

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Приладобудівний факультет

Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю

До захисту допущено:

в.о. завідувача кафедри АСНК

_____ Галина БОГДАН

«__» _____ 2025 р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра

**за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи та
технології в приладобудуванні»**

спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

на тему: «Логістичний робот для тилових військових робіт»

Виконав:

Студент IV курсу, групи ПМ-11

Оникійчук Богдан Ігорович _____

Керівник:

проф., д.т.н.

Киричук Юрій Володимирович _____

Рецензент:

асистент каф. КІТВП

Заєць Сергій Сергійович _____

Засвідчую, що у цьому дипломному
проєкті немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент _____

Київ – 2025 року

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4		Завдання на дипломний проєкт	2	
2	A4	ДП.ПМ-11.10.1760.000.ПЗ	Пояснювальна записка	65	
3	A1	ДП.ПМ-11.10.1760.000.СхС	Структурна блок-схема	1	
4	A1	ДП.ПМ-11.10.1760.000.СхА	Блок-схема алгоритму	1	
6	A1	ДП.ПМ-11.10.1760.000.СхЕ	Схема електрична	1	
7	A4	ДП.ПМ-11.10.1760.000.СП	Специфікація	1	
8	A1	ДП.ПМ-11.10.1760.000.СК	Складальне креслення	1	
9	A3	ДП.ПМ-11.10.1760.001.ПЗ	Корпус	1	
10	A4	ДП.ПМ-11.10.1760.001.ПЗ	Колесо	1	
11	A3	ДП.ПМ-11.10.1760.001.ПЗ	Двигун	1	

				ДП.ПМ-11.10.1760.000.ПЗ		
	ПБ	Підп.	Дата	Відомість дипломного проєкту	Лист	Листів
Розробн.	Оникійчук Б.І.				2	65
Керівн.	Киричук Ю.В.					
Консульт.						
Н/контр.						
Зав.каф.	Богдан Г.А.				КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. АСНК Гр. ПМ-11	

**Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: «Логістичний робот для тилкових військових
робіт»**

Київ – 2025 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Приладобудівний факультет
Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні»

ЗАТВЕРДЖУЮ

в.о. завідувача кафедри АСНК

_____ Галина БОГДАН

«__»_____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ
на дипломний проєкт студенту
Оникійчук Богдан Ігорович

1. Тема проєкту «Логістичний робот для тилових військових робіт», керівник проєкту проф., д.т.н. Киричук Ю.В., затверджені наказом по університету від «26» травня 2025 р. №1765-с.

2. Термін подання студентом проєкту: «13» червня 2025 р.

3. Вихідні дані до проєкту: габаритні розміри 750×500×300 мм, 4 колеса діаметром 250 мм, ширина протектора 100 мм, вага комплексу 25 кг, габаритні розміри корисного навантаження 450х300 мм, рекомендоване навантаження 15 кг, максимальне навантаження 30 кг, середня швидкість 8 км/год, максимальна швидкість 20км/год, запас ходу на одному заряді акумулятора 5-10 км, час автономної роботи 2 години, ємність акумулятора 6 А · год, напруга живлення 24 В, потужність акумулятора 500 Вт.

4. Зміст пояснювальної записки: ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ БЕЗПІЛОТНИХ СИСТЕМ У ВІЙСЬКОВІЙ ЛОГІСТИЦІ, ФУНКЦІОНАЛЬНІ БЛОКИ БЕЗПІЛОТНОГО

КОМПЛЕКСУ, АВТОНОМНЕ КЕРУВАННЯ НАЗЕМНИМ БЕЗПІЛОТНИКОМ,
КІНЕМАТИЧНА ТА ДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ РУХУ, РОЗРАХУНОК
ПАРАМЕТРІВ БЕЗПІЛОТНИКА

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо): структурна блок-схема, блок-схема алгоритму, схема електрична, складальне креслення, специфікація.

6. Дата видачі завдання 19.03.2025 року.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Визначення напрямку дослідження.	30.03.2025	
2	Проведення аналітичного огляду інформаційних джерел	03.04.2025	
3	Розробка структурної схеми	12.04.2025	
4	Аналіз блоків системи керування	18.04.2025	
5	Аналіз компонентів системи	28.04.2025	
6	Дослідження алгоритмів автономного керування	08.05.2025	
7	Розробка блок схеми алгоритму	20.05.2025	
8	Розробка принципової електричної схеми	25.05.2025	
9	Оформлення текстової частини ДП	30.05.2025	
10	Оформлення графічної частини ДП	31.05.2025	
11	Представлення ДП на перевірку науковому керівнику	05.06.2025	
12	Подання ДП до Екзаменаційної комісії	13.06.2025	
13	Захисти кваліфікаційних робіт	19.06.2025	

Студент

Оникійчук Б.І.

Керівник

Киричук Ю.В.

АНОТАЦІЯ

Метою даного дипломного проєкту є розробка безпілотного наземного комплексу для військової логістики, здатної працювати в ручному та автономному режимах у різних умовах місцевості. Під час виконання проєкту була розроблена конструкція безпілота, електрична схема живлення, підібрані інтегровані сенсори, виконавчі механізми та канали зв'язку.

В ході дослідження дипломного проєкту був проведений аналіз існуючих безпілотних систем, розглянуті структурні блоки необхідні для функціонування даного приладу, було детально досліджено систему керування.

Результатом розробки проєкту стала модель безпілота з ручним та автономним рухом, були підібрані компоненти безпілота які задовільняють граничні умови.

Даний проєкт може бути впроваджений у тилове забезпечення підрозділів для доставки боєприпасів, розвідки та евакуації поранених шляхом оснащення додаткового модулів, такі як медичного або вантажного призначення. Подальші дослідження передбачають інтеграцію системи машинного зору для виявлення перешкод, оптимізацію апаратних рішень та алгоритмів енергозбереження, оптимізація платформи під різноманітні модулі для певних військових операцій.

ABSTRACT

The purpose of this diploma project is to develop an unmanned ground complex for military logistics, capable of operating in manual and autonomous modes in various terrain conditions. During the project, the design of the drone was developed, the electrical power supply circuit was selected, integrated sensors, actuators and communication channels were selected.

During the research of the diploma project, an analysis of existing unmanned systems was conducted, the structural blocks necessary for the functioning of this device were considered, the control system was studied in detail.

The result of the project development was a model of a drone with manual and autonomous movement, and the components of the drone were selected that would satisfy the boundary conditions.

This project can be implemented in the logistics support of units for the delivery of ammunition, reconnaissance and evacuation of the wounded by equipping additional modules, such as medical or cargo. Further research involves integrating a machine vision system for obstacle detection, optimizing hardware solutions and energy-saving algorithms, and optimizing the platform for various modules for specific military operations.

СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ

БпНК – безпілотний наземний комплекс.

UGV – Unmanned ground vehicle (Безпілотний наземний транспортний засіб).

LIDAR – Light Detection and Ranging (Виявлення та вимірювання дальності світла).

IMU – Inertial Measurement Unit (інерційний вимірювальний пристрій).

GPS – Global Positioning System (система глобального позиціонування).

UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) – протокол для асинхронного обміну даними між пристроями.

LTE (Long Term Evolution) – стандарт бездротової високошвидкісної передачі даних для мобільних телефонів.

CRC (Cyclic Redundancy Check) – циклічна перевірка резервування.

ROS (Robot Operating System) – операційна система робота.

					<i>ДП.ПМ-11.10.1760.000.ПЗ</i>		
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	<i>Умовні скорочення</i>		
Розроб.		<i>Оникійчук Б.І.</i>					
Перев.		<i>Киричук Ю.В.</i>					
Н. Контр.							
Затв.		<i>Киричук Ю.В.</i>			<i>КПІ ім. І. Сікорського, ПБФ</i>		
					Літ.	Аркуш	Аркушів
						7	65

ЗМІСТ

СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	10
1. ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ БЕЗПІЛОТНИХ СИСТЕМ У ВІЙСЬКОВІЙ ЛОГІСТИЦІ.....	12
1.1 Мета та завдання дипломного проєкту	12
1.2 Американські наземні безпілотні системи	13
1.3 Європейські комплекси	14
1.4 Українські розробки.....	18
Висновки до розділу 1	23
2. ФУНКЦІОНАЛЬНІ БЛОКИ БЕЗПІЛОТНОГО КОМПЛЕКСУ	25
2.1 Система управління	25
2.1.1 Вибір мікроконтролера.....	26
2.2. Система зв'язку	28
2.3 Шасі	31
2.4. Електродвигун	32
2.4.1 Розрахунки електродвигуна	34
2.4.2 Драйвер двигунів.....	36
2.5 Вибір акумулятора	36
2.5.1 Стабілізатор напруги	38
2.6. Навігація та сенсорні системи	39
2.7 Вибір компонентної бази.....	43
Висновки до розділу 2	44
3. АВТОНОМНЕ КЕРУВАННЯ НАЗЕМНИМ БЕЗПІЛОТНИКОМ.....	45
3.1 Сучасні алгоритми автономної навігації	45
3.2 Вибір алгоритму автономного керування	49

					<i>ДП.ПМ-11.10.1760.000.ПЗ</i>			
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		<i>Оникійчук Б.І.</i>			<i>Зміст</i>	Літ.	Аркуш	Аркушів
Перев.		<i>Киричук Ю.В.</i>					9	65
						<i>КПІ ім. І. Сікорського, ПБФ</i>		
Н. Контр.								
Затв.		<i>Киричук Ю.В.</i>						

Висновки до розділу 3	50
4. КІНЕМАТИЧНА ТА ДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ РУХУ	52
Висновок до розділу 4	55
5. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ БЕЗПІЛОТНИКА	56
Висновки до розділу 5	59
ВИСНОВКИ.....	60
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ	61

					ДП.ПМ-11.10.1760.000.ПЗ				
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Зміст				
Розроб.		Оникійчук Б.І.							
Перев.		Киричук Ю.В.							
Н. Контр.									
Затв.		Киричук Ю.В.			КПІ ім. І. Сікорського, ПБФ				

ВСТУП

У сучасних умовах стрімкого розвитку воєнних технологій, питання автоматизації бойових та логістичних операцій стає важливим та перспективним напрямком розвитку безпілотників. Збройні конфлікти ХХІ століття дедалі більше характеризуються високою динамікою, інформаційною насиченістю, необхідністю швидкого реагування та зменшення впливу людського фактору на театрі воєнних дій. Військові підрозділи постійно стикаються з проблемами оперативного забезпечення боєприпасами, спорядженням, продовольством, а також з потребою у вивезенні поранених або виведенні пошкодженої техніки з зони бойового зіткнення. Традиційне виконання цих задач вручну є надзвичайно ризикованим і вимагає залучення особового складу. У цьому контексті використання безпілотних наземних комплексів, здатних автономно або під дистанційним керуванням виконувати логістичні завдання, відкриває нові горизонти підходів до військових операцій та збереження людей.

Даний проєкт має на меті розробку прототипу безпілотного наземного транспортного засобу, який зможе забезпечити автоматизоване перевезення вантажів, підвезення продовольства, боєприпасів або пального на передові позиції в умовах різноманітної місцевості. Комплекс розробляється з урахуванням апаратної (сенсорних систем) та алгоритмічної реалізації автономного управління без залучення оператора.

Актуальність проєкту зумовлена як глобальними тенденціями військової роботизації, так і безпосередніми потребами Збройних Сил. Сьогодні більшість логістичних завдань виконуються людьми вручну, та за допомогою традиційної техніки, яка є вразливою до вогневого ураження, залежна від наявності водіїв, пального та логістичної інфраструктури. У бойових умовах такі перевезення часто призводять до втрат серед особового складу. Безпілотні системи дозволяють мінімізувати ці ризики, зберегти життя особового складу, та зменшити фізичне навантаження. Крім того, роботизовані логістичні платформи

					<i>ДП.ПМ-11.10.1760.000.ПЗ</i>	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

здатні працювати у важкодоступних районах, цілодобово, без втоми і потреби у відпочинку, що значно підвищує оперативні можливості підрозділів.

Проект передбачає інтеграцію сучасних технологій у сфері безпілотних систем, реалізацію алгоритмів обробки даних з сенсорів, енергозабезпечення, телекомунікацій. Передбачене використання вбудованих комп'ютерів, таких як мікроконтролерів STM32.

