

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

ПОГОДЖЕНО

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Декан факультету

Завідувач кафедри

Інформаційних технологій

Комп'ютерних систем, мереж та кібербезпеки

_____ Болбот І.М., д-р.техн.наук., проф.

_____ Касаткін Д.Ю., к.п.н., доц.

підпис

ПІБ, вчене звання і ступінь

підпис

ПІБ, вчене звання і ступінь

«__» _____ 2025 р.

«__» _____ 2025 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

На тему: Дослідження і вдосконалення системи наземної роботизованої платформи

Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія

(код і найменування)

Освітня програма Комп'ютерні системи та мережі

(назва)

Орієнтація освітньої програми _____

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Гарант освітньої програми

_____ Д.Т.Н., доцент
(науковий ступінь та вчене звання)

_____ (підпис)

_____ Шкарупило В. В.
(ПІБ)

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

_____ доцент
(науковий ступінь та вчене звання)

_____ (підпис)

_____ Болбот І. М.
(ПІБ)

Виконав _____

(підпис)

_____ Зінченко В. В.
(ПІБ)

КИЇВ-2025

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
завідувач кафедри
комп'ютерних систем, мереж та кібербезпеки
/ Касаткін Д.Ю., к.п.н., доц. /
підпис ПБ, вчене звання і ступінь
«__» _____ 20__ р.

З А В Д А Н Н Я

ДО ВИКОНАННЯ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ МАГІСТЕРСЬКОЇ СТУДЕНТУ

Зінченко Владислав Валерійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність (напрямок підготовки): 123 «Комп'ютерна інженерія» _____

1. Тема кваліфікаційної бакалаврської роботи: «Дослідження і вдосконалення системи наземної роботизованої платформи»

затверджена наказом ректора НУБіП України від «29» жовтня 2024р. № 1941
«С» _____

Термін подання завершеної роботи на кафедру 14.11.2025 р.

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 13 11 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: Дослідження і вдосконалення системи наземної роботизованої платформи

Перелік графічного матеріалу (за потреби) _____

Дата видачі завдання «29» жовтня 2024 р.

Керівник магістерської роботи _____ Болбот І.М., д-р.техн.наук, проф
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання _____
(підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 68 сторінок, 13 рисунків, 14 таблиць, 15 джерел.

Об'єкт розробки – Розробка уніфікованої, енергоефективної та надійної плати схеми керування (ПСБ), що слугує силовим та комутаційним інтерфейсом для наземної роботизованої платформи.

Мета роботи – творення та експериментальна верифікація власної друкованої плати керування (ПСБ), яка забезпечує високу надійність, оптимальну енергоефективність.

Проект складається з 3 розділів.

Перший розділ присвячений огляду літератури та аналізу вимог до системи. У розділі розглядається актуальність вдосконалення апаратної частини мобільних роботів, проводиться аналіз функціональних, нефункціональних та технічних вимог до ПСБ, а також виконується порівняльний аналіз існуючих комерційних та відкритих рішень для керування потужними виконавчими механізмами.

Другий розділ охоплює інженерне проектування апаратної частини. Розглядається вибір функціональної архітектури (зонний поділ, чотиришарова структура), вибір та обґрунтування компонентної бази (MOSFET, DC-DC контролери), а також виконуються інженерні розрахунки силових та теплових ланцюгів.

Третій розділ описує процес практичної реалізації та верифікації. Особлива увага приділена роботі в середовищі САД (EasyEDA), організації тестового стенда та налагодженню, а також представлені детальні методики функціональної та стрес-верифікації ПСБ.

Результатом виконання дипломної роботи є фізичний зразок плати схеми керування (ПСБ), оптимізованої для наземної роботизованої платформи.

ABSTRACT

Explanatory note: 68 pages, 13 figures, 14 tables, 15sources.

Development object – Development of a unified, energy-efficient, and reliable control circuit board (CCB) that serves as a power and switching interface for a ground-based robotic platform.

The purpose of the work is to create and experimentally verify a proprietary printed control board (PCB) that provides high reliability and optimal energy efficiency.

The project consists of 3 sections.

The first section is devoted to a review of the literature and analysis of system requirements. The section discusses the relevance of improving the hardware of mobile robots, analyzes the functional, non-functional, and technical requirements for the PSC, and performs a comparative analysis of existing commercial and open solutions for controlling powerful executive mechanisms.

The second section covers the engineering design of the hardware. It considers the choice of functional architecture (zone division, four-layer structure), the choice and justification of the component base (MOSFET, DC-DC controllers), and performs engineering calculations of power and thermal circuits.

The third section describes the process of practical implementation and verification. Particular attention is paid to working in a CAD environment (EasyEDA), organizing a test bench and debugging, and detailed methods for functional and stress verification of the PSB are presented.

The result of the thesis is a physical sample of a control circuit board (PSB) optimized for a ground-based robotic platform.

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	9
ABSTRACT.....	10
СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАЧКИ.....	10
ВСТУП.....	11
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ВИМОГ ДО СИСТЕМИ	12
1.1 Актуальність теми.....	12
1.2 Мета та задачі дослідження.....	13
1.3 Визначення вимог до системи	16
1.4 Аналіз існуючих рішень	22
РОЗДІЛ 2 ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМИ	29
2.1 Уточнення вимог до апаратної платформи.....	29
2.2 Вибір функціональної та структурної архітектури ПСБ.....	33
2.3 Вибір та обґрунтування компонентної бази	36
2.4 Принципи функціонування пристрою	40
2.5 Інженерний розрахунок критичних вузлів	44
2.6 Вибір та порівняльний аналіз САД-систем для проектування ПСБ	49
2.7 Проектування топології та трасування друкованої плати (ПСБ).....	53
РОЗДІЛ 3 РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ТЕСТУВАННЯ СИСТЕМИ	59
3.1 Практична реалізація проєкту та підготовка до виробництва	59
3.2 Налагодження та первинна верифікація	63
3.3 Результати вимірювань та аналіз надійності	65
ВИСНОВКИ	68
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	70

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАЧКИ

ПСБ	– Плата Схеми Керування (або Плата Системи Керування)
МК	– Мікроконтролер
ГК	– Головний Контролер
САПР	– Система Автоматизованого Проєктування
EMC	– Електромагнітна Сумісність
VIN	– Voltage Input (Вхідна напруга живлення)
Vout	– Voltage output (Вихідна напруга)
DC-DC	– Direct Current to Direct Current (Перетворювач постійного струму)
MOSFET	– Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor (Польовий транзистор)
SMD	– Surface-Mount Device (Компонент для поверхневого монтажу)
BOM	– Bill of Materials (Специфікація компонентів)
DRC	– Design Rule Check (Перевірка правил проєктування)
LED	– Light-Emitting Diode (Світлодіод)
TVS	– Transient Voltage Suppressor (Діод-супресор)
UHF	– Ultra High Frequency (Ультрависокі частоти)
CRSF	– Crossfire Serial Protocol (Цифровий послідовний протокол зв'язку)
UART	– Universal Asynchronous Receiver-Transmitter (Універсальний асинхронний приймач-передавач)
PWM	– Pulse Width Modulation (Широтно-імпульсна модуляція)
DC	– Direct Current (Постійний струм)

ВСТУП

У сучасному світі робототехніка є одним із найдинамічніше зростаючих напрямів технічного прогресу. Розвиток електроніки, мікроконтролерних систем та інтелектуальних алгоритмів керування сприяє активному впровадженню автономних роботизованих комплексів у промисловість, науку, військову справу та повсякденне життя. Наземні мобільні платформи, які є основою для створення різних роботизованих систем, здатні виконувати широкий спектр завдань — від моніторингу та транспортування вантажів до участі у рятувальних операціях і дослідженні небезпечних середовищ.

Ефективність та надійність таких систем значною мірою залежать від якості апаратної частини, зокрема від плати керування, яка забезпечує взаємодію між сенсорами, виконавчими механізмами та засобами зв'язку. Від того, наскільки грамотно спроектована ця плата, залежить стабільність роботи всієї платформи, точність виконання команд і можливість подальшого розширення функціоналу.

Більшість існуючих комерційних рішень не завжди відповідають конкретним вимогам розробників — через обмеження за розмірами, енергоспоживанням або сумісністю з певними компонентами. Саме тому актуальним стає завдання створення власної плати керування, оптимізованої для конкретної роботизованої платформи, яка забезпечуватиме надійну роботу системи в різних умовах експлуатації.

Отже, дослідження і вдосконалення системи наземної роботизованої платформи шляхом розроблення сучасної друкованої плати керування (ПСБ) є важливим і перспективним напрямом, який відповідає потребам сучасного суспільства у створенні надійних, ефективних та розумних технічних систем.

Результати даної роботи можуть бути використані для розробки універсальних рішень у сфері мобільної робототехніки, навчальних лабораторних комплексів та дослідницьких платформ.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ВИМОГ ДО СИСТЕМИ

1.1 Актуальність теми

У сучасному світі швидкого розвитку технологій спостерігається активне впровадження систем автоматизації, робототехніки та інтелектуального керування у найрізноманітніші сфери діяльності людини. Зокрема, наземні роботизовані платформи дедалі частіше використовуються у військовій техніці, промисловості, наукових дослідженнях, логістиці та сільському господарстві. Такі платформи здатні виконувати небезпечні або рутинні завдання замість людини, що значно підвищує безпеку, точність і ефективність роботи системи.

Основним елементом будь-якої роботизованої системи є плата керування, яка відповідає за обробку сигналів датчиків, формування команд виконавчим механізмам і забезпечення зворотного зв'язку. Саме цей компонент визначає швидкодію, стабільність та точність роботи всієї системи. У багатьох комерційних зразках застосовуються універсальні плати або готові контролери, проте вони не завжди відповідають конкретним вимогам проекту — зокрема щодо компактності, енергоспоживання, рівня шумозахисту та розширюваності.

У зв'язку з цим актуальним є створення власної друкованої плати керування (ПСБ), спроектованої з урахуванням особливостей конкретної наземної платформи. Такий підхід дозволяє оптимізувати схему живлення, розділити аналогові та цифрові контури, забезпечити надійний захист від перешкод і стабільну роботу при різних умовах навколишнього середовища. Окрім того, власна плата надає можливість інтеграції додаткових модулів — датчиків, радіомодулів, GPS, модулів зв'язку, що робить систему гнучкою і масштабованою.

Важливою тенденцією сучасності є також розвиток технологій інтернету речей (IoT), які дозволяють підключати роботизовані пристрої до мережі для віддаленого моніторингу та керування. Це відкриває нові перспективи для вдосконалення платформ, зокрема у напрямку автономної навігації, збору даних і

взаємодії з іншими системами. Для реалізації таких можливостей необхідна потужна та надійна електронна база, якою є саме вдосконалена плата керування.

Отже, дослідження і вдосконалення системи наземної роботизованої платформи шляхом розробки сучасної плати керування є актуальним науково-технічним завданням, що поєднує питання електронного проектування, мікроконтролерного програмування, енергетичної ефективності та автоматизації.

Результати роботи можуть бути використані не лише у навчальних і наукових цілях, а й у практичних розробках роботизованих систем для цивільних та промислових застосувань.

1.2 Мета та задачі дослідження

Метою даного дослідження є розроблення, проектування та вдосконалення системи керування наземною роботизованою платформою шляхом створення сучасної друкованої плати (ПСБ), яка забезпечить стабільну роботу електронних компонентів, зменшить рівень електромагнітних перешкод, покращить компоновку елементів та підвищить загальну ефективність функціонування системи.

У сучасних умовах стрімкого розвитку електроніки та робототехніки зростає потреба у створенні надійних і гнучких систем управління, які можуть адаптуватися до різних умов експлуатації. Більшість готових комерційних рішень мають універсальний характер, що часто призводить до надлишковості функціональних можливостей, складності інтеграції або невідповідності конкретним вимогам конкретного проєкту. Саме тому створення власної апаратної платформи керування є актуальним напрямом розвитку робототехнічних систем, який дозволяє досягти максимальної сумісності, надійності та функціональності.

Розробка власної друкованої плати керування дає змогу не лише оптимізувати електричну схему, але й підвищити рівень безпеки та ремонтпридатності системи. Вона дозволяє точно визначити необхідні параметри для живлення, навантаження, захисту, керування виконавчими елементами та зчитування даних із сенсорів. Крім того, власна ПСБ забезпечує можливість подальшої модернізації — як у напрямку підвищення обчислювальної потужності, так і розширення функціональних

можливостей за рахунок модульності.

Основна мета дослідження:

Розробити власну друковану плату керування наземною роботизованою платформою, яка об'єднує функції живлення, розподілу сигналів та керування модулями системи, забезпечуючи високу надійність, ефективність і зручність експлуатації.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити низку науково-технічних завдань, серед яких:

1. Провести аналіз сучасних систем керування роботизованими платформами, дослідити їхню архітектуру, конструкційні особливості та принципи побудови. Виявити переваги та недоліки існуючих технічних рішень, визначити напрями вдосконалення з урахуванням вимог до стабільності, компактності, енергоефективності та зручності обслуговування.

2. Сформулювати технічні вимоги до нової друкованої плати керування, що визначають основні параметри: напругу живлення, споживаний струм, кількість каналів керування, інтерфейси підключення, габаритні розміри та умови експлуатації. При цьому слід врахувати особливості роботи платформи, такі як тип двигунів, сенсорів, модулів живлення і логічних вузлів.

3. Розробити структурну та принципову електричну схему системи, визначити склад основних функціональних блоків: вузол живлення, контролер керування, модуль розподілу сигналів, блок захисту та інтерфейси підключення. На цьому етапі здійснюється підбір електронних компонентів, стабілізаторів напруги, конденсаторів фільтрації, драйверів для виконавчих механізмів та елементів захисту від перевантаження й короткого замикання.

4. Виконати трасування друкованої плати у середовищі автоматизованого проєктування (наприклад, Altium Designer, KiCad або EasyEDA). Забезпечити правильне розміщення елементів, мінімізацію перехрещення доріжок, дотримання електромагнітної сумісності, розділення аналогових і цифрових контурів, а також

оптимальне формування полігонів живлення і заземлення.

5. Розробити повний комплект конструкторської документації: електричну принципову схему, специфікацію компонентів (BOM), креслення монтажу та виробничі файли (Gerber, NC Drill). Це дозволить забезпечити точність виготовлення та подальшу серійну реалізацію пристрою.

6. Провести збірку дослідного зразка плати керування, перевірити правильність монтажу та електричну справність усіх з'єднань. На цьому етапі здійснюється перевірка працездатності вузлів живлення, стабільності напруг, відповідності номіналів елементів та відсутності паразитних ефектів.

7. Виконати експериментальне тестування створеної плати у складі роботизованої платформи.

8. Перевірити роботу всіх основних підсистем: живлення двигунів, обробку сигналів сенсорів, стійкість до електричних завад, поведінку плати при зміні навантаження та зовнішніх умов.

9. Провести аналіз отриманих результатів і оцінити, наскільки створена плата відповідає поставленим вимогам щодо надійності, ефективності, компактності та безпеки.

10. Розробити рекомендації щодо подальшого вдосконалення, зокрема у напрямі підвищення енергоефективності, інтеграції з модулями зв'язку (UART, I²C, SPI, Bluetooth, Wi-Fi) або розширення функціональних можливостей системи шляхом модульної архітектури

Реалізація зазначених завдань дозволить створити вдосконалену апаратну платформу керування для наземного роботизованого комплексу, яка відповідатиме сучасним вимогам до точності, стабільності та енергоефективності. Такий підхід забезпечить гнучкість системи, її адаптивність до різних конфігурацій і можливість подальшої інтеграції з програмними модулями у майбутніх дослідженнях.

Розроблена друкована плата може бути використана як основа для подальших експериментів у галузі робототехніки, навчальних цілей або у складі більш складних систем автоматизації. Вона поєднує в собі принципи сучасного схемотехнічного проектування, ергономічного розміщення елементів та

забезпечення надійності роботи у різних умовах експлуатації.

1.3 Визначення вимог до системи

Етап визначення вимог є одним із ключових у процесі проектування будь-якої технічної системи, оскільки саме на цьому етапі формується основа для всіх подальших рішень, що стосуються конструкції, функціональності, вибору компонентів та методів реалізації. Для ефективного проектування та створення вдосконаленої системи керування наземною роботизованою платформою необхідно чітко окреслити вимоги до функціональних, технічних та експлуатаційних характеристик пристрою.

Цей розділ визначає основні критерії, яким повинна відповідати нова друкована плата (ПСБ), що буде виконувати роль центрального вузла управління, розподілу живлення, обробки сигналів і забезпечення зв'язку між усіма підсистемами роботизованої платформи.

Правильно сформульовані вимоги дозволяють забезпечити:

1. відповідність пристрою призначенню та умовам експлуатації;
2. високу надійність і безпеку роботи;
3. зручність інтеграції з існуючими або майбутніми модулями системи;
4. можливість масштабування та подальшої модернізації.

Загалом усі вимоги поділяються на три основні групи:

1. функціональні — визначають, що саме має виконувати система;
2. нефункціональні — описують якісні характеристики роботи;
3. технічні — визначають конкретні параметри, норми й обмеження конструкції.

1.3.1 Функціональні вимоги

Функціональні вимоги визначають набір основних завдань, які повинна виконувати розроблена друкована плата для забезпечення повноцінного керування наземною роботизованою платформою.

Основними функціональними вимогами є:

1. Забезпечення централізованого керування електронними вузлами.

Плата повинна виконувати роль головного комутаційного елемента між джерелами живлення, контролером та виконавчими механізмами. Вона має забезпечувати узгодження рівнів сигналів, керування напрямком руху, швидкістю двигунів, а також розподіл енергопотоків між компонентами системи.

2. Обробка та передача сигналів від сенсорних модулів.

Конструкція повинна дозволити підключення різних типів сенсорів — інфрачервоних, ультразвукових, гіроскопічних, датчиків струму, напруги та температури. Зібрані сигнали передаються на основний контролер або модуль обробки для подальшої логіки роботи.

3. Розподіл живлення між компонентами системи.

Друкована плата має забезпечувати подачу стабілізованої напруги на всі модулі роботизованої платформи. Це передбачає наявність вузла стабілізації напруги, ланцюгів захисту від перевантаження, перешкод і короткого замикання.

4. Захист електронних ланцюгів.

Плата повинна мати вбудовані елементи захисту від стрибків напруги, електростатичних розрядів, зворотної полярності та перевантаження по струму. Також доцільно передбачити плавкий запобіжник або автоматичне відключення живлення при виникненні аварійних режимів.

5. Можливість контролю параметрів живлення.

Для підвищення надійності експлуатації система має забезпечувати можливість вимірювання напруги, струму та температури основних елементів схеми з метою подальшої діагностики.

Реалізація зазначених функціональних вимог забезпечить стабільну, безпечну та ефективну роботу плати керування як базового елемента всієї платформи.

1.3.2 Нефункціональні вимоги

Нефункціональні вимоги описують якісні характеристики системи та умови, за яких вона має функціонувати. На відміну від функціональних вимог, які

визначають, що система робить, нефункціональні вимоги визначають, як система працює. Вони є критично важливими для проєктування плати керування (ПСБ), оскільки напряду впливають на її надійність, продуктивність, ремонтпридатність, безпеку та загальну якість експлуатації у польових умовах.

Для наземної роботизованої платформи, яка, ймовірно, експлуатуватиметься у різних умовах, ці вимоги повинні бути сформульовані з особливою увагою до апаратної частини.

1. Надійність та Стійкість

Ця група вимог визначає здатність системи функціонувати без збоїв протягом певного часу.

- Стійкість до електромагнітних завад (ЕМС): Плата керування повинна відповідати вимогам електромагнітної сумісності. Необхідно мінімізувати випромінювання власних перешкод та забезпечити стійкість до зовнішніх електромагнітних впливів (наприклад, від потужних двигунів, радіозв'язку чи статичних розрядів). Це досягається за допомогою грамотного трасування, фільтрації живлення та ефективного заземлення.
- Теплова стійкість: Усі компоненти повинні бути здатні працювати у всьому діапазоні температур, передбачених для експлуатації платформи (наприклад, від -20 до +50). Необхідно забезпечити ефективне відведення тепла від потужних елементів (драйверів двигунів, стабілізаторів) для запобігання перегріву та передчасному виходу з ладу.
- Стійкість до вібрацій та ударів: Конструкція плати та спосіб монтажу компонентів повинні забезпечувати надійне функціонування в умовах постійної вібрації та можливих ударних навантажень, характерних для руху наземної платформи.

2. Продуктивність та Енергоефективність

Ці вимоги стосуються швидкості реакції системи та раціонального

використання енергії.

- Швидкодія обробки сигналів: Плата повинна забезпечувати мінімальну затримку (латентність) між отриманням даних від сенсорів та видачею керуючих команд виконавчим механізмам. Це критично важливо для стабілізації руху та швидкого реагування на зміну зовнішніх умов.
- Енергоспоживання: Розроблена ПСБ повинна мати мінімально можливе енергоспоживання, щоб максимізувати час автономної роботи роботизованої платформи від акумуляторної батареї. Це вимагає ретельного вибору енергоефективних компонентів та оптимізації схем живлення.
- Можливість роботи з високими струмами: Вузли керування двигунами (драйвери) повинні бути розраховані на максимальні пікові струми, необхідні для запуску та динамічного руху платформи.

3. Експлуатаційні вимоги (Зручність використання та Обслуговування)

Ці вимоги стосуються зручності взаємодії з платою для налаштування, ремонту та подальшого розвитку.

- Модульність та Розширюваність: Архітектура плати повинна бути модульною, що дозволяє легко інтегрувати додаткові сенсори або модулі (наприклад, комунікаційний модуль Wi-Fi/LTE, модуль штучного інтелекту) без необхідності повної переробки основної схеми.
- Ремонтпридатність: Компоненти повинні бути розташовані таким чином, щоб забезпечити зручний доступ для діагностики, заміни та ремонту. Важливе використання стандартних роз'ємів та чітке маркування на платі.
- Компактність: Габаритні розміри плати повинні бути мінімально можливими, щоб забезпечити зручність інтеграції в обмежений простір корпусу наземної платформи.
- Діагностика та Індикація: Необхідно передбачити наявність діагностичних точок, світлодіодних індикаторів (наприклад, статусу живлення, роботи контролера, помилок) та інтерфейсів для налагодження

(наприклад, UART, JTAG/SWD).

4. Безпека

Вимоги до безпеки забезпечують захист обладнання та оператора.

- Захист від переполусування: Схема живлення повинна включати захист від неправильного підключення акумулятора (зворотна полярність).
- Захист від перевантаження по струму/напрузі: Необхідна наявність швидкодіючих запобіжників (плавких або електронних) у критичних ланцюгах живлення (особливо на лінії двигунів) та використання TVS-діодів для захисту від перенапруг на лініях зв'язку.
- Ізоляція: У разі використання високострумівих елементів (наприклад, живлення двигунів) доцільно розглянути електричну ізоляцію керуючих сигналів.

1.3.3 Технічні вимоги

Технічні вимоги визначають конкретні апаратні, електричні та конструктивні параметри, яким повинна відповідати розроблена Плата Схеми Керування (ПСБ), щоб забезпечити ефективну інтеграцію у наземну роботизовану платформу та стабільне функціонування усіх її вузлів. Ці вимоги є основою для вибору компонентів, розроблення електричної принципової схеми та трасування друкованої плати.

1. Вимоги до інтерфейсу керування та обчислювальної взаємодії

Оскільки ПСБ розробляється як інтерфейсний вузол (модуль), що підключається до зовнішнього головного контролера (ГК), вимоги фокусуються на забезпеченні надійного зв'язку та комутації сигналів.

- Інтерфейс логічного зв'язку: ПСБ повинна мати стандартизований низьковольтний інтерфейс (наприклад, 3.3 В або 5 В TTL-логіка) для прийому керуючих сигналів від ГК. Це включає лінії для ШІМ-керування швидкістю двигунів та лінії GPIO (General-Purpose Input/Output) для керування напрямком і допоміжними функціями.

- Узгодження рівнів: Плата повинна забезпечувати узгодження рівнів напруги між логікою МК та силовими компонентами (драйверами), якщо вони працюють на різних напругах.
- Обробка зворотного зв'язку: ПСБ повинна мати вхідні роз'єми та ланцюги для фільтрації та підготовки сигналів зворотного зв'язку (наприклад, від енкодерів, датчиків струму) перед їх передачею до МК.

2. Вимоги до напруги живлення та силових ланцюгів

Ці вимоги є ключовими, оскільки ПСБ відповідає за розподіл і захист основного живлення.

- Вхідна напруга: Плата повинна бути спроектована для роботи від основного джерела живлення платформи, підтримуючи широкий діапазон вхідної напруги (наприклад, від 10 В до 30 В), що є типовим для літєвих акумуляторних збірок.
- Формування вторинних напруг: ПСБ має містити високоефективні понижувальні перетворювачі (DC/DC) для формування стабілізованих напруг 5 В та 3.3 В для живлення підключених сенсорів та логічних мікросхем, а також для живлення зовнішнього МК.
- Силові канали: ПСБ повинна підтримувати 4 незалежні високоструміві канали для керування двигунами, здатні витримувати пікові струми (наприклад, до 15 А на канал). Це вимагає використання товстих доріжок, полігонів та якісних кінцевих роз'ємів.

3. Вимоги до інтерфейсів керування виконавчими механізмами

- Керування двигунами: ПСБ має інтегрувати або забезпечити надійний інтерфейс для підключення драйверів двигунів (наприклад, H-мостів). Ці драйвери мають бути захищені від перегріву та короткого замикання.
- Підтримка сенсорів: Необхідно передбачити роз'єми для підключення:
 - Датчиків позиції (енкодерів): Не менше 4 каналів для зворотного зв'язку по швидкості обертання коліс.
 - Аналогових датчиків: Входи для вимірювання напруги батареї та загального струму.

- Цифрових сенсорів: Підключення для внутрішніх датчиків температури (для моніторингу силових ключів).

4. Вимоги до конструкції та компонування

- Багатошарове трасування: Для ефективного розділення силових, аналогових і цифрових ланцюгів та забезпечення ЕМС рекомендується використання 4-шарової друкованої плати.
- Розміри та монтаж: Габаритні розміри ПСБ мають бути оптимізовані під конкретний простір шасі платформи, а місця кріплення — стійкі до вібрацій.
- Тип компонентів: Переважне використання SMD-компонентів (Surface Mount Device) для підвищення надійності в умовах вібрації, мінімізації розмірів та спрощення автоматизованого монтажу.

Визначення цих технічних вимог є фундаментальним кроком у розробці системи керування, оскільки вони слугують конкретними критеріями під час вибору компонентів та виконання трасування плати, забезпечуючи відповідність функціональності очікуванням користувачів і умовам експлуатації.

1.4 Аналіз існуючих рішень

Перш ніж розпочати розроблення власної Плати Схеми Керування (ПСБ), необхідно провести поглиблений аналіз існуючих на ринку апаратних рішень, які використовуються для керування наземними роботизованими платформами. Це дозволить об'єктивно оцінити їхні функціональні обмеження та технічні недоліки у контексті специфічних вимог до надійності, компактності та енергоефективності, що є ключовим для обґрунтування необхідності розробки власного рішення.

Для порівняльного аналізу наявних апаратних рішень будуть використані такі основні критерії:

Таблиця 1.4.1 – Порівняльний аналіз наявних апаратних рішень

Критерій	Опис	Чому це важливо для ПСБ
Функціональна інтеграція	Ступінь об'єднання на одній платі силових, логічних та комунікаційних вузлів.	Зниження кількості з'єднань, підвищення надійності та компактності.
Енергоефективність	ККД перетворювачів напруги, власний струм споживання плати.	Максимізація часу автономної роботи платформи.
Захист та ЕМС	Наявність вбудованого захисту від переполюсування, перевантажень, короткого замикання та стійкість до електромагнітних завад.	Забезпечення довговічності та стабільності роботи у складних умовах.
Масштабованість	Можливість додавання нових сенсорів, модулів зв'язку та керування додатковими приводами.	Гнучкість для майбутньої модернізації та досліджень.
Вартість (С)	Загальна вартість впровадження рішення.	Оптимізація собівартості кінцевого виробу.

Аналіз існуючих рішень структуровано за трьома основними класами апаратного забезпечення.

1. Універсальні відкриті платформи (на базі Arduino/Raspberry Pi та шилдів)

Ці рішення є поширеними у сфері освітньої робототехніки та прототипування. Вони базуються на використанні основного керуючого

комп'ютера (наприклад, Raspberry Pi або Jetson Nano) або мікроконтролера (Arduino) та підключенні додаткових силових модулів (драйверів) через інтерфейси.

- Приклади: Arduino Mega + L298N/DRV8835 шилди; Raspberry Pi + Motor HAT.
- Критичний аналіз:
 - Недоліки інтеграції: Відсутність єдиної шини живлення та заземлення. З'єднання виконуються за допомогою дротів, що створює високий ризик електричного шуму, паразитних індуктивностей та знижує надійність системи під час вібрацій.
 - Енергетична неоптимальність: Часто використовуються прості лінійні стабілізатори (наприклад, 7805), які мають низький ККД (до 50%) при великій різниці вхідної та вихідної напруг, перетворюючи надлишкову енергію на тепло.
 - Проблеми ЕМС: При використанні зовнішніх драйверів силові та логічні ланцюги не ізольовані належним чином, що робить логічну частину вразливою до високочастотних перешкод від ШІМ-керування двигунами.

Таблиця 1.4.2 – Оцінка критеріїв універсальних відкрити платформ

Критерій	Оцінка	Коментар
Функціональна інтеграція	Низька	Багато роз'ємів та модулів, низька вібростійкість.
Енергоефективність	Низька	Високі втрати на лінійних стабілізаторах.
Захист та ЕМС	Низький	Відсутність надійного захисту від стрибків напруги.

2. Спеціалізовані комерційні контролери двигунів

Це високопродуктивні, але вузькоспеціалізовані рішення, які фокусуються виключно на силовому керуванні двигунами.

- Приклади: Контролери серії VESC (Vedder Electronic Speed Controller), плати RoboClaw (SyRen).
- Критичний аналіз:
 - Надлишковість: VESC, наприклад, є оптимальним для керування безколекторними двигунами (BLDC) за допомогою складних алгоритмів (FOC), що може бути надлишковим і дорогим, якщо на платформі використовуються простіші колекторні двигуни (DC).
 - Неповна інтеграція: Ці плати зазвичай не інтегрують функції керування живленням для всіх логічних вузлів та сенсорів. Вони вимагають окремого, зовнішнього мікроконтролера (ГК) для обробки навігаційних даних та вищого рівня логіки.
 - Протокол зв'язку: Використовують специфічні протоколи (наприклад, послідовний порт або CAN для VESC), що вимагає додаткової програмної реалізації на боці ГК.

Таблиця 1.4.3 – Оцінка критеріїв спеціалізованих комерційних контролерів двигунів

Критерій	Оцінка	Коментар
Функціональна інтеграція	Середня	Висока силова інтеграція, але повна відсутність інтеграції логіки та сенсорів.
Енергоефективність	Висока	Оптимізовані силові ключі та високий ККД.
Захист та ЕМС	Високий	Надійний захист силових ланцюгів.

3. Індустріальні та дослідницькі шилди високого рівня

Це платформи, розроблені для швидкого впровадження дослідницьких систем, які зазвичай використовують високопродуктивні процесори (FPGA, DSP).

- Приклади: NI sbRIO, спеціалізовані модулі для MIL-STD.
- Критичний аналіз:
 - Неприйнятна вартість: Ці системи коштують на порядки дорожче, ніж комерційні аналоги, і виходять за межі бюджету дипломного проекту та малосерійного виробництва.
 - Надлишковість ресурсів: Вони надають надмірні обчислювальні ресурси та інтерфейси (наприклад, надлишкове екранування, індустріальні конектори), що призводить до непотрібного збільшення маси та габаритів.
 - Складність обслуговування: Вимагають спеціалізованого програмного забезпечення та високої кваліфікації для налаштування та обслуговування.

Таблиця 1.4.4 – Оцінка критеріїв індустріальних та дослідницьких шилдів високого рівня

Критерій	Оцінка	Коментар
Функціональна інтеграція	Висока	Повний комплекс апаратного забезпечення.
Компактність	Низька	Велика маса та габарити.
Вартість (С)	Дуже висока	Не виправдана для цивільних та навчальних цілей.

Для наочності проведемо порівняння трьох класів рішень з ідеальною (цільовою) розробленою платою (ПСБ):

Таблиця 1.4.3 – Порівняльна таблиця та Обґрунтування розробки власної ПСБ

Критерій	Відкриті платформи	Комерційні контролери	Індустріальні модулі	Цільова ПСБ (Власна розробка)
Інтеграція	Низька	Середня	Висока	Висока (лише необхідний функціонал)
Енергоефективність	Низька	Висока	Висока	Оптимально висока (через вибір компонентів)
Захист та EMC	Низький	Високий (силовий)	Найвищий	Високий (фокус на ізоляції та фільтрації)
Компактність	Дуже низька	Висока (окремо)	Низька	Максимальна (оптимізовано під корпус)
Вартість	Низька	Висока	Дуже висока	Помірна (збалансована)

Обґрунтування необхідності розробки власної ПСБ

Проведений аналіз чітко доводить, що на ринку відсутнє рішення, яке одночасно відповідає критеріям високої функціональної інтеграції, надійності, енергоефективності та помірної вартості.

1. Проблема інтеграції та надійності: Універсальні платформи (п. 1) не забезпечують необхідної надійності в умовах вібрації, а складні системи з великою кількістю дротів збільшують ймовірність збою.
2. Проблема оптимізації: Спеціалізовані контролери (п. 2) є дорогими, не інтегрують логіку сенсорів і часто мають надлишковий функціонал.
3. Економічна доцільність: Створення власної ПСБ дозволяє інтегрувати тільки необхідні силові драйвери, схеми фільтрації та комутаційні вузли, мінімізуючи загальну вартість та габарити, що робить її економічно вигіднішою та технічно обґрунтованою для цільової наземної платформи.

Власна розробка дозволить створити оптимізований інтерфейсний модуль, який буде виконувати роль силового щита та комутаційного центру, забезпечуючи безперебійний зв'язок між зовнішнім головним контролером, двигунами та сенсорами у складних умовах експлуатації.

РОЗДІЛ 2 ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМИ

2.1 Уточнення вимог до апаратної платформи

На основі критичного аналізу існуючих рішень (Розділ 1.4) та визначеної архітектури (ПСБ як комутаційно-силовий інтерфейсний модуль) проводиться деталізація та уточнення кількісних та якісних вимог до апаратної частини. Ці вимоги є безпосередньою технічною специфікацією для вибору компонентів та розроблення електричної принципової схеми, забезпечуючи перехід від загальних концепцій до інженерних параметрів.

1. Уточнення функціональної архітектури та вимоги до інтеграції

ПСБ повинна виконувати роль центрального вузла живлення та комутації, мінімізуючи складність системи та підвищуючи її надійність.

Таблиця 2.1.1 – Функціональна архітектура

Функціональний блок	Призначення	Ключова вимога	Значення для системи
Вхідний силовий вузол	Прийом основного живлення від акумуляторної батареї та захист від зовнішніх впливів.	Забезпечення захисту TVS та ESD по вхідній шині, а також захист від зворотної полярності.	Критично важливий для захисту всієї електроніки від помилок підключення та електричних перешкод, що виникають у польових умовах.
Силовий перетворювач 5В	Формування стабілізованої напруги для логічних вузлів (зовнішній ГК, сенсори).	Високий ККД (>90%) та стабільна напруга $5.0 \text{ В} \pm 0.1 \text{ В}$ при навантаженні до 3 А.	Оптимізація енергоспоживання (ККД) та забезпечення безперебійної роботи чутливої логіки (точність напруги).

Продовження таблиці 2.1.1

Функціональний блок	Призначення	Ключова вимога	Значення для системи
Комутаційний вузол (Реле)	Дискретне керування допоміжними пристроями (освітлення, приводи скидання, тощо).	Гальванічна розв'язка між логічним ланцюгом керування та силовими виходами.	Запобігання проходженню високочастотного шуму та стрибків напруги із силових ланцюгів у логічний контролер.
Фільтрація та розподіл 12В	Очищення напруги 12 В від шумів, особливо для модулів, чутливих до якості живлення.	Ефективне придушення високочастотних шумів та пульсацій по лінії живлення VTX та САМ (відеосистеми).	Гарантує високу якість відеосигналу та мінімізує спотворення зображення, спричинене роботою силових вузлів платформи.

2. Кількісні вимоги до електричних параметрів

Вимоги до електричних параметрів базуються на типових характеристиках роботизованих платформ, що використовують літєві акумуляторні батареї та високострумове навантаження.

Таблиця 2.1.2 – Кількісні вимоги до електричних параметрів

Параметр	Од. вим.	Вимоги	Обґрунтування
Вхідна напруга (Vin)	В	12.0 – 30.0	Забезпечення універсальної сумісності з акумуляторними батареями 3S (12.6В) до 7S (29.4В), що є стандартом для мобільних роботів.

Продовження таблиці 2.1.2

Параметр	Од. вим.	Вимоги	Обґрунтування
Максимальний вхідний струм	А	≥ 25 (піковий)	Розрахунковий піковий струм має враховувати момент інерції при старті двигунів та одночасне спрацювання всіх комутаційних каналів.
Власний струм споживання ПСБ	мА	< 50 (без навантаження)	Мінімізація власного споживання плати у режимі очікування для збереження заряду батареї під час простою.
Вихідна напруга логіки (Vout 5V)	В	5.0	Стандарт живлення для мікроконтролерів (ГК) та цифрових сенсорів. Точність $\pm 2\%$ необхідна для надійного функціонування логіки.
Вихідний струм логіки (Iout 5V)	А	≥ 4.0	Забезпечення стабільного живлення зовнішнього SBC/ГК (до 2А) та наявності резерву для додаткових USB-пристроїв або модулів.
Кількість комутаційних каналів	шт.	5	Відповідність функціоналу: 2 канали для скидання (RELE_SKYD), 1 — світло (LIGHT), 1 — камера (CAM), 1 — допоміжний (SOLO).
Максимальний струм на канал	А	≥ 7.0	Необхідний запас потужності для живлення світлодіодного освітлення високої яскравості та приводу допоміжного обладнання.

3. Уточнення конструктивних вимог та вимог до надійності

Для забезпечення надійної роботи в умовах вібрацій, температурних перепадів та зовнішніх електромагнітних впливів (ЕМС) встановлюються жорсткі вимоги до конструкції плати.

- Топологія ПСБ та ЕМС: Плата має бути 4-шаровою для ефективного розділення силових (Power Plane) та сигнальних (Signal Layer) ланцюгів. Це дозволяє використовувати внутрішні шари для суцільних полігонів заземлення та живлення, що значно знижує петлі струму та підвищує стійкість до електромагнітних завад.
- Термічний режим: Усі високоструміві доріжки (Power Traces) повинні мати розрахункову ширину, що запобігає їх перегріву при максимальному струмі. Необхідне термічне розвантаження для силових компонентів (перетворювачів, реле) через широкі полігони міді або можливість встановлення додаткових радіаторів.
- Інтерфейси: Для забезпечення високої надійності логічні сигнали (RX, TX, керування реле) повинні підключатися через блоковані (locking) роз'єми, стійкі до випадкового від'єднання через вібрацію. Силові роз'єми мають мати механічний захист від випадкового короткого замикання.
- Матеріал плати: Рекомендовано використання стандартного FR-4 з підвищеною температурою склування ($T_g > 150^\circ\text{C}$) для забезпечення стабільності при роботі з високими струмами.

Уточнені та деталізовані вимоги до апаратної платформи є завершенням аналітичного розділу та слугують безпосередньою технічною базою для наступних етапів проектування: вибору елементної бази, виконання інженерних розрахунків та трасування друкованої плати.

2.2 Вибір функціональної та структурної архітектури ПСБ

Вибір архітектури Плати Схеми Керування (ПСБ) є фундаментальним етапом проектування, який визначає не лише функціональність, але й життєздатність системи в умовах експлуатації. Архітектура базується на необхідності створення єдиного, надійного та компактного інтерфейсного модуля, який ефективно розділяє силові та логічні ланцюги. Цей принцип дозволяє ізолювати чутливий зовнішній Головний Контролер (ГК) від електричного шуму, генерованого потужними комутаційними елементами.

Функціональна архітектура ПСБ: Блочна схема та призначення вузлів.

Функціональна архітектура ПСБ являє собою логічне групування компонентів плати за їхнім призначенням, що дозволяє візуалізувати потік енергії та даних. Плата концептуально поділяється на чотири основні взаємозалежні блоки:

Таблиця 2.2.1 – Блочна схема та призначення вузлів.

№	Функціональний блок	Призначення	Ключові елементи	Взаємодія
1	Вузол вхідного живлення та захисту (VIN/Protection Unit)	Прийом основного живлення від акумулятора (12В–30В) та забезпечення первинного захисту всієї схеми.	Роз'єм живлення (In+, Gnd), захист від переполюсування (MOSFET/діод), TVS-діоди для придушення імпульсних перенапруг.	Надсилає живлення на Блок 2 та Блок 3.

Продовження таблиці 2.2.1

№	Функціональний блок	Призначення	Ключові елементи	Взаємодія
2	Вузол розподілу та стабілізації живлення (PDU)	Формування стабілізованих низьких напруг (5 В, 3.3 В) для логічних модулів та очищення напруги 12 В.	Імпульсний понижувальний перетворювач (Step-down to 5V), LC-фільтри для лінії 12 В (FILTER 12V), розподільні шини живлення.	Живить зовнішній ГК, камери (CAM) та відеопередавачі (VTX) очищеною напругою.
3	Вузол комутації допоміжних пристроїв (Relay/Switching Unit)	Прийом логічних керуючих сигналів від ГК та комутація високих струмів на периферійні пристрої.	Опторозв'язка або транзисторні ключі, вихідні твердотільні (SSR) або електромеханічні реле (RELE_SKYD, LIGHT, SOLO, CAM).	Отримує керуючі сигнали від Блоку 4. Комутує живлення від Блоку 1 на зовнішнє навантаження.
4	Вузол логічного інтерфейсу та діагностики (Interface/Diagnostic Unit)	Фізичний інтерфейс зв'язку з ГК, надання точок для налагодження та візуального моніторингу.	Логічні роз'єми (RX/TX, керуючі піни), захист ESD на сигнальних лініях, LED-індикатори живлення та стану реле.	Надсилає керуючі сигнали на Блок 3. Отримує стабілізоване живлення від Блоку 2.

Ця модульна схема дозволяє проводити ізольоване проєктування та тестування кожного функціонального блоку, що значно підвищує надійність фінального продукту.

Структурна архітектура ПСБ: Принципи зонування та ЕМС

Структурна архітектура визначає фізичне розташування та геометрію трасування компонентів на друкованій платі. Головною метою є забезпечення електромагнітної сумісності (ЕМС) та ефективного тепловідведення.

Принцип 1: Зонний Поділ (Zoning)

Фізичний поділ плати на Силу Зону та Логічну Зону є обов'язковим для уникнення взаємних перешкод:

- Силова Зона (Power Zone): Тут розміщуються компоненти, що працюють з великими струмами та генерують електричні шуми (реле, вхід живлення, перетворювачі). Ця зона має бути максимально компактною для мінімізації довжини струмопровідних доріжок (зниження опору та індуктивності).
- Логічна Зона (Signal Zone): Призначена для розміщення чутливих інтерфейсів (роз'єми RX/TX, індикатори). Розміщується на максимальній відстані від Силової Зони та має мати власну, чисту лінію заземлення.

Принцип 2: Керування Землею (GND Partitioning)

Для роботизованої платформи, де присутні потужні імпульсні струми, критично важливим є розділення заземлення:

- Силова Земля (Power GND): Використовується для комутаційних реле та понижувальних перетворювачів.
- Логічна Земля (Signal GND): Використовується для зовнішнього ГК та сигнальних ліній.
- Одноточкове З'єднання (Star Ground): Обидві землі повинні з'єднуватися

лише в одній точці, бажано безпосередньо біля вхідного роз'єму живлення. Це запобігає протіканню високоамплітудних струмів силової землі через логічну землю, що є основною причиною збоїв контролерів.

Принцип 3: Чотиришарова топологія (4-Layer Stackup)

Використання чотиришарової друкованої плати є вимогою для досягнення високої ЕМС та надійності:

1. Top Layer (Верхній шар): Розміщення більшості компонентів та трасування сигнальних ліній.
2. Internal Layer 1 (Внутрішній шар 1): Суцільний Ground Plane (GND), що виступає як екран для верхнього шару, поглинаючи високочастотні шуми.
3. Internal Layer 2 (Внутрішній шар 2): Суцільний Power Plane (+12V, +5V), що забезпечує низький опір та ефективне живлення компонентів.
4. Bottom Layer (Нижній шар): Трасування силових доріжок та допоміжних сигнальних ліній.

Така структура забезпечує мінімальну індуктивність для ліній живлення та створює конденсатор з розподіленими параметрами між внутрішніми шарами, допомагаючи у фільтрації високочастотних шумів.

Вибрана структурна архітектура гарантує, що розроблена ПСБ буде не лише функціональною, але й електрично стабільною та механічно стійкою в умовах, характерних для наземних роботизованих комплексів.

2.3 Вибір та обґрунтування компонентної бази

Вибір електронних компонентів є критичним етапом, що забезпечує відповідність функціональності, надійності та економічної доцільності розробленої Плати Схеми Керування (ПСБ). Обґрунтування базується на **технічних вимогах** (Розділ 2.1), особливо щодо широкого діапазону вхідної напруги (до 30 В), високого

струму комутації (до 7 А на канал) та необхідності високого ККД для енергоефективності.

1. Елементи вузла живлення та захисту (PDU)

Цей вузол вимагає високопродуктивних компонентів для ефективного зниження напруги та захисту всієї системи.

Таблиця 2.3.1 – Блочна схема та призначення вузлів.

Функція	Вимоги	Обґрунтування та вибір
Основний понижувальний перетворювач (Step-down to 5V)	$V_{out} = 5 \text{ В}$, $I_{out} \geq 4 \text{ А}$, $V_{in} \leq 30 \text{ В}$.	Вибір: Інтегральні мікросхеми DC-DC перетворювачів типу MP1584 або TPS5430. Вони забезпечують високу частоту перемикання, що дозволяє використовувати менші індуктивності та конденсатори, та високий ККД. Це запобігає значному тепловиділенню порівняно з лінійними стабілізаторами.
Захист від переполюсування	Надійний захист вхідної шини V_{in} від неправильної полярності акумулятора.	Вибір: P-канальний MOSFET (наприклад, FDN338P) або потужний захисний діод Шотткі (наприклад, SS54). MOSFET забезпечує менші втрати енергії та менше тепловиділення, ніж діод, що є пріоритетом для автономної системи.

Продовження таблиці 2.3.1

Функція	Вимоги	Обґрунтування та вибір
Захист від перенапруг (TVS)	Миттєве придушення високовольтних імпульсів, спричинених індуктивним навантаженням.	Вибір: TVS-діоди серії SMBJ або SMCJ з напругою пробою, що відповідає максимальній робочій напрузі (наприклад, 33 В). Вони мають дуже швидкий час відгуку, захищаючи чутливі мікросхеми.
Фільтрація живлення	Ефективне придушення високочастотних шумів.	Вибір: Керамічні конденсатори (0.1 мкФ, 100 нФ) для високочастотної фільтрації та електролітичні конденсатори великої ємності (100–470 мкФ) для згладжування низькочастотних пульсацій. Додатково — ферритові намистини на лінії живлення VTX/CAM.

2. Елементи вузла комутації допоміжних пристроїв

Хоча MOSFET-транзистори, які використовуються для комутації, самі по собі є напівпровідниковими ключами і не мають прямого металевого зв'язку між керуючим (затвор) і силовими (стік, витік) ланцюгами, їх недостатньо для абсолютної ізоляції у критичних промислових або польових умовах. Електричні сплески та високочастотний шум можуть передаватися через паразитні ємності транзистора.

Для забезпечення максимальної гальванічної розв'язки та захисту чутливої логіки Головного Контролера (ГК) від цих шумів та потенційних аварійних ситуацій (наприклад, пробою силового MOSFET-транзистора) у керуючий канал інтегрується оптопара (наприклад, PC817 або аналог).

Принцип роботи оптопар:

1. Світловий бар'єр: Оптопара складається зі світлодіода (LED) на вході, що підключається до вихідного піна ГК, та фототранзистора на виході, що керує затвором силового MOSFET-ключа.
2. Повний розрив: Керуючий сигнал передається виключно за допомогою світлового потоку, що фізично розриває електричний зв'язок між логічною та силовою частинами. Це усуває спільну землю та загальні струмові петлі.
3. Ізоляція від шуму: Будь-який електричний шум, високовольтний імпульс або аварійний струм, що виникне в силовому ланцюзі (наприклад, через коротке замикання на навантаженні), не зможе потрапити на чутливі виводи мікроконтролера, оскільки він захищений діелектричним бар'єром.

Впровадження оптопар в кожен із п'яти комутаційних каналів (SKYD, LIGHