами і електродвигунами та розподіл каналів радіоприймача, було використано дві плати Arduino Nano, з'єднані через інтерфейс UART, завдяки чому два пристрої обмінюються даними. Специфіка роботи цього інтерфейсу полягає у асинхронній передачі даних через з'єднання пари контактів Rx і Tx, виступаючих у ролі приймача та відправника (Rx – receive, Tx – transmit).

У зв'язку з тим, що Arduino Nano №2 відповідає за звернення з каналів радіоприймача до функцій руху, описаних у програмному коді Arduino Nano №1, їх підключення відбувається односторонньо, тобто, контакт плати з

радіоприймачем – Tx, а іншої, як приймаючої – Rx. Приклад підключення можна побачити на рисунку 2.4.

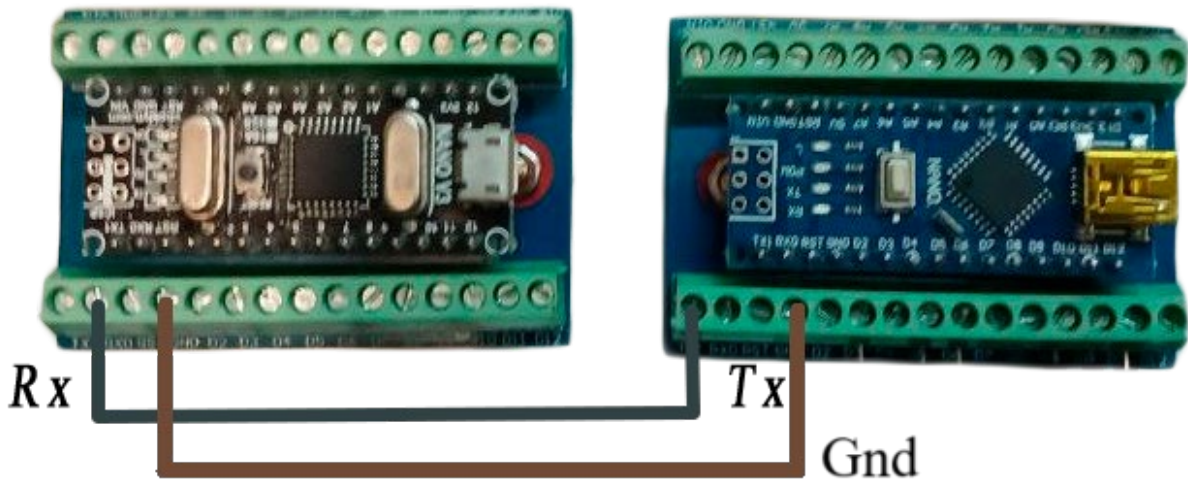


Рисунок 2.4 – Підключення інтерфейсу UART між двома платами

Наступним кроком варто обрати привідні електродвигуни, завдяки яким буде відбуватись переміщення, що контролюватиметься платою мікроконтролерів та драйверами з широтно-імпульсною модуляцією (ШИМ).

Для відповідності майбутнім умовам експлуатації, мобільна платформа повинна бути оснащена двигунами, потужності яких буде достатньо для перевезення вантажу до 50 кг та більше: як по прямим поверхням, так і по бездоріжжю.

Зважаючи на доступні варіанти та критерії, описані вище, доцільним рішенням є вибір найбільш розповсюджених, дешевих, простих з конструкційної точки зору двигунів, які легко придбати у разі виникнення необхідності заміни.

За цими вимогами мобільна платформа оснащена мотор-редукторами ME241-3730 (рис. 2.5). Це мотор колекторного типу, в якому струм поступає на обмотку рухомої частини – ротор. За рахунок виникнення магнітного поля у обмотці, що взаємодіє з магнітами у статорі, виникає ЕРС, яка рухає ротор. Важливу роль у цьому процесі відіграють щітки, які перемикають струм на різних

обмотках, щоб забезпечити рух. Вал ротору має на кінці черв'ячну передачу, з'єднану з редуктором.

Дані з технічної документації занесено до таблиці 2.2.



Рисунок 2.5 – Двигун-редуктор ME241 [21]

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики мотор-редуктора ME241

Назва параметру	Характеристика
Номінальна напруга	12 В
Потужність	6 Вт
Сила струму за номінальної швидкості	1,5 А
Швидкість обертання	55 об/хв
Обертальний момент	12,5 Н·м
Діаметр вхідного валу	10 мм

Як можна побачити, номінальна напруга живлення двигунів становить 12 В, а потужність 6 Вт. За цими параметрами ми можемо приблизно розрахувати ємність акумулятора, що буде використовуватись.

Ємність акумулятора для однієї години безперервної роботи:

$$C = \frac{P \cdot t}{U} = \frac{6 \cdot 1}{12} = 0,5 \text{ А} \cdot \text{год.} \quad (2.1)$$

Тобто для чотирьох двигунів ємність буде більше у 4 рази та дорівнювати 2 А·год.

Незважаючи на велику різницю між розрахованими параметрами, наявний автомобільний акумулятор забезпечить близько 50 год роботи:

$$t = \frac{C \cdot U}{P \cdot n}, \quad (2.2)$$

де n – кількість електродвигунів, шт.

$$t = \frac{100 \cdot 12}{6 \cdot 4} = 50 \text{ год.}$$

Обраний акумулятор наведено на рисунку 2.6, характеристики занесено до таблиці 2.3.



Рисунок 2.6 – Акумулятор DECARO 6 CT-100-L [22]

Виходячи з раціональних обґрунтувань вибору можна сказати, що висока ємність дозволить зменшити загальну пройдену відстань, що буде відведена на повернення мобільної платформи на базу для заряджання. Окрім цього, знижується ймовірність загублення платформи при передчасному розрядженні акумулятора через нестачу заряду для повернення до оператора.

Таблиця 2.3 – Характеристики обраного приладу живлення

Назва параметру	Характеристика
Виробник	DECARO
Ємність	100 А·год
Пусковий струм	840 А
Розміри	353 мм × 175 мм × 190 мм
Клеми	Товсті
Модель	6 СТ-100-L
Напруга	12 В
Тип	Свинцево-кислотний авто-акумулятор

Оскільки плати керування потребують напругу від 6 В, а 12 В є граничним значенням, окрім головного джерела живлення має бути перетворювач, що дозволить знизити та стабілізувати вихідну напругу, на якій будуть працювати плати Arduino. Для цієї задачі вирішено обрати понижуючий DC-DC перетворювач на базі мікросхеми XL4015-E1, що працює з 4-38 В вхідної напруги та видає на виході 1,25-32 В і 5 А з регулятором (рис. 2.7).

Мікросхема має п'ять виводів і виконана в корпусі TO263-5L. Схему регулятора обмеження струму і компаратора, що відповідає за індикацію закінчення заряду, спроектовано на основі операційного підсилювача LM358. За допомогою одного потенціометра можна регулювати вихідну напругу, а інший змінний резистор призначений для регулювання сили струму.

Відповідні контакти:

- in+ – вхідна напруга;

- out+ – вихідна напруга живлення 1,25-32 В;
- in- – земля на вході;
- out- – земля на виході.

Характеристики пристрою наведено у таблиці 2.4.

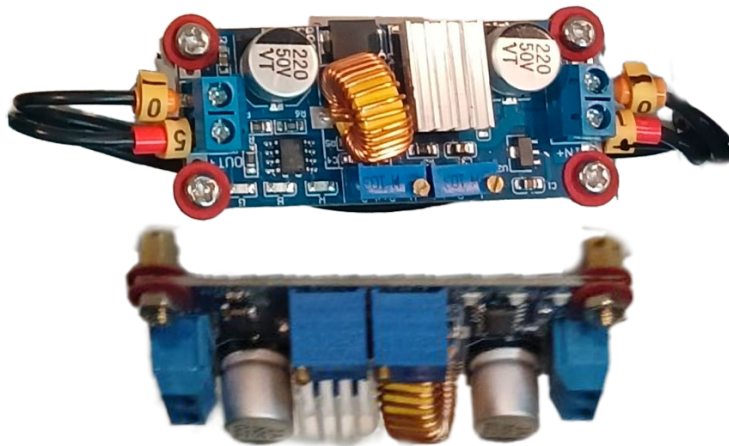


Рисунок 2.7 – Перетворювач напруги XL4015-E1

Таблиця 2.4 – Технічні характеристики перетворювача XL4015-E1 [23]

Назва параметру	Характеристика
Мікросхема	XL4015
Вхідна напруга	8-36 В
Діапазон регулювання вихідної напруги	1,25-32 В
Максимальний струм навантаження,	5 А
Частота перемикання	180 кГц
Пульсація вихідної напруги	0,05 В
ККД	95 %
Робоча температура	-40...85 °С
Розміри модуля	43 мм × 21 мм × 14 мм

Оскільки двигуни виконують обертання в одному чи іншому напрямку за відповідної полярності напруги, яка подається на них, за наявності реле можна було б автоматизувати рух назад та вперед, маючи при цьому лише два контакти. Але при керуванні рухомих пристроїв не стільки важливий сам рух, як можливість контролювати його швидкість та напрямок. Для реалізації такого завдання використовуються драйвери для моторів, що являють собою плату з силовими ключами та ШІМ-контролерами, які оброблюють керуючі сигнали для більш ефективного керування виконавчими пристроями.