Очікуваним результатом проєкту є створення функціональної моделі безпілотного наземного комплексу з гібридною системою керування, який буде здатен здійснювати рух в автономному режимі за заданим маршрутом з урахуванням поточної ситуації на місцевості; переключатися у ручний режим для прямого керування оператором на випадок складних тактичних ситуацій, пошкодження комплектуючих. Розроблений безпілотник повинен бути сумісним з різним типом дорожнього покриття та погодних умов, забезпечувати стабільний зв'язок на тактичних дистанціях; виконувати основні логістичні функції: доставка вантажів, евакуація поранених, транспортування спорядження тощо.

					<i>ДП.ПМ-11.10.1760.000.ПЗ</i>	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ БЕЗПІЛОТНИХ СИСТЕМ У ВІЙСЬКОВІЙ ЛОГІСТИЦІ

Огляд існуючих безпілотних наземних систем демонструє широкий спектр застосування цих технологій у найрізноманітніших сферах – від комерційної доставки до тактичних військових операцій. Хоча кожна із сфер має власні вимоги до функціональності, всі вони ґрунтуються на схожих технологічних принципах.

Для військової сфери адаптація рішень із цивільного сектору (зокрема логістичних або сільськогосподарських платформ) має великий потенціал. Завдяки гнучкій модульній архітектурі та потужним сенсорним системам, такі комплекси можуть бути перетворені на бойових або допоміжних роботів.

1.1 Мета та завдання дипломного проєкту

Мета дипломного проєкту полягає у розробці багатомодульного безпілотного наземного комплексу, призначеного для виконання завдань військової логістики з підтримкою як ручного, так і автономного режимів керування. Проєкт спрямований на створення функціонально завершеної, конструктивно оптимізованої платформи з адаптивною архітектурою, здатною до транспортування вантажів в умовах відкритої місцевості з обмеженим сенсорним та навігаційним забезпеченням. У процесі реалізації передбачається дослідити сучасні технічні рішення у галузі безпілотних систем, сформулювати вимоги до функціональності та конструкції комплексу, обґрунтувати вибір апаратних і програмних засобів, розробити кінематичну та динамічну модель руху, здійснити структурно-функціональне проєктування платформи, а також створити алгоритмічну базу для реалізації автономного пересування на основі даних від GPS, інерціальних сенсорів і лазерного датчику. Завершальним завданням проєкту стало проведення техніко-експлуатаційних розрахунків, які підтверджують працездатність запропонованих рішень у межах заданих умов.

					<i>ДП.ПМ-11.10.1760.000.ПЗ</i>	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.2 Американські наземні безпілотні системи

Розглянемо аналоги наземних безпілотників найбільш передових країн світу та безпосередньо Українські розробки.

– GDLS S-MET / MUTT (Multi-Utility Tactical Transport). Напів-автономний наземний робот від General Dynamics, розроблений для полегшення перевезення спорядження піхоти. Доступний у конфігураціях 4×4, 6×6 та 8×8. Його вантажопідйомність складає приблизно 272 кг (4×4), 408 кг (6×6) і 544 кг (8×8) [1].



Рисунок 1.1 – робот General Dynamics MUTT [1]

Може обладнуватися різними модульними платформами (включно з медичними ношами, додатковими багажниками тощо) та пропонує кілька режимів управління. Переваги: значно зменшує навантаження на військових, високий рівень автономності та можливість швидко модифікувати під конкретну місію. Недоліки: відносно обмежена вантажопідйомність у порівнянні з великими транспортними засобами та залежність від.

					<i>ДП.ПМ-11.10.1760.000.ПЗ</i>	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– TORC GUSS (Ground Unmanned Support Surrogate). Експериментальна автономна «вантажівка» Корпусу морської піхоти США. Побудована на шасі легкого автомобіля ITV (аналог джипа) з автопілотом від TORC Robotics. TORC GUSS продемонстрував можливість транспортування до 725 кг вантажу, а також перевезення поранених, із швидкістю близько 13 км/год [2].



Рисунок 1.2 – TORC GUSS [2]

Переваги: велика вантажопідйомність, здатність слідувати за солдатом із трекером для безпечної доставки припасів. Недоліки: на даний момент на стадії випробувань; обмежена офіційна інформація про бойову надійність; потребує супроводу оператора або швидкого перемикання на ручне керування у разі віддалення.

1.3 Європейські комплекси

– Rheinmetall Mission Master (Німеччина): Сімейство багатоцільових UGV з гібридним приводом, розрахованих на підтримку солдат. Варіант SP (Stealth & Portable) – низько профільний робот із електродвигуном, призначений для тилових задач біля фронту: тихого супроводження піхоти та перевезення

					ДП.ПМ-11.10.1760.000.ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

невеликих вантажів. Mission Master СХТ – більший гусеничний робот з поєднаним дизель-електричним двигуном, вантажопідйомністю до 1000 кг та загальною дальністю ходу 450 км [3].



Рисунок 1.3 – Комплекси Rheinmetall Mission Master [3]

Усі платформи можуть бути транспортовані гелікоптерами та вантажними літаками. Переваги: велика вантажопідйомність, запас ходу, можливість пересування у воді, низький рівень шуму на електротязі. Недоліки: висока складність конструкції, велика маса та вартість; потребують обслуговування гібридної силової установки; значні розміри у порівнянні з компактними безпілотниками.

– ARX Robotics Gereon RCS (Німеччина): Гусеничний автономний платформа для логістики та евакуації. Вантажопідйомність до 500 кг, дальність руху – до 40 км автономно [4].



Рисунок 1.4 – Комплекс ARX Robotics Gereon RCS [4]

					ДП.ПМ-11.10.1760.000.ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Використовується в навчаннях НАТО та поставляється Україні. Переваги: розробка вже перевірена у бойових діях, успішно оптимізована для автономних підвозів боєприпасів і медеваку. Недоліки: порівняно невелика вантажопідйомність; потребує безперешкодного каналу зв'язку для автономії.

– Milrem THeMIS (Естонія): Трековий модульний робот, розроблений для багатозадачності, включно з доставкою та евакуацією. Базова вага 850 кг, вантажопідйомність – 750 кг, максимальна швидкість – 50 км/год. Система в експлуатації в 16 країнах, зокрема в Нідерландах та Фінляндії (НАТО), а в Україні – для транспорту боєприпасів і розмінування [5]. Переваги: широкий набір модулів для даної системи (модульна архітектура, легко додати модулі зі зброєю чи сенсорами). Недоліки: вимагає потужної тяги для подолання перешкод, пагорбів, доволі помітний через великі габарити.

– IAI-FFG Rex MK II (Ізраїль/Німеччина): Прототип автономної 6×6 платформи, що здобула перше місце в конкурсі ELROB-2024. Розрахований на завдання підтримки піхоти: доставка боєприпасів, обладнання, медичної амуніції, евакуація поранених; має комплекс сенсорів (оптичні та радарні) для орієнтування на місцевості [6]. Переваги: багатоцільове призначення, здатність діяти автономно. Недоліки: наразі на стадії випробувань, немає досвіду реально використання; деталізовані характеристики не оголошені, тому важко визначити серйозні недоліки.



Рисунок 1.5 – Комплекс IAI-FFG Rex MK II [6]

					<i>ДП.ПМ-11.10.1760.000.ПЗ</i>	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– QinetiQ Titan (Великобританія): Багатоцільовий двогусеничний безпілотник, також брав участь у програмах США (SMET) та Британії (ALMRS). Вага – 900 кг, вантажопідйомність – до 680 кг. Оснащений стандартними модулями для доставки вантажу і евакуації, може перевозити ножний бульдозер, ноші, ящики тощо [7]. Переваги: висока броньованість, прохідність. Недоліки: велика власна маса, дороговартісна розробка.



Рисунок 1.6 – Комплекс QinetiQ Titan [7]

– Noriba MIRA Viking (Великобританія): 6×6 мультикомандний безпілотник, створений для масштабних завдань – підвезення, CBRN-розвідка (від англійського Chemical, Biological, Radiological, and Nuclear) тощо. Маса 2 т, вантажопідйомність – 750 кг, максимальна швидкість – 50 км/год, дальність ходу – 200 км. Може використовувати штучний інтелект і низькошвидкісні канали зв'язку для навігації [8]. Переваги: велика дальність ходу і швидкість, автономність у GPS-обмежених районах, високотехнологічні системи спостереження. Недоліки: проект все ще розвивається, обмежена інформація про бойову надійність, висока вартість.



Рисунок 1.7 – Комплекс Horiba MIRA Viking [8]

1.4 Українські розробки

– ZeDigital D-21 / D-21-12R: Вітчизняний наземний робот для логістики, схвалений Міноборони у 2025 році. Може перевозити їжу, боєприпаси, спорядження та евакуювати поранених. Існує варіант з бойовим модулем, що дозволяє застосовувати кулемет D-21 для вогневої підтримки [9]. Переваги: універсальна збірка (комбінує транспортні та бойові функції), захищене дистанційне керування, стійкість до електронних перешкод. Недоліки: невеликий запас ходу, потреба в потужних батареях та зарядній інфраструктурі.



Рисунок 1.8 – Комплекс ZeDigital D-21 [9]

					ДП.ПМ-11.10.1760.000.ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– «Паук» (Spider): Український легкий безпілотник (вага 50 кг, вантажопідйомність – 100 кг). Чотири електродвигуни забезпечують маневреність на схилах і вузьких дорогах. Оснащений захищеним зв'язком (стійким до РЕБ) і може перевозитися групою по два в кузові пікапу завдяки своїм габаритам [10]. Переваги: мобільність і компактність (швидко розгортаються біля фронту), низький рівень шуму, підвищена прохідність за рахунок незалежних коліс. Недоліки: дуже обмежена вантажопідйомність, невисока швидкість і відносно низький ресурс батареї.



Рисунок 1.9 – Комплекс Spider [10]

– «Віслук» (Donkey): Середньоваговий український вантажний робот. Може перевозити 200 кг вантажів і навіть тягнути транспорт розміром з позашляховик, що застряг у багнюці. Має стійкий канал керування (захищений від глушінь) і опцію дротового під'єднання [11]. Переваги: більша потужність порівняно з «Spider», можливість буксирування застряглих машин. Недоліки: необхідність обслуговування силової установки.

– UNEX: безпілотник українсько-чеської розробки – амфібійна розвідувально-ударна платформа. Завдяки широким шинам та низькому тиску на ґрунт може рухатись по воді, болоту, льоду тощо. Випробування показали, що UNEX може проїжджати навіть по кераміці та чашкам без збитків, вказуючи на

дуже делікатний тиск на поверхню. В конфігураціях зумовленої робо-мобільної оснастки платформа виконує логістичні, протимінні, евакуаційні й бойові завдання [12]. Переваги: унікальна розробка, універсальність (один шасі – і транспортування, і розмінування, і бойова підтримка), наднизький тиск і висока прохідність (не активує протитанкові міни). Недоліки: поки що у сертифікації; велика вага та габарити робота у логістичній конфігурації; вартість і складність виробництва таких машин.



Рисунок 1.10 – Комплекс UNEX [12]

– «Тарган» (сімейство): Легкі українські UGV для тактичної логістики. Модифікація Тарган 2К: тиха електродвигунна платформа, дальність ходу до 20 км, можна нести різні види вантажів та виконувати розвідку. Вантажопідйомність старших моделей ≈ 200 кг. Вже впроваджена в армії (сертифікована восени 2024 р.) для доставки припасів [13]. Переваги: компактність і безшумність (мінімізує ймовірність виявлення), відносна дешевизна ($\approx 3000\$$ за одиницю Тарган 2К), висока надійність. Недоліки: обмежена вантажність, залежність від акумуляторів (20 км – максимальна), потреба в операторі.

					ДП.ПМ-11.10.1760.000.ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 1.11 – Комплекс Тарган 2К [13]

– «Gimli» (сімейство): Нова лінійка багатоцільових легких безпілотників, прийнята на озброєння в лютому 2025. Зазвичай електричні, вони мають «тихий» режим роботи: кількагодинна робота на одному заряді. Вантажопідйомність – до 150–200 кг (схоже до «Тарган»). Модульна конструкція дозволяє використовувати їх для евакуації, транспортування боєприпасів, а також за потреби встановлювати бойове озброєння [14]. Переваги: висока адаптивність (легко переобладнати), електротяга на малих вуличних операціях, може діяти вночі завдяки інфрачервоній-камері. Недоліки: відносно малі розміри та відповідно невелика вантажність, новизна (обмежена практика бойового використання).



Рисунок 1.12 – Комплекс Gimli [14]

– «Веpr» (Vepr): Вітчизняний гусеничний робот-вантажівка. Масивний і броньований: на полігоні витримував 16 атак бойових квадрокоптерів. Електроживлення забезпечує до 36 годин безперервної роботи (залежно від навантаження), експериментальна дальність ходу – 6 км (на полігоні; в реальних умовах пересування переважно до лінії фронту). Може буксирувати до 1000 кг вантажу [15]. Переваги: висока броньованість, великий тяговий потенціал (буксирування важких машин), перевірена на фронті (декілька тижнів безперервної доставки боєприпасів). Недоліки: велика вага і габарити (ускладнене розгортання), невелика швидкість (6 км – тестова), вимагає значних ресурсів енергії.



Рисунок 1.13 – Комплекс Vepr [15]

Таблиця 1.1 – Порівняльна таблиця безпілотників для логістики

Модель (країна)	Вантажо-підйомність	Запас ходу (км)	Швидкість	Особливості
MUTT 4×4 (США)	≈272 кг	–	–	Багатофункц. БпНК (S-MET)
MUTT 8×8 (США)	≈544 кг	–	–	Вантажні варіанти (8×8)
Titan (ББ)	≈680 кг	–	–	Модульний 2-гусеничний БпНК
Viking (ББ)	750 кг	200 км	50 км/год	6×6 гібрид, AI-навчання
THeMIS (Естонія)	750 кг	–	50 км/год	Гусеничний багатоцільовий БпНК

Продовження таблиці 1.1

Модель (країна)	Вантажо-підйомність	Запас ходу (км)	Швидкість	Особливості
Gereon RCS (Німеччина)	500 кг	40 км	—	Логістичний гусеничний БпНК
Mission Master CXT (Нім.)	1000 кг	450 км	—	Гібридний амфібійний БпНК
Spider (Україна)	100 кг	—	—	Легкий робот-вантажник (тактичний)
Осел (Україна)	200 кг	—	—	Середній робот-буксир
Tarhan 2K (Україна)	200 кг	20 км	—	Тиха електроплатформа
Gimli (Україна)	150–200 кг	—	—	Компактний модульний робот
Vepr (Україна)	тягне до 1000 кг	6 км (тест)	—	Броньований гусеничний БпНК

Висновки до розділу 1

Порівнюючи характеристики, можна виділити кілька категорій оптимальних рішень для військової логістики. Великовантажні БпНК (наприклад, Rheinmetall Mission Master CXT чи ARX Gereon RCS) мають високу вантажопідйомність (до 1 т) і значну дальність ходу, що робить їх ефективними для масштабних перевезень на «лінію тилу». Водночас вони громіздкі та дорогі, тому їх масштабне розгортання вимагає серйозних ресурсів (транспортування, технічна підтримка). Для ближніх перевезень у тактичних зонах корисні компактні БпНК (наприклад, Spider, Tarhan 2K, Gimli) з електродвигуном. Вони легко пересуваються поруч із ближніми підрозділами, мають низький акустичний профіль і можуть діяти у зонах з радіоперешкодами, але мають обмежену вантажопідйомність (до 100–200 кг) і залежність від заряду батареї. Щодо надійності, варто віддавати перевагу системам, перевіреним у бойових або навчальних випробуваннях. Наприклад, німецький Mission Master та естонський THeMIS уже інтегровані у деякі бойові бригади та показали стабільну роботу.

Українські розробки (D-21, Vepr, Tarhan) швидко розвиваються: Міноборони схвалило їх застосування та отримало позитивні відгуки від

					ДП.ПМ-11.10.1760.000.ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

військових. Їх виробництво нарощується (за держпрограмами закуплено тисячі БпНК), що забезпечує масштабованість та подальший розвиток даного напрямку.

					<i>ДП.ПМ-11.10.1760.000.ПЗ</i>	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. ФУНКЦІОНАЛЬНІ БЛОКИ БЕЗПІЛОТНОГО КОМПЛЕКСУ

Розглянемо безпосередньо структуру безпілотної наземної платформи, а також її системи керування на базі мікроконтролера STM32. Спочатку описав апаратні компоненти: ходову частину, сенсорний блок (LiDAR, GPS, IMU, камери), обчислювальні й комунікаційні модулі та енергетичну систему.

Безпілотний наземний комплекс є інтегрованою багаторівневою системою, що поєднує потужну електромеханічну базу, гнучку модульну компоновку, багатофункціональні сенсорні й навігаційні підсистеми, а також здатність до автономного функціонування в умовах бойового середовища, тому потрібно детально дослідити кожен компонент, та на основі цього обґрунтувати вибір конкретної елементної бази.

2.1 Система управління

Система управління є центральною ланкою безпілотного наземного комплексу, що забезпечує узгоджену роботу всіх його підсистем – сенсорів, виконавчих механізмів, джерел живлення та навігаційних модулів. Основним її завданням є обробка вхідних даних, формування алгоритмів руху та передача команд на виконавчі пристрої.

Функціонально система управління виконує декілька ключових ролей. Вона забезпечує прийом інформації з датчиків положення, швидкості, відстані до перешкод, аналізує ці дані в режимі реального часу і на їх основі генерує сигнали керування виконавчими механізмами, зокрема двигунами.

До системи управління безпілотного наземного комплексу висувається низка вимог. Насамперед, вона повинна мати достатню обчислювальну потужність для обробки численних сенсорних сигналів та виконання керуючих алгоритмів у реальному часі. Надзвичайно важливою є підтримка багатьох периферійних інтерфейсів – UART, SPI, I²C, PWM – для одночасного підключення GPS-модуля, IMU, драйверів двигунів, систем зв'язку та інших

					<i>ДП.ПМ-11.10.1760.000.ПЗ</i>	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

компонентів. Також система має бути енергоефективною, компактною, з можливістю автономної роботи та підтримкою засобів самодіагностики. Не менш важливою є відмовостійкість: навіть у випадку збоїв окремих вузлів система повинна переходити в безпечний режим або зберігати контроль над критичними функціями.

Серед мікроконтролерів, які можуть бути використані в якості основи для блоку управління, є представники STM32, Arduino, ESP32, та інші.

2.1.1 Вибір мікроконтролера

Для розробки безпілотного наземного комплексу для військової логістики в якості основного обчислювального елемента системи керування доцільно обрано мікроконтролер STM32H743, який належить до серії STM32H7 архітектури ARM Cortex-M7, розробленої компанією STMicroelectronics.

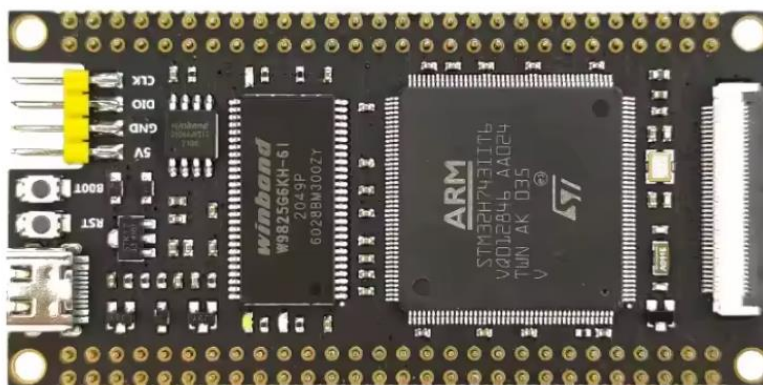


Рисунок 2.1 – Мікроконтролер STM32H743IIT6 [16]

Мікроконтролер STM32H743IIT6 належить до високопродуктивної серії STM32H7 і працює на основі ядра ARM Cortex-M7 з тактовою частотою до 480 МГц, забезпечуючи надзвичайно високу швидкодію при обробці даних у режимі реального часу. Він має 2 МБ Flash-пам'яті та 1 МБ оперативної пам'яті SRAM, що на кілька порядків перевищує характеристики мікроконтролерів середнього класу. Такий об'єм пам'яті та обчислювальна потужність відкривають можливості для реалізації не лише низькорівневого керування приводами, збору

					ДП.ПМ-11.10.1760.000.ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

та попередньої обробки даних від сенсорів, а й алгоритмів локальної навігації, векторної навігації та навіть елементів SLAM. Завдяки розширеному набору апаратних таймерів, підтримці високошвидкісних шин АНВ/АРВ та контролерів DMA, STM32H743 дозволяє реалізувати прецизійне керування моторними каналами, модулями живлення, а також синхронізовану роботу з сенсорними системами, зокрема LIDAR, IMU, GPS.

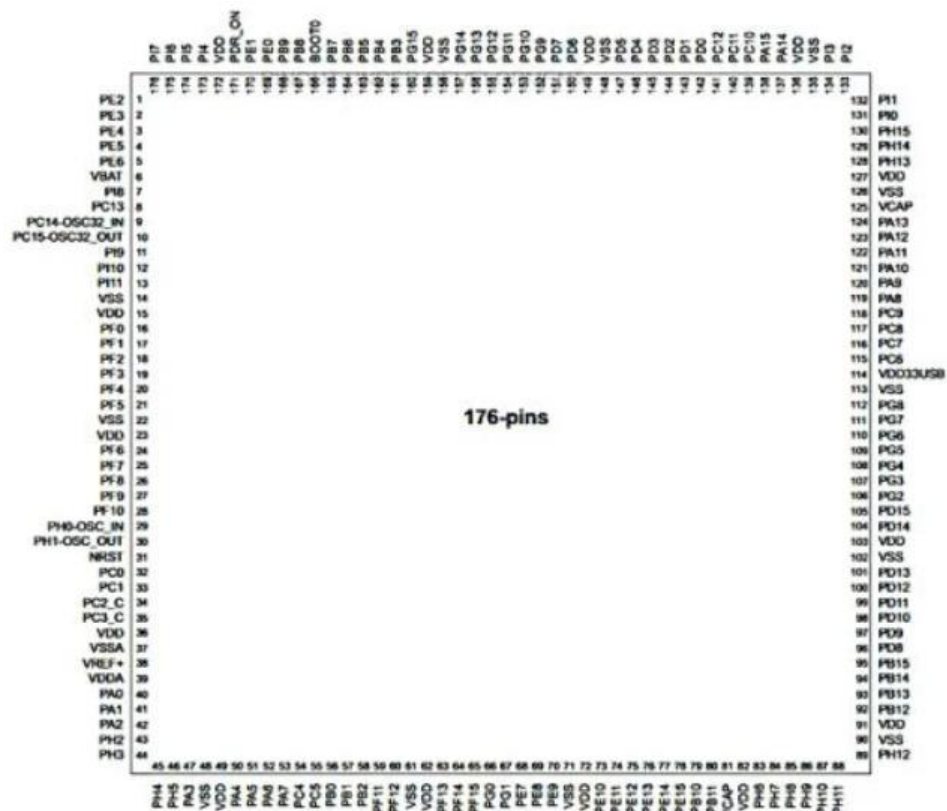


Рисунок 2.2 – Піни STM32H743IIT6

Одна з ключових технічних переваг STM32H743IIT6 — це надзвичайно багатий набір периферійних інтерфейсів. Контролер підтримує до 8 UART/USART, 6 SPI, 4 I²C, 3 ADC 16-біт, 2 DAC, USB OTG HS/FS, а також інтерфейси CAN FD, Ethernet MAC, SDMMC і FMC для роботи з пам'яттю або периферією високої пропускної здатності [16]. Це дозволяє йому ефективно інтегруватися з широким спектром цифрових і аналогових сенсорів, включаючи GNSS-приймачі, інерціальні вимірювальні блоки, ультразвукові датчики, енкодери, лідара, телеметричні модулі та блоки зв'язку. Багатоканальні таймери

					ДП.ПМ-11.10.1760.000.ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

з підтримкою ШІМ-режимів та апаратна обробка переривань забезпечують точне керування швидкодіючими системами приводу, включаючи індивідуальне керування кожним із чотирьох коліс у конфігурації 4x4.

Потужна архітектура STM32H743 супроводжується ефективною системою енергоспоживання, яка передбачає кілька режимів зниження енергоспоживання (Sleep, Stop, Standby) без втрати даних у SRAM або реєстрах. Це робить його придатним для застосування у мобільних автономних платформах, які живляться від батареї та потребують енергетичної ефективності під час простою або очікування команди. Завдяки широкому температурному діапазону експлуатації від -40°C до $+105^{\circ}\text{C}$, а також високому рівню захищеності периферії, мікроконтролер демонструє надійність за різних кліматичних та польових умовах, що характерні для військових операцій.

У структурі наземного безпілота STM32H743 виконує роль центрального керуючого вузла, який координує роботу блоку сенсорів (LIDAR, IMU, GPS), здійснює високоточне формування сигналів керування приводами, реалізує алгоритми автономного керування, а також виконує надає дані оператору через LoRa або радіоканали.

Таким чином, STM32H743ПТ6 є надзвичайно потужним ефективним вибором для реалізації керуючого блоку в складі безпілотного наземного комплексу, що вимагає не лише базового керування апаратними ресурсами, а й складних алгоритмів автономного функціонування.

2.2. Система зв'язку

Ефективне функціонування безпілотного наземного комплексу у військових умовах неможливе без надійної, адаптивної та стійкої до завад системи зв'язку. Саме зв'язок є критичним компонентом, що забезпечує обмін даними між оператором і платформою, інтеграцію в загальну інформаційну систему управління військами, передавання телеметрії, отримання команд та, у перспективі, координацію з іншими автономними системами у складі бойового

					<i>ДП.ПМ-11.10.1760.000.ПЗ</i>	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

рою. Враховуючи можливі труднощі в середовищі застосування, система зв'язку повинна одночасно відповідати ряду вимог: стійкість до перешкод і глушіння, низьке енергоспоживання, достатня дальність дії, адаптивна пропускна здатність залежно від типу переданих даних (команди, телеметрія, відео).

Для даного проєкту розглянемо різні типи систем зв'язку що реалізуються на базі багаторівневої архітектури, яка поєднує різні технології обміну даними залежно від відстані, типу переданої інформації та умов середовища.

Основним каналом зв'язку оберемо LoRa-модулі на основі чипа SX1278, що працюють у діапазоні 433 або 868 МГц. Цей вибір зумовлений необхідністю забезпечення стійкого зв'язку на відстані до 5-10 км при низькому енергоспоживанні та обмеженому обсязі даних. LoRa забезпечує високу надійність за рахунок розширеної модуляції спектра, що дозволяє протистояти перешкодам, а також мінімізує вірогідність втрати пакету. Цей канал призначений головним чином для передавання команд управління та телеметричних параметрів – координат, стану акумулятора, швидкості, температури, повідомлень про несправності тощо.

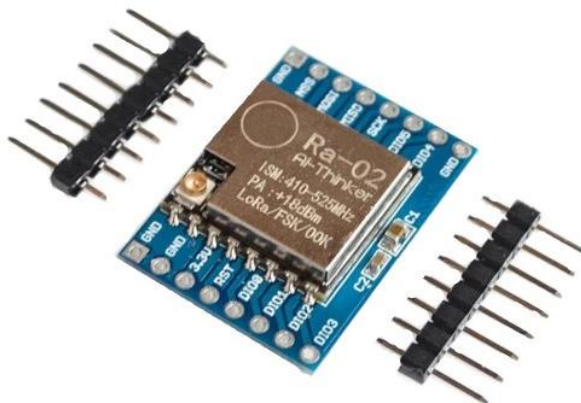


Рисунок 2.3 – Модуль LoRa Ra-02 SX1278 433МГц [17]

Додатково для коротких системних сигналів використовується Wi-Fi-модуль ESP32, який дозволяє організувати пряму точку доступу до платформи для відображення діагностичної інформації, оновлення прошивки та локального керування у тестовому середовищі. Один цей канал не призначений для

					ДП.ПМ-11.10.1760.000.ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

польових умов через низьку стійкість до перешкод і обмежену дальність дії, проте він відіграє певну роль у стадії розробки, а також як резервний канал при роботі в зоні прямої видимості, на коротких дистанціях.

Як альтернативу та розширення функціональності, у проєкті також передбачено можливість використання модулів зв'язку стандарту LTE (наприклад, SIM7600E), які можуть бути активовані для передавання відеопотоку з бортових камер, синхронізації з віддаленим сервером або контролю з командного пункту у разі наявності покриття мобільного оператора. Це рішення потребує реалізації шлюзу передачі даних із відповідною маршрутизацією на обчислювальному модулі (наприклад, Raspberry Pi). Під час активної фази бойових дій LTE може бути недоступним або вразливим до перешкод, тому його використання розглядається як допоміжний інструмент, але не як основний канал зв'язку.

Реалізація системи зв'язку передбачає модульну побудову, де кожен комунікаційний пристрій підключається до мікроконтролера STM32H743IIT6 через відповідний інтерфейс: LoRa – через SPI, LTE-модуль – через UART з підтримкою AT-команд. Комунікаційні протоколи оптимізовані для обсягу переданих даних, використовуючи структурування пакетів у форматі TLV (Type-Length-Value). Для захисту інформації на рівні LoRa реалізовано базове шифрування пакетів із CRC-контролем, що забезпечує цілісність даних.

Високий рівень інтеграції системи зв'язку з навігаційними та діагностичними підсистемами дозволяє забезпечити постійний контроль над станом платформи, її координатами та працездатністю, а у випадку аварійної ситуації – ініціювати зворотний зв'язок або аварійне завершення місії. У перспективі передбачається розширення до мультиагентного обміну інформацією між кількома UGV за допомогою LoRa-меш-мережі або спеціалізованих протоколів, що забезпечить колективне планування маршрутів і узгоджену логістику на полі бою.

Отже, система зв'язку в проєкті є багатокomпонентною, масштабованою і стійкою до зовнішніх впливів, а її реалізація дозволяє забезпечити повноцінну

					<i>ДП.ПМ-11.10.1760.000.ПЗ</i>	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

взаємодію між безпілотником, оператором та іншими системами управління в умовах реального бойового застосування.

2.3 Шасі

У структурі безпілотного наземного комплексу шасі та корпус відіграють фундаментальну роль, оскільки формують не лише опорну базу для всіх функціональних підсистем, а й забезпечують механічну стійкість, захист від впливів зовнішнього середовища, можливість пересування на складному рельєфі та адаптацію до різних функціональних модулів. У військових умовах дані компоненти повинні відповідати ряду специфічних вимог, зокрема високій удароміцності, стійкості до вібрацій, пилу, води та температурних перепадів, при цьому зберігаючи компактність, малопомітність і можливість швидкого обслуговування.

У проекті було прийнято рішення розробити шасі з габаритними розмірами в межах 750×500×300 мм, що відповідає умовній категорії легких роботизованих платформ типу "Тарган" або "Спайдер", які успішно застосовуються в зоні бойових дій для оперативної логістики або мінування. Такий розмір дозволяє платформі залишатися мобільною в міській забудові, транспортуватися у стандартному військовому транспорті, а також легко маскуватися або ховатися за природними укриттями.

Корпус проектується з використанням алюмінієвого сплаву типу D16T або 6061-T6, що має високу питому міцність, корозійну стійкість і придатність до механічної обробки та зварювання. Локальні ділянки, де розміщуються силові елементи або акумулятори, укріплюються вставками зі сталі 65Г або вогнетривких полімерів з армуванням.

Ходова частина базується на чотириколісному незалежному шасі з гумовими пневматичними шинами діаметром до 250 мм, змонтованими на амортизованих незалежних підвісках. Це дозволяє зменшити динамічне навантаження на корпус та компоненти при русі по ґрунтовій місцевості. Як

					<i>ДП.ПМ-11.10.1760.000.ПЗ</i>	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

варіант гусеничної ходової частини, може бути розглянута концепція з двома гумовими гусеницями, як у Milrem Themis, проте така система збільшує масу і складність конструкції, тому в рамках полегшеного варіанту логістичного UGV перевага надається колесам.

Також увагу приділено системі модульного кріплення, яка є важливою для адаптації платформи під різні задачі. В основі багатомодульності — механічні напрямні типу Т-подібного профілю (алюмінієві профілі 20×20 або 30×30), розміщені по периметру верхньої панелі та бокових стінок корпусу. Завдяки стандартизованим кріпленням, модулі можуть бути встановлені без спеціальних інструментів за допомогою швидкознімних фіксаторів або ексцентрикових замків. Це дозволяє оперативно адаптувати платформу до задачі, наприклад, встановити вантажний контейнер, підйомний механізм, відеомодуль або комунікаційний ретранслятор.

Таким чином, у запропонованому проекті реалізовано конструктивне рішення, що базується на поєднанні захищеного алюмінієвого корпусу, 4х4 ходової частини та уніфікованої системи модульного кріплення. Це забезпечує платформі гнучкість у конфігурації, зниження впливу зовнішніх навантажень, спрощення технічного обслуговування та підлаштування під умови бойового застосування.

2.4. Електродвигун

Очевидно що електродвигуни безпосередньо забезпечують здатність безпілота до пересування, маневрування, подолання перешкод і змін рельєфу. Для військової логістичної платформи використання саме електродвигунів обумовлене рядом технічних і тактичних переваг. Насамперед, електродвигуни забезпечують високу керованість крутного моменту, майже миттєву реакцію на команди управління, низький рівень шуму.

У контексті заданих габаритних параметрів платформи (750×500×300 мм), маси (25 кг), навантаження до 30 кг і колісної формули 4×4 з кліренсом 100 мм,

					<i>ДП.ПМ-11.10.1760.000.ПЗ</i>	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вибір електродвигуна повинен задовольняти вимоги до тяги, швидкості (до 20 км/год) та енергоефективності на дальності не менше 5 км з корисним навантаженням.

Переглянувши аналоги електродвигунів, виявив що для доцільне використання двигунів типу MY1020 24V 500W або ZYT-13 350W, які широко використовуються в електроскутерах і роботизованих платформах. Вони мають компактну форму, достатню потужність, можливість інтеграції з редуктором та енкодером, і стабільно працюють на напрузі 24 В. У більшості випадків двигун використовується з зовнішнім редуктором або ланцюговою передачею, що дозволяє знизити оберти та підвищити крутний момент для приводу коліс.



Рисунок 2.4 – Електродвигун MY1020 24V 500W [18]

					ДП.ПМ-11.10.1760.000.ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.1 – Характеристики електродвигуна MY1020 24V 500W

Параметр	Значення
Модель	MY1020
Тип двигуна	Двигун постійного струму з щітками
Номінальна напруга	24 В
Номінальна потужність	500 Вт
Максимальна потужність (короткочасно)	до 750 Вт
Номінальний струм	~26 А
Максимальний струм	до 35 А
Номінальна швидкість обертання	приблизно 2600 об/хв
Крутний момент (номінальний)	~1.8 Н·м
Передача/редуктор	Зазвичай постачається без редуктора
Вал (тип і діаметр)	Шліцьовий вал / Ø10–12 мм (залежно від модифікації)
Напрямок обертання	Ревсиривний (зміна полярності)
Тип охолодження	Пасивне (повітряне, з радіатором)
Клас ізоляції	В
Габаритні розміри	~170×120×95 мм
Маса двигуна	~4.0–4.5 кг
Монтажні отвори	Стандартні кріплення під болти М6 або М8
Рекомендований контролер	24V 500–750W з підтримкою струму до 35 А

2.4.1 Розрахунки електродвигуна

Маємо такі початкові дані:

- Габаритні розміри (без урахування розмірів антени): 750×500×300
- Вага: 25 кг
- Колісна формула: 4х4.
- Кліренс (дорожній просвіт) – 100мм
- Габаритні розміри корисного навантаження: 450х300
- Рекомендоване навантаження: 10-20 кг
- Рекомендована швидкість – 8-10км/год
- Максимальна швидкість – 20км/год
- Максимальне навантаження: 30 кг
- Запас ходу на одному заряді аккумулятора (з корисним навантаженням 10кг): 5+ км

					ДП.ПМ-11.10.1760.000.ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Проведемо розрахунки щоб визначити чи здатен даний двигун забезпечити необхідну швидкість та потужність для ефективної роботи безпілота.

Для рівномірного руху по твердій поверхні основним опором є опір тертя:

$$F_{\text{коч}} = mg\mu \quad (2.1)$$

де m – сумарна маса платформи разом з вантажем (25 кг + 10 кг), 35 кг;

g – прискорення вільного падіння, 9.81 м/с^2 ;

μ – коефіцієнт опору коченню (для гумових шин по асфальту), 0.015.

Маємо

$$F_{\text{коч}} = 35 * 9.81 * 0.015 = 5.15 \text{ Н}$$

Розрахуємо необхідну потужність на одного двигуна для подолання тертя як добуток сили на швидкість з урахуванням ККД:

$$P_{\text{двиг}} = \frac{F_{\text{коч}} * v}{\eta} \quad (2.2)$$

Де $v = \frac{8}{3.6} = 2.22 \text{ м/с}$;

η – ККД електродвигуна, 0.85.

Тоді

$$P_{\text{двиг}} = \frac{5.15 * 2.22}{0.85} = 13.47 \text{ Вт}$$

Оскільки платформа має колісну формулу 4×4, кожне колесо оснащується окремим двигуном. Тоді сумарна потужність буде:

$$P_{\text{заг}} = 4 * P_{\text{двиг}} = 4 * 13.47 = 53.86 \text{ Вт} \quad (2.3)$$

Тобто необхідно обрати двигун з потужність не менше 53,86 Вт. Для електродвигуна MY1020 24V 500W номінальна потужність 500 Вт. Отже, даний

					ДП.ПМ-11.10.1760.000.ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

компонент задовольняє граничні умови і його можна сміливо використовувати в даному проекті.

2.4.2 Драйвер двигунів

Для електродвигунів MY1020 24 В, 500 Вт, які використовуються як привід колісного механізму, потрібен потужний драйвер здатний комутувати струми до 30–40 А на канал. Оптимальним у цьому випадку є двоканальний драйвер BTS7960, розрахований на постійну роботу при струмах до 43 А, керований логічними сигналами рівня 3,3 В, що сумісні з мікроконтролером STM32H743. BTS7960 є H-мостом високої потужності, з внутрішнім захистом по струму, температурі, та інтегрованими MOSFET ключами. Завдяки низькому опору відкритого каналу (<16 мОм), забезпечується мінімальна втрата при навантаженні, що впливає на ефективність живлення.

Драйвер дозволяє реалізовувати як пряме керування ШІМ-сигналом, так і керування напрямком обертання кожного з коліс, що дозволяє безпілотнику здійснювати повороти на місці (диференційне керування) або роздільне керування кожною стороною при необхідності. Також важливо зазначити, що BTS7960 підтримує живлення від 5 В до 27 В, що робить його сумісним з номінальним живленням.

2.5 Вибір акумулятора

Правильно підібраний акумулятор повинен забезпечувати живлення усіх функціональних блоків платформи: виконавчих механізмів, мікроконтролера, систем зв'язку, сенсорів. Основне призначення енергосистеми полягає у накопиченні, зберіганні, розподілі та контролі енергії між усіма компонентами системи. Принцип дії енергосистеми базується на використанні переносних джерел енергії — акумуляторних батарей, до яких через DC-DC перетворювачі підключаються окремі вузли з різними вимогами до напруги та струму. У

					ДП.ПМ-11.10.1760.000.ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

сучасних мобільних роботах, зокрема військово-логістичних БпНК, найпоширенішими джерелами живлення є літєві батареї — Li-ion (літій-іонні) або Li-Po (літій-полімерні).

Проведемо розрахунок відстані, яку може подолати робот з наявним акумулятором, та безпосередньо підберемо конкретну модель акумулятора для наших потреб.

Як початкові дані візьмемо мінімальні значення напруги, ємності для повноцінної роботи дрону. Енергія, що зберігається у акумуляторній батареї, визначається як:

$$E_{\text{акум}} = C * V \quad (2.4)$$

де C – ємність батареї, А*год; V – робоча напруга, В.

Споживча потужність всіх 4-ох колес 53,86 Вт, припустимо що інші компоненти безпілота споживають 15 Вт. Тоді споживча потужність буде приблизно 69 Вт.

Спробуємо вибрати акумулятор BMS ECO MINI 2406(LiFePO4). Дана модель має ємність 6 А · год, напругу 24 В.



Рисунок 2.5 – Літєвий Акумулятор BMS ECO mini 2406(LiFePO4) [19]

					ДП.ПМ-11.10.1760.000.ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Обчислимо загальну енергію батареї за формулою (2.4):

$$E_{\text{акум}} = 6 \cdot 24 = 144 \text{ Вт/год}$$

Знайдемо час роботи системи:

$$t = \frac{E_{\text{акум}}}{P_{\text{заг}}} = \frac{144}{69} = 2 \text{ год} \quad (2.5)$$

Запас ходу розраховується за формулою:

$$S = t \cdot v = 2 \cdot 8 = 16 \text{ км} \quad (2.6)$$

Отже, дана модель акумулятора цілком підходить для даного проекту, адже задовольняє показники з технічного завдання, та дає можливість мінімум 1 раз доставити необхідний вантаж в тактичній зоні бойових дій.

2.5.1 Стабілізатор напруги

Для підвищення безпеки системи та уникнення коливань напруги підберемо DC-DC стабілізатори напруги.

Враховуючи, що номінальна напруга бортового живлення системи становить 24 В (акумулятор LiFePO₄), а логічні вузли (STM32, GPS, IMU, зв'язок) працюють при 5 В або 3,3 В, доцільним є стабільний перетворювач постійної напруги з входом до 35 В та регульованим виходом. З цією метою обрано стабілізатор LM2596HV, який дозволяє перетворювати напругу до заданого рівня з високим ККД до 92% при навантаженнях до 2 А. Дана модель є імпульсним понижувальним стабілізатором з широтно-імпульсною модуляцією, що забезпечує фіксовану або регульовану напругу на виході у межах 1,25–30 В [20].

					ДП.ПМ-11.10.1760.000.ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.6. Навігація та сенсорні системи

У безпілотної для військової логістики навігаційна та сенсорна система виконує функцію забезпечення орієнтації в просторі, розпізнавання навколишнього середовища, уникнення перешкод, визначення власного положення на місцевості та підтримки стабільного руху в автономному режимі.

Цей функціональний модуль є невід'ємною частиною програмно-апаратного комплексу, оскільки саме завдяки сенсорним та навігаційним даним можлива реалізація алгоритмів самостійного прийняття рішень платформою. У військових умовах, де часто відсутнє точне картографування, спостерігається заглушення сигналів GPS, а також присутня динамічна зміна обстановки, наявність надійної мультисенсорної системи дозволяє автоматизувати виконання логістичних завдань без участі оператора.

Архітектура сенсорно-навігаційного комплексу повинна поєднувати глобальні та локальні засоби орієнтації. Глобальні системи відповідають за абсолютне позиціонування, тоді як локальні – за виявлення та аналіз оточення в безпосередній зоні руху та видимості. У проєкті розглядається комбінований підхід, який забезпечує стабільну навігацію навіть за часткової відмови одного з каналів.

Основним компонентом глобальної навігації є GNSS-приймач u-blox NEO-M8N, який підтримує одночасну роботу з декількома супутниковими системами (GPS, GLONASS, Galileo), забезпечуючи точність до 2.5 метрів у реальному часі, або до 0.5 метра при використанні диференціального режиму RTK [21].

					<i>ДП.ПМ-11.10.1760.000.ПЗ</i>	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

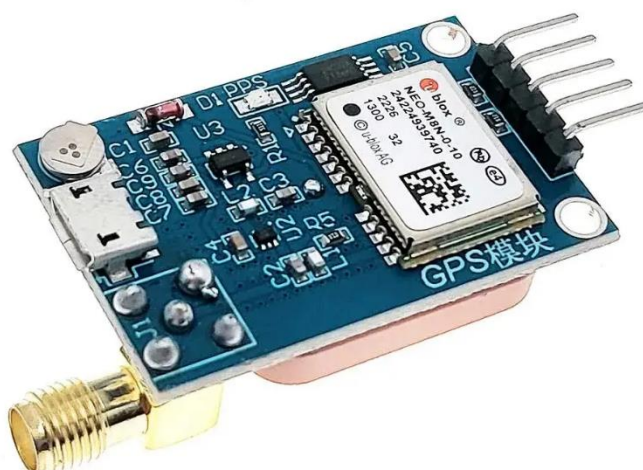


Рисунок 2.6 – Модуль GPS на U-blox NEO-M8N [21]

Даний модуль вибрано через його широку підтримку різними мікроконтролерами. Комплект містить інтерфейсну плату з роз'ємами для підключення до Arduino, ESP32, STM32 та інших мікроконтролерів, а також активну антену, що забезпечує стабільний прийом сигналу на великих відстанях або за слабого покриття.

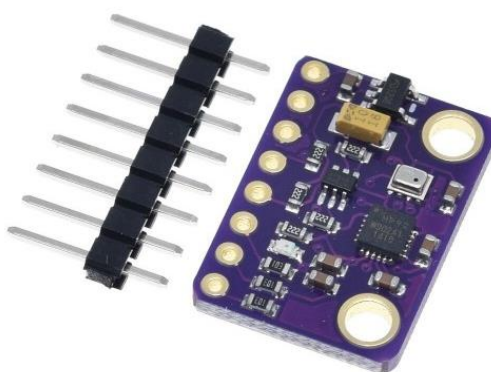


Рисунок 2.7 – модуль MPU-9250

надається за запитом до авторів

Рисунок 2.8 –Принципова електрична схема модулю MPU-9250

Для забезпечення локальної орієнтації та компенсації втрат GNSS-сигналу використовується інерціальний модуль MPU-9250, який об'єднує в собі

					ДП.ПМ-11.10.1760.000.ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

акселерометр, гіроскоп і магнітометр. Інтеграція даних з інерціальним вимірювальним пристроєм дозволяє обчислювати зміну положення, нахил платформи, прискорення та обертання у трьох площинах.

Система безпосереднього сприйняття навколишнього середовища реалізується через комбінацію ультразвукових сенсорів HC-SR04, інфрачервоних детекторів, а також лідара RPLIDAR A1. Ультразвукові датчики розміщуються по периметру корпусу та забезпечують виявлення перешкод на відстані до 4 м. Вони функціонують на частоті 40 кГц та дозволяють створювати первинну карту перешкод у близькій зоні. Інфрачервоні сенсори виконують роль резервного каналу, особливо ефективного при виявленні об'єктів з тепловим випромінюванням або змін освітлення.



Рисунок 2.9 – Лідар RPLIDAR A1 [22]

Основним компонентом для побудови локальної карти простору є лідар RPLIDAR A1, який формує 2D-карту в секторі 360° з частотою до 5–10 Гц [22]. При максимальному радіусі до 12 м та роздільній здатності до декількох сантиметрів, ця система забезпечує якісну сегментацію середовища, необхідну для реалізації алгоритмів SLAM (Simultaneous Localization and Mapping). Зібрані дані дозволяють не лише обминати перешкоди, а й здійснювати автономне планування маршруту.

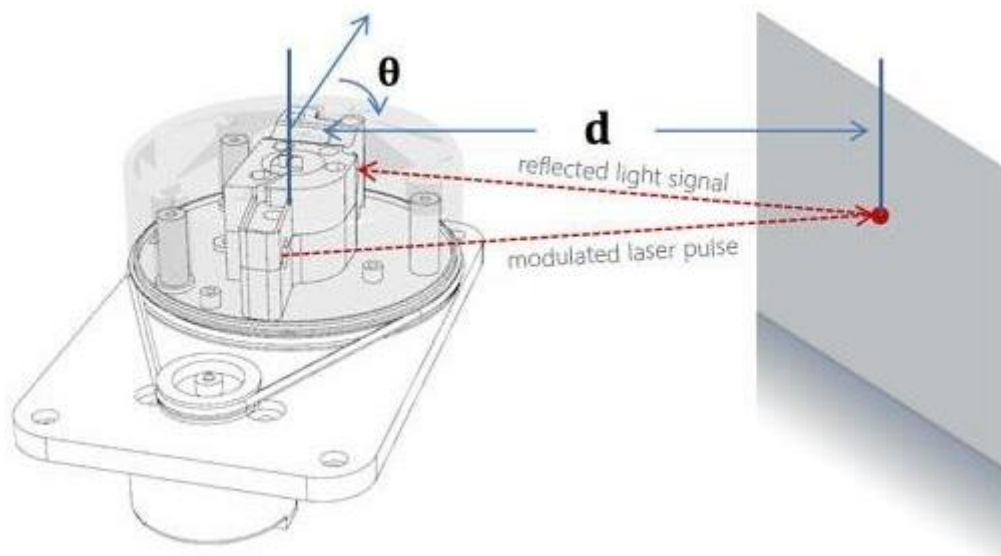


Рисунок 2.10 – Схематичний принцип роботи лідару RPLIDAR A1

У перспективі розширення можливостей платформи можливе впровадження візуальної навігації на основі камери з глибиною (наприклад, Intel RealSense) або стереозору. Ці модулі дозволяють не лише формувати тривимірну модель середовища, а й реалізовувати системи розпізнавання об'єктів (зокрема мін, людей, машин), що є перспективним напрямом у військових безпілотних системах.

Аналіз сучасних рішень показує, що більшість тактичних дронів (наприклад, Milrem Themis або Ghost Robotics V60) використовують комбіновану навігацію: GPS, інерціальні вимірювальні пристрої та лідар або камеру. Це дає змогу забезпечити адаптивну навігацію в умовах поганої видимості, порушення комунікацій і відсутності супутникових сигналів.

