Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та систем
(повна назва)

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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
(рівень вищої освіти)

Розроблення електроної частини для наземної платформи військового призначення
(тема)

Виконав:
здобувач 3 року навчання,
групи АКТАКІТу-23-1

Тарас ПОКОТИЛО
(прізвище, ініціали)

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

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

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

Керівник доц. Дмитро НІКІТІН
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри _____ Ігор НЕВЛЮДОВ
(підпис) (прізвище, ініціали)

Харків 2026

Я, Покотило Тарас Олегович, як здобувач вищої освіти ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Я не використовував штучний інтелект для підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на віповідне джерело.

15 червня 2026 р. Тарас ПОКОТИЛО



ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет Автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та систем
Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації, робототехніки та безпекової інженерії
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Спеціальність 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка
(код і повна назва)
Тип програми освітньо-професійна
Освітня програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)
«___» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві Покотило Тарасу Олеговичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення електроної частини для наземної платформи військового призначення
Затверджена наказом університету від 20.05.2026 р. №411 Ст
2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 25 червня 2026 р.
3. Вихідні дані до роботи
3.1 Тип платформи – колісна роботизована платформа з колісною формулою 6×6;
3.2 Максимальна вантажопідйомність – не менше 400 кг;
3.3 Максимальна швидкість руху – до 15 км/год;
3.4 Напруга бортової мережі – 48 В;
3.5 Кількість тягових електродвигунів – 2 шт.;
3.6 Номінальна потужність одного двигуна – 2000 Вт;
4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі:
4.1 Вступ;
4.2 Аналіз предметної області;
4.3 Розробка апаратної частини системи керування;
4.4 Розробка друкованої плати та конструктивна реалізація системи;
4.5 Охорона праці;
4.6 Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) Демонстраційний матеріал у вигляді презентації формату PowerPoint (*.ppt) – 12 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	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Збір матеріалів для проведення розробки	06.04.2026 – 25.04.2026	виконано
2	Аналіз предметної області	27.04.2026 – 16.05.2026	виконано
3	Розробка апаратної частини системи керування	19.05.2026 – 30.05.2026	виконано
4	Розробка модуля переключення двигунів	31.05.2026 – 01.06.2026	виконано
5	Оформлення кваліфікаційної роботи	02.06.2026 – 11.06.2026	виконано
6	Подання роботи на перевірку нормоконтролю	15.06.2026 – 16.06.2026	
6	Подання роботи на перевірку Інтернетсервісом StrikePlagiarism	17.06.2026 – 18.06.2026	
7	Подання роботи на рецензію	18.06.2026 – 19.06.2026	
8	Подання роботи на підпис зав. кафедри	20.06.2026 – 22.06.2026	
9	Подання кваліфікаційної роботи в ЕК		

Дата видачі завдання 06 квітня 2026 р.

Здобувач _____ Тарас ПОКОТИЛО
(підпис) (прізвище, ініціали)

Керівник роботи _____ доц. Дмитро НІКІТІН
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 74 с., 8 табл., 25 рис., 1 дод., 20 джерел.

НАЗЕМНИЙ РОБОТИЗОВАНИЙ КОМПЛЕКС, ЕЛЕКТРОНІКА, КЕРУВАННЯ, РЕЗЕРВУВАННЯ, ВІДМОВОСТІЙКІСТЬ.

Об’єкт дослідження – процес автоматизованого керування тяговими приводами, маршрутизації струмів та обміну даними у важких мобільних платформах спеціального призначення.

Предмет дослідження – апаратно-програмна архітектура підсистеми керування, топологія модуля матриці живучості та канали зв'язку електронної частини наземної платформи.

Мета роботи – підвищення надійності, відмовостійкості та функціональної стійкості наземної платформи військового призначення шляхом розроблення спеціалізованої апаратно-програмної електронної частини із застосуванням дворівневого резервування силових каналів керування та дублювання систем зв'язку.

У результаті роботи запропоновано архітектуру системи керування наземною платформою з підвищеною відмовостійкістю та надійністю. Розроблені технічні рішення забезпечують збереження працездатності комплексу у випадку відмови окремих електронних вузлів та можуть бути використані під час створення логістичних і евакуаційних роботизованих платформ військового призначення.

Отриманий результат кваліфікаційної роботи, відноситься цілей сталого розвитку № 9, а саме 9.4 «Підтримка досліджень: Інвестиції у науку та створення нових технологій».

ABSTRACT

The explanatory note contains: 74 p., 8 tabl., 25 fig., 1 app., 20 sources.

GROUND ROBOTIC COMPLEX, ELECTRONICS, CONTROL, REDUNDANCY, FAULT TOLERANCE.

Object of research – the processes of automated control of traction drives, current routing, and data exchange in heavy-duty special-purpose mobile platforms.

Subject of research – the hardware and software architecture of the control subsystem, the topology of the survivability matrix module, and the communication channels of the electronic system of a ground platform.

Purpose of the study – to improve the reliability, fault tolerance, and operational resilience of a military ground platform through the development of a specialized hardware and software electronic system with two-level redundancy of power control channels and duplicated communication systems.

As a result of the study, a control system architecture for a ground platform with enhanced fault tolerance and reliability was proposed. The developed technical solutions ensure continued operation of the system in the event of failures of individual electronic modules and can be used in the development of military logistics and evacuation robotic platforms.

The result of qualified work is the goal of development No. 9, and itself 9.4 «Advancement of research: Investment in science and the creation of new technologies».

ЗМІСТ

Перелік скорочень.....9
Вступ.....11
1 Аналіз предметної області.....13
1.1 Види наземних роботів та робототехнічних комплексів.....13
1.2 Військові наземні робототехнічні комплекси: класифікація, архітектура та фізико-математичне обґрунтування електронної бази.....16
1.3 Огляд існуючих аналогів наземних роботизованих комплексів.....22
1.4 Аналіз технічного завдання.....25
1.5 Висновки до першого розділу.....26
2 Розробка апаратної частини системи керування.....27
2.1 Схема розташування модулів.....27
2.2 Компонентна база.....28
2.2.1 Система живлення.....32
2.2.2 Центральний блок керування.....38
2.2.3 Підсистема зв'язку та телеметрії.....42
2.3 Структурна організація та макетування системи керування.....44
2.4 Висновки до другого розділу.....47
3 Розробка друкованої плати та конструктивна реалізація системи.....48
3.1 Розробка принципової електричної схеми.....48
3.2 Проєктування друкованої плати.....51
3.3 Конструктивні параметри та трасування плати.....60
3.4 Висновки до третього розділу.....63
4 Охорона праці…….....……..….65
4.1 Правила охорони праці під час паяльних робіт……..…65
4.2 Загальні вимоги безпеки…….....……....66

4.3 Безпека акумуляторних модулів……..…….…….67
4.4 Висновки до четвертого розділу……..…….….67
Висновки…….……..……..…69
Перелік джерел посилання.....71
Додаток А Демонстраційний матеріал.……...…….73

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ВОСПІ – волоконно-оптичні системи передачі інформації;

ЕОЗ – електронно-обчислювальні засоби;

МЕМС – мікроелектромеханічні системи;

МОЕМС – мікрооптоелектромеханічні системи;

НВО – науково-виробниче об’єднання;

НРК – наземний роботизований комплекс;

НТУ – національний технічний університет;

НУ – національний університет;

ПІД – пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор;

ПНДЛ – проблемна науково-дослідна лабораторія;

РЕБ – радіоелектронна боротьба;

РЕЗ – радіоелектронні засоби;

САК – система автоматичного керування;

САПР – системи автоматизованого проєктування;

СКБ – студентське конструкторсько-технологічне бюро;

ТВР – технологія виробництва радіоапаратури;

ЦБК – центральний блок керування;

ШІМ – широтно-імпульсна модуляція.

BMS – Battery Management System (система керування батареєю);

DC-DC – Direct Current to Direct Current (перетворювач постійної напруги);

FHSS – Frequency Hopping Spread Spectrum (псевдовипадкове перелаштування робочої частоти);

$LiFePO_4$ – літій-залізо-фосфатний акумулятор;

LoRa – Long Range (технологія бездротової передачі даних на великі відстані);

MIMO – Multiple Input Multiple Output (багатоканальна технологія передачі радіосигналу);

MOSFET – Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor (МОН-транзистор, польовий транзистор із ізольованим затвором);

Starlink – глобальна супутникова система зв'язку;

THeMIS – Tracked Hybrid Modular Infantry System (гусенична гібридна модульна піхотна система);

TVS – Transient Voltage Suppressor (напівпровідниковий діодний обмежувач напруги);

VTX – Video Transmitter (аналоговий відеопередавач).

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасні умови ведення бойових дій вимагають широкого впровадження наземних роботизованих комплексів (НРК) для виконання логістичних місій, евакуації поранених та вогневої підтримки. Проте досвід реальної експлуатації таких платформ показує, що їхнім найуразливішим місцем є бортова електроніка. Робота важкої платформи (вагою до 750 кг) на складному рельєфі характеризується екстремальними пусковими струмами (понад 150 А) та постійними індуктивними викидами від тягових електродвигунів.

Використання стандартних рішень без належного апаратного резервування призводить до того, що у разі термічного пробою одного силового контролера, заклинювання ходової частини або потужного впливу засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ), платформа повністю втрачає рухомість . Раптова зупинка комплексу в «сірій зоні» найчастіше означає безповоротну втрату дороговартісної техніки. Тому розробка гнучкої, відмовостійкої електронної архітектури з можливістю апаратного резервування силових магістралей (матриці аварійних реле) та дублюванням комунікаційних каналів є надзвичайно актуальним інженерним завданням.

Об’єкт дослідження – процес автоматизованого керування тяговими приводами, маршрутизації струмів та обміну даними у важких мобільних платформах спеціального призначення.

Предмет дослідження – апаратно-програмна архітектура підсистеми керування, топологія модуля матриці живучості та канали зв'язку електронної частини наземної платформи.

Мета роботи – підвищення надійності, відмовостійкості та функціональної стійкості наземної платформи військового призначення шляхом розроблення спеціалізованої апаратно-програмної електронної частини із застосуванням

дворівневого резервування силових каналів керування та дублювання систем зв'язку.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

– провести аналіз існуючих військових наземних роботизованих комплексів та виявити їхні вразливості в електронній архітектурі;

– розробити загальну структурну схему бортової електроніки з урахуванням жорсткого фізичного та гальванічного поділу на силову, логічну та комунікаційну зони;

– обґрунтувати вибір компонентної бази (тягових драйверів, мікроконтролера, системи живлення) та розрахувати параметри силових навантажень;

– спроєктувати апаратний модуль крос-комутації (матрицю живучості) для забезпечення перекидання тяги на резервні драйвери у випадку аварії;

– виконати математичне моделювання системи автоматичного керування тяговим електроприводом для оптимізації алгоритмів руху;

– підготувати та оформити кваліфікаційну роботу відповідно до вимог ДСТУ 3008:2015 [1] і методичних вказівок із підготовки та оформлення кваліфікаційних робіт здобувачів першого (бакалаврського) рівня спеціальності 174 «Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології» [2].

Практичне значення отриманих результатів. Розроблена електронна архітектура, структурні електричні схеми та алгоритми крос-комутації (матриця живучості) можуть бути безпосередньо впроваджені у виробництво серійних логістичних та евакуаційних НРК середнього і важкого класу. Це дозволить суттєво знизити відсоток безповоротних втрат техніки на полі бою через відмови електроніки та підвищити стійкість систем керування до впливу РЕБ.

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

1.1 Види наземних роботів та робототехнічних комплексів

Сучасний розвиток науки та мікроелектроніки призвело до того, що стався швидкий розвиток та розповсюдження автоматизованих систем, практично в усіх сферах сучасного світу. На сьогоднішній день використання роботів дозволяє значно підвищити точність та швидкість роботи, а також мінімізувати вплив людського фактора цим самим знижеється рівень ризику при роботі в небезпечних умовах

У базовому розумінні робот являє собою програмно-керуємий пристрій, який здатний сприймати інформацію з околишнього середовища, аналізувати її та виконувати роботу по заздалегіть прописаному алгоритму або з елементами автоматичного прийняння рішень. Конструкційно будь-який сучасний робот складається з переліку компонентів пов’язаних між собою. Основою є механічна частина це: корпус, привода, шасі, маніпулятор, тощо. За збір данних відповідають сенсорні системи такі як оптичні камери, датчики відстані, температури, тиску, тощо. Обробка таких даний виконується системой керування на базі мікроконтролерів або мікропроцесорів, працюющих під управлінням програми чи оператора. Аптономність забезпечується блортовим або зовнішнім джерелом живлення [3].

Однак в сучасній інженерній практиці окремий робот рідко використовується сам по собі. Частіше за все він являється частиною більш складної структури – робототехнічного комплекса. Важливо розуміти різницю: роботизований комплекс являє собою сукупність самого виконавчого пристрою (одного чи декількох мобільних роботів), станції керування оператора, захищених каналів звязку, а також додаткового обладнання для обслуговування.

Сфера використання таких комплексів на сьогоднішній день охоплює багато напрямків. В промисловості мобільні та стаціонарні роботи виконують задачі по зварюванню, зборці деталей та автономному переміщенню вантажів по території цеха, що кратно збільшує продуктивність підприємства. Приклад ромислового робота зображено, на рис. 1.1. В медицині роботизовані системи використовуються для проведення високоточних хірургічних операцій та реабілітації пацієнтів. Окреме місце займають дослідницькі системи, які застосовуються для вивчення космосу або роботи в агресивних середовищах де присутність людини неможлива [4].



Рисунок 1.1 – Промисловий робот пилосос

В залежності від конструктивних особливостей та призначення, наземні роботи класифікуються по ряду ключових технічних ознак. Одним із самих важливих параметрів, що визначає складність електронної частини комплекса, являється ступінь його аптономності. Телекеруємі системи повністю контролюються людиною-оператором в режимі реального часу. Напівавтономні комплекси здатні самостійно виконувати частину задач, наприклад утримувати заданий курс або автоматично зупинятися перед перешкодою. Повністю автономні платформи функціонують без втручання людини спираючись на алгоритми машинного зору та штучного інтелекту

Другим важливим критерієм класифікації виступає тип ходової частини (рушія), який визначає прохідність платформи. Для роботи на рівних поверхнях (в цехах чи міських умовах) переважно використовуються колісні шасі, відрізняючиєся високою енергоефективністю [4]. В умовах складного рельєфу, бездоріжжя або зруйнованої інфраструктури застосовуються гусеничні платформи, які забезпечують максимальне зчеплення з поверхнею. Зовнішній вигляд типової гусеничної платформи наведено на рис. 1.2.