На прикладі моторів ефективність керування можна виразити можливістю задавати швидкість обертання, формуючи імпульси різної тривалості.

На рисунку 2.8 наведено драйвер двигуна BTS7960, що використано на макеті мобільної платформи.

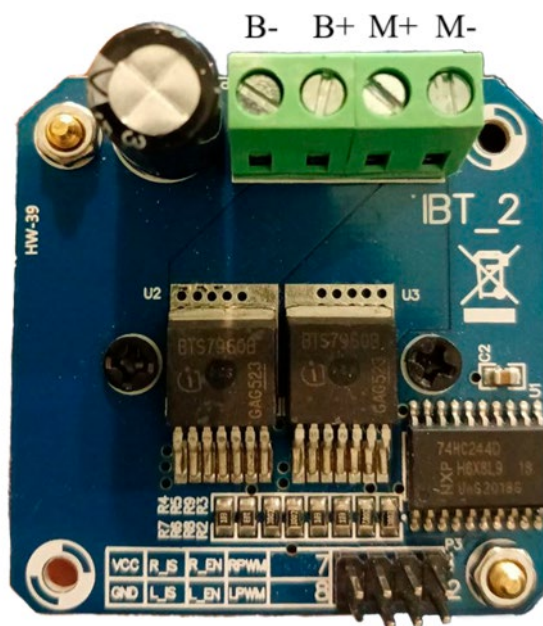


Рисунок 2.8 – Драйвер мотора BTS7960

Цей драйвер дозволяє керувати одним щіточним двигуном постійного струму, живлення якого варіюється близько 5,5-27,5 В та до 43 А. Для запобігання перегріву і забезпечення стабільної роботи рекомендований струм становить 10 А. Звертаючи увагу на струм і напругу наявних моторів, є більше ніж достатньо для коректної роботи.

Характеристики та пояснення призначення виводів занесено до таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 – Технічні характеристики драйвера моторів BTS7960

Назва параметру	Характеристика	Призначення виводів	
		Контакт	Пояснення
Напруга живлення двигуна	5,5-27,5 В	M+, M-	Виходи для підключення мотора
Напруга живлення логіки	5 В (DC)	V+, V-	Живлення мотору
Критичне значення струму	43 А	Vcc, Gnd	Живлення мікрокомпонентів
Допустиме значення струму	10 А	L_IS, R_IS	Контроль струму мотора та перенавантаження
Максимальна частота ШІМ на виходах	25 кГц	L_EN, R_EN	Ввімкнення обертання в один та другий бік
Напруга вузлів логіки на виходах управління	3,3 або 5 В	L_PWM, R_PWM	Рівень сигналу ШІМ для контролю швидкості

Останнім пристроєм буде описаний у підрозділі 1.3 радіоприймач FlySky FS-iA6B. Він надає користувачу 6 каналів зв'язку для керування різними функціями моделі, у випадку з мобільною платформою це може бути її переміщення або управління окремими модулями, як, наприклад, маніпулятор.

Передатчик працює на частоті 2,4 ГГц, чого достатньо для підтримання зв'язку на відстані до 1 км на відкритих ділянках, та до 300 м через перешкоди. Також протокол бездротового зв'язку, що використовується цим приймачем,

дозволяє запобігти виникненню ситуацій, коли два пристрої можуть працювати на одній частоті. Так як оптимальна напруга живлення приймача знаходиться між значеннями 4-6,5 В, його буде підключено до перетворювача XL4015-E1, на виході якого маємо 5 В.

Після вибору апаратних частин, можна перейти до збірки модулю управління та підключення кожного з пристроїв між собою.

2.3 Розробка схеми підключення компонентів модулю управління

Загалом схему можна розділити на дві основні частини, послідовність з'єднання яких йде за тою чергою, за якою відбувається взаємодія оператора та мобільної платформи: від радіоприймача до плати Arduino, від другої керуючої плати до драйверів моторів.

Контроль за коректністю з'єднань є важливою частиною процесу збирання моделі, оскільки неправильно або помилково під'єднані контакти можуть спричинити не тільки некоректну роботу, але й пошкодження електронних вузлів та вихід їх з ладу.

Почнемо з передатчика. На рисунку 2.9 можна побачити схему розташування виводів наведеного пристрою.

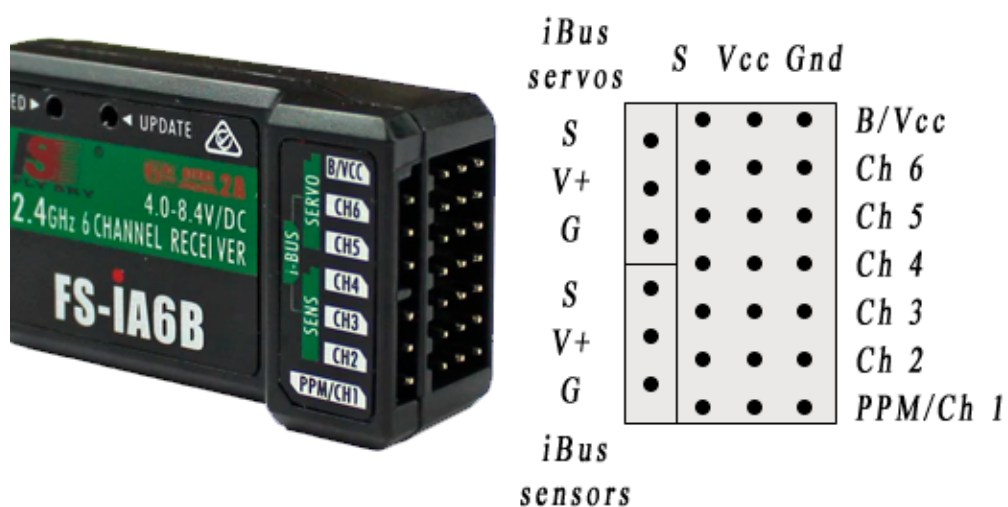


Рисунок 2.9 – Контакти радіопередавача FS-iA6B

Згідно схеми розміщення контактів ми маємо два типи зв'язку: шина двостороннього зв'язку iBus та односторонній. Шина iBus зазвичай використовується для керування літаючими апаратами та пристроями, стан сенсорів та сервоприводів яких може відображатись на екрані керуючої апаратури (пульта управління). В нашому випадку будуть використані піни, що відповідають каналам з першого по шостий, та живлення.

Позначення S відповідає цифровому контакту каналу, Vcc – живлення, Gnd – земля. Останні два, як вже було сказано, будуть працювати від стабілізатору, контакти типу Servo під'єднаємо до пінів, які підтримують ШІМ, плати Arduino послідовно: Ch1 – 3 Pin, Ch2 – 5 Pin, Ch3 – 6 Pin, Ch4 – 9 Pin, Ch5 – 10 Pin, Ch6 – 11 Pin.

На рисунку 2.10 зображено схему підключення передавача FS-iA6B та пінів з ШІМ.

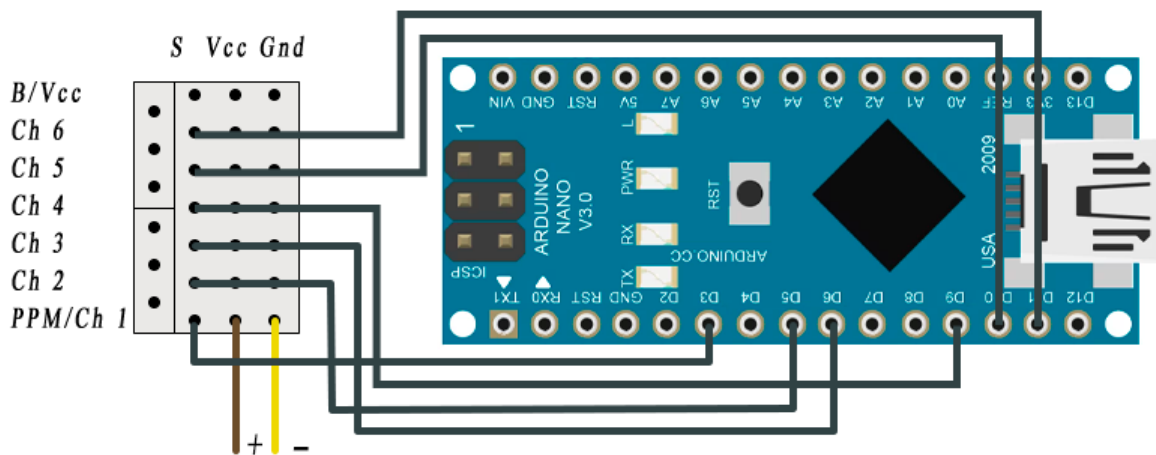


Рисунок 2.10 – Схема підключення передавача до цифрових пінів Arduino Nano

Далі будемо називати цю плату Arduino Tx, оскільки вона є ініціатором передавання сигналів до другої плати – Arduino Rx. Одна з другою вони з'єднані через інтерфейс UART зі спільним піном Gnd та живленням 5 В через стабілізатор.

Так як кількість моторів рівна чотирьом, кожен драйвер підключається до Arduino Rx. Пінів, що відповідають за напрямок руху та його швидкість усього чотирьох: R_PWM, L_PWM та R_EN, L_EN. На рисунку 2.11 зображено схему підключення драйверів до плати керування, в таблиці 2.6 наведено відповідність пінів драйвера з пінами плати та їх фізичною сутністю у двигунів.

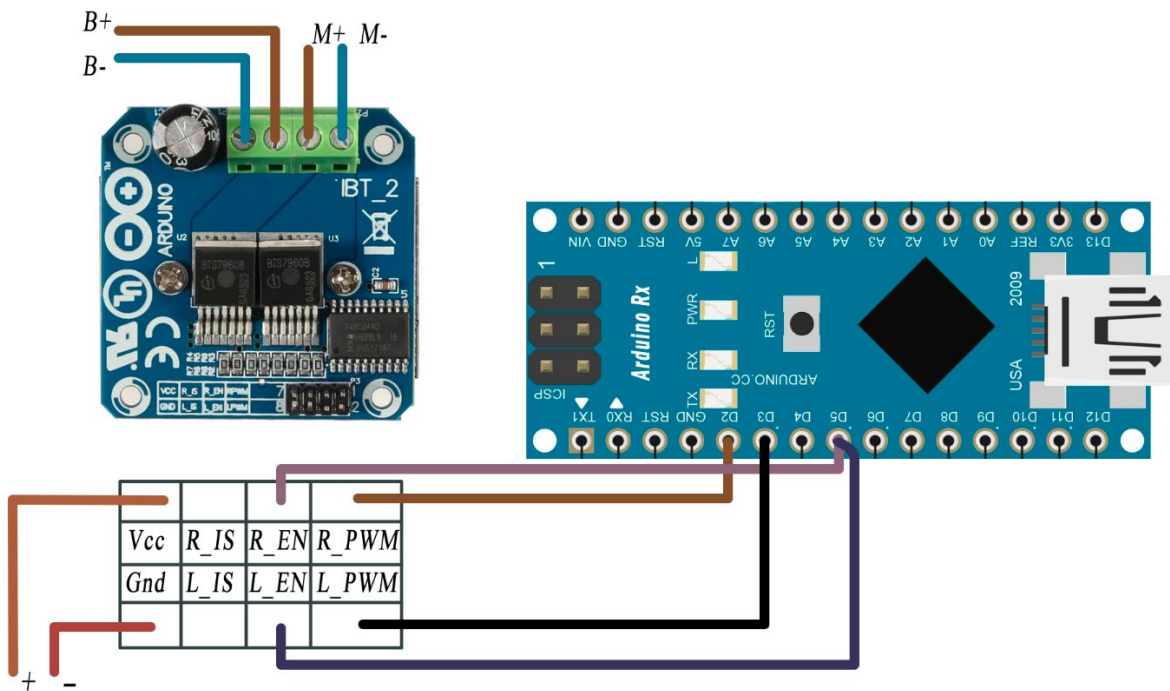


Рисунок 2.11 – Схема підключення модулю управління двигуном

Як можна побачити, контакти, що відповідають за ШІМ, парні, напрямлення руху задає R_PWM, L_PWM, де перший – вперед, а другий – реверс. Відштовхуючись від підключення драйверу фронтального лівого двигуна, зробимо те саме для останніх трьох та занесемо дані до таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 – Таблиця відповідностей контактів драйверів

Позиція двигуна	Пін драйверу	Пін плати керування	Пояснення
Фронтальний лівий	R_EN, L_EN	D5	Контроль швидкості
	R_PWM	D2	Рух вперед
	L_PWM	D3	Реверс
	Vcc	-	5 В
	Gnd	-	Земля
Задній лівий	R_EN, L_EN	D6	Контроль швидкості
	R_PWM	D8	Рух вперед
	L_PWM	D9	Реверс
	Vcc	-	5 В
	Gnd	-	Земля
Фронтальний правий	R_EN, L_EN	D10	Контроль швидкості
	R_PWM	D4	Рух вперед
	L_PWM	D7	Реверс
	Vcc	-	5 В
	Gnd	-	Земля
Задній правий	R_EN, L_EN	D11	Контроль швидкості
	R_PWM	D12	Рух вперед
	L_PWM	D13	Реверс
	Vcc	-	5 В
	Gnd	-	Земля

Закінчивши з драйверами та двигунами, складемо загальну схему усієї системи керування мобільною платформою, що наведена у додатку А.

2.4 Розробка та збирання ходової частини

Ходова частина мобільної платформи являє собою поєднання трьох основних деталей: двигун, редуктор та колесо, кожна з яких є частиною механічного вузла забезпечення руху. Розробку можна поділити на етап вибору, що відбувався в попередньому підрозділі, та доробку задля сумісності.

Початково двигун складався з мотор-редуктора, обертального моменту якого на виході було недостатньо для зрушення з місця мобільної платформи на наявних колесах, тому було розроблено трьоступінчатий редуктор, який можливо з'єднати з двигуном в один вузол. Можливість поєднання забезпечується, по-перше, модифікацією валу якоря на двигуні, по-друге, додаванням створеного кожуха, що виконує функції захисту та з'єднання, по-третє, розробкою та заміною ведучої шестерні редуктора.

У використаному колекторному, тобто щіточному, електродвигуні одна щітка з'єднана з «плюсом». Негативний контакт двигуна і щітки під'єднано на корпус. У випадку використання двигуна з таким електричним колом унеможлиблювався би рух платформи в ситуації, коли для розвороту на кожен борт подається живлення з різною полярністю. Як результат, станеться замикання, бо по корпусу одночасно йшов би «мінус» та «плюс». Для запобігання аварійних ситуацій, і можливості коректної роботи системи переміщення і управління, конструкція двигунів була дещо змінена, а саме – тепер мінусовий контакт не з'єднано з корпусом, а припаяно до однієї з щіток.

Окрім цього, для забезпечення можливості передавати обертання валу двигуна на коліща редуктора, черв'ячна передача була замінена довгою косозубою шестернею. Використання саме косозубого типу колеса можна обґрунтувати більш плавним зчепленням, та здатністю витримувати велике навантаження при великій швидкості, що у нашому випадку є важливим фактором, оскільки шестерню виконано з полімеру та роздруковано за допомогою 3D-принтера. Дані шестерні у середовищі розробки та вже надруковані наведено на рисунку 2.12.

При друці було використано філамент PETg, який дуже часто використовується для створення механічних вузлів, тому що має високу зносостійкість та жорсткість, а також низьку термоусадку, завдяки чому шестерні збережуть форму, яка була початково змодельована.

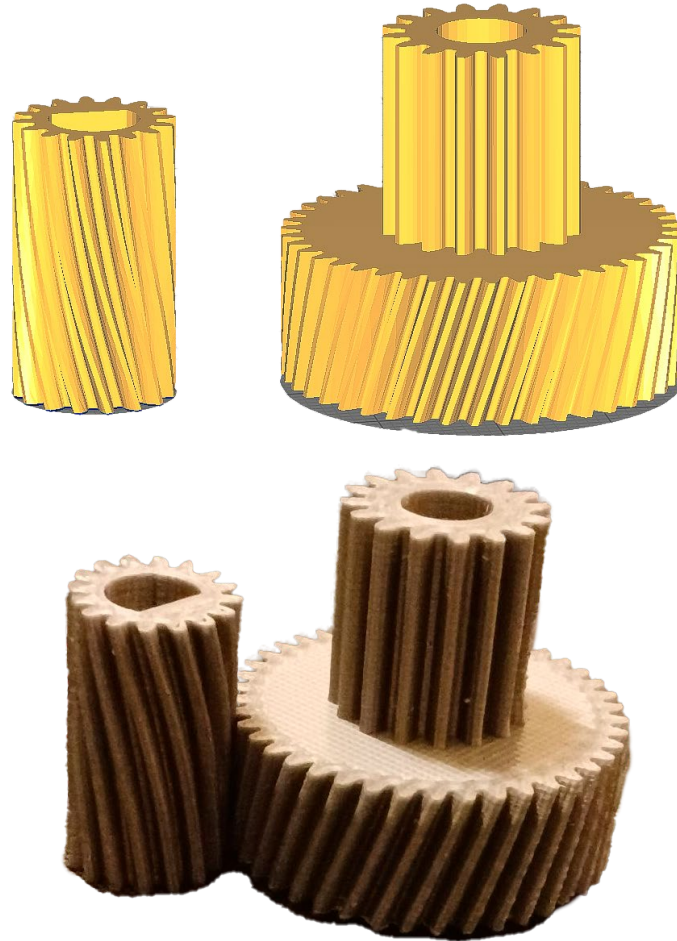


Рисунок 2.12 – Шестерня валу та ведена нею шестерня редуктора

Вище згаданий перехідник, що з'єднує корпус двигуна та редуктора (рис. 2.13) являє собою чашу з двома наскрізними отворами для кріплення та отвором для валу. Модель також розроблено у середовищі CAD та роздруковано за допомогою 3D-принтера.

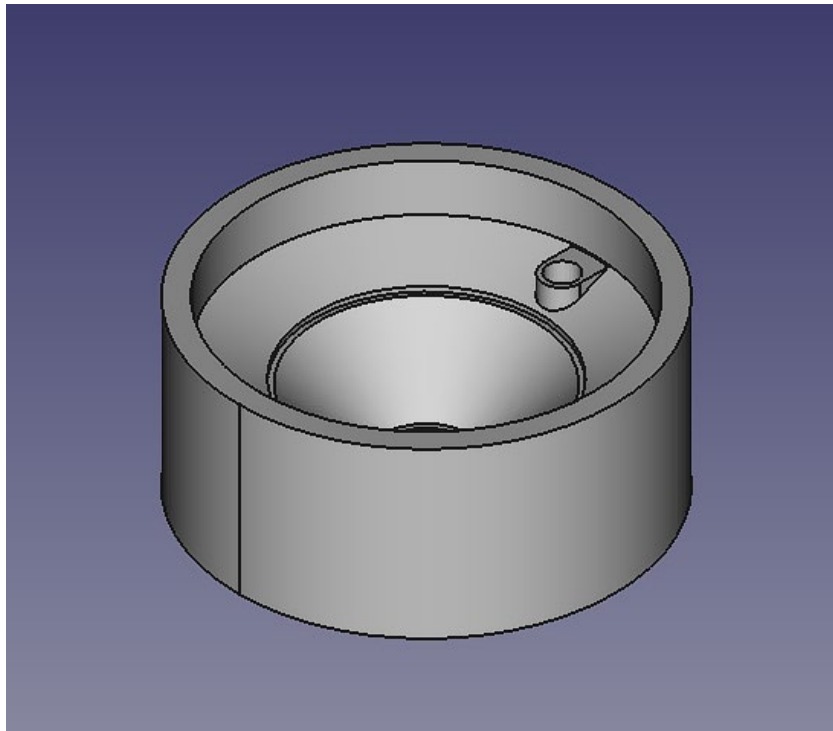


Рисунок 2.13 – Модель з'єднувача у середовищі проєктування

Після з'єднувача поглянемо на редуктор (рис. 2.14). Позаду закріплено мотор, на вал якого зафіксовано шестерню. Згідно з розрахунками, передатне число такого редуктора становить 35:1.

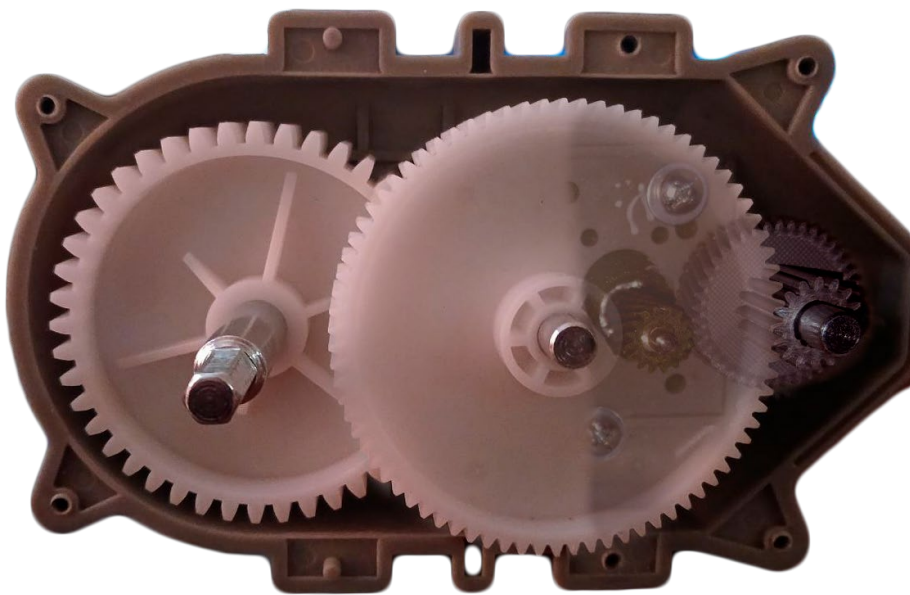


Рисунок 2.14 – Редуктор у розібраному стані з заміненою шестернею

$$i = \frac{z_1}{z_2}, \quad (2.4)$$

де z_1 – кількість зубів веденої шестерні, шт;

z_2 – кількість зубів ведучої шестерні, шт.

Беручи до уваги, що деякі шестерні двоступінчасті, кожна ступінь розраховується як окрема шестерня. Кількість зубців по порядку становить: 16, 42, 16, 78, 44:

$$i = \frac{42}{16} \cdot \frac{78}{16} \cdot \frac{44}{16} \cong 35.$$

За розрахунками можна зрозуміти, що редуктор з таким передатним числом значно збільшить на виході обертаючий момент, чим дозволить впоратись зі значними навантаженнями на двигун та за рахунок низьких обертів забезпечить більш прецизійне позиціонування і виконання команд з переміщення платформи.

Виміряв швидкість обертів на вихідному валі редуктора, можна розрахувати її для двигуна без черв'ячної передачі:

$$v_{\text{вх}} = v_{\text{вих}} \cdot i,$$

$$v_{\text{вх}} = 60 \cdot 35 = 2100 \text{ об/хв.}$$

Щоб розрахувати швидкість обертання коліс мобільної платформи, достатньо знати їх діаметр. У нашому випадку було використано 12-дюймові колеса, яких буде достатньо для гарного зчеплення з поверхнею.

Спочатку переведемо дюйми у сантиметри та знайдемо довжину кола:

$$C = \pi \cdot d,$$

$$C = 3,14 \cdot 30,48 = 95,76 \text{ см.}$$

Розрахуємо лінійну швидкість:

$$V = C \cdot v_{\text{вих}},$$
$$V = 95,76 \cdot 60 = 5745,6 \text{ см/хв.}$$

Якщо перевести величини, отримаємо 3,5 км/год та приблизно 1 м/с.

3 РОЗРОБКА СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ МОБІЛЬНОЮ ПЛАТФОРМОЮ

3.1 Вибір середовища розробки

Для створення відкритої та гнучкої системи керування мобільною платформою важливу роль відіграє середовище, в якому розробляється програмний код. Згідно аналізу, проведеного у попередніх розділах, та обраних технічних засобів інтегроване середовище розробки дозволить в подальшому редагувати наявний код без встановлення зайвих бібліотек та іншого програмного забезпечення, чим значно спрощує процес розробки.

У ході роботи над макетом, через розподілення функцій між двома пристроями керування, виконано два файли з програмним кодом: для плати Rx та Tx.

Після завершення роботи з розробки необхідно завантажити скетч до плат керування та перед цим зробити декілька кроків. Знаходячись у головному вікні середовища розробки, потрібно обрати вкладку “tools” і у випадяючому меню обрати наступні параметри: тип плати мікроконтролерів – “Board: Arduino Nano”, процесор, тобто мікроконтролер, обрано за замовчуванням та номер порту – “Port: COM5”.

На рисунку 3.1 наведено приклад обраних параметрів у вікні.

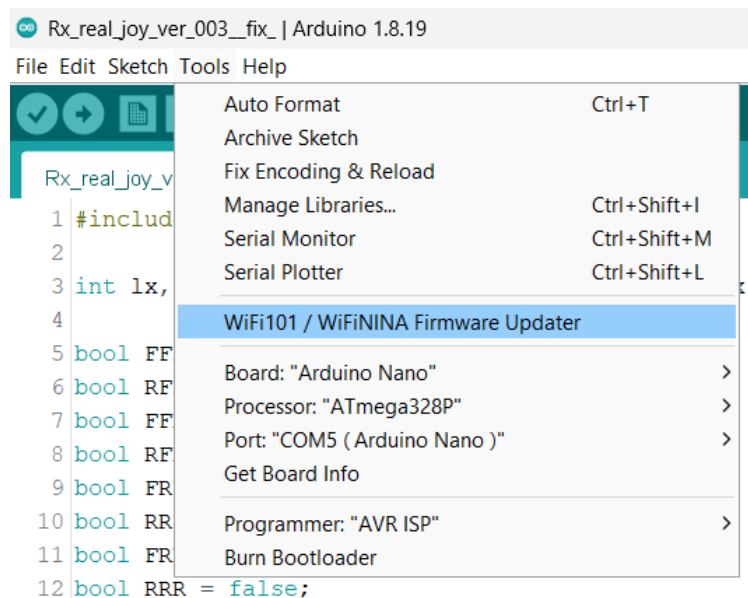


Рисунок 3.1 – Вікно вибору налаштувань для програмованого мікроконтролера

Наступним кроком, вже перед завантаженням скетчу, потрібно провести його перевірку на ймовірні помилки. Для цього потрібно натиснути “Verify” та зачекати до закінчення (рис. 3.2). Після перевірки можна завантажити скетч, натиснувши “Upload”.

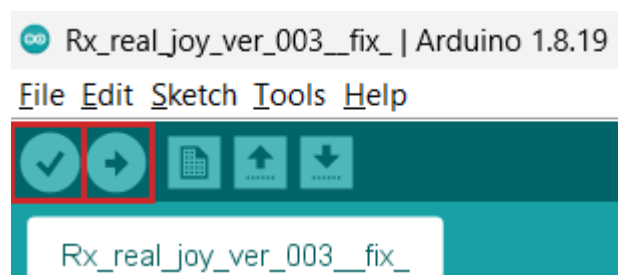


Рисунок 3.2 – Опції перевірки завантаження скетчу

3.2 Розробка загального алгоритму

Для керування пристроєм використовується комплект радіоапаратури на 6 каналів. Зважаючи на це – алгоритм керування має певну специфіку. Це обумовлено тим, що для формування широкого функціоналу керування потрібно використовувати більшу кількість каналів управління. Але для реалізації саме

бюджетного рішення, як і було зазначено у розділі 2, було прийнято рішення використати можливості програмних рішень та засобів програмного середовища Arduino IDE.

Для контролю керування по кожному за каналів управління використовується широтно-імпульсний тип сигналу. Таким чином кожен з каналів управління, з програмної точки зору, можна розглядати, вирізняти та обробляти лише за трьома параметрами: номер каналу, наявність та тривалість імпульсу.

Для забезпечення руху мобільної платформи використовується три канали пульта керування та приймача: газ, селектор, що дає змогу обрати режим руху (перемикання напряму руху вперед, розвороту на місці та реверс) та повороти. Третій канал використовується для реалізації повороту пристрою вліво та вправо.

Так як при реалізації керування пристроєм використовується широтно-імпульсний тип сигналу, то для зчитування та обробки сигналу керування використовується функція `pulsein`, яка при виконанні програми повертає дані про номер каналу, наявність сигналу в даному каналі та тривалість імпульсу.

Обробка (зчитування) стану селектору руху реалізована на обробці даних за каналу. Селектор вибору режиму має лише три можливі варіанти вибору. Відповідно, якщо при обробці за допомогою функції `pulsein` даних, з каналу де запрограмовано селектор, ми отримуємо мінімальну тривалість імпульсу, можна зробити висновок, що селектор знаходиться у положенні “1”, що вказує на необхідність обробляти частину програми, яка відповідає за переміщення пристрою вперед. Якщо при обробці за допомогою функції `pulsein` даних, з каналу де запрограмовано селектор, ми отримуємо середню тривалість імпульсу, тоді можна зробити висновок, що селектор знаходиться у положенні “2”, що вказує на необхідність обробляти частину програми, що відповідає за розворот на місці. Аналогічно, якщо при обробці за допомогою функції `pulsein` даних, з каналу де запрограмовано селектор ми отримуємо максимальну тривалість імпульсу, то можна зробити висновок що селектор знаходиться у положенні “3”, що вказує на необхідність обробляти частину програми, що відповідає за реверс пристрою (рис. 3.3).

```
void manual() {  
    throttle = ch_3_Val;  
    turn = ch_4_Val;  
    if (ch_5_Val > 30) {  
        FNR = 1;  
    } else if (ch_5_Val < -30) {  
        FNR = -1;  
    } else {  
        FNR = 0;  
    }  
}
```

Рисунок 3.3 – Функція зчитування положення тумблера

Функція повороту також реалізована на пристрої. Так як на мобільній платформі для спрощення конструкції та для підвищення надійності відсутній поворотний механізм, для реалізації повороту використовується принцип повороту гусеничної техніки. Таким чином, у разі необхідності виконання повороту механізму, при відхиленні важеля повороту, пригальмовує одна з пар привідних моторів на стороні, що відповідає напрямку повороту. Величина пригальмовування прямо пропорційно відповідає величині відхилення важеля вліво\вправо на пульті керування.

На рисунку 3.4 наведено фрагмент коду, що відповідає функції здійснення повороту.

```

void turnLeftDrivers() {
    FFL = true;
    RFL = false;
    FFR = true;
    RFR = false;
    FRL = false;
    RRL = true;
    FRR = false;
    RRR = true;
}

void turnRightDrivers() {
    FFL = false;
    RFL = true;
    FFR = false;
    RFR = true;
    FRL = true;
    RRL = false;
    FRR = true;
    RRR = false;
}

```

Рисунок 3.4 – Функції повороту в обидві сторони

Згідно малюнку, можна побачити, що в кожній функції наявні змінні, що відносяться до пінів драйвера та мають власні назви за напрямом їх руху і положенням двигуна, до якого відносяться. Наприклад, для забезпечення повороту вліво у функції на виходи переднього та заднього правого двигуна подається значення “True”, а на передній та задній лівий значення “False” Цим виходам відповідають змінні FFR, FFR та RFL, RFR. Також значення “True” надається тим самим контактам у реверсі, тобто, щоб в подальшому при виконанні функції було можливо повертати в зворотному напрямку, керуючи через пульт управління.

Під терміном “газ” мається на увазі задання інтенсивності виконання обраної селектором функції. При взаємодії зі стіками пульта управління, сигнал, що відповідає змінним каналів, відпрацьовує процедуру ReadCH за допомогою функції Pulsein (рис. 3.5).

```
int readCHs(int CH_in, int min_Val, int max_Val, int def_Val) {
    int ch = pulseIn(CH_in, HIGH, 30000);
    if (ch < 100) return def_Val;
    return map(ch, 1000, 2000, min_Val, max_Val);
}
```

Рисунок 3.5 – Процедура читання тривалості імпульсів каналів

Тривалість імпульсу додається до “мапи” каналу, у якій знаходяться дані про максимальне та мінімальне значення тривалості, після чого вони відправляються до монітору порта у вигляді змінних: throttle – 3-й канал, також відповідає значенню ly, тобто “газу”; turn – 4-й канал, відповідає значенню lx, тобто повороту; FNR – 5-й канал, перемикач.

На рисунку 3.6 зображено фрагмент коду, що відповідає читанню, прирівнюванню отриманих значень та їх обмеженню для lx – від -100 до 100, для ly – від 0 до 100.

```
ch_1_Val = readCHs(CH1, -100, 100, 0); //ry
ch_2_Val = readCHs(CH2, -100, 100, 0); //rx
ch_3_Val = readCHs(CH3, 0, 100, 0); //ly
constrain(ch_3_Val, 0, 100);
ch_4_Val = readCHs(CH4, -100, 100, 0); //lx
constrain(ch_4_Val, -100, 100);
ch_5_Val = readCHs(CH5, -100, 100, 0); //FNR
ch_6_Val = readCHs(CH6, 0, 100, 0); //MoGPS
```

Рисунок 3.6 – Читання значень каналів та мапування

Після цього дані, що передано по монітору порта, будуть відправлені до другої плати керування та будуть читатись парсером.

Окрім станів логічних флагів, що відповідають положенню та напрямку обертання двигунів, які занесені до функцій stopDrivers, forwardDrivers, rearDrivers, turnLeftDrivers, turnRightDrivers, керування забезпечується функціями руху. Із використаних важливо описати дві: moving та movingNeutral. Перша відповідає за

рух та поворот при русі, а друга – за розворот на місці. Як було сказано раніше, поворот при русі відбувається за рахунок пригальмовування однієї зі сторін мобільної платформи, що програмно виражено формулою:

$$T_{lx} = ly - \left(\frac{ly \cdot M_{lx}}{100} \right), \quad (3.1)$$

де M_{lx} – абсолютне значення повороту;

ly – значення відхилення по осі y .

Фрагмент коду, що відповідає за виконання функцій руху наведено на рисунку 3.7. У випадку руху вперед функції логічних флагів для розвороту та руху виконуються за умови, коли значення lx не відхиляється менше -7 та більше 7 . Тоді на вихідні змінні з ШІМ $LFout$, $LRout$, $RFout$ та $RRout$, які відповідають входам L_PWM , R_PWM на драйверах, подається поточне значення ly , тобто “газу”, і ті конфігурації двигунів, що увімкнені, забезпечують рух.

```
void moving() {
    if (lx > -7 && lx < 7) {
        LFout = ly;
        LRout = ly;
        RFout = ly;
        RRout = ly;
    } else if (lx < -7) {
        LFout = Tlx;
        LRout = Tlx;
        RFout = ly;
        RRout = ly;
    } else if (lx > 7) {
        LFout = ly;
        LRout = ly;
        RFout = Tlx;
        RRout = Tlx;
    }
}
```

Рисунок 3.7 – Функція виконання руху

Коли відхилення менше -7 , тоді значення швидкості обертання лівого фронтального та заднього двигунів дорівнюють не поточному значенню ly , а значенню пригальмовування Tlx . Умови, що є протилежними попереднім – відхилення більше 7 . У такому випадку відбувається те саме, але з різницею у стороні двигунів – тепер це правий передній та задній.

При виконанні розвороту на місці алгоритм дещо відрізняється, а саме: тепер, щоб запобігти руху вперед, за нейтральних умов виконується функція логічних флагів `stopDrivers`, за якою на усіх цифрових входах драйверів буде 0 . Як і у попередньому випадку, коли відхилення lx менше -7 або більше 7 , значення виходів з ШІМ будуть дорівнювати поточному значенню ly , тоді як функції логічних флагів будуть відповідати `turnLeftDrivers` або `turnRightDrivers`, в яких кожна сторона є інвертованою (рис. 3.8).

```
void movingNeutral() {
    if (lx > -7 && lx < 7) {
        LFout = 0;
        LRout = 0;
        RFout = 0;
        RRout = 0;
        stopDrivers();
    } else if (lx < -7) {
        LFout = ly;
        LRout = ly;
        RFout = ly;
        RRout = ly;
        turnLeftDrivers();
    } else if (lx > 7) {
        LFout = ly;
        LRout = ly;
        RFout = ly;
        RRout = ly;
        turnRightDrivers();
    }
}
```

Рисунок 3.8 – Функція руху на місці

Закінчивши з функціями руху, перейдемо до безперервного циклу програми.

3.3 Розробка алгоритму передачі даних між двома пристроями

Реалізація передачі даних між двома пристроями управління Arduino організована за допомогою універсального асинхронного інтерфейсу UART. Підпрограма реалізації функції записування та зчитування даних організована за допомогою програмного парсера побудованого через модуль FIFO побітового реєстру змін при зчитуванні даних, відповідального за рівень інтенсивності виконання обраної селектором функції.

Зі сторони першого пристрою, котрий приймає та оцифровує дані з радіоприймача, формується протокол даних та передається через монітор порта Tx до другого Rx. Для обробки надходячих даних використовується клас `parser`, бібліотека якого підключається на початку програми.

У тлі безперервно виконуваної функції знаходяться текстові змінні, що відстежують зміни в буфері монітору порта приймаючого дані пристрою, та відраховують час функцією таймера `milis()`. Якщо загальна отримана кількість байтів змінюється, це значення зберігається, а таймер оновлюється. За умови, що кількість байтів змінюється в період 10 мілісекунд або значення їх кількості досягне 60, функція `Serial.readBytesUntil(';', str, 15)` зчитує строку буфера по відповідному ключу першого символу протоколу даних, що підлягає парсингу. Термінатором протоколу даних, який підлягає парсингу слугує символ “;”. Отримані дані з буфера строки класу “Serial” записуються у раніше підготовлений одномірний масив на 15 комірок з типом даних `CHAR`. Для дострокового закриття строки буфера, котрий знаходиться в масиві даних, змінна “amount” рахує кількість отриманих байт за одиниці часу функції `millis()`, та в кінці строка буфера прирівнюється до нуля (`str [amount] = NULL;`).

На рисунку 3.9 наведено приклад програмного коду, у якому відбувається парсинг даних, отриманих через монітор порта від другої плати керування.

```

uint32_t us = micros();
char str[15];
int amount = Serial.readBytesUntil(';', str, 15);
str[amount] = NULL;
Parser data(str, ',');
int ints[3];
int am = data.parseInts(ints);

```

Рисунок 3.9 – Алгоритм парсингу отриманих даних

Після цього об'єкт Parser, котрий ініціалізується строковим типом даних та ключем у вигляді символу коми, розподіляє строку даних на окремі компоненти – цілі числа, зберігаючи їх до масиву. За цими умовами результатом буде три цілих числа у тій послідовності, в якій вони були відправлені першим пристроєм керування до монітору порта: throttle – ly, turn – lx та FNR. Обмежені значення ступеня і сторони повороту, а також газу потім використовуються у функціях руху.

Заключним етапом процесу керування у програмному коді є перетворення і мапінг значень змінних LFval, LRval, LRout, RFval, RRval, які, використовуючи функцію “analogWrite”, відправляють керуючий ШІМ-сигнал на драйвери, контролюючи швидкість обертання електродвигунів. Приклад мапінгу та керування виходами з ШІМ наведено на рисунку 3.10.

```

LFval = map(LFout, 0, 100, 0, 255);
LRval = map(LRout, 0, 100, 0, 255);
RFval = map(RFout, 0, 100, 0, 255);
RRval = map(RRout, 0, 100, 0, 255);
analogWrite(5, LFval);
analogWrite(6, LRval);
analogWrite(10, RFval);
analogWrite(11, RRval);

```

Рисунок 3.10 – Фрагмент програмного коду з перетворення значень для роботи з виходами з ШІМ

3.4 Проведення експерименту

При подачі відповідної напруги на обидва плати мікроконтролерів Arduino та відповідні контролери ШІМ, програмне забезпечення прирівнює сигнали ШІМ до нульового рівня. Всі дискретні та аналогові зміни програмного забезпечення прирівнюються до дефолтного стану налаштування в функції `void setup()`. В плати мікроконтролерів Arduino відповідального за приймання сигналів з радіоприймача: оголошуються числові та дискретні глобальні змінні для присвоєння зчитаних сигналів шести каналів радіоприймача і оброблені для протоколу передачі даних через асинхронний інтерфейс UART; відповідним електричним портам прирівнюються значення констант директивою `#define`; налаштовуються порти на зчитування дискретних сигналів, та для подальшої передачі даних через монітор UART відкликається клас `serial.begin` зі швидкістю порта в 115200 бод. В керуючого пристрою відповідального за керування контролерами сигналами ШІМ: відповідним електричним портам прирівнюються значення констант на вивід рівня сигналів ШІМ та для зчитування даних для виконання функції парсингу, через асинхронний інтерфейс UART, відкликається клас `serial.begin` зі швидкістю порта в 115200 бод.

Поки відповідний важіль “газу” пульта керування (`chanel_3`) не прийме стан нульового положення разом з відповідним перемикачем налаштування функції переміщення платформи (`chanel_6`), відповідні сигнали ШІМ та дискретні значення сигналів керування контролерами електромоторів будуть мати нульовий рівень.

Для початку переміщення платформи необхідно вибрати відповідну функцію перемикача налаштування напрямку (`chanel_6`), котрий в свою чергу буде змінювати стан числової змінної FNR -1,0,1 (Forward Neutral Rear) функції `void manual()` контролеру, відповідального за прийняття сигналів з радіоапаратури.

При значенні числової змінної FRN “1” або “-1” відповідні дискретні значення стану керування контролерами змінюються відповідно для руху вперед або назад. Функція повороту при цьому відбувається імітація пригальмовування відповідної сторони пар коліс платформи.

При значенні числової змінної FRN “0” відповідні дискретні значення стану керування контролерами приймуть нульове значення, до моменту руху важеля радіоапаратури відповідального за поворот платформи. При русі важеля радіоапаратури відповідального за поворот платформи, відповідні дискретні значення стану, та вихідні ШІМ сигнали керування контролерами, приймають значення інверсного стану пар електродвигунів один до одного для повороту платформи на місці.

На рисунку 3.11 зображено виконану мобільну платформу під час проведення експерименту з перевірки роботи двигунів.

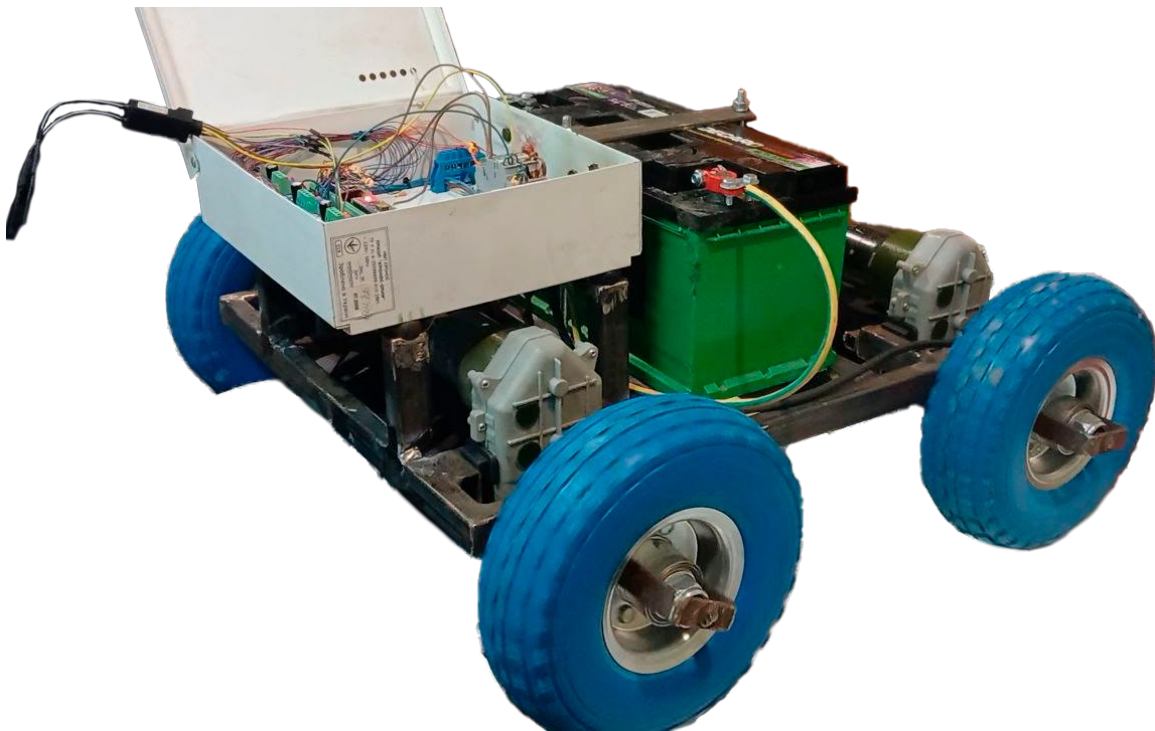


Рисунок 3.11 – Макет робототехнічної колісної мобільної платформи

3.5 Дослідження стійкості АСУ за алгебраїчними критеріями

Стійкість системи є однією з важливих умов, яким повинна відповідати АСУ. Через те, що на систему діють зовнішні сили, які призводять до її збудження або, навпаки, шкоди в нормальному стані, потрібно дослідити, чи здатна система повернутися до стану рівноваги.

До алгебраїчних способів розрахунку стійкості АСУ відноситься критерій Гурвіца. За ним спочатку потрібно побудувати визначник, що являє собою матрицю, коефіцієнти якої у порядку розташовуються по діагоналі. Кожен рядок заповнюється по порядку або парними або непарними коефіцієнтами, при цьому елементи з від'ємними індексами та більшими за останній замінюються на нулі.

Розглянемо передатну функцію, яка відповідає контуру системи, в якому знаходяться електродвигуни:

$$W(s)_{\text{роз}} = \frac{0,306975s^2 + 11,0121555s + 48400,44}{0,001380625s^2 + 0,05005525s + 48400} \quad (3.2)$$

Додамо змінну для роз'єднаної системи, значення підсилення, та передатну функцію виконавчого пристрою до скрипта середовища Matlab. Результат наведено на рисунку 3.12.

```
wgain = 30;
wr = tf([0.3036975 11.0121555 48400.44], [0.001380625 0.05005525 48400.002]);
wa = tf([0 1], [0 1 2]);
```

Рисунок 3.12 – Додані змінні до скрипта

Для розрахунку замкненої системи, зауважуючи на послідовне підключення, усі елементи було перемножено (рис. 3.13).

Wz =

$$\frac{9.111 s^2 + 330.4 s + 1.452e06}{0.001381 s^3 + 0.05282 s^2 + 4.84e04 s + 9.68e04}$$

Continuous-time transfer function.

wfb =

$$\frac{0.01258 s^5 + 0.9373 s^4 + 4.43e05 s^3 + 1.695e07 s^2 + 7.031e10 s + 1.406e11}{1.906e-06 s^6 + 0.01272 s^5 + 134.6 s^4 + 4.484e05 s^3 + 2.36e09 s^2 + 7.968e10 s + 1.499e11}$$

Continuous-time transfer function.

Рисунок 3.13 – Передатна функція для замкненої системи без та зі зворотнім зв'язком

Проведемо оцінку стійкості за коренями характеристичного рівняння:

$$1,906e-06 \cdot \lambda^6 + 0,01272 \cdot \lambda^5 + 134,6 \cdot \lambda^4 + 4,474e05 \cdot \lambda^3 + 2,36e09 \cdot \lambda^2 + 7,968e10 \cdot \lambda + 1,499e11. \quad (3.3)$$

Так як усі коефіцієнти характеристичного рівняння одного знаку, умова стійкості виконується.

Для продовження оцінки стійкості системи за критерієм Гурвіца з обраних коефіцієнтів створимо визначник. На рисунку 3.14 наведено матрицю визначників Гурвіца.

$$\text{delt} = \det \begin{pmatrix} a_1 & a_3 & a_5 & 0 & 0 & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & a_6 & 0 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & a_5 & 0 & 0 \\ 0 & a_0 & a_2 & a_4 & a_6 & 0 \\ 0 & 0 & a_1 & a_3 & a_5 & 0 \\ 0 & 0 & a_0 & a_2 & a_4 & a_6 \end{pmatrix}$$

Рисунок 3.14 – Головний визначник Гурвіца

За результатами розрахунків отримаємо такі значення: $\Delta_0 = 7.2479e+36 > 0$; $\Delta_1 = 4.8352e+23 > 0$; $\Delta_2 = 6.2963e+12 > 0$; $\Delta_3 = 4.5733e+03 > 0$. Отже необхідна умова виконується, що доводить стійкість системи.

3.6 Охорона праці

Вимоги до умов експлуатації мобільної платформи мають важливе значення для збереження макету в працюючому стані. У зв'язку з тим, що більшість мікроелектронних компонентів, які використані у системі керування мобільною платформою, можуть бути вразливими до чинників навколишнього середовища, їх положення на макеті було згруповано до одного місця та виконано у щитку. Щиток допоможе вберегти електроніку від пилу, якщо мобільна платформа буде використана у польових умовах, при несприятливих погодних умовах, як, наприклад, дощ чи сніг, щиток забезпечує захист від потрапляння всередину вологи. Доцільність захисту від вологи пояснюється тим, що вода слугує гарним провідником, через що є дуже великий ризик виникнення короткого замикання між контактами системи управління. Другий рівень захисту, що направлений на зменшення вірогідності виведення електроніки з ладу, забезпечується кріпленням плат керування та інших пристроїв на ніжки з діелектричними прокладками, які повністю ізолюють плати від щитку та корпусу платформи.

Окремо важливо згадати зміну електричного кола у двигунах, завдяки чому унеможлиблюється виникнення короткого замикання у випадку, коли на різні двигуни подається напруга з різною полярністю. Окрім цього у місцях прилягання двигунів і редукторів до корпусу мобільної платформи знаходяться діелектричні резинові прокладки, які також зменшують ризик виникнення аварійної ситуації та слугують для амортизації, тобто запобігання механічного ураження двох окремих модулів.

У випадку, коли мобільна платформа використовується в складських приміщеннях, для запобігання аварійних ситуацій робоче приміщення повинно бути добре освітлено, для чого потрібно провести розрахунки.

Якщо використовувати метод питомої потужності, відношення сумарної потужності ламп у приміщенні до площі освітлюваної поверхні дає значення, яке можна порівняти за стандартами освітленості приміщень по ДБН В.2.5-28-2006 [25].

Розрахуємо питому потужність за формулою 3.4, звернувши увагу, що у приміщенні на 76м^2 знаходиться шість кріплень для люмінесцентних ламп, в якому знаходиться 4 лампи по 18 Вт:

$$\omega = \frac{P}{S}, \quad (3.4)$$

де P – сумарна потужність усіх ламп у приміщенні;

S – площа освітлюваної поверхні.

Підставимо значення:

$$P = 18 \cdot 24 = 432 \text{ Вт},$$

$$\omega = \frac{432}{76} = 5,7 \text{ Вт/м}^2.$$

Далі потрібно знайти світловий потік для усіх ламп. Світловіддача для люмінесцентних ламп становить 70 люмен на 1 Вт, за цими значеннями знайдемо:

$$\Phi_{\text{одна}} = 18 \cdot 70 = 1260 \text{ лм},$$

$$\Phi_{\text{усі}} = n \cdot \Phi_{\text{од}}, \quad (3.6)$$

де n – кількість ламп, шт;

$\Phi_{\text{од}}$ – світловий потік для однієї лампи, лм.

$$\Phi_{yci} = 24 \cdot 1260 = 30240 \text{ лм.}$$

Розрахуємо освітленість у люксах:

$$E = \frac{\Phi_{yci}}{S}, \quad (3.7)$$

де S – площа приміщення, м².

$$E = \frac{30240}{76} = 397,4 \text{ лк.}$$

За даними, наведеними у ДБН В.2.5-28-2006 для приміщень проєктних зал і кімнат конструкторських бюро значення для комбінованого штучного освітлення – 400 лк. Отримані значення майже відповідають вимогам, але для збільшення освітленості можна також додати ще декілька ламп.

ВИСНОВКИ

У ході виконання кваліфікаційної роботи було досліджено процес створення колісної мобільної робототехнічної платформи та його кожен складову. Для цього на початку було проведено аналіз сучасних мобільних платформ, які класифіковано та систематизовано за типом рушія, програмного забезпечення та оперативної системи. Також було проаналізовано технічні засоби, щоб обрати серед них аналоги серед доступних для розробки макету, а також для забезпечення модульності, яка дозволить швидко знайти заміну у випадку виходу з ладу одного з модулів.

За конструкцією та способом переміщення було обрано колісний тип за його середню прохідність, яка здатна зберегти потенціал швидкості та вантажопідйомності у будь-яких умовах. Окрім звичайних коліс, яким було віддано перевагу, ніж всепрямованим колесам, цей вибір вплинув на подальшу розробку макету та зокрема його програмної частини – поворот платформи, основну частину якого реалізовано програмно, відбувається за принципом гусеничного рушія, чим значно спрощує конструкцію.

Апаратна база була підготовлена за створеною структурною схемою макету мобільної платформи, запчастини до якої були попередньо обрані та перевірені на сумісність.

Після роботи з механічною частиною, а саме: зміною конструкції двигунів, модифікацією редуктора та фіксацією коліс було розроблено схеми підключення пристроїв управління з драйверами двигунів, живлення обох від різних джерел та підключено радіоприймач.

Розроблена програма управління мобільною платформою за своєю сутністю є відкритою, тому, за потреби додати до конструкції модуль, скажімо, маніпулятора та мікрокомп'ютера можна вважати можливим.

Результати експериментів наглядно показали, що розроблений макет цілком справляється з задачами перевезення вантажів і здатен розвивати розраховану

швидкість. Що стосується запасу ходу, то реальні показники також наближуються до розрахованих, тому можна сказати, що розробка мобільної платформи була успішна – усі поставлені цілі було виконано.

Подальші дослідження з макетом будуть стосуватися розробки системи виявлення вибухонебезпечних предметів та зіставлення локаційної мапи, яку буде можливо переглянути та прийняти до уваги координати, що будуть зазначені. З точки зору актуальності подальші розробки даної мобільної платформи цілком співпадають з тією ціллю, що була початково покладена, тому що система, яка буде працювати у небезпечних умовах та може бути пошкоджена, за умови її модульності та легкозамінності деталей відповідає сьогоденним гуманітарним потребам.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Biswajit Mallick; Harish Chandra Mohanta. (2024) Development of a Mobile Robot using Arduino Uno. Volume: 6. Issue: 1. Page(s): 40-48. DOI:10.5281/zenodo.10804359.
2. What is Mobile Robot Platform. URL: <https://robotnik.eu/what-is-a-mobile-robotic-platform-inspection-in-the-construction-sector/> (дата звернення: 02.05.2024).
3. Невлюдов І. Ш., Андрусевич А. О., Євсєєв В. В., Новоселов С. П., Демська Н. П. Проектування мобільних маніпуляційних роботів: Монографія. – Х. :, 2022. – 427 с.
4. ДСТУ 3008: 2015 Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 31 с.
5. Невлюдов І. Ш. Дипломне проектування для студентів усіх форм навчання спеціальностей 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» [Текст]: навч. посіб. / І. Ш. Невлюдов, А. О. Андрусевич, О. В. Токарева, Г. В. Пономарьова – Київ-58, пр. Космонавта Комарова, 1, 2016 – 320 с.
6. Методичні вказівки до Підготовки атестаційної роботи бакалавра для студентів усіх форм навчання спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» освітньої програми: «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / упоряд.: І. Ш. Невлюдов, О. В. Токарева, Г. В. Пономарьова. – Харків: ХНУРЕ, – 2019. – 36 с.
7. China Custom Autonomous Mobile Platform Manufacturers, Suppliers - High Quality - RoboCT. China Mobile Robot, Compound Robot, Mobile Robot Components Manufacturers, Suppliers - RoboCT. URL: <https://www.roboct-global.com/mobile-robot-components/omnidirectional-mobile-platform/autonomous-mobile-platform.html> (дата звернення: 02.05.2024).
8. Crawler RoboTech Vision. RoboTech Vision. URL: <https://robotechvision.com/crawler> (дата звернення: 02.05.2024).
9. UnitreeGo1. Edu4Industry. Edu4Industry. URL:

<https://edu4industry.com/en/produkt/unitree-go1-2/> (дата звернення: 02.05.2024).

10. AgileX mobile robots: versatile and agile - Génération Robots - Blog. Génération Robots - Blog. URL: <https://www.generationrobots.com/blog/en/agilex-mobile-robots-versatile-and-agile/> (дата звернення: 02.05.2024).

11. Комплекс навчально-методичного забезпечення навчальної дисципліни «Гнучкі комп'ютеризовані виробничі комплекси» підготовки бакалавра спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» [Текст]: освітня-професійна програма: «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / ХНУРЕ; розроб. В. В. Євсєєв. – Харків, 2022. – 114 с.

12. Mega2560 Плати Ардуіно. Ардуіно в Україні. URL: <https://doc.arduino.ua/ru/hardware/Mega2560> (дата звернення: 27.05.2024).

13. Радіоуправління FlySky FS-I6 6Ch (з приймачем FS-IA6B і телеметрією) Купити. Хоббіманія URL: https://hobbymania.com.ua/tovar.php?id_tovar=3147 (дата звернення: 27.05.2024).

14. Плата ESP32-CAM з камерою OV2640, WiFi + Bluetooth. URL: <https://ardushop.in.ua/arduino/esp32-cam-with-ov2640-camera-wifi-bluetooth> (дата звернення: 27.05.2024).

15. ROS/Introduction - ROS Wiki. Documentation - ROS Wiki. URL: <https://wiki.ros.org/ROS/Introduction> (дата звернення: 27.05.2024).

16. Raspberry Pi Documentation. URL: <https://www.raspberrypi.com/documentation/computers/os.html> (дата звернення: 27.05.2024).

17. Getting Started with Arduino IDE. Arduino Documentation. URL: <https://docs.arduino.cc/software/ide-v2/tutorials/getting-started-ide-v2/> (дата звернення: 27.05.2024).

18. Контроллер Arduino Nano V3.0 ATmega328P-AU 5V 16M MiniUSB от Diymore. DiYelectronics. Розумні компоненти. URL: <https://detalipro.in.ua/kontroller-arduino-nano-v30-atmega328p-au-diymore-diymore> (дата звернення: 27.05.2024).

19. Nano IO shield expansion board for arduino screw terminals. Sharvielectronics: URL: <https://sharvielectronics.com/product/nano-io-shield-expansion-board-for->

arduino-screw-terminals/ (дата звернення: 27.05.2024).

20. Контролер Arduino Nano V3 AVR Купити. Хоббіманія. URL: https://hobbymania.com.ua/tovar.php?id_tovar=5144 (дата звернення: 27.05.2024).

21. Мотор склоочисника ВАЗ (2103-3730000) ДК МЕ241 (ID#2033293488) URL: <https://prom.ua/p2033293488-motor-dvornikov-vaz.html> (дата звернення: 27.05.2024).

22. Акумулятор DECARO 6 СТ-100-L 610031m купити у Києві. Каталог АКБ. URL: <https://evrodetal.com.ua/akkumulyatoryi/decaro/akkumulyator-decaro-6-ct-100-l-610031m/> (дата звернення: 27.05.2024).

23. Модуль XL4015-E1 buck step down DC-DC 5A понижуючий з регулятором струму і напруги. Харків Україна 3v3.com.ua. URL: https://3v3.com.ua/product_5532.html (дата звернення: 27.05.2024).

24. Методичні вказівки до виконання розділу «Охорона праці» у випускних роботах ОКР «бакалавр» усіх форм навчання [Текст] / упоряд.:Б. В. Дзюнзюк, В. А. Айвазов, Т. Є. Стищенко. – Харків: ХНУРЕ, 2012. – 28с.

25. ДБН В.2.5-28-2006 Природне і штучне освітлення. Останні новини, нормативи та публікації - ДБНУ - Державні будівельні норми України - норми: ДБН, ДСТУ, СНиП, ГОСТ, СН, ВБН. URL: <https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-394> (дата звернення: 10.06.2024).