Тобто реалізація системи навігації та сенсорної системи в даному проекті базується на принципі багатоканального сприйняття простору з подальшим злиттям даних та їх обробкою у центральному контролері. Це дозволяє досягти високої автономності платформи, забезпечуючи її ефективну експлуатацію в реальних тактичних умовах, включно з автономним обходом перешкод та доставкою вантажу до заданої точки. У наступних етапах реалізації програмного забезпечення на основі цієї сенсорної бази можлива побудова алгоритмів руху по карті і уникнення перешкод, SLAM-навігації.

					ДП.ПМ-11.10.1760.000.ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.7 Вибір компонентної бази

На основі проведеного дослідження функціональних блоків безпілотної платформи з врахуванням всіх початкових параметрів, мети проєкту, та наявності аналогів на ринку.

1) Система керування

Мікроконтролер: STM32H743ІІТ6

Процесор: ARM Cortex-M3, 72 МГц

Інтерфейси вводу/виводу: 2х SPI, 3х USART, 2х I2C, 1х CAN, 37х порти В/О

2) Сенсори

Ультразвукові датчики: HC-SR04

LiDAR-модуль: RPLIDAR A1

GPS/INS: модуль U-blox NEO-M8N + датчик MPU-9250

3) Ходова частина

Двигуни: MY1020 24V 500W

Драйвер двигунів BTS7960

Шасі: габаритні розміри 750×500×300 мм

4) Енергосистема

Акумулятор: BMS ECO mini 2406(LiFePO4)

Стабілізатор напруги LM2596HV

5) Система зв'язку

Модуль LoRa Ra-02 SX1278 433МГц

надається за запитом до авторів

Рисунок 2.11 – Структурна блок-схема проєкту

					<i>ДП.ПМ-11.10.1760.000.ПЗ</i>	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки до розділу 2

У межах проведеного дослідження структурної архітектури наземного безпілотного комплексу було сформовано логічно завершену модульну систему, в основі якої лежить функціональна інтеграція виконавчих, керуючих, сенсорних, енергетичних та комунікаційних підсистем.

На основі проведеного аналізу можна зробити висновок, що розроблена функціональна структура забезпечує високу ступінь адаптивності, надійності та масштабованості системи. Вона відповідає вимогам, що висуваються до автономних багатофункціональних мобільних комплексів для виконання логістичних завдань у польових умовах, зберігаючи при цьому баланс між технічною складністю та функціональною доцільністю.

					<i>ДП.ПМ-11.10.1760.000.ПЗ</i>	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. АВТОНОМНЕ КЕРУВАННЯ НАЗЕМНИМ БЕЗПІЛОТНИКОМ

Автономне керування наземним безпілотником є складною функціональною підсистемою, що охоплює розпізнання навколишнього середовища, прийняття рішень щодо маневрування, забезпечення стабільності руху у випадку втрати зв'язку з оператором. Система автономного керування повинна функціонувати у режимі реального часу, спираючись на дані сенсорної системи, та виконувати обчислення, достатні для прийняття рішень про вибір маршруту без безпосередньої участі оператора.

Автономне керування вирішує такі ключові завдання:

- Локалізація. Визначення координат платформи у вже заданій або невідомій місцевості.
- Побудова карти. Створення або оновлення наявної карти місцевості на основі отриманих сигналів від датчиків.
- Уникнення перешкод та планування траєкторії. Запобігання зіткнення у реальному часі впроваджуючи відповідні алгоритми уникнення перешкод.
- Управління рухом на основі отриманих сигналів. Генерація команд на приводи забезпечує слідування траєкторії.

Ці завдання взаємозалежні і зазвичай реалізуються у вигляді ієрархічної системи, де високорівневі алгоритми (локалізація, картографування, проложення маршруту) взаємодіють з низькорівневим керуванням приводами.

3.1 Сучасні алгоритми автономної навігації

У сучасній робототехніці алгоритми автономного керування умовно поділяються на кілька груп відповідно до рівня абстракції: реактивні методи, методи локалізації та планування, гібридні підходи, а також методи на основі машинного навчання. У контексті наземних безпілотників без візуальної інформації з камер найбільш застосовуваними є реактивні та комбіновані

					ДП.ПМ-11.10.1760.000.ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

навігаційні підходи, зокрема ті, що ґрунтуються на отриманих даних з сенсорів у режимі реального часу.

Сучасні підходи на основі машинного навчання чи нейромереж дають високу точність результуючого маршруту та є доволі гнучкими до будь-яких нештатних ситуацій, але мають дуже високі обчислювальні вимоги, вимагають потужних процесорів, тому виключаються для даного проекту.

Тоді для даного дипломного проекту розглянемо більше прості локальні методи автономної навігації, які використовують безпосередньо сигнали датчиків із даних на місцевості. Можна виділити такі алгоритми:

– Методи штучних полів (Artificial Potential Field, APF). GPS система дрону формує траєкторію до цілі а модуль LiDAR на основі отриманих даних середовища формує вектор який буде обходити певну перешкоду. Тобто цей вектор задає напрям руху. Даний метод дуже інтуїтивний і простий в обчисленні, але має недолік локальних мінімумів: робот може «застрягти» між симетричними перешкодами. Для їх усунення запропоновано різні евристики (віртуальні цілі, випадкове збурення тощо), але вони ускладнюють реалізацію. З ресурсної точки зору APF є нескладним тому може працювати на STM32.

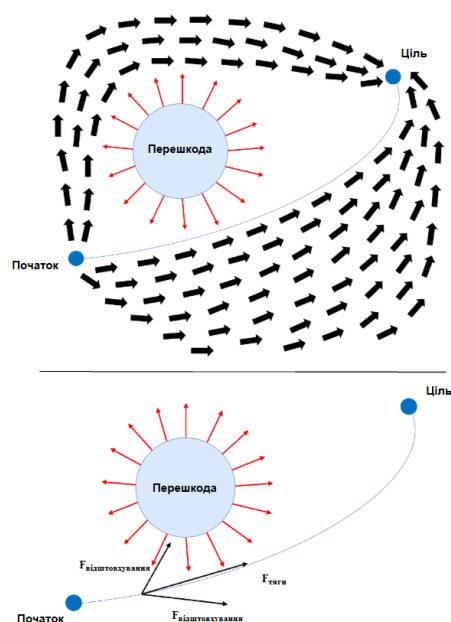


Рисунок 3.1 – Схематичне зображення APF навігації для дрону

– Алгоритми серії «Bug» (наприклад, Bug-1, Bug-2, Dist-Bug). Робот рухається вздовж прямої до цілі, а при виявленні перешкоди обходить її за контуром, потім повертається до прямолінійного шляху. Ці методи дуже прості і не вимагають об'ємних обчислень, що робить їх доречними до використання на малопотужному процесорі. Наприклад, при методі Bug-2 продовжує рух по прямій, поки відсутня перешкода; при зустрічі – йде по контуру перешкоди до повернення на вихідну пряму. Недоліки: маршрут погано оптимізований і дуже низька ефективність коли багато перешкод.

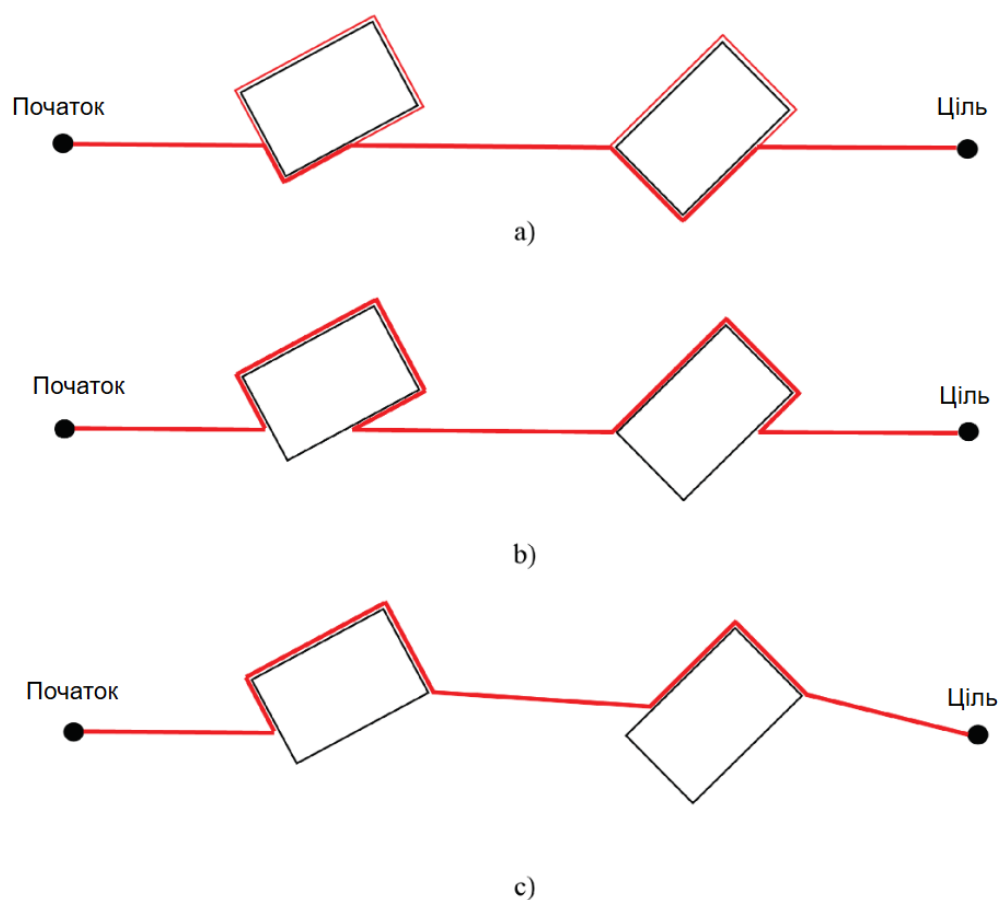


Рисунок 3.2 – Уникнення перешкод за допомогою алгоритмів Bug: (a) – шлях алгоритму Bug-1, (b) – шлях алгоритму Bug-1 та (c) – шлях алгоритму Dist-Bug.

– Follow-The-Gap Method (FGM). Робить акцент на величину проміжку між перешкодами. Зі сканів LiDAR формуються проміжки між перешкодами, та

алгоритм обирає найширший доступний просвіт і обчислює кут руху в його центрі. FGM простий і задовольняє маршрути на відкритій місцевості, однак не завжди працює в щільній міській забудові і може призводити до «зигзагів».

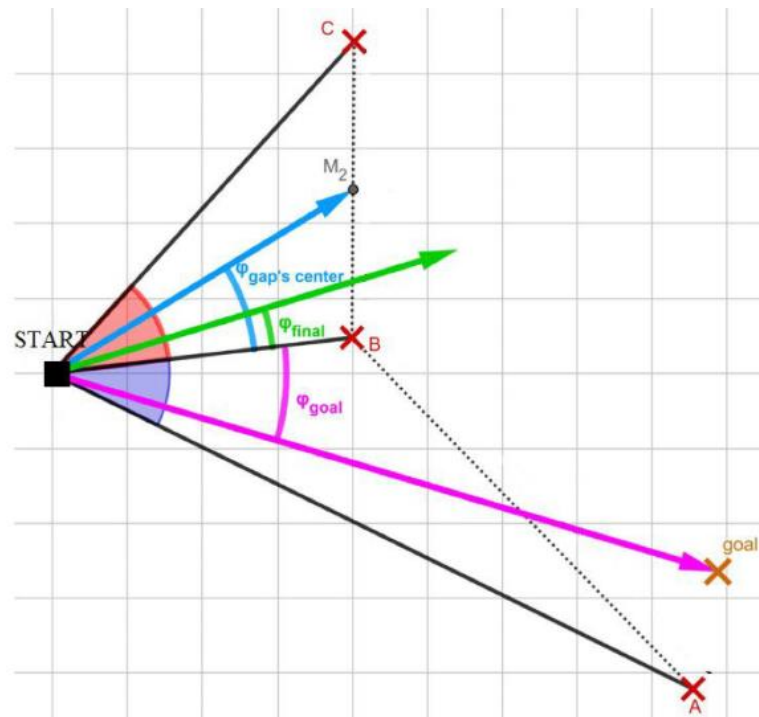


Рисунок 3.3 – Метод Follow-The-Gap.

На рис. 3.3: точки A, B, C – перешкоди. φ_{goal} – кут до точки призначення; $\varphi_{gap's center}$ – кут до центральної точки найбільшого проміжку між перешкодами; φ_{final} – кінцевий кут курсу.

– Vector Field Histogram (VFH). За даного методу будується гістограма щільності перешкод у просторі навколо робота (перетворюючи 2D карту в полярну гістограму секторів), потім вибирає найбезпечніший сектор (із малою кількістю перешкод) для створення фінального маршруту. VFH метод ефективний за наявності великої кількості об'єктів, але вимагає значної пам'яті та обчислень (особливо для побудови гістограм).

– Dynamic Window Approach (DWA). Цей метод враховує кінематичні обмеження дрону і зміну швидкості, перебирає можливі значення швидкості та кути розвороту в межах динамічного вікна і оцінює траєкторії за критеріями досяжності поставленої цілі. DWA можна реалізувати в ROS (Robot Operating

System), він швидко реагує і якісно уникає локальних перешкод, проте алгоритм вимагає розрахунку кількох можливих варіантів руху.

– Методи на основі одночасної локалізації та картографування (SLAM). SLAM методи на основі LiDAR (HectorSLAM, GMapping тощо) забезпечують побудову карти та точну локалізацію в реальному часі. Утім, для реалізації на STM32-платформі такі методи потребують значного спрощення або відмови від частини функцій.

3.2 Вибір алгоритму автономного керування

З огляду на вимоги до енергоспоживання, обмежену сенсорну конфігурацію та модель мікроконтролера, доцільно обрати метод "слідування за проміжком" (Follow-the-Gap Method), що базується на аналізі лазерного сканування середовища для вибору оптимального напрямку руху. Цей метод добре масштабований для 2D-LiDAR, не вимагає картографування і не використовує багато ресурсів пам'яті чи багатоканальних фільтрів. Його основна задача – виділити найбільший доступний прохід (gap) у полі огляду LiDAR, який задовольняє умови проходу дрону за шириною, та обрати вектор напрямку, найближчий до цільового.

Мікроконтролер STM32H743ПТ6 приймає вхідні дані у вигляді масиву відстаней з LiDAR RPLIDAR A1, типово у 360 точках (роздільність $\sim 1^\circ$). В межах цього масиву аналізуються послідовні ділянки (вікна), які перевищують порогову відстань безпечного проходу. Ідентифікується найбільший з цих проміжків, а середина відповідного кута визначається як напрямок руху. Вектор руху коригується у бік цілі, якщо проміжок містить її в межах поля огляду. Результатом є обчислення кута повороту, який подається у систему пропорційно-інтегрального приводу для реалізації траєкторії.

					ДП.ПМ-11.10.1760.000.ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

надається за запитом до авторів

Рисунок 3.4 – Блок-схема автономного управління безпілотною на основі алгоритму Follow-the-Gap

Алгоритм роботи:

- LiDAR RPLIDAR A1 передає отримані вхідні дані по UART або UART-over-USB до модуля STM32H743.
- Модуль обробки у ядрі Cortex-M7 виконує сегментацію простору, визначення gap-зон, а також обчислення кута повороту.
- За допомогою вбудованих таймерів та ШІМ-каналів мікроконтролер формує керуючі сигнали до Н-мостів двигунів (4×4 привід).
- Модуль GPS (NEO-M8N) передає координати цілі та поточної позиції, які перетворюються у відносний кут до цілі.
- Інерціальний модуль (IMU) використовується для компенсації нахилів корпусу та орієнтації при втраті сигналу LiDAR або GPS.
- Через UART або LoRa канали зв'язку здійснюється телеметрія до станції управління.

Висновки до розділу 3

В ході аналізу сучасних рішень автономного керування для схожих аналогів наземного безпілотною, дійшов висновку що прийнятними варіантами для мого проєкту є методи локалізації які ґрунтуються на даних про навколишнє середовище із сенсорних систем. Так як у нас відсутня відеокамера, а лідар дає зображення тільки в 2D, це звужує вибір підходящого алгоритму.

Тому вибраний алгоритм автономного керування Follow-the-Gap є оптимальним з точки зору співвідношення складності реалізації, надійності й ефективності в умовах бойових дій; також наявні комплектуючі безпілотною

					<i>ДП.ІМ-11.10.1760.000.ІЗ</i>	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

дозволяють реалізувати цей алгоритм без додаткових витрат чи включення більш потужних компонентів.

					<i>ДП.ПМ-11.10.1760.000.ПЗ</i>	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4. КІНЕМАТИЧНА ТА ДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ РУХУ

Наземний безпілотник переміщується по поверхні, використовуючи окремо керовані колеса, розташовані з обох боків корпусу. Це дає можливість змінювати напрям руху шляхом зміни відносної швидкості обертання коліс. В більшості випадків швидкість однакова для всіх коліс відповідної сторони. Тоді даний проект можна розглядати як диференціальний робот з двома колесами.

Кінематична модель описує положення, орієнтацію та швидкість БпНК у просторі, не враховуючи сил, які спричиняють цей рух. Для колісної платформи типу диференціального приводу (два незалежно керованих колеса) кінематичну модель можна описати в локальній системі координат робота.

Основні рівняння руху матимуть вигляд:

$$x' = v \cdot \cos(\theta) \quad (4.1)$$

$$y' = v \cdot \sin(\theta) \quad (4.2)$$

$$\theta' = \omega \quad (4.3)$$

Де x, y – координати центру мас на площині;

θ – кут повороту відносно осі x ;

v – лінійна швидкість центру мас;

ω – кутова швидкість обертання навколо вертикальної осі.

Дану модель можна використати для побудови локальної траєкторії, реалізації реактивних алгоритмів обходу перешкод, а також для низькорівневого керування в системах з LiDAR та GPS-навігацією. Вона не враховує масу та інерційні характеристики, однак дозволяє отримати певну точність при малих швидкостях.

У випадку побудови реального конструктивного прототипу робота, де необхідно точно враховувати впливи, які подаються безпосередньо на колеса, слід використовувати модель з диференціальним приводом. Ця модель передбачає два окремо керованих колеса, розташованих зліва та справа відносно

					ДП.ПМ-11.10.1760.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

корпусу робота. Змінні стану в цій моделі ті самі що й у моделі робота з одним колесом, проте входними параметрами тут є кутові швидкості лівого (v_l) та правого (v_r) коліс. Розглянемо як входні значення будуть змінюватися тепер.

Оскільки v_l та v_r вимірюються в радіанах на секунду, лінійну швидкість кожного колеса можна знайти як добуток його відповідної кутової швидкості v на радіус R .

Переміщення робота за малий проміжок часу визначається зміщенням лівого та правого коліс. Середнє арифметичне цих швидкостей дає загальну поступальну швидкість робота:

$$V = \frac{R}{2}(v_r + v_l) \quad (4.4)$$

Кутову швидкість обчислюють як відношення різниці швидкостей коліс на радіус повороту. Отримаємо радіус при повертанні L . Це легко зрозуміти на прикладі, коли ліве колесо залишається нерухомим, а праве рухається – у такому випадку робот обертається навколо лівого колеса, описуючись на дугу радіуса L . Тоді кутова швидкість дорівнює:

$$\omega = \frac{R}{L}(v_r - v_l) \quad (4.5)$$

Отримаємо наступні рівняння для робота з диференціальним приводом:

$$x' = \frac{R}{2}(v_r + v_l) \cdot \cos(\theta) \quad (4.6)$$

$$y' = \frac{R}{L}(v_r - v_l) \cdot \sin(\theta) \quad (4.7)$$

$$\theta' = \frac{R}{L}(v_r - v_l) \quad (4.8)$$

Як уже згадувалося, якщо всі колеса з одного боку обертаються з однаковою швидкістю, модель можна звести до двоколісного робота з диференціальним приводом незалежно від фактичної кількості коліс. Для цього вводиться поняття «віртуального» колеса, яке представляє всі колеса з одного боку. Його ефективний радіус $\bar{R}$ визначається як відстань від центра мас відповідної сторони до найбільш віддаленого колеса.

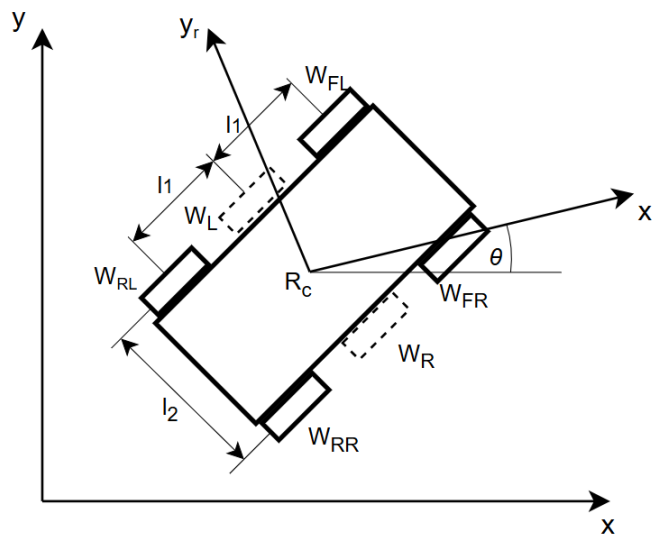


Рисунок 4.1 – схематична модель руху БпНК

На відміну від кінематичної моделі, динамічна модель повинна охоплювати також і сили, що виникають у точках контакту коліс із поверхнею, деформацій шин, ковзання, сил тертя та інерційних ефектів, тобто така модель забезпечує високий ступінь фізичної достовірності моделювання.

Динаміка системи описується за допомогою формули Лагранжа другого роду. Узагальнені сили включають сили тяги, що виникають внаслідок моментів приводу, реакції контакту між колесами і поверхнею, а також сили інерції та сили Коріоліса. Основне рівняння руху має вигляд:

$$M(q)q'' + C(q, q')q' + Dq' = Q \quad (4.9)$$

де q – вектор узагальнених координат, $M(q)$ – матриця інерції, $C(q, q')$ – матриця коріоліса та центробіжних сил, D – матриця дисипативних коефіцієнтів (враховує в'язке тертя), Q – вектор узагальнених сил, пов'язаних з приводами коліс та контактними взаємодіями між поверхнями.

Таким чином, динамічна модель чотириколісного наземного робота дозволяє точно описати його поведінку в широкому діапазоні умов, включаючи ковзання, сили інерції та складні траєкторії руху. Вона може використатись для розробки адаптивних систем керування та оптимального планування траєкторії з урахуванням обмежень навколишнього середовища.

Висновок до розділу 4

Розгляд кінематичної та динамічної моделі руху в контексті безпілотного наземного комплексу логістичного призначення дозволив сформулювати формалізоване уявлення про характер переміщення платформи, її взаємодію з середовищем та вплив силових факторів на параметри руху.

У рамках цього розділу було побудовано математичне представлення як кінематичного рівня, що описує геометричну зміну положення платформи у просторі, так і динамічного рівня, який враховує сили та моменти, що діють на об'єкт.

Можна стверджувати, що кінематико-динамічна модель створює теоретичну основу для синтезу системи автономного керування та моделювання сценаріїв поведінки платформи в умовах, наближених до експлуатаційних. Наявність математично обґрунтованих рівнянь дозволяє реалізувати стійкі та енергоефективні алгоритми керування на рівні мікроконтролера STM32H743 та прогнозувати поведінку системи при різних навантаженнях, швидкостях та зовнішніх впливах. Розділ є ключовим з погляду трансформації фізичної системи в її цифровий аналог, придатний для програмної реалізації й оптимізації.

					ДП.ПМ-11.10.1760.000.ПЗ	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ БЕЗПІЛОТНИКА

В цьому розділі здійснимо техніко-аналітичний розрахунок ключових параметрів конструкції наземного безпілотного комплексу. Мета розрахунків полягає у підтвердженні обґрунтованості обраних технічних рішень, перевірці відповідності комплектуючих встановленим експлуатаційним вимогам, а також в оцінці ефективності функціонування системи в реальних умовах експлуатації. Розрахункова частина є важливою складовою загального інженерного підходу до проектування безпілотника і виступає базою для підтвердження практичної доцільності обраної конфігурації.

На основі отриманих результатів можливо виявити потенційні компоненти з підвищеним навантаженням, недостатнім живленням, тоді вони б потребували заміни або технічного корегування. Більш того, розрахунки дозволяють провести оптимізацію параметрів систем живлення, руху й стабілізації з урахуванням обмежень по вазі, габаритах і автономності.

Характеристики, маса, габаритні розміри безпілотника вже відомі.

Сила тертя кочення яку повинен компенсувати привід для збереження сталого руху:

$$F_{\text{коч}} = \mu mg \quad (5.1)$$

Де $\mu = 0.02$ – коефіцієнт тертя кочення (для ґрунту), $m = 45\text{кг}$ – загальна маса (платформа + навантаження), $g = 9.81\text{ м/с}^2$ – прискорення вільного падіння.

Отримаємо

$$F_{\text{коч}} = 0,02 * 45 * 9,81 = 8,829\text{ Н}$$

Розрахуємо аеродинамічний опір при русі комплексу на відкритій місцевості.

					ДП.ПМ-11.10.1760.000.ПЗ	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$F_{\text{аер}} = \frac{1}{2} \rho C_d A v^2 \quad (5.2)$$

де C_d – коеф. лобового опору (прийmemo за 0,9 для невеликого корпусу),

$\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$ – густина повітря,

A – площа лобової проекції (припустимо $0,15 \text{ м}^2$),

$v = 10 \text{ км/год} = 2,78 \text{ м/с}$ рекомендована швидкість

Підставивши:

$$F_{\text{пов}} = \frac{1}{2} * 1,2 * 0,9 * 0,15 * 2,78^2 = 0,626 \text{ Н}$$

Отримали опір повітря який менше 10% від опору тертя, тому він незначний і не має серйозного впливу.

Далі розрахуємо сумарне тягове зусилля. Тобто силу, яку мають забезпечити двигуни для стабільного руху з врахуванням всіх опорів.

$$F_{\text{заг}} = F_{\text{коч}} + F_{\text{аер}} = 9.455 \text{ Н} \quad (5.3)$$

Потужність необхідна для підтримки швидкості $v = 2,78 \text{ м/с}$ враховуючи отримані протидії, обрахуємо за формулою:

$$P = F_{\text{заг}} * v = 9.455 * 2,78 = 26,28 \text{ Вт} \quad (5.4)$$

Впевнились, що вибраний двигун MY1020 24V 500W повністю компенсує тягове зусилля.

Також знайдемо крутний момент на одне колесо який може використатись для вибору передаточного числа редуктора або оцінки мотору.

$$T = \frac{F_{\text{заг}} * r}{n} \quad (5.5)$$

					ДП.ПМ-11.10.1760.000.ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де r – радіус колеса, $n = 4$ кількість коліс. Тоді

$$T = \frac{26,28 * 0,125}{4} = 0,29 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Також доцільно було б знайти прискорення та гальмування для оцінки керованості платформи під час екстреного гальмування. Припустимо що максимальна швидкість набереться на 12-й секунді.

$$a = \frac{v_{max}}{t} \quad (5.6)$$

$$F_{приск} = m \cdot a \quad (5.7)$$

Отримаємо прискорення для розгону a (м/с²)

$$a = \frac{5,56}{12} = 0,46 \text{ м/с}^2$$

Сила розгону

$$F_{приск} = 0,46 * 45 = 20,7 \text{ Н}$$

Визначимо точність позиціонування (GPS + IMU) як максимальну похибку для алгоритмів автономного керування.

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{GPS}^2 + \sigma_{IMU}^2} \quad (5.8)$$

Де $\sigma_{GPS} = 2.5$ м – похибка GPS, $\sigma_{IMU} = 0,17$ м – похибка блоку IMU.

Тоді отримаємо сумарну похибка $\sigma = 0,425$ м

Також можна знайти допустиме навантаження на колеса для перевірки стійкості шасі і можливого вибору амортизаторів/коліс відповідно до максимального навантаження платформи.

$$F_{кол} = \frac{mg}{4} = 110.36 \text{ Н} \quad (5.9)$$

					ДП.ПМ-11.10.1760.000.ПЗ	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки до розділу 5

Проведені розрахунки показують, що задані параметри є реалістичними та збалансованими. Обрана акумуляторна батарея забезпечує потрібну ємність з запасом, площа контакту та коефіцієнт зчеплення коліс достатні для передачі тягових зусиль, шасі гарантує стійкість і плавність ходу, а двигуни з необхідною потужністю дозволять досягти швидкості 8 км/год і впевнено долати опір руху. Усі розраховані формули і параметри взаємопов'язані і обґрунтовують технічну реалізованість проєкту.

					<i>ДП.ПМ-11.10.1760.000.ПЗ</i>	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У межах дипломного проєкту було здійснено комплексну розробку безпілотного наземного комплексу, призначеного для виконання військових логістичних завдань у відкритій місцевості. Основна мета проєкту полягала у створенні функціонально завершеної мобільної платформи з підтримкою як ручного, так і автономного керування, здатної транспортувати вантажі в умовах змінного рельєфу, обмеженої видимості та потенційного впливу зовнішніх дестабілізуючих факторів.

Ретельно проаналізував сучасні рішення у сфері безпілотних платформ і сформулював технічні вимоги до майбутнього комплексу. Вибір апаратних компонентів здійснювався на основі об'єктивних розрахунків, адаптованих до передбачених умов експлуатації.

Розробка охоплює більшість ключових аспектів проєктування — від апаратної архітектури до алгоритмізації, що забезпечує готовність до подальшого масштабування. Результати конструювання можуть стати основою для побудови реального прототипу наземного безпілотника.

					<i>ДП.ПМ-11.10.1760.000.ПЗ</i>	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ

[1] Безпілотні роботи носії MUTT [Електронний ресурс] URL: <https://focus.ua/auto/478838-armiya-ssha-ispytaet-roboty-transportery-kotorye-obojdutsya-ej-v-162-mln-video> (дата звернення: 02.05.2025)

[2] Marine Corps tests autonomous mini-truck [Електронний ресурс] URL: <https://newatlas.com/guss-autonomous-truck-us-marines/33270/> (дата звернення: 02.05.2025)

[3] The Rheinmetall Mission Master SP [Електронний ресурс] URL: <https://www.rheinmetall.com/en/products/uncrewed-vehicles/uncrewed-ground-systems/mission-master-a-ugs> (дата звернення: 02.05.2025)

[4] Німецькі наземні дрони від ARX Robotics отримують українські турелі [Електронний ресурс] URL: <https://military.com/uk/news/nimetski-nazemni-drony-vid-arx-robotics-otrymayut-ukrayinski-tureli/> (дата звернення: 02.05.2025)

[5] THeMIS [Електронний ресурс] URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/THeMIS> (дата звернення: 02.05.2025)

[6] The REX MKII multi-mission unmanned land vehicle system [Електронний ресурс] URL: <https://www.facebook.com/photo/?fbid=887057920116836&set=rex-mk-ii-awarded-best-scientific-solution-in-the-european-land-robot-trial-germ> (дата звернення: 02.05.2025)

[7] Titan Unmanned Ground Vehicle (UGV) [Електронний ресурс] URL: <https://www.army-technology.com/projects/titan-unmanned-ground-vehicle-ugv/> (дата звернення: 02.05.2025)

[8] HORIBA MIRA [Електронний ресурс] URL: <https://www.horiba-mira.com/horiba-mira-wins-2-3m-government-contract-to-supply-autonomous-ugvs-for-landmark-trials/> (дата звернення: 02.05.2025)

[9] Наземний робот D-21-11 [Електронний ресурс] URL: <https://gagadget.com/ru/tehnologii/379355-v-ukraine-predstavili-nazemnyij-robot-d-21-11>

					<i>ДП.ПМ-11.10.1760.000.ПЗ</i>	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

21-11-on-oborudovan-avtomaticheskoy-turelyu-i-mozhet-vyipolnyat-boe/ (дата звернення: 04.05.2025)

[10] Наземний дрон "Спайдер" [Електронний ресурс] URL: <https://texty.org.ua/fragments/115051/ukrayinski-inzhenery-rozrobyly-dlya-zsu-nazemnyj-dron-spajder-foto/> (дата звернення: 04.05.2025)

[11] У ЗСУ з'явився новий гусеничний робот «Віслюк» [Електронний ресурс] URL: <https://hromadske.ua/viyna/244212-u-zsu-ziavyvsia-novyy-husenychnyy-robot-visliuk> (дата звернення: 04.05.2025)

[12] Чесько-український амфібійний дрон UNEX UGV [Електронний ресурс] URL: <https://focus.ua/voennye-novosti/708452-v-chehii-predstavili-amfibiynyy-dron-unex-ugv-vozmozhnosti-kompleksa-video> (дата звернення: 04.05.2025)

[13] ТАРГАН 2К [Електронний ресурс] URL: <https://armyinform.com.ua/2024/11/06/targany-prorvalys-na-front-shhe-chotyry-rozrobky-projshly-kodyfikacziyu/> (дата звернення: 04.05.2025)

[14] Характеристики «Гімлі» [Електронний ресурс] URL: <https://shotam.info/na-fronti-pratsiuvatymut-robotyzovani-platformy-liniyky-himli/> (дата звернення: 04.05.2025)

[15] У Міноборони кодифікували робота «Вепр» [Електронний ресурс] URL: <https://armyinform.com.ua/2024/07/25/u-minoborony-kodyfikuvaly-robota-vepr-na-shho-zdatnyj-czej-bronovanyj-kabanchyk/> (дата звернення: 04.05.2025)

[16] stm32h743iit6 mcu core board [Електронний ресурс] URL: <https://evo.net.ua/ru/stm32h743iit6-mcu-core-board-16635/> (дата звернення: 06.05.2025)

[17] Модуль LoRa Ra-02 SX1278 433МГц [Електронний ресурс] URL: <https://uamper.com/SX1278-LoRa-Module-433M-Ra-02-Wireless-Module> (дата звернення: 06.05.2025)

[18] Мотор дитячих електричних квадроциклів 24V 500W MY1020 [Електронний ресурс] URL: <https://samurai-instrument.com.ua/motor-dytiachykh-elektrychnykh-kvadrotsykliv-24v-500w-my1020/> (дата звернення: 08.05.2025)

					<i>ДП.ПМ-11.10.1760.000.ПЗ</i>	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

[19] 24 В 6 А*год літій-залізо-фосфатний акумулятор BMS ECO mini 2406 [Електронний ресурс] URL: <https://teplakraina.com/avtonomnoe/battery/bmsecomini2406.html> (дата звернення: 12.05.2025)

[20] Знижувальний імпульсний стабілізатор напруги LM2596HV регульований 5-56V [Електронний ресурс] URL: <https://xebike.com/product/ponizhayushhij-impulsnyj-stabilizator-napryazheniya-lm2596hv-reguliruemyj-5-56v/> (дата звернення: 12.05.2025)

[21] Модуль супутникової навігації на U-blox NEO-M8N [Електронний ресурс] URL: https://ekran.in.ua/ua/p2633637024-modul-gps-blox.html?source=merchant_center&gad_source=1&gad_campaignid=15532087393 (дата звернення: 12.05.2025)

[22] Датчик Відстані Лазерний RPLIDAR A1 [Електронний ресурс] URL: <https://evo.net.ua/waveshare-datchyk-vidstani-lazernyi-rplidar-a1-22342/> (дата звернення: 16.05.2025)

[23] A Review of 2D Lidar SLAM Research [Електронний ресурс] URL: <https://www.mdpi.com/2072-4292/17/7/1214> (дата звернення: 18.05.2025)

[24] Introduction to Autonomous Navigation and Mapping for Unmanned Ground Vehicles [Електронний ресурс] URL: https://hal.science/hal-04585273v1/file/Intro_to_Autonomous_Navigation_Mapping_challenges.pdf (дата звернення: 20.05.2025)

[25] IDENTIFICATION AND CONTROL OF A UNMANNED GROUND VEHICLE BY USING ARDUINO [Електронний ресурс] URL: https://www.scientificbulletin.upb.ro/rev_docs_arhiva/full7f1_538299.pdf (дата звернення: 20.05.2025)

[26] Modelling and Control of Unmanned Ground Vehicle [Електронний ресурс] URL: <https://hal.science/hal-03375529/document> (дата звернення: 24.05.2025)

[27] Annalisa Milella Donato Di Paola and Grazia Cicirelli: Mechatronic Systems Applications , 2010. DOI: 10.5772/206.

					<i>ДП.ПМ-11.10.1760.000.ПЗ</i>	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

[28] Review on Vehicle Detection Technology for Unmanned Ground Vehicles [Електронний ресурс] URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/4/1354> (дата звернення: 24.05.2025)

[29] Motion control design for unmanned ground vehicle in dynamic environment using intelligent controller [Електронний ресурс] URL: <https://scispace.com/pdf/motion-control-design-for-unmanned-ground-vehicle-in-dynamic-3yg29sty75.pdf> (дата звернення: 26.05.2025)

[30] Obstacle Avoidance and Path Planning Methods for Autonomous Navigation of Mobile Robot [Електронний ресурс] URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/24/11/3573> (дата звернення: 28.05.2025)

					<i>ДП.ПМ-11.10.1760.000.ПЗ</i>	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		