Рисунок 1.2 – Робот вогнегасник на гусеничному шасі

Значно рідше в серійному виробництві зустрічаються шагаючі комплекси через високу складність математичних моделей балансування

Впровадження роботизованих комплексів має ряд беззаперечних переваг: забезпечення високої точності операцій, можливість цілодобової роботи без втрати концентрації та економія виробничих ресурсів. Тим не менш, існують і певні недоліки, серед яких висока початкова вартість розробки, складність технічного обслуговування та залежність від стабільного джерела електроенергії [5].

Окреме місце в класифікації займають військові робототехнічні комплекси, призначені для розвідки, розмінування, логістики та вогневої підтримки.

На рис. 1.3 проєктування таких систем потребує принципово інших підходів до надійності електронних компонентів, захисту каналів звязку та бронюванню корпуса. Специфіка, види та особливості військових наземних комплексів потребують більш детального розгляду та будуть проаналізовані в наступному підрозділі [3, 4].



Рисунок 1.3 – Приклад військового НРК

1.2 Військові наземні робототехнічні комплекси: класифікація, архітектура та фізико-математичне обґрунтування електронної бази

Наземні робототехнічні комплекси військового призначення на сьогодні є одним із найскладніших класів автономних систем. Розробка таких машин вимагає чіткої систематизації, оскільки їхні конструктивні особливості напряму залежать від тактичних завдань на полі бою. Для правильного проєктування апаратної частини найчастіше застосовується класифікація, що базується на загальних конструктивних ознаках та масі корисного навантаження.

У реаліях сучасних бойових дій 2024 – 2026 років стандарти щодо ваги та габаритів техніки зазнали суттєвих змін. На сьогодні такі комплекси прийнято поділяти на наступні вагові категорії:

Легкий клас – корисне навантаження яких зазвичай варіюється в межах кількох десятків кілограм. До цієї категорії відносяться малогабаритні розвідувальні комплекси та ударні наземні дрони-камікадзе. Габарити таких машин диктується їх тактичним призначення. Довжина бази зазвичай варіюється від пятисот до восьмисот міліметрів. Висота машини рідки перевищує триста міліметрів. Най відомішим придставником цього класу є ударний космлекс “Ratel S”, рис. 1.4, призначений для ударних місій по підриву техніки противника, або інженерних місій по мінуванню [4].

Головною перевігою легких платформ є низька помітність, завдяки малим габаритам такі комплекси здатні потай переміщатися в складках рельєфу. Також враховуючи те, що такі дрони розробляються для одноразового використання, це дозволяє використання низькоякісної та дишевої електроніки, та не потребує високої якості виробництва, що в свою чергу спрощує та значно дешевить виробництво [3].

Але даний клас має свої недоліки. Малий діаметир колес або коротка гусенична база гарантують слабку прохідність по складному рельєфу, будь-яка багнюка, кущ, глибока колія кдатна стати серйозною перешкодою. Також суттєвим недоліком є обмежений об.єм внутрішнього простору для встаноалення потушної системи зв.язку та великої батареї, що в свою чергу обмежує дальність роботи.



Рисунок 1.4 – Малогабаритний наземний робот Ratel S

Середній клас – корисне навантаження яких варіюється в межах від п.ятидесяти до двухсот кілограм. На сьогоднішній день це найбільш поширений сегмент роботизованої техніки військового призначення. Розміри таких машин також продиктовані необхідністю розміщення стандартних медичних носилок або важких ящиків з боєприпасами. Зазвичай довжина бази становить від метра, до півтора метра, а ширина становить до одного метра. Представниками цього класу, добре зарекомендовані як логістичні машини є «ТАРГАН 200» та «BUREVII». Також спеціальні еваруаційні машини такі як «Мураха» та «Воля-Е» [4].

Головною перевагою середнього класу є баланс між високою вантажопідйомність та відносна непомітність, мають достатню маневреність для пересування вузькими лісовими стежками, між руїнами будівель та навіть всередині широких окопів. Забезпечуючи логістичні потреби та евакуацію.

Але специфіка застосуваня таких машин вимагає надзвичайно високу надійність. Виконання задач по евакуації чи логістики під постійним ворожим вогнем, поломки через не якісні матеріали, слабку електроніку – неприпустимо. Електронна архітектура таких комплексів обов.язково повинна мати думлюючи системи. Крім того, при переуванні навантаженої машини по складній місцевості, в складних погодніх умовах супроводжується постійними

механічними навантаженнями на корпус та силову установку. Тому вимоги до електронних драйверів управління двигунами, двигунів, електронної частини надзвичайно високі. Це в свою чергу підвищує ціну компонентів та ускладнює виробництво, рис. 1.5.



Рисунок 1.5 – Багатофункціонально логістична платформа “BUREVII”

Важкий клас – корисне навантаження яких починається від трьохсот кілограмів і може сягати понад одну тонну. За своїми габаритними показниками такі комплекси нагадують повноцінні міні-трактори або невеликі бронетранспортери. Довжина їхньої бази зазвичай становить від двох з половиною до майже чотирьох метрів, а висота дозволяє встановлювати повноцінні башти з озброєнням. Яскравим представником цього класу є потужна багатоцільова машина «Танчик», що здатна нести важке озброєння або перевозити великі об'єми корисного навантаження. На світовому ринку цю нішу міцно займають відомі західні аналоги, такі як естонський комплекс «THeMIS», рис. 1.6 від компанії «Milrem Robotics» [8].



Рисунок 1.6 – Важкий робототехнічний комплекс «THeMIS»

З інженерної точки зору архітектура важких платформ сильно відрізняється від легших моделей. Враховуючи величезну масу машини та необхідність переміщення складним рельєфом, використання виключно акумуляторних батарей стає вкрай неефективним. Тому більшість таких систем оснащується гібридними силовими установками. У подібних комплексах дизельний або бензиновий генератор працює в парі з масивом літієвих батарей. Це вимагає розробки надзвичайно складної електронної системи розподілу живлення, яка повинна в реальному часі балансувати струми між генератором, батареями та електродвигунами [5].

Крім того, дистанційне керування багатотонною машиною є вкрай складним завданням для оператора, оскільки через затримки відеосигналу та обмежений кут огляду камер дуже легко перекинути платформу або застрягти. Саме тому важкі комплекси майже завжди комплектуються складними системами машинного зору, оптичними лідарами. Ці електронні модулі дозволяють платформі самостійно аналізувати перешкоди на шляху, рухатися за заданими навігаційними точками або автоматично повертатися на базу у випадку повної втрати радіозв'язку з пультом керування. Незважаючи на високу технологічність, важкі НРК мають критичні недоліки в умовах сучасних інтенсивних бойових дій. Їхня надвисока вартість, величезний тепловий слід від двигуна внутрішнього згоряння та гучний звук роботи роблять їх першочерговими цілями для ворожої артилерії та ударних дронів. Також у разі

пошкодження ходової частини або виходу з ладу електроніки в «сірій зоні», ручна евакуація такої машини силами піхоти є фізично неможливою, що найчастіше призводить до повної втрати коштовного комплексу [15].

Вибір ходової частини є одним із найважливіших етапів розробки наземного комплексу, оскільки саме вона визначає прохідність машини та її споживання енергії. В сучасній військовій робототехніці найчастіше використовують два типи шасі, і кожен з них має свої жорсткі вимоги до експлуатації.

Колісні платформи – цей тип шасі відрізняється простою конструкцією та використовується в основному для швидких логістичних місій на більш-менш рівних поверхнях.

Переваги: висока енергоефективність. Завдяки низькому тертю в трансмісії, такі машини здатні швидко їздити та споживають значно менше заряду батареї. Це дозволяє розробникам ставити менш потужні та дешевші двигуни.

Недоліки: високий тиск на грунт. В умовах осінньої багнюки, глибокого снігу чи піску колісні роботи, особливо якщо вони сильно навантажені боєкомплектом або бронею, швидко грузнуть і повністю зупиняються.

Гусеничні шасі – є найкращим рішенням для сильного бездоріжжя, лісу та зруйнованих міст.

Переваги: завдяки великій площі контакту гусениці з землею досягається мінімальний тиск на грунт. Така машина здатна спокійно проїжджати через глибоку багнюку, окопи, траншеї та повалені дерева.

Недоліки: постійне тертя в гусеницях та катках забирає велику частину потужності двигуна. Також під час повороту на місці (так званий танковий розворот) опір грунту дуже сильно зростає. Це ставить дуже жорсткі вимоги до силової електроніки: драйвери моторів мають витримувати екстремальні перевантаження по струму та температурі без пошкодження самих плат [5, 14].

Саме тому розробка надійної системи керування для будь-якої з цих платформ неможлива без попередніх розрахунків навантаження. Вибір між колесом і гусеницею напряму впливає на коефіцієнти тертя, які лягають в основу розрахунків.

1.3 Огляд існуючих аналогів наземних роботизованих комплексів

Розробка надійної системи керування починається з аналізу тих машин, які вже існують на ринку та активно використовуються в бойових умовах. Для порівняння були обрані комплекси середнього та важкого класу [4]. Розглянемо як дорогі західні зразки, так і українські розробки, спираючись на їхні офіційні тактико-технічні характеристики, щоб виявити конструктивні та електронні недоліки.

Естонський комплекс «THeMIS» від компанії «Milrem Robotics». Це один із найвідоміших у світі військових багатоцільових дронів, який створювався за стандартами НАТО [8]. Основні технічні параметри комплексу зведено у табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Технічні характеристики комплексу «THeMIS»

Параметр	Значення
Вантажопідйомність	750 кг (у деяких модифікаціях до 1200 кг) при власній вазі 1650 кг.
Габарити та прохідність	Довжина 2470 мм, ширина 2040 мм. Дорожній просвіт регулюється від 400 до 600 мм.
Швидкість та автономність	Гібридна силова установка (дизель/електро). Максимальна швидкість до 20 км/год. Запас ходу до 15 годин у гібридному режимі та лише 1,5 години в повністю електричному режимі.

Продовження таблт 1.1

Параметр	Значення
Зв'язок та сенсорика	Використовується військовий стандарт тактичного зв'язку (технологія MIMO) із самовідновлюваною мережею та дублюванням радіоканалів. Машина оснащена лідарами, тепловізорами, нічним баченням та складними алгоритмами машинного зору.

Переваги: висока вантажопідйомність, дублювання всіх систем зв'язку та здатність частково рухатися в автономному режимі.

Недоліки: робота дизельного генератора створює гучний шум та яскравий тепловий слід. Машина має нульову ремонтопридатність у польових умовах: у разі пошкодження складних електронних плат або механіки відновити її в траншеї неможливо. Ціна комплексу перевищує триста тисяч євро.

Українська платформа «Тарган 200». Популярний логістичний робот українського виробництва з колісною базою та несучим кузовом. Основні технічні параметри зведено у табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Технічні характеристики платформи «Тарган 200»

Параметр	Значення
Вантажопідйомність	200 кг (при власній масі 280 кг).
Габарити та прохідність	Довжина 1440 мм, ширина 1120 мм. Кліренс становить 210 мм. Максимальний кут підйому — 20 градусів.
Швидкість та автономність	Повністю електрична силова установка. Швидкість до 15 км/год на твердому покритті. Запас ходу до 20–25 км (або до двох годин безперервного руху).
Зв'язок та сенсорика	Радіоканал працює на частотах 868–915 мегагерц із радіусом дії від 1 км до 2,5 км (залежно від рельєфу). Резервних каналів керування у базовій комплектації не передбачено. Базова сенсорика обмежена курсовою денною камерою, тепловізор встановлюється лише як опція.

Переваги: низька вартість, маневреність та простота транспортування в пікапі.

Недоліки: критичною проблемою цього сімейства є різкість керування. Через коротку базу та використання драйверів без функції плавного пуску (ШІМ-рампи), машина реагує на команди дуже різко. При спробі трохи підрулити на ходу, робот здійснює сильний ривок. Крім того, відсутність апаратного дублювання зв'язку робить машину вразливою до систем радіоелектронної боротьби (РЕБ) [15].

Український комплекс «Воля-Е». Українська гусенична радіокерована платформа, створена спеціально для евакуації поранених. Основні технічні параметри зведено у табл. 1.3.

Таблиця 1.3 – Технічні характеристики комплексу «Воля-Е»

Параметр	Значення
Вантажопідйомність	150 кг при власній масі 174 кг.
Габарити та прохідність	Довжина 1350 мм, ширина 980 мм. Висота машини становить всього 450 мм, що забезпечує наднизький профіль та акустичну непомітність.
Швидкість та автономність	Електрична силова установка. Максимальна швидкість до 12 км/год. Запас ходу становить 22 км (близько 2,5 годин роботи).
Зв'язок та сенсорика	Дальність керування заявлена до 3 кілометрів. Використовуються стандартні аналогові модулі відеозв'язку. Вбудований машинний зір чи датчики перешкод відсутні.

Переваги: Гусенична база дає відмінну прохідність по багнюці, а проста механічна конструкція легко ремонтується в польових умовах [4].

Недоліки: Використання жорсткої підвіски без амортизаторів призводить до того, що платформа сильно підстрибує на нерівностях. Крім того, відкритий гусеничний механізм часто заклинює від гілок. У цей момент навантаження на контролери моторів зростає, і через відсутність якісного апаратного захисту по струму вони вигорають.

1.4 Аналіз технічного завдання

На основі аналізу існуючих комплексів та їхніх слабких місць, було сформовано вимоги до розробки надійної системи керування для логістичної платформи середнього класу. Головна ідея зробити машину, яка не "осліпне" від дії РЕБ і не зупиниться через вихід з ладу якогось електронного компонента [5].

Для реалізації проєкту система повинна відповідати наступним вимогам. Вимоги до систем зв’язку та керування.

Основний канал зв’язку. Керування платформою на великих відстанях має відбуватися через термінал Starlink. Це забезпечує найбільш стійкий та надійний зв'язок із мінімальними затримками, що дозволяє керувати роботом навіть поза межами прямої видимості.

Резервний канал. На випадок збоїв у цифровій мережі або специфічних умов роботи, на борту має бути встановлена дублююча аналогова система зв’язку. Це дозволить оператору зберегти контроль над машиною в критичній ситуації [12, 15].

Програмний плавний пуск. Для вирішення проблеми різких ривків як у аналогів. Контролер має поступово нарощувати потужність через ШІМ-сигнал. Це збереже механіку та дозволить перевозити чутливі вантажі.

Вимоги до надійності та дублювання.

Резервування силових драйверів. Система повинна мати максимальний рівень виживання. У разі виходу з ладу одного з драйверів двигуна, програма має автоматично розпізнати аварію, знизити загальну потужність комплексу та перемкнути керування на резервний робочий драйвер. Це дозволить врятувати машину та вивести її з небезпечної зони.

Запас потужності. Силові драйвери мають бути обрані з суттєвим запасом (у 1,5–2 рази від номінального струму двигунів). Це необхідно для того, щоб один вцілілий драйвер міг короткочасно взяти на себе навантаження всієї платформи в аварійному режимі.

Гальванічна розв’язка. Для захисту "мізків" системи від високовольтних викидів напруги та перешкод від моторів, логічна частина має бути повністю ізольована від силової за допомогою оптопар.

Захист від перевантажень. Контролер має постійно зчитувати струм із двигунів. Якщо колесо заклинило в багнюці і струм підскочив до критичного, система повинна миттєво вимкнути живлення, щоб плати не згоріли [5, 11].

1.5 Висновки до першого розділу

У першому розділі проведено аналіз сучасних наземних роботизованих комплексів та особливостей їх застосування у військовій сфері. Розглянуто класифікацію наземних платформ за призначенням, масогабаритними характеристиками та типом ходової частини. Встановлено, що найбільш поширеними для логістичних та евакуаційних завдань є платформи середнього класу, які поєднують достатню вантажопідйомність, мобільність та прохідність.

Виконано аналіз існуючих зразків роботизованих комплексів, зокрема THeMIS, «Тарган 200» та «Воля-Е». Виявлено їх основні переваги та недоліки. Встановлено, що найбільш критичними проблемами сучасних НРК є недостатня відмовостійкість електронних систем, відсутність резервування силових модулів і каналів зв’язку, а також висока вразливість до впливу засобів радіоелектронної боротьби.

На основі проведеного аналізу сформовано технічні вимоги до розроблюваної системи керування. Визначено необхідність використання резервованих силових драйверів, дубльованих каналів зв’язку, гальванічної розв’язки логічної та силової частин, а також систем захисту від перевантажень і аварійних режимів роботи.

Отримані результати стали основою для подальшої розробки електронної частини наземної платформи військового призначення та обґрунтування вибору її структурної та компонентної бази.

2 РОЗРОБКА АПАРАТНОЇ ЧАСТИНИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

2.1 Схема розташування модулів

Основою розроблюваного комплексу є повнопривідна колісна платформа з формулою 6×6. Враховуючи високу заявлену вантажопідйомність в 400 кг, шасі має форму пласкої несучої палуби, оптимізованої для кріплення медичних нош або габаритних логістичних контейнерів [4].

Електронна та силова частина системи керування повністю прихована всередині захищеного металевого корпусу. Архітектура розташування компонентів побудована за модульним принципом з урахуванням жорстких вимог до електромагнітної сумісності, тепловідведення та правильного розподілу мас. Внутрішній та зовнішній простір платформи логічно поділяється на три зони: силову, логічну та комунікаційну.

Силова зона. Тут знаходяться найважчі деталі, які сильно гріються. Ми розмістили їх на самому дні платформи, щоб максимально опустити центр ваги. Завдяки цьому машина не перекинеться, якщо поїде під нахилом з вантажем [4].

Блок акумуляторів. Стоїть рівно по центру, щоб вага розподілялася рівномірно. Саму батарею ми закрили в легкий алюмінієвий ящик від вологи (за стандартом IP67). Робити важку сталеву броню не стали, щоб не додавати завої ваги.

Двигуни. Два мотори стоять по боках від батареї. Кожен із них підключений до понижувального редуктора і через ланцюг крутить одразу всі три колеса зі свого боку.

Силові драйвери. Їх прикрутили прямо до металевого днища через теплопровідну пасту. Тобто сам корпус машини працює як великий радіатор і забирає тепло від транзисторів [13].

Блок реле. Це коробка з комутаторами, яка стоїть між драйверами. Якщо один драйвер виходить з ладу, цей блок перемикає обидва мотори на вцілілий драйвер.

Логічна зона. Плата керування: Вона лежить в окремій екранованій коробці на віброізоляторах. Її поставили якнайдалі від двигунів та силових кабелів. Це зроблено для того, щоб під час старту моторів, коли по дротах ідуть струми під 300 А, електромагнітне поле не давало збоїв на процесор [14].

Комунікаційна зона. Антени зв'язку: Щоб сигнал був стабільним, антени аналогового відео та керування винесли на високі металеві дуги ззаду [12].

Термінал Starlink. Кріпиться на окремому майданчику позаду, щоб антена дивилася прямо в небо і їй не заважав вантаж чи металеві деталі конструкції.

2.2 Компонентна база

У цьому розділі наведено обґрунтування вибору комплектуючих та розрахунок необхідної потужності для платформи. Щоб рухати 750 кг машину по пересіченій місцевості, розрахуємо необхідне тягове зусилля та потужність двигунів. Сила опору коченню розраховується за формулою [4]:

$$F = m \cdot g \cdot f \,, \tag{2.1}$$

де m дорівнює 750 кг – повна маса платформи;

g дорівнює 9,81 м/с^2 – прискорення вільного падіння;

f дорівнює 0,15 – коефіцієнт опору коченню для ґрунту та бездоріжжя.

Підставляємо значення:

$$F = 750 \cdot 9{,}81 \cdot 0{,}15 \approx 1103\, H \,. \tag{2.2}$$

Загальний крутний момент на колесах при радіусі колеса r дорівнює 0,25 м становить:

$$M_{\text{заг}} = F \cdot r = 1103 \cdot 0{,}25 \approx 276\, H \cdot \text{м}\,. \tag{2.3}$$

Оскільки ми маємо два незалежні борти, необхідний момент на один борт становить:

$$M_{\text{борт}} = 138\, H \cdot \text{м}\,. \tag{2.4}$$

Для досягнення швидкості 15 км/год або v дорівнює 4,16 м/с кутова швидкість колеса складатиме:

$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{4{,}16}{0{,}25} = 16{,}64\ \text{рад/с}\,. \tag{2.5}$$

Необхідна механічна потужність на один борт:

$$P = M_{\text{борт}} \cdot \omega = 138 \cdot 16{,}64 \approx 2296\ \text{Вт}\,. \tag{2.6}$$

З огляду на ці розрахунки, для нашої платформи ідеально підходять промислові колекторні двигуни потужністю 2000 Вт наприклад, поширеної серії MY1020 48В 2000Вт або їхні важкі індустріальні аналоги, рис. 2.1 [5]. Їхня номінальна потужність складає 2 кВт, але в пікових режимах (підйом під гірку) вони здатні короткочасно видавати до 4 кВт.



Рисунок 2.1 – Двинуг MY1020 48 В 2000 Вт

Розрахункова механічна потужність в 2296 Вт відображає навантаження під час руху по складному бездоріжжю з максимальним корисним навантаженням. Обрані електродвигуни мають номінальну потужність 2000 Вт, що забезпечує їх стабільну роботу в тривалому крейсерському режимі на твердому або змішаному покритті без теплового перевантаження. У режимов критичного опору коченню (диференційний розворот на місці, подолання крутих підйомів або вихід із глибокої колії) колекторні електродвигуни постійного струму здатні короткочасно переходити в режим струмового перевантаження, розвиваючи пікову потужність до 4000 Вт на борт [5]. Такий вибір електроприводу є оптимальним, оскільки дозволяє уникнути невиправданого збільшення маси та габаритів силової установки, гарантуючи при цьому подолання пікових розрахункових опорів.

Для узгодження номінальної частоти обертання валу електродвигуна, що становить 3000 об/хв. із розрахунковою кутовою швидкістю коліс визначено необхідне передаточне число трансмісії. Частота обертання колеса для забезпечення максимальної швидкості комплексу *v* дорівнює 15 км/годину становить:

$$n_2 = \frac{30 \cdot \omega}{\pi} = \frac{30 \cdot 16{,}64}{3{,}14} \approx 159 \text{ об/хв}. \quad (2.7)$$

Відповідно, необхідне передаточне число $i_{\text{розр}}$ дорівнює:

$$i_{\text{розр}} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{3000}{159}. \quad (2.8)$$

Згідно зі стандартизованими рядами, для інтеграції обрано найближче значення *i* дорівнює 20 [4].

Оптимальним рішенням для трансмісії є застосування одноступінчастого черв'ячного редуктора промислової серії NMRV 063. На рис. 2.2 вибір саме черв'ячного типу передачі зумовлений її кінематичною властивістю статичного

самогальмування. При передаточному числі $i \geq 20$ кут підйому гвинтової лінії черв'яка стає меншим за кут тертя матеріалів, що робить передачу незворотною: зовнішнє навантаження на вихідний вал (колеса) не здатне провернути ротор знеструмленого двигуна [4]. Це забезпечує надійну фіксацію платформи на крутих схилах без необхідності застосування додаткових електромеханічних гальм, що своєю чергою знижує масу комплексу та усуває додаткове споживання енергії.



Рисунок 2.2 – Черв'ячного редуктора промислової серії NMRV 063

Алгоритм керування ходовою частиною побудовано за принципом розімкненої петлі або без зворотного зв'язку. Тягові електродвигуни не оснащуються датчиками кутового переміщення (енкодерами). Така апаратна архітектура є умовою для забезпечення заявленого рівня живучості системи. У разі бойового пошкодження одного з контролерів та спрацювання блоку реле для паралельного підключення обох бортів до резервного драйвера, відсутність замкненого контуру ПІД-регулювання унеможливлює виникнення програмних помилок розсинхронізації [9]. Регулювання тягового зусилля в аварійному режимі здійснюється виключно за рахунок зміни шпаруватості ШІМ-сигналу, що гарантує безперервність виконання місії [5, 9].

2.2.1 Живлення

Для забезпечення точного регулювання швидкості, напрямку обертання та крутного моменту тягових електродвигунів у системі необхідні спеціалізовані модулі драйвери. Їхня головна функція полягає у перетворенні слабкострумового логічного керуючого сигналу від центрального мікроконтролера у потужний струм для обмоток двигуна.

Принцип роботи та розрахунок втрат

Основою будь-якого сучасного драйвера двигунів постійного струму є транзисторний Н-міст (H-bridge). На рис. 2.3 така топологія дозволяє пропускати струм через обмотки ротора у двох напрямках, забезпечуючи як рух вперед, так і реверс без використання механічних реле [5].

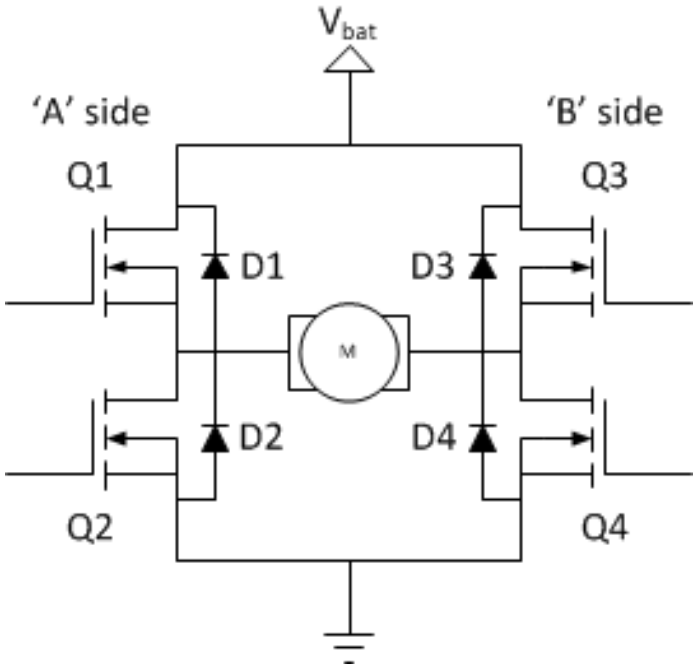


Рисунок 2.3 – Принципова схема транзисторного Н-моста

Керування вихідною потужністю здійснюється методом широтно-імпульсної модуляції. Ефективна напруга на двигуні (U_{eff}) є прямо пропорційною до шпаруватості ШІМ-сигналу (D) та напруги джерела живлення (U_{bat}):

$$U_{eff} = U_{bat} \cdot D \,, \tag{2.9}$$

де *D* змінюється в межах від 0 (двигун зупинено) до 1 (максимальна потужність).

Вибір силових ключів на MOSFET-транзисторів, драйвера базується на розрахунку максимального струму споживання одного борту [14]. Виходячи з номінальної потужності двигуна *P* дорівнює 2000 Вт та напруги системи *U* дорівнює 48 В, визначимо номінальний струм:

$$I_{nom} = \frac{P}{U} = \frac{2000}{48} \approx 41{,}67\ A\,. \tag{2.10}$$

З урахуванням коефіцієнта перевантаження при пуске, подоланні перешкод або розвороті на місці $Kp \approx 2{,}5\ldots..3$, піковий струм I_{peak} становитиме:

$$I_{peak} = I_{nom} \cdot K_p = 41{,}67 \cdot 3 \approx 125\ A\,. \tag{2.11}$$

При таких струмах критичним параметром стає тепловиділення на транзисторах. Загальні втрати потужності на драйвері P_{loss} складаються зі статичних втрат на опорі відкритого каналу $R_{DS(on)}$ та динамічних втрат при перемиканні [5]:

$$P_{loss} = I^2 \cdot R_{DS(on)} + P_{sw}\,. \tag{2.12}$$

Для забезпечення надійної роботи драйвер повинен мати апаратний запас по піковому струму (не менше 150 А) та масивний радіатор для розсіювання теплової потужності.

Порівняльний аналіз класів драйверів. На ринку силової електроніки представлено декілька класів контролерів, які гіпотетично можуть бути використані в проєкті. Для обґрунтування кінцевого вибору проведемо їх порівняльний аналіз, табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Порівняння класів силових драйверів для НРК

Клас драйвера	Приклади моделей	Макс. робоча напруга	Макс. піковий струм	Наявність рекуперації	Придатність для проєкту
Хобійні / DIY збірки	BTS7960, IBT-2	24 В	43 А	Ні	Не підходить. Невідповідність по напрузі та струму. Ризик теплового пробою.
Контролери легкого електротранспорту	Generic E-bike 48V 1000W	60 В	35–45 А	Частково	Не підходить. Не розраховані на танковий розворот. Проблемна реалізація різкого реверсу.
Промислові контролери DC-двигунів	Kelly KLS4812S, RoboteQ	60–72 В	120–150 А	Так	Оптимально. Створені для важких умов, витримують високі пускові струми, герметичні.

На основі розрахунків та порівняльного аналізу табл. 2.1, для керування тяговими бортами платформи обрано промислові контролери класу Kelly Controls (або промислові аналоги від RoboteQ), рис. 2.3 [6].



Рисунок 2.3 – Зовнішній вигляд обраного контролера

Вибір цієї компонентної бази аргументований наступними технічними перевагами.

Струмовий запас. Здатність витримувати довготривалий струм до 50 А та пікові пускові навантаження понад 120 А, що гарантує відсутність просадок тяги під час руху по складному рельєфу.

Захисні механізми. Вбудований апаратний захист від короткого замикання обмоток, перенапруги та термічного перегріву за допомогою внутрішніх датчиків температури.

Герметичність. Контролери цього класу залиті теплопровідним компаундом та мають ступінь захисту оболонки IP66/IP67, що критично важливо для наземного роботизованого комплексу [13].

Інтерфейс керування. Контролер підтримує стандартне аналогове керування (від 0 В до 5 В), що легко узгоджується з цифро-аналоговими перетворювачами або відфільтрованим ШІМ-сигналом мікроконтролера.

Джерело живлення та система керування акумулятором.

Енергетична підсистема є критично важливим вузлом наземного роботизованого комплексу. Вона повинна не лише забезпечувати розрахований запас ходу по пересіченій місцевості, але й витримувати екстремальні струмові навантаження під час маневрування платформи з повною масою 750 кг.

Розрахунок необхідних параметрів батареї. Вибір джерела живлення базується на двох головних критеріях: необхідній струмовіддачі та загальному запасі енергії.

Загальна номінальна потужність двох тягових двигунів становить P_{nom} дорівнює 4000 Вт. При робочій напрузі системи U дорівнює 48 В, безперервний номінальний струм розряду I_{nom} дорівнює:

$$I_{nom} = \frac{P_{nom}}{U} = \frac{4000}{48} \approx 83{,}3\ A\ . \tag{2.13}$$

У пікових режимах (рух по глибокому бруду, танковий розворот) загальна потужність може короткочасно зростати до P_{peak} дорівнює 8000 Вт, що вимагає від акумулятора здатності віддавати піковий струм I_{peak}:

$$I_{peak} = \frac{P_{peak}}{U} = \frac{8000}{48} \approx 166{,}6\ A\ . \quad (2.14)$$

Враховуючи практичні дані експлуатації важких НРК, витрата енергії на 1 км шляху по бездоріжжю становить близько 500 Вт/годину. Для забезпечення запасу ходу щонайменше від 20 км до 25 км у найважчих умовах або до 50 км по твердому ґрунту, загальна ємність батареї повинна бути не меншою за 10 кВт/год.

Порівняльний аналіз хімічних джерел струму. Для реалізації розрахованих параметрів необхідно обрати оптимальний тип електрохімічної системи. У табл. 2.2 наведено порівняння найпоширеніших типів акумуляторів, придатних для тягового застосування.

Таблиця 2.2 – Порівняльний аналіз типів тягових акумуляторів

Тип акумулятора	Питома енергоємність	Ресурс	Безпека при пошкодженні	Здатність високої струмовід дачі	Висновок для НРК
Свинцево-кислотні (AGM / GEL)	Низька (30-40 Вт·год/кг)	300 - 500	Висока	Низька (сильна просадка напруги)	Не підходить. Для 10 кВт·год вага батареї перевищить 300 кг.
Літій-іонні (Li-ion NMC)	Дуже висока (150-250 Вт·год/кг)	800 - 1000	Критично низька.	Висока	Не підходить. Занадто високий ризик пожежі для військового/рятувал ьного застосування.
Літій-залізо-фосфатні (LiFePO4)	Середня (90-160 Вт·год/кг)	3000 - 7000	Висока	Дуже висока	Оптимально. Ідеальний баланс безпеки, струмовіддачі та ресурсу.

Обґрунтування обраного рішення. На основі проведеного аналізу, для живлення комплексу обрано збірку на базі літій-залізо-фосфатних ($LiFePO_4$)

елементів. Головним аргументом на користь цієї хімії є її виняткова пожежна безпека та стабільність. На відміну від стандартних літій-іонних батарей, $LiFePO_4$ не схильні до термічного розгону з виділенням кисню при фізичному пробитті наприклад, уламком або сильному ударі [5].

Для нашої системи застосовується збірка з 16 послідовно з'єднаних промислових призматичних комірок формату 16S такі як EVE LF230, рис. 2.4.



Рисунок 2.4 – Зовнішній вигляд призматичних комірок $LiFePO_4$ ємністю 230 А/годин

Параметри обраної акумуляторної збірки:

– номінальна напруга: 51,2 В;

– ємність: 230 А/год;

– загальна енергія: 11,7 кВт/год;

– маса комірок: 78 кг.

Така маса акумулятора конструктивно використовується як баласт, що розміщується на самому дні платформи для зміщення центру мас донизу та підвищення кута бокового перекидання НРК.

Система керування батареєю. Обов'язковою умовою використання літієвих акумуляторів є наявність плати BMS (Battery Management System) рис. 2.5, яка відповідає за балансування комірок, захист від перезаряду, глибокого розряду та короткого замикання.



Рисунок 2.5 – Симетрична плата BMS 16S

Враховуючи розрахований піковий струм системи у 166 А, до збірки інтегрується промислова симетрична BMS-плата така як, DALY Smart BMS 16S 48 В 250 А [11]. Плата розрахована на постійний струм розряду 250 А та здатна витримувати короткочасні пускові струми понад 400 А. Наявність модуля Bluetooth у BMS дозволяє оператору в реальному часі контролювати температуру збірки та залишковий рівень заряду (SoC) з екрана планшета керування.

2.2.2 Центральний блок керування

Центральний блок керування (ЦБК) є «мозком» роботизованого комплексу, який забезпечує координацію підсистем обробки команд оператора, формування керуючих сигналів для драйверів двигунів та моніторингу телеметрії.

Технічні вимоги до обчислювального модуля. Для стабільної роботи платформи мікроконтролер повинен відповідати наступним критеріям.

Кількість апаратних ШІМ-каналів: мінімум 2 незалежних канали для керування бортами.

Інтерфейси зв'язку: наявність кількох апаратних UART-портів (для Starlink, радіомодуля ExpressLRS та телеметрії) та шини I2C/CAN для опитування BMS-плати акумулятора.

Швидкодія: здатність обробляти вхідні пакети даних та виконувати алгоритми стабілізації з частотою оновлення не менше 100 Гц (цикл керування 10 мс).

Розрахунок частоти та роздільної здатності ШІМ. Якість керування колекторними двигунами через Н-міст залежить від частоти ШІМ (f_{pwm}). При занизькій частоті двигуни будуть видавати акустичний писк, а при зависокій зростуть динамічні втрати на транзисторах драйвера. Оптимальний діапазон для нашої потужності від 16 кГц до 20 кГц [14].

Роздільна здатність ШІМ (bit resolution) визначає плавність ходу. При 10-бітній роздільній здатності ми маємо 2^{10}, що дорівнює 1024 кроки швидкості, що забезпечує точне маневрування.

Порівняльний аналіз платформ керування. Для вибору архітектури ЦБК проведено порівняння трьох популярних рішень (табл. 2.4).

Таблиця 2.4 – Порівняння мікроконтролерних платформ

Параметр	Arduino Uno (ATmega328P)	ESP32-S3 (Dual-Core)	STM32F405 (Cortex-M4)
Тактова частота	16 МГц	240 МГц	168 МГц
Розрядність	8 біт	32 біти	32 біти
Кількість ядер	1	2 (незалежні)	1
UART / I2C / SPI	1 / 1 / 1	3 / 2 / 3	6 / 3 / 3
Вбудований Wi-Fi/BT	Відсутній	Наявний	Відсутній
Висновок	Не підходить. Замало портів та низька швидкість.	Оптимально. Висока швидкість, 2 ядра, багато портів.	Добре. Промисловий стандарт, але складніше в розробці.

Обґрунтування обраного рішення. На основі аналізу для проєкту обрано мікроконтролер ESP32-S3 (рис. 2.6) [10]. Вибір аргументований наявністю двох обчислювальних ядер.

Core 0: виділяється суто під комунікаційні задачі такі як обробка пакетів Starlink та ExpressLRS, підтримка Wi-Fi як сервісного каналу.

Core 1: виконує критичні задачі керування двигунами, опитування датчиків та реалізацію алгоритмів безпеки.

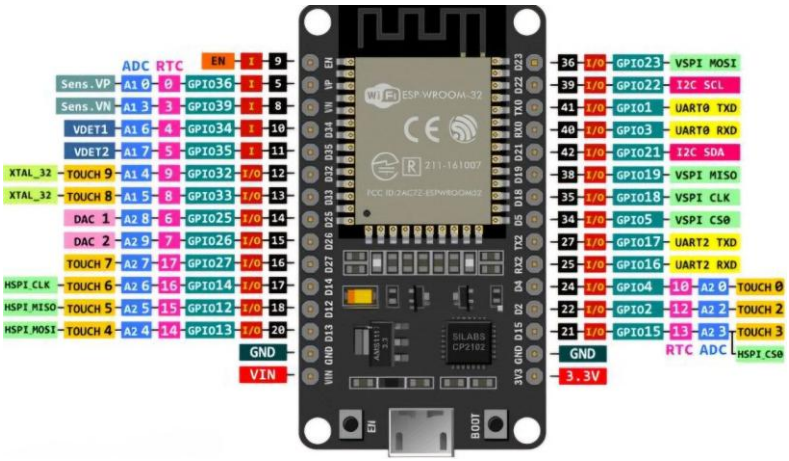


Рисунок 2.6 – Зовнішній вигляд контролера ESP32 та схема розпіновки

Наявність двох незалежних ядер технічна необхідність для контролера [10]. Одне ядро повністю виділяється під мережеві задачі: підтримку зв'язку та обробку телеметрії. У цей же час друге ядро працює виключно з апаратною частиною, безперервно генеруючи ШІМ-сигнали для драйверів та керуючи матрицею реле. Завдяки такому розділенню навіть значні затримки в мережі чи передача важких пакетів даних жодним чином не впливають на плавність ходу платформи.

Ще один важливий нюанс стосується узгодження напруг. Оскільки сам мікроконтролер працює з логікою 3,3 В, а промислові драйвери потребують 5 В, ми додали в схему двоспрямовані перетворювачі рівнів, що гарантує стабільну передачу керівних сигналів [14]. До того ж, обчислювальна потужність цієї

плати залишає нам величезний простір для модернізації. У перспективі сюди можна легко інтегрувати додаткові модулі.

Щоб повністю виключити цей ризик, ми реалізували гальванічну розв'язку всіх ліній керування, рис. 2.7. Для передачі ШІМ-сигналів використовуються високошвидкісні оптопари серії 6N137, які не спотворюють частоту імпульсів, а для керування комутаційними реле цілком достатньо класичних PC817 [7].

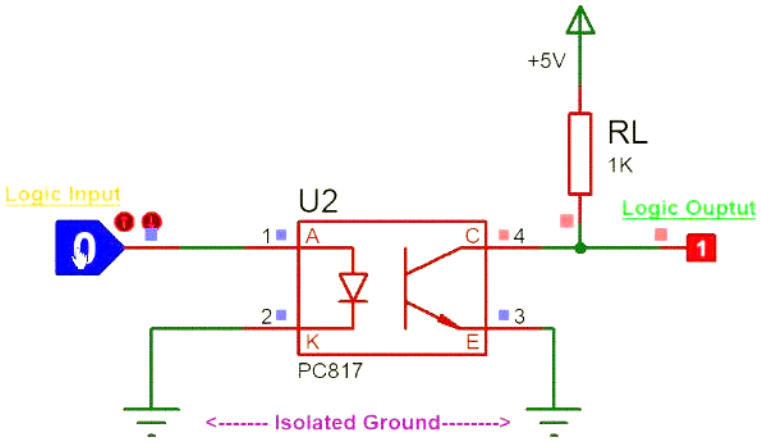


Рисунок 2.7 – Принципова схема оптоізоляторної розв'язки керуючих сигналів

Головна перевага заключається в відсутності електричного контакту між центральною платою та виконавчими механізмами. Сигнал передається виключно за допомогою світла всередині мікросхеми. Навіть якщо станеться найгірше, наприклад, теплове пробиття силових транзисторів у драйвері чи коротке замикання обмоток двигуна, висока напруга просто спалить дешеву оптопару [14]. При цьому сам мікроконтролер, дорогі модулі зв'язку та телеметрія залишаться повністю неушкодженими і зможуть повідомити оператора про характер аварії.

Максимальна шкода обмежиться вигорянням мікросхеми оптоізолятора. Для запобігання хибному виходу з ладу самих оптопар від дрібних

електромагнітних наведень чи статичної напруги, на входах логічних ліній додатково встановлюються захисні TVS-діоди, які зрізають будь-які нештатні піки напруги, гарантуючи безперебійну роботу сигнального тракту в умовах сильних перешкод [14].

2.2.3 Підсистема зв'язку та телеметрії

Зв'язок, це ахіллесова п'ята будь-якого наземного роботизованого комплексу. В умовах щільної роботи ворожого РЕБ (радіоелектронної боротьби) стандартні рішення втрачають сигнал на першій же сотні метрів [15]. Тому комунікаційну підсистему ми будуємо за принципом подвійного резервування: маємо основний супутниковий канал і тактичний модульний радіоканал.

Основний канал. Супутниковий термінал Starlink (рис. 2.8). Розміщується на верхній палубі або на дугах безпеки антену Starlink. Її перевага полягає в тому, що вона спрямована вертикально в небо. Наземним засобам РЕБ дуже не в змозі заглушити такий вузьконаправлений промінь. Завдяки цьому ми отримуємо якісний канал зв'язку, через який можна без затримок передавати відразу кілька відеопотоків у високій якості.

Але є суттєвий мінус: якщо машина заїде в густий ліс, сховається під бетонним мостом чи в ангарі, супутник її загубить через фізичні перешкоди [15]. Саме для таких сценаріїв нам потрібен тактичний резерв.



Рискнок 2.8 – Супутниковий термінал Starlink

Резервний ешелон. Радіоканал для виживання під РЕБ. Коли супутниковий зв'язок втрачається, мікроконтролер перемикається на прямий радіозв'язок із пультом оператора. І тут ми принципово розділяємо керування та відео на два незалежні потоки, адже цифрові та аналогові сигнали по-різному поводяться під впливом перешкод.

Керування машиною. Для передачі команд від джойстика до моторів ми використовуємо модулі на базі протоколу LoRa (наприклад, системи ExpressLRS). Їхня головна зброя проти РЕБ це алгоритм FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum псевдовипадкове перелаштування робочої частоти). Приймач і передавач синхронно стрибають по всьому діапазону сотні разів на секунду. Ворожі перешкоди не здатні перекрити весь цей спектр одночасно, тому команди керування все одно прориваються до центральної плати [12, 15].

Передача відео. Свідомо відмовилися від сучасного цифрового відео на користь старого аналогового відеопередавача (Analog VTX). Для підвищення живучості. Коли цифрова камера потрапляє під дію РЕБ, втрачаються пакети даних: зображення миттєво завмирає, або екран стає синім. Оператор сліпне.

Аналоговий сигнал працює інакше, при потужному глушінні зображення деградує поступово. На екрані з'являється «сніг», сильні смуги, картинка смикається, але крізь цей шум оператор усе одно бачить силуети. Цього цілком достатньо, щоб вивести машину з небезпечної зони [15].

Модульність замість фіксованих частот. Радіоелектронна ситуація на фронті постійно змінюється. Тому плата контролера має бути з мошливістю швидкої заміни (модульна архітектура).

У разі потреби, оператор повинен мати змогу прямо в польових умовах за хвилину витягнути стандартний приймач керування чи відеопередавач, вставити замість нього інший (наприклад, на нестандартні низькі частоти типу 433 МГц або 1,2 ГГц) і встановити відповідну антену. Низькі частоти набагато краще огинають перешкоди і пробивають густий ліс. При цьому центральний

контролер (ESP32) автоматично продовжить роботу з новими модулями без жодного перепрограмування.

2.3 Структурна організація та макетування системи керування

У даному підрозділі розглядається логіка фізичної інтеграції обраних електронних компонентів та організація кабельних магістралей розробленої платформи. Враховуючи високу складність промислових контролерів та систем керування батареєю (BMS), побудова повної класичної принципової схеми на рівні окремих радіодеталей є недоцільною. Натомість архітектура підключень реалізована за модульним принципом із чітким та жорстким розділенням силових та сигнальних ліній. Для наочної демонстрації маршрутизації струмів та сигналів розроблено структурну схему електричних підключень комплексу, рис. 2.9.

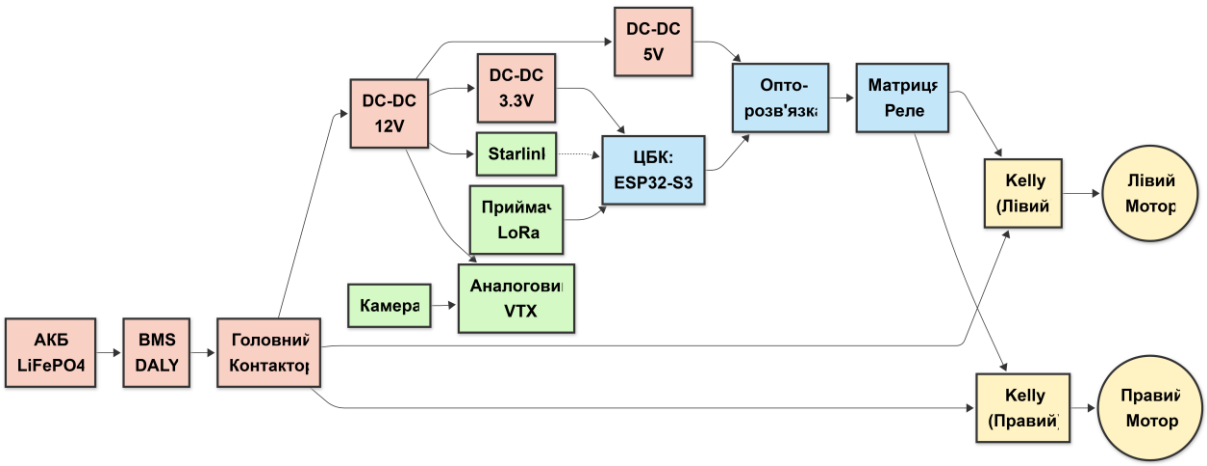


Рисунок 2.9 – Структурна схема електричних підключень роботизованої платформи

Організація магістралей живлення та гальванічна ізоляція. Головним джерелом енергії є збірка $LiFePO_4$ з номінальною напругою 51,2 В. Від силових клем акумулятора струм проходить через захисну плату BMS та головний промисловий контактор, після чого висока напруга подається безпосередньо на

тягові контролери моторів. Цей контур формує «силову зону» з власним, ізольованим нульовим потенціалом (мінусом).

Для живлення логічної частини використовується каскад знижувальних перетворювачів напруги (DC-DC), який формує повністю відокремлену мережу:

Первинний перетворювач знижує напругу з 48 В до 12 В для живлення котушок комутаційних реле та забезпечення універсальної магістралі живлення для модулів комунікаційної зони (як інтерфейс для підключення корисного навантаження сторонніх розробників).

Вторинні лінійні та імпульсні стабілізатори знижують напругу до 5 В (для живлення опторозв'язки) і до 3,3 В (для живлення ядер мікроконтролера та бортових приймачів керування).

З метою підвищення загальної надійності та стійкості до зовнішніх факторів, відведення тепла від потужних модулів знижувальних перетворювачів реалізовано суто пасивним методом шляхом їхнього безпосереднього монтажу на металеве днище платформи через теплопровідний інтерфейс. Це виключає необхідність використання вразливих механічних елементів активного охолодження [13].

Критично важливою вимогою безпеки розробленої системи є повна фізична ізоляція силового мінуса від логічного мінуса. У системі існують два незалежні контури заземлення. Об'єднуються лише нульові потенціали всередині логічної зони (між мікроконтролером, датчиками та приймачами) для уникнення внутрішніх перешкод. Відсутність електричного зв'язку між силовим та логічним контурами гарантує, що у разі бойового пошкодження двигунів чи короткого замикання силових ліній на корпус, висока напруга не потрапить до центрального процесора [14].

Маршрутизація сигналів керування. Керуючі імпульси від мікроконтролера (сигнали широтно-імпульсної модуляції для регулювання швидкості та для вибору напрямку руху) надходять до промислових контролерів виключно через плату оптичної ізоляції. В якості бар'єра використовуються

високошвидкісні оптопари серії 6N137 [7]. Мікроконтролер запалює світлодіод всередині оптопари, а фототранзистор на іншому кінці, заживлений від окремого джерела 5 В, зчитує це світло і передає команду на драйвер двигуна. Таким чином досягається безперебійне керування важкими механізмами без жодного прямого контакту між платами.

Перевірка програмної логіки та віртуальне макетування. Оскільки використання реальних промислових контролерів високої потужності в середовищах віртуального моделювання є неможливим, для відпрацювання базових алгоритмів керування було створено спрощений віртуальний макет системи рис. 2.10 [3].

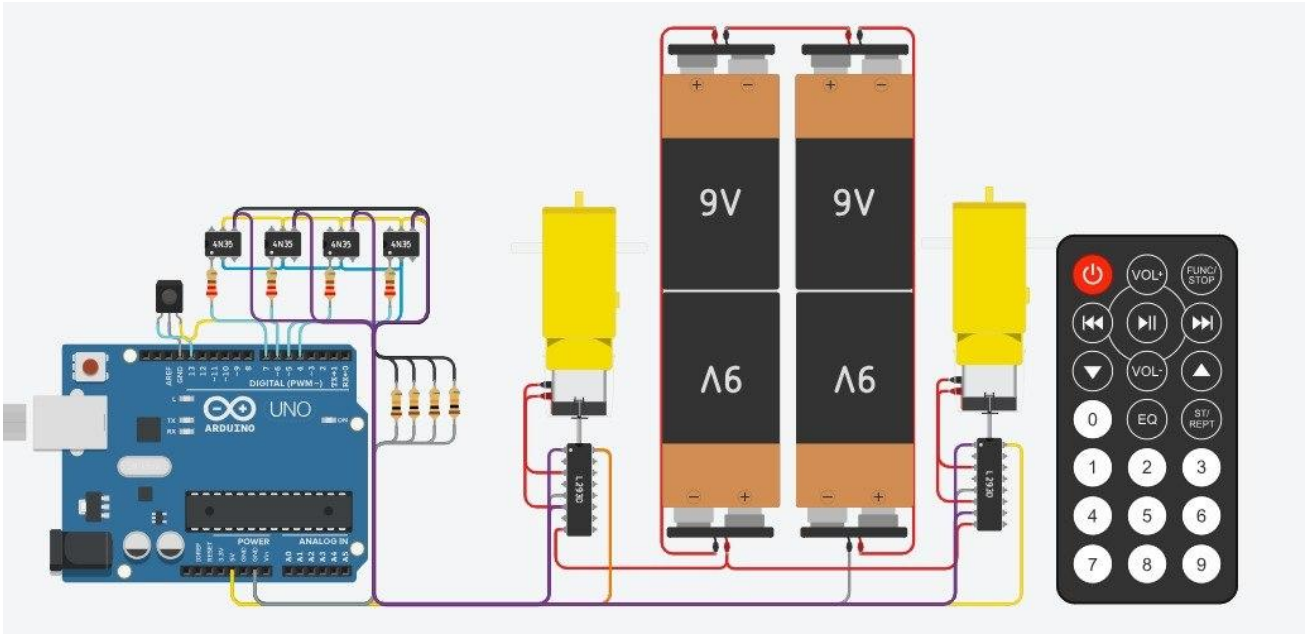


Рисунок 2.10 – Макетна схема для відпрацювання логіки керування бортовими приводами

Цей стенд логічно повторює архітектуру реальної машини: керівні імпульси генеруються мікроконтролером і через розділені канали надходять на драйвери моторів (у макеті використано мікросхеми L293D, що імітують роботу промислових силових мостів). Розроблене на цьому стенді програмне забезпечення дозволило успішно протестувати математику переведення

відсотків потужності в шпаруватість імпульсів, алгоритми плавного розгону, реверсивного гальмування та перерозподілу тяги між бортами для танкового розвороту без ризику пошкодження дороговартісного обладнання.

2.4 Висновки до другого розділу

У другому розділі розроблено апаратну частину системи керування наземною роботизованою платформою військового призначення. Сформовано структуру розташування основних модулів із поділом на силову, логічну та комунікаційну зони, що забезпечує електромагнітну сумісність, зручність обслуговування та підвищену надійність роботи комплексу [3].

Виконано обґрунтування вибору компонентної бази системи керування, проведено розрахунок тягових характеристик платформи та визначено необхідні параметри електроприводів. На основі отриманих результатів обрано силові компоненти, систему живлення та центральний блок керування, які забезпечують роботу платформи в умовах значних механічних і електричних навантажень.

Розроблено архітектуру електронної системи з використанням резервованих силових каналів, дубльованих засобів зв’язку та гальванічної розв’язки між силовою і логічною частинами. Запропоновані технічні рішення дозволяють підвищити відмовостійкість комплексу, забезпечити збереження працездатності у разі виходу з ладу окремих електронних вузлів та створюють основу для подальшого впровадження системи в перспективні наземні роботизовані комплекси військового призначення [4].

3 РОЗРОБКА МОДУЛЯ ПЕРЕКЛЮЧЕННЯ ДВИГУНІВ

3.1 Концепція, апаратна база та розрахунок елементів системи резервування

Головною метою розробки даної підсистеми є забезпечення аварійного режиму наземного роботизованого комплексу (НРК) у разі критичної відмови одного з тягових промислових контролерів. Оскільки дублювання масивних контролерів для кожного борту є недоцільним через обмеження масогабаритних показників, розроблено модуль крос-комутації силових фаз матрицю живучості [3, 4].

Обґрунтування та розрахунок силової елементної бази. Традиційним рішенням для комутації струмів є електромеханічні контактори, однак їхні контакти схильні до "зварювання" при високих постійних струмах та є вразливими до ударних навантажень. Тому матриця побудована на потужних N-канальних МОН-транзисторах (MOSFET) [5, 14].

Оскільки двигуни постійного струму при реверсі змінюють полярність, використання одиночного транзистора неможливе через наявність паразитного (внутрішнього) діода, який пропускатиме струм у зворотному напрямку, рис. 3.1.

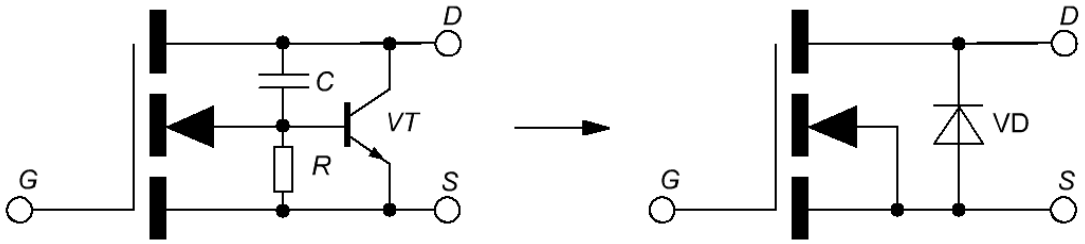


Рисунок 3.1 – Внутрішня структура MOSFET транзистора та утворення паразитного діода

Для повного блокування струму кожна лінія (фаза) розривається двома транзисторами, увімкненими зустрічно-послідовно (Source-to-Source), рис. 3.2 [5,14].

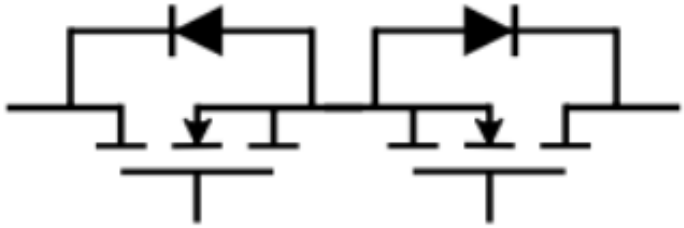


Рисунок 3.2 – Принципова схема зустрічно-послідовного включення транзисторів для двонаправленого блокування струму

В якості базового елемента обрано промисловий транзистор типу IRFP4468PbF (корпус TO-247). Для підтвердження правильності вибору проведемо розрахунок запасу міцності та теплових втрат. Вихідні дані системи: номінальний струм руху по прямій: I_{nom} дорівнює 42 А; максимальний струм (пікове навантаження): I_{max} дорівнює 150 А; максимальна напруга батареї ($LiFePO_4$ 16S): U_{bat_max} дорівнює 58,4 В; опір відкритого каналу транзистора (за даташитом): $R_{DS(on)}$ дорівнює 0,002 м; максимально допустимий струм транзистора: I_D дорівнює 290 А; максимальна напруга транзистора: U_{DSS} дорівнює 100 В.

Оскільки на одній фазі струм послідовно проходить через два транзистори, загальний опір комутаційного вузла становить:

$$R_{total} = 2 \cdot R_{DS(on)} = 2 \cdot 0{,}002 = 0{,}004 \text{ Ом}. \quad (3.1)$$

Розрахуємо статичні втрати потужності (тепловиділення), які доведеться розсіювати радіатору в номінальному режимі роботи [5]:

$$P_{nom} = I_{nom}^2 \cdot R_{total} = 42^2 \cdot 0{,}004 = 1764 \cdot 0{,}004 \approx 7{,}05 \text{ Вт}. \quad (3.2)$$

При пікових навантаженнях (заклинювання коліс, подолання крутого підйому) тепловиділення становитиме:

$$P_{max} = I_{max}^2 \cdot R_{total} = 150^2 \cdot 0{,}004 = 22500 \cdot 0{,}004 = 90 \text{ Вт}. \quad (3.3)$$

Визначимо коефіцієнт запасу міцності по струму k_I та по напрузі k_U:

$$k_I = \frac{I_D}{I_{max}} = \frac{290}{150} \approx 1{,}93,$$

$$k_U = \frac{U_{DSS}}{U_{bat_max}} = \frac{100}{58{,}4} \approx 1{,}71. \quad (3.4)$$

Обрана елементна база забезпечує майже двократний запас міцності по ключових параметрах. Тепловиділення в 7 Вт у штатному режимі не потребує активного охолодження, а 90 Вт у піковому короткочасному режимі успішно поглинатимуться алюмінієвим радіатором [13].

Гальванічна розв'язка та керування затворами. Центральний мікроконтролер ESP32 оперує логічними рівнями 3,3 В, яких недостатньо для переведення MOSFET-транзистора в режим повного насичення (де $R_{DS(on)}$ досягає заявлених 2 мОм). Крім того, пряме підключення мікроконтролера до силової частини є неприпустимим через ризик пробою високою напругою. Цю проблему вирішено застосуванням мікросхем ізольованих драйверів затворів. Вони забезпечують оптичну або магнітну гальванічну розв'язку керуючої логіки від магістралей 48 В. Живлячись від окремого перетворювача (12 В), драйвер формує потужний струмовий імпульс, здатний за наносекунди зарядити ємність затвора силового транзистора, переводячи його у повністю відкритий стан. Захист від індуктивних викидів колекторних двигунів. Особливістю колекторних двигунів постійного струму є генерація високовольтних індуктивних викидів (Back-EMF) через іскріння на щітково-колекторному вузлі. Замість встановлення вразливих TVS-супресорів, які можуть перегрітися від

постійних мікроімпульсів зношеного двигуна, захист реалізовано на рівні самих кристалів транзисторів. Застосовані MOSFET-ключі мають подвійний запас по робочій напрузі (100 В для системи 48 В) та високий показник стійкості до лавинного пробою (Avalanche Energy). Це дозволяє кристалу безпечно розсіювати короткочасні сплески напруги у вигляді тепла без руйнування структури [5, 14].

3.2 Принципова архітектура, вибір елементної бази та конструктивне виконання системи

Для комплексного розуміння принципів взаємодії апаратних компонентів та візуалізації топології енергетичних і сигнальних потоків було розроблено детальну загальну структурну схему (рис. 3.3) системи керування та апаратного резервування [3]. Запропоноване рішення базується на концепції жорсткого фізичного та логічного розділення підсистем. Інтегрований багаторівневий захист охоплює кілька ключових етапів: від застосування високошвидкісної оптичної ізоляції керуючих логічних ланцюгів мікроконтролера до використання силових N-канальних MOSFET-ключів із підвищеною стійкістю до лавинного пробою.

Такий підхід дозволяє створити максимально відмовостійкий комутаційний вузол, здатний працювати в екстремальних режимах. Описана архітектура ефективно мінімізує деструктивний вплив нелінійних перехідних процесів, викидів зворотної електрорушійної сили та ефектів самоіндукції, які неминуче виникають при реверсивному управлінні потужними колекторними електродвигунами. Забезпечення стабільності цих параметрів є критично важливим фактором для збереження експлуатаційної живучості НРК, особливо під час виконання маневрів у складних польових умовах, що супроводжуються інтенсивними вібраційними, термічними та електричними навантаженнями.

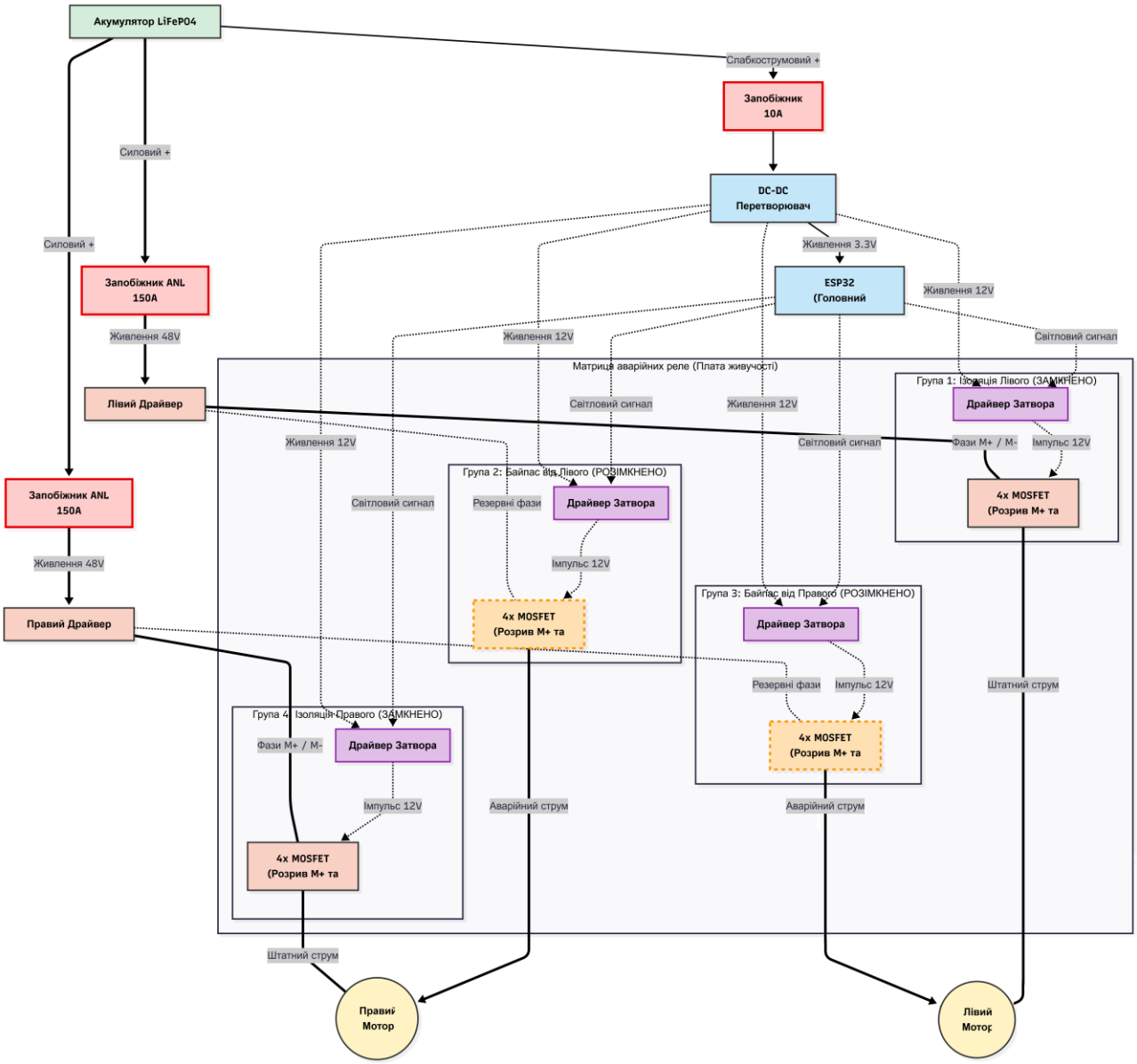
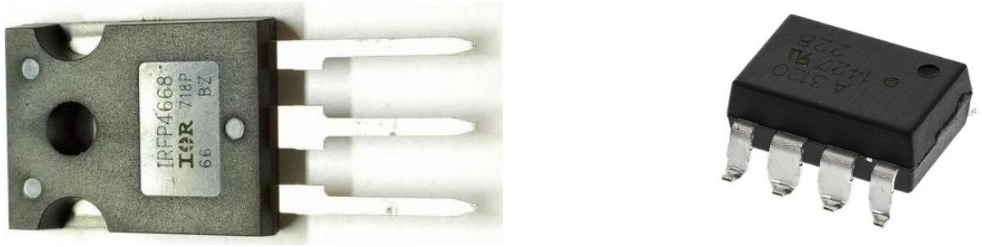


Рисунок 3.3 – Загальна структурна блок-схема багаторівневої системи живлення, логіки та апаратного резервування

Схема наочно демонструє ешелонований захист (розділення силових магістралей драйверів та слабострумової магістралі логіки через індивідуальні запобіжники), а також перехресну комутацію фаз у матриці живучості.

Вибір елементної бази та принципова електрична схема. Для розробки принципової електричної схеми модуля матриці живучості було проведено підбір конкретної елементної бази, що задовольняє вимоги по струмових навантаженнях (пікові струми до 150 А) та робочій напрузі (номінально 48 В).

Комутаційний вузол кожної силової фази реалізовано на базі чотирьох силових N-канальних МОН-транзисторів Infineon IRFP4468PbF. На рис. 3.4, а вибір даного компонента у корпусі TO-247 обумовлений його наднизьким опором відкритого каналу ($R_{DS(on)}$ дорівнбє 2 мОм) та здатністю витримувати постійний струм стоку до 290 А при напрузі до 100 В. Транзистори об'єднані у зустрічно-послідовні пари (Source-to-Source) для забезпечення повного двонаправленого блокування струму при розмиканні ланцюга [5, 14].



а) б)

а – N-канальних МОН-транзистор Infineon IRFP4468PbF; б – драйвер затвора Broadcom HCPL-3120

Рисунок 3.4 – Елементи схеми

Для гальванічної розв'язки керуючої логіки мікроконтролера від силової магістралі застосовано інтегральні оптичні ізольовані драйвери затворів Broadcom HCPL-3120, рис. 3.5, б. Дана мікросхема здатна видавати піковий струм керування до 2,5 А, що є достатнім для швидкого та одночасного перезаряду ємностей затворів чотирьох потужних транзисторів IRFP4468PbF [7].

Схемотехнічна обв'язка силового вузла, яка відображена на принциповій схемі, включає:

– струмообмежувальні резистори у колах затворів R_g дорівнює 10 Ом для запобігання високочастотним осциляціям під час перемикання;

– стягуючі резистори між затвором та витоком R_{gs} дорівнює 10 кОм, що гарантують надійне закриття транзисторів за відсутності керуючого сигналу та захищають від електромагнітних завад.

Живлення драйверів затворів здійснюється стабілізованою напругою 12 В від ізольованого промислового DC-DC перетворювача Mean Well SD-15C-12, рис. 3.5.

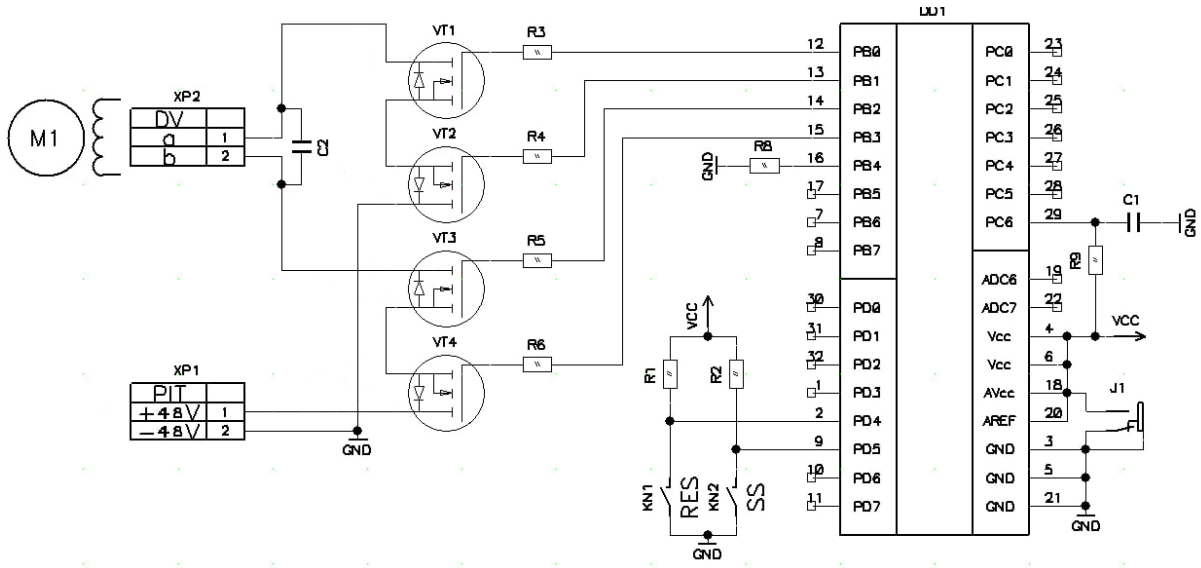


Рисунок 3.5 – Принципова електрична схема силового комутаційного вузла та його гальванічної розв'язки

Конструктивне виконання плати живучості (Гібридний монтаж). Враховуючи екстремальні струмові навантаження (до 150 А), класичне виконання модуля у вигляді єдиної друкованої плати (PCB) з фольгованого склотекстоліту є технологічно неприпустимим через ризик миттєвого перегоряння мідних струмопровідних доріжок. Тому конструктивне виконання матриці реалізовано за концепцією "гібридного просторового монтажу", що розділяє систему на два фізичних рівні.

Силовий рівень (Heavy Current Layer). Виконаний методом навісного монтажу. Як струмопровідні магістралі (входи від драйверів та виходи на двигуни) використовуються суцільні мідні шини перерізом не менше 10 мм². Стоки (Drains) транзисторів корпусу TO-247 кріпляться безпосередньо до цих шин за допомогою жорсткого болтового з'єднання або високотемпературного паяння [14].

Логічний рівень (Logic Layer). Друкована плата з матеріалу FR4, на якій розміщені драйвери затворів HCPL-3120, резисторна обв'язка та лінії живлення 12 В. Ця плата фізично ізольована від силових шин і з'єднується з транзисторами виключно через тонкі керуючі виводи затворів (Gates) [13].

Для реалізації електронної частини системи керування розроблено односторонню друковану плату, виготовлену на основі фольгованого склотекстоліту марки FR-4 товщиною 1,5 мм. Матеріал FR-4 характеризується високою механічною міцністю, достатньою теплостійкістю та добрими діелектричними властивостями, що забезпечує надійну роботу пристрою в умовах експлуатації [13].

Плата виконана в односторонньому виконанні з товщиною мідної фольги 35 мкм. Таке рішення спрощує технологію виготовлення та знижує вартість виробництва.

Габаритні розміри друкованої плати становлять приблизно 80×70 мм, що відповідає площі 56 см². Орієнтовний коефіцієнт заповнення монтажної площі елементами та провідниками становить 35–40 %, що забезпечує достатню щільність компонування при збереженні технологічності монтажу та обслуговування.

Ширина сигнальних провідників прийнята 0,4–0,6 мм, що забезпечує надійне передавання керуючих сигналів та відповідає вимогам технології виготовлення друкованих плат. Для силових ланцюгів використано провідники збільшеної ширини 1,5–2,0 мм з метою зменшення падіння напруги та забезпечення допустимого струмового навантаження.

Мінімальний зазор між провідниками становить 0,3 мм, що відповідає вимогам до виготовлення друкованих плат загального призначення. Компонування елементів виконано з урахуванням мінімізації довжини з'єднань, зниження рівня електромагнітних завад та забезпечення зручності монтажу, рис. 3.6 [14].

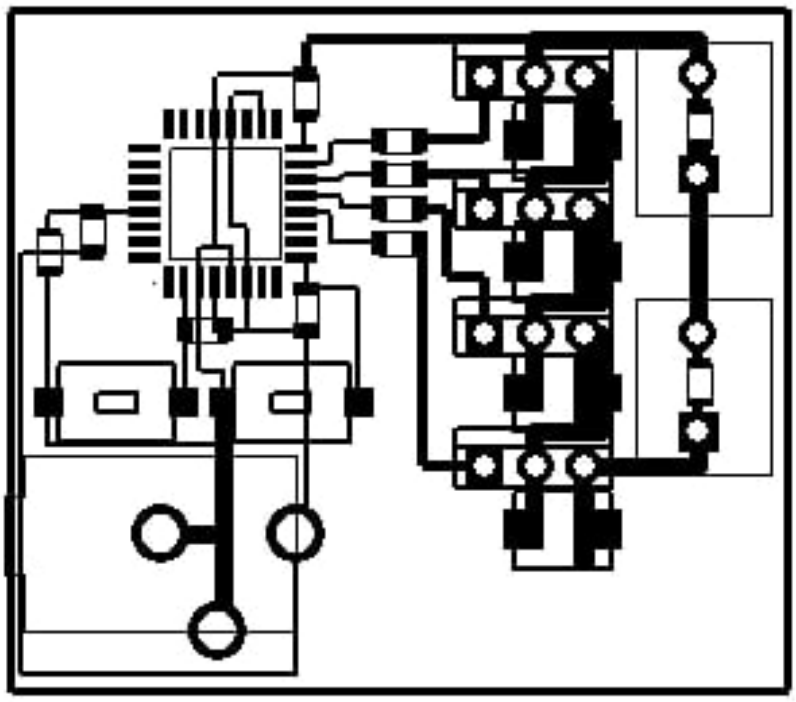
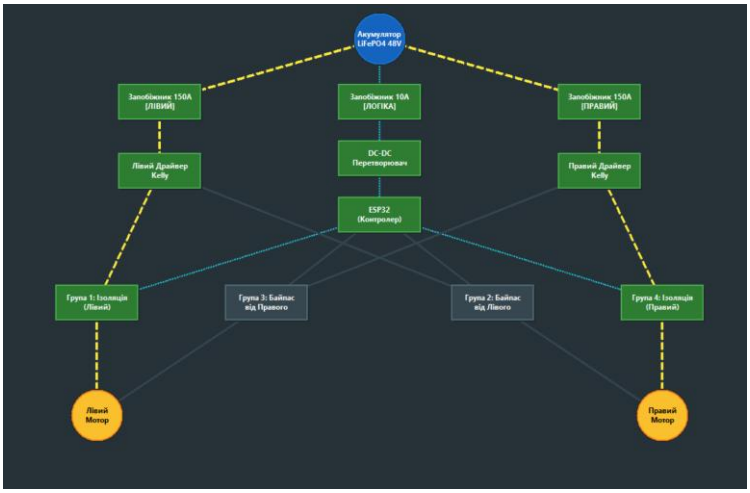


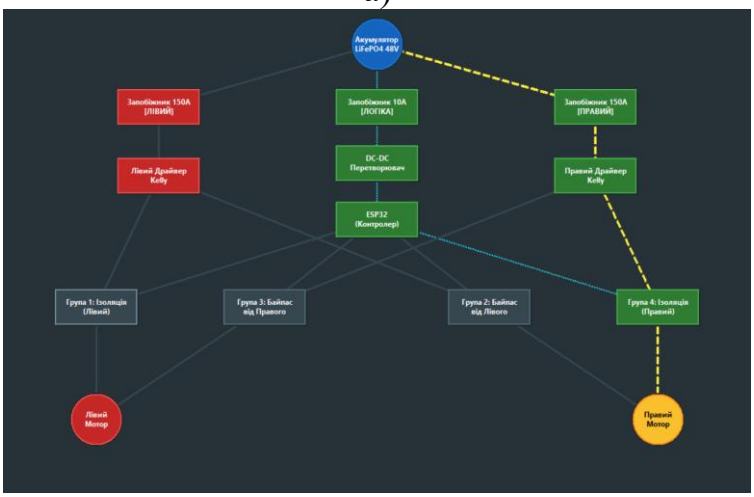
Рисунок 3.6 – Трасерована плата в PCAD

Програмна візуалізація та алгоритм гарантованого повернення. З метою наочної демонстрації логіки роботи матриці живучості та алгоритму перехресної комутації фаз було розроблено інтерактивний програмний додаток.

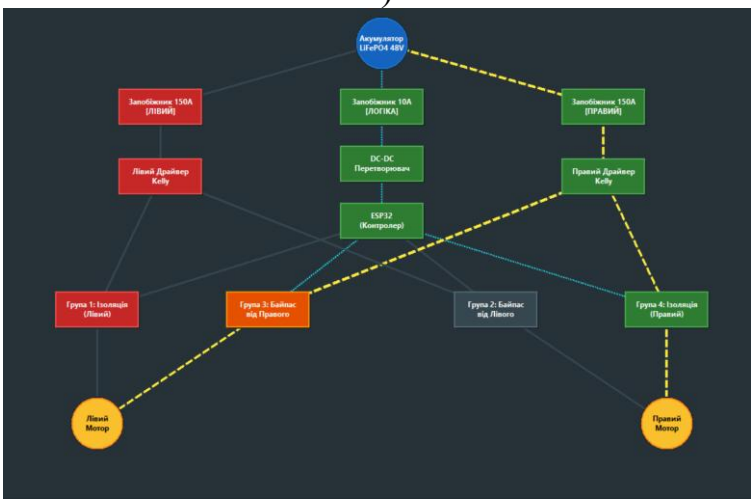
Дане програмне рішення дозволяє в інтерактивному режимі покроково показати зміну топології живлення при виникненні нештатних ситуацій, умовно активувати резервні лінії (байпаси) та графічно проілюструвати напрямки проходження струмів крізь відповідні групи транзисторів. Завдяки такій динамічній візуалізації забезпечується чітке, структуроване та доступне пояснення етапів спрацювання алгоритму гарантованого повернення НРК у випадку критичної відмови контролера, що детально продемонстровано на рис. 3.7 [9].



а)



б)



в)

а – інтерфейс симулятора у штатному режимі роботи; б – симуляція аварії лівого драйвера; в – візуалізація алгоритму аварійного байпасу при відмові лівого драйвера

Рисунок 3.7 – Елементи схеми

Відпрацювання алгоритму апаратного резервування здійснюється за наступною циклограмою.

Штатний режим. Керуючі сигнали подаються на оптодрайвери штатних груп ізоляції. Транзистори матриці постійно відкриті і без втрат пропускають високочастотний ШІМ-сигнал від тягових контролерів Kelly безпосередньо до двигунів.

Критична відмова. Термічний пробій лівого контролера викликає коротке замикання. Індивідуальний запобіжник лівого борту (ANL 150A) перегоряє, ізолюючи пробій та зберігаючи живлення слабострумової логіки і правого борту.

Ініціалізація ізоляції. За командою оператора мікроконтролер знімає напругу з драйвера HCPL-3120 лівої групи. Зустрічні транзистори закриваються, виконуючи роль апаратних "ножиць", які фізично відсікають лівий двигун від згорілого контролера.

Активація резервного живлення. Мікроконтролер подає сигнал на відкриття транзисторів резервної групи (байпасу). Фази знеструмленого лівого двигуна паралельно підключаються до силових виходів вцілілого правого контролера.

Адаптивне маневрування. Для здійснення поворотів програмно активується алгоритм "переривання тяги": ESP32 короткочасно знімає сигнал з оптодрайвера одного з бортів безпосередньо у матриці живучості, спричиняючи тимчасову зупинку відповідного двигуна та зміну вектора руху платформи [10].

Розрахунок масогабаритних параметрів та теплового балансу модуля. Для забезпечення інтеграції матриці живучості у бронекорпус наземного роботизованого комплексу (НРК), проведено перерахунок фізичних розмірів та системи охолодження за концепцією щільного просторового компонування. Структура складається з трьох рівнів: радіатора-основи, силової матриці з мідними шинами та друкованої плати логіки.

Габарити силової матриці та плати керування. Комутаційний вузол утворено з 16 силових транзисторів типу IRFP4468PbF у корпусі TO-247. Для оптимізації довжини провідників обрано топологію розміщення «матриця 4×4». З урахуванням технологічних зазорів для розміщення 8 мідних силових шин (входи від контролерів та виходи на двигуни), габарити силової частини становлять 115 мм×90 мм. Плата керування (логічний рівень) розміщується другим поверхом. Для забезпечення надійного прямого паяння керуючих виводів усіх 16 транзисторів без використання навісних провідників, габарити друкованої плати з матеріалу FR4 збільшено до 130 мм×100 мм. Оптодрайвери рознесені по краях плати, що мінімізує довжину сигнальних доріжок і знижує вплив електромагнітних завад [14].

Тепловий розрахунок радіатора охолодження.

Оскільки транзистори працюють у ключовому режимі, їхнє тепловиділення визначається статичними втратами [5].

При номінальному режимі руху (42 А на борт), сумарне тепловиділення обох бортів становить близько $P_{nom} \approx 15$ Вт.

При пікових навантаженнях (до 150 А) короткочасне тепловиділення досягає $P_{max} \approx 180$ Вт.

Для забезпечення температури кристалів не вище T_c = 75 °C при максимальній температурі навколишнього середовища T_a = 40 °C, необхідний тепловий опір радіатора (R_{th}) становить:

$$R_{th} = \frac{T_c - T_a}{P_{nom}} = \frac{75 - 40}{15} \approx 2{,}33^0 C/\text{Вт}\,. \tag{3.5}$$

Для задоволення цієї вимоги обрано екструдований алюмінієвий ребристий профіль, який одночасно виконує функцію нижньої стінки (дна) корпусу модуля. Його габарити становлять 160 мм×110 мм×20 мм. Тепловий опір такого масиву становить близько 1,2 °C/Вт, що забезпечує двократний запас міцності. Висока теплова ємність алюмінієвої основи дозволяє поглинати пікові

сплески у 180 Вт під час заклинювання коліс без руйнування кристалів транзисторів [5, 13].

Щільне компонування та загальні габарити модуля. Система збирається у вигляді багатошарового пакету:

– алюмінієвий радіатор (дно): висота 20 мм;

– силові транзистори на радіаторі: товщина 5 мм;

– мідні струмопровідні шини: товщина 3 мм;

– ізоляційний повітряний зазор (нейлонові стійки): 5 мм;

– друкована плата логіки: товщина 2 мм;

– мікросхеми та елементи обв'язки на платі: до 3 мм;

– верхня захисна кришка корпусу: товщина матеріалу 2 мм.

Загальні зовнішні габарити монолітного модуля (радіатор + захисний ковпак) становлять лише 160 мм×110 мм×40 мм. Верхній ковпак герметично з'єднується з радіатором (клас захисту IP67), а внутрішній порожній простір (близько 5-7 мм вільного об'єму) заливається діелектричним теплопровідним компаундом. Це робить вузол абсолютно невразливим до вібрацій, ударних навантажень та вологи [4, 13].

3.3 Математичне моделювання системи автоматичного керування тяговим електроприводом

Згідно із технічним завданням на розробку наземного роботизованого комплексу (НРК), система керування повинна забезпечувати плавне та точне регулювання швидкості тягових колекторних двигунів постійного струму в умовах змінного навантаження (пересічена місцевість). Заносимо початкові розрахункові дані до таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Значення параметрів САК тягового приводу

Найменування	Позначення	Значення
Коефіцієнт підсилення контролера (ESP32)	$K_{ПП}$	100
Коефіцієнт підсилення силового драйвера	$K_Д$	20
Стала часу силового драйвера	$T_Д$	0,005 с
Коефіцієнт моменту тягового двигуна	$K_М$	0,8 Н·м/А
Електрична стала часу двигуна ($T_e = L/R$)	T_e	0,002 с
Зведений момент інерції (ротор + маса НРК)	J	≈ 0,4 кг·м²
Стала часу датчика зворотного зв'язку	$T_{дат}$	0,02 с

До табл. 3.2 заносимо вимоги, яким повинна задовольняти вихідна система автоматичного керування (САК) для забезпечення стабільного руху платформи.

Таблиця 3.2 – Вимоги щодо якості процесу управління

Найменування	Позначення	Значення
Максимальний час встановлення швидкості	t_c	≤0,5 с
Допустиме перерегулювання	σ	≤ 10 %
Статична похибка	$\varepsilon_{ст}$	≤ 1 %

Лінійна неперервна САК швидкістю тягового колекторного двигуна містить: потужний колекторний двигун постійного струму як об'єкт регулювання, модуль зворотного зв'язку (датчик струму/швидкості), елемент порівняння, головний контролер керування (ПП) та силовий драйвер двигуна (ДД), рис. 3.8 [9].

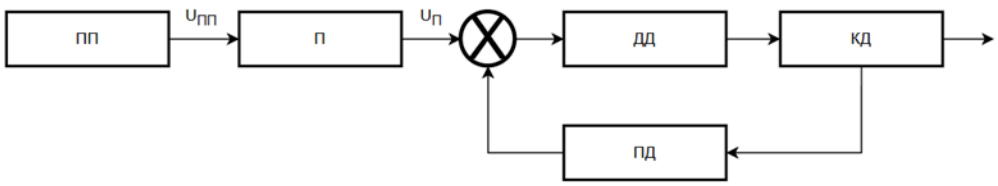


Рисунок 3.8 – Функціональна блок-схема САК

Математичний опис ланок системи в операторній формі Лапласа. Рівняння елемента порівняння:

$$e(t) = \theta\text{зад}(t) - \theta\text{вих}(t)\,, \tag{3.6}$$

де $e(t)$ – сигнал помилки (різниця між заданою і фактичною швидкістю двигуна);

$\theta зад(t)$ – задане значення швтдкості;

$\theta вих(t)$ – фактичне значення швидкості.

Формула плати керування (ПП):

$$U_{\text{ПП}}(s) = \text{К}_{\text{ПП}} \cdot E(s)\,, \tag{3.7}$$

де $U_{ПП}(s)$ – вихідна напруга/ШІМ контролера;

$K_{ПП}$ – коефіцієнт підсилення;

$E(s)$ – сигнал помилки в образі Лапласа.

Передавальна функція силового драйвера:

$$W_{\text{Д}}(s) = \frac{\text{К}_{\text{Д}}}{\text{Т}_{\text{Д}}s + 1}\,, \tag{3.8}$$

де $W_Д(s)$ – передавальна функція драйвера;

$K_Д$ – коефіцієнт підсилення драйвера;

$T_Д$ – стала часу драйвера.

Передавальна функція виконавчого колекторного двигуна:

$$W_{\text{двиг}}(s) = \frac{\text{К}_\text{М}}{J_{S^2} + T_e s + \text{К}_\text{М}}, \tag{3.9}$$

де K_M – коефіцієнт моменту двигуна;

J – зведений момент інерції платформи;

T_e – електрична стала часу;

s – комплексна змінна Лапласа.

Формула датчика зворотного зв'язку:

$$W_{\text{дат}}(s) = \frac{1}{\text{Т}_{\text{дат}} s + 1}. \tag{3.10}$$

Передавальна функція всієї замкненої системи керування бортом:

$$W_{\text{САУ}}(s) = \frac{\text{К}_{\text{ПП}} \cdot \text{К}_\text{Д} \cdot \text{К}_\text{М}}{(\text{Т}_\text{д} s + 1)(J_{S^2} + T_e s + \text{К}_\text{М})(\text{Т}_{\text{дат}} s + 1)}. \tag{3.11}$$

Підставимо реальні розрахункові параметри нашої системи (при $K_{ПП}$ = 100, $K_Д$ = 20):

$$W_{CAK}(s) = \frac{100 \cdot 20 \cdot 0.8}{(0{,}005s + 1)(0{,}4s^2 + 0{,}002s + 0{,}8)(0{,}02s + 1)}, \tag{3.12}$$

$$W_{CAK}(s) = \frac{1600}{(0{,}005s + 1)(0{,}4s^2 + 0{,}002s + 0{,}8)(0{,}02s + 1)},$$

де $W_{\text{САУ}}(s)$ – передавальна функція всієї системи автоматичного керування;

$\text{К}_{\text{ПП}}$ – коефіцієнт підсилення ПП;

$\text{К}_\text{Д}$ – коефіцієнт підсилення драйвера;

$\text{К}_\text{М}$ – коефіцієнт моменту двигуна;

$\text{Т}_\text{Д} s$ – стала часу драйвера;

J – момент інерції ротора;

T_e – електрична стала часу двигуна;

$T_{дат}s$ – стала часу датчика;

s – комплексна змінна Лапласа.

Дана математична модель дозволяє на етапі програмного налаштування PID-регулятора в ESP32 оптимізувати коефіцієнти для уникнення автоколивань платформи під час руху по складному рельєфу [9, 10].

Базове моделювання підтверджує принципову стійкість системи та коректність розрахованих параметрів. Однак, через високу нелінійність реальних бойових умов (екстремальні стрибки струму, жорстке блокування роторів), остаточне налаштування ПІД-регуляторів та підтвердження надійності контурів керування доцільно проводити виключно емпіричним шляхом – під час натурних випробувань фізичного прототипу.

3.4 Висновки до третього розділу

У третьому розділі розроблено електронну систему керування наземною платформою та виконано її макетування. Обґрунтовано вибір компонентної бази та сформовано архітектуру взаємодії підсистем живлення, керування і зв’язку[3].

Особливу увагу приділено забезпеченню надійності та відмовостійкості комплексу. Для цього передбачено резервування силових каналів керування, використання дубльованих каналів зв’язку та впровадження засобів захисту від перевантажень і електромагнітних завад. Розроблені рішення дозволяють зберігати працездатність платформи навіть у разі часткової відмови окремих електронних вузлів [5,14].

Отримані результати підтверджують можливість створення ефективної електронної системи керування для наземних роботизованих комплексів військового призначення. Запропонована архітектура може бути використана як основа для подальшого проєктування, виготовлення та впровадження перспективних логістичних і евакуаційних платформ із підвищеними вимогами до надійності та живучості [4].

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Правила охорони праці під час паяльних робіт

Основним документом, що регламентує правила роботи під час паяльних робіт є НПАОП 28.52-1.32-14 [16]. Згідно до цього стандарту визначаються наступні небезпечні та шкідливі чинники лазерної обробки. Згідно цього документи регламентуються такі правила під час паяння електрифікованим інструментом:

– паяння електрифікованим інструментом (далі – паяльник) необхідно виконувати відповідно до вимог Інструкції з охорони праці під час виконання монтажних робіт інструментами і пристроями, затвердженої наказом Міністерства праці та соціальної політики України від 05 червня 2001 року № 254, зареєстрованої у Міністерстві юстиції України 20 липня 2001 року за № 616/5807 (НПАОП 0.00-5.24-01), ДСТУ 7237:2011 та ГОСТ 12.1.030-81 [17, 18, 19];

– електрифікований інструмент для паяння деталей повинен відповідати вимогам ДСТУ IEC 60745-1:2010 «Інструмент ручний електро-механічний. Безпека. Частина 1. Загальні вимоги» [20];

– паяння великогабаритних виробів необхідно виконувати паяльником з вбудованим відсмоктувачем;

– виконувати паяння в замкнутих об’ємах необхідно із застосуванням яльника напругою не вище 12 В [18];

– паяльник на робочих місцях повинен встановлюватися на вогне-стійкій підставці для запобігання його падінню;

– паяльник, що знаходиться в робочому стані, повинен постійно перебувати в зоні дії місцевої витяжної вентиляції;

– у проміжках часу між паяльними операціями нагрівання жала паяльника повинно бути знижене до 150-180 °С, а при тимчасовому припиненні робіт відключене. Робочі місця повинні бути обладнані регуляторами нагріву паяльників;

– паяння малогабаритних виробів у вигляді штепсельних роз'ємів, наконечників, клем та аналогічних виробів необхідно виконувати із закріпленням їх у спеціальних пристроях (затискачі, струбцини);

– під час паяння інтегральних мікросхем необхідно використовувати бінокулярні стереоскопічні мікроскопи з телевізійними екранами.

4.2 Загальні вимоги безпеки

Розробка та експлуатація джерел живлення передбачає підвищену увагу до безпеки, оскільки ці пристрої працюють із електричною енергією і можуть становити потенційну загрозу у разі неправильного монтажу або експлуатації [18].

Джерела живлення, як портативні, так і стаціонарні, включають у свій склад акумуляторні модулі, контролери заряду та розряду, стабілізатори напруги та інші електронні компоненти, що забезпечують стабільну роботу пристрою.

Відповідне проектування цих вузлів є ключовим для безпечної експлуатації, оскільки неправильне підключення або використання неякісних компонентів може призвести до перегріву, короткого замикання або виходу з ладу. Тому вже на етапі проектування необхідно передбачити комплекс заходів безпеки, які включають вибір сертифікованих компонентів, захист від перевантажень і перегріву, ізоляцію контактів та продуману конструкцію корпусу [13, 20].

4.3 Безпека акумуляторних модулів

Акумуляторні модулі, що застосовуються у джерелах живлення, зазвичай базуються на літій-іонних або літій-полімерних елементах. Вони мають високу енергетичну щільність, що забезпечує значну автономність роботи пристрою, проте підвищує ризик аварійних ситуацій у разі неправильного використання [5]. Однією з основних причин небезпеки є перегрів або перевантаження батарей, що може призвести до термічного розкладу та займання.

Для запобігання таким випадкам застосовуються спеціалізовані контролери заряду та розряду, наприклад TP4056, які забезпечують стабільний струм і напругу під час зарядки, автоматично відключають батарею при критичній температурі або перевантаженні, а також блокують коротке замикання [11]. Додатково використовуються захисні модулі з балансуванням елементів батареї та термозахистом, що значно підвищує надійність роботи джерела живлення.

Правильне зберігання батарей також є критично важливим: їх слід утримувати у сухому, прохолодному та недоступному для дітей місці, уникати тривалого впливу сонячного проміння, а також не допускати механічних пошкоджень. Дотримання цих правил значно знижує ризик аварійних ситуацій [16].

4.4 Висновки до четвертого розділу

Комплексна охорона безпеки джерел живлення включає правильний вибір і захист акумуляторів, проектування електронних схем із стабілізаторами та запобіжниками, грамотний вибір корпусних матеріалів та забезпечення термозахисту.

Організаційні заходи, включаючи тестування, інструктаж користувачів та обмеження доступу до пристрою, доповнюють технічні рішення і забезпечують надійну та безпечну експлуатацію.

Дотримання всіх цих рекомендацій дозволяє створити надійні джерела живлення, що працюють ефективно та безпечно навіть у складних умовах експлуатації.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі вирішено актуальне науково-технічне завдання щодо підвищення надійності та відмовостійкості електронної частини важких наземних роботизованих комплексів (НРК) військового призначення. За результатами проведених досліджень та розробок зроблено наступні висновки.

Проведено аналіз умов експлуатації та існуючих зразків військових НРК (на прикладі систем THeMIS, «Тарган 200», «Воля-Е»). Виявлено, що головними причинами втрати техніки на полі бою є вигоряння силової електроніки внаслідок критичних перевантажень ходової частини та обрив керування під впливом засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ). Це підтвердило необхідність розробки принципово нової архітектури з апаратним резервуванням.

Розроблено модульну багаторівневу апаратно-програмну архітектуру. Внутрішній простір платформи жорстко поділено на силову, логічну та комунікаційну зони із забезпеченням повної гальванічної розв'язки між ними. Для керування системою обґрунтовано використання двоядерного мікроконтролера ESP32-S3, що дозволило фізично розділити обробку мережевих пакетів телеметрії та безперервну генерацію ШІМ-сигналів для силових приводів.

Виконано розрахунок силових навантажень та обрано компонентну базу. Для платформи загальною масою 750 кг розраховано необхідну механічну потужність тяги. На основі розрахунків обрано тягові колекторні двигуни номінальною потужністю 2000 Вт, промислові контролери Kelly (із запасом струму до 150 А) та розраховано кінематику черв'ячного редуктора. Енергетичну незалежність забезпечує пожежобезпечна акумуляторна збірка $LiFePO_4$ (51,2 В, 230 А·год) із симетричною BMS-платою. Для захисту від РЕБ спроєктовано дубльовану комунікаційну підсистему: основний супутниковий канал (Starlink)

та резервний тактичний (модулі ExpressLRS з FHSS і аналоговий відеопередавач).

Спроєктовано інноваційний модуль крос-комутації — матрицю живучості. Модуль реалізовано на базі силових N-канальних транзисторів IRFP4468PbF із зустрічно-послідовним включенням для двонаправленого блокування струмів. Виконано теплові розрахунки, які підтвердили здатність алюмінієвого радіатора (дна корпусу) успішно розсіювати пікові теплові удари до 180 Вт. Надійна ізоляція керуючих імпульсів забезпечується високошвидкісними оптопарами 6N137. Розроблено щільне 3D-компонування модуля (габарити 160 мм×110 мм×45 мм) та створено інтерактивний симулятор для відпрацювання алгоритмів апаратного байпасу при відмові лівого або правого контролера.

Виконано математичне моделювання системи автоматичного керування. За допомогою операційного числення Лапласа складено математичну модель тягового електроприводу. Визначено передавальні функції для контролера, силового драйвера та виконавчого двигуна. Отримана математична база дозволяє на етапі програмного налаштування оптимізувати коефіцієнти ПІД-регулятора та уникнути автоколивань платформи під час руху по складному рельєфу в аварійних режимах.

Отримані інженерні рішення повністю відповідають поставленому технічному завданню. Розроблена електронна архітектура готова до етапу фізичного прототипування та здатна суттєво підвищити показник живучості транспортно-евакуаційних НРК під час виконання бойових місій.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ 3008:2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлення. Введ. 2017-01-01. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016. 29 с.

2. Методичні вказівки з підготовки кваліфікаційної роботи для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної і заочної форми навчання спеціальності 174 «Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології» / Упоряд.: І. Ш. Невлюдов, О. І. Филипенко, О. В. Токарєва, С. П. Новоселов, О. В. Сичова. Харків: ХНУРЕ, 2023. 64 с.

3. Невлюдов І. Ш., Клименко М. О., Жмуд О. А. Комп’ютерно-інтегровані технології в робототехніці: навч. посібник. Харків: ХНУРЕ, 2023. 215 с.

4. Симоненко А. В., Ковальчук О. І. Проєктування та конструювання мобільних роботизованих комплексів спеціального призначення. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 256 с.

5. Броуді Д. Силова електроніка для робототехнічних комплексів. Київ: Техніка, 2024. 340 с.

6. Kelly Controls, Inc. KLS Brushless Motor Controller User Manual: Technical Documentation. 2024. 45 с.

7. Broadcom Inc. HCPL-3120 High Output Current Gate Drive Optocoupler: Data Sheet. 2023. 22 с.

8. Milrem Robotics. THeMIS Unmanned Ground Vehicle: Technical Whitepaper. 2025. 12 с.

9. Коваленко В. В., Бойко О. В. Моделювання систем автоматичного керування мехатронними та робототехнічними комплексами. 2-ге вид., переробл. і допов. Харків: ХНУРЕ, 2024. 145 с.

10. Espressif Systems. ESP32-S3 Series Datasheet. Version 1.6. 2023. 84 с.

11. Daly Electronics Co., Ltd. DALY Smart BMS Hardware and Protocol Manual. 2023. 15 с.

12. ExpressLRS Open Source Radio Control Link Documentation. 2025. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.expresslrs.org/

13. Іванов І. І. Матеріалознавство в електроніці: FR4, теплопровідні компаунди та системи охолодження. Київ: Наукова думка, 2024. 180 с.

14. Бойко В. І., Жуйков В. Я. Сучасна силова схемотехніка та керування напівпровідниковими перетворювачами. Київ: НТУУ «КПІ», 2023. 380 с.

15. Звєрєв О. О., Ткаченко В. В. Основи радіоелектронної боротьби та захист безпілотних роботизованих платформ. Житомир: ЖВІ ім. С.П. Корольова, 2024. 205 с.

16. НПАОП 28.52-1.32-14. Правила охорони праці під час паяльних робіт. Затв. Мінсоцполітики України, 2014.

17. НПАОП 0.00-5.24-01. Інструкція з охорони праці під час виконання монтажних робіт інструментами і пристроями. Затв. Наказом Мінпраці України № 254 від 05.06.2001.

18. ДСТУ 7237:2011. Система стандартів безпеки праці. Електробезпека. Загальні вимоги та номенклатура видів захисту. Київ: Держспоживстандарт України, 2011.

19. ДСТУ EN 61140:2015. Захист від ураження електричним струмом. Загальні аспекти щодо установок та обладнання. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2015.

20. ДСТУ IEC 60745-1:2010. Інструмент ручний електромеханічний. Безпека. Частина 1. Загальні вимоги. Київ: Держспоживстандарт України, 2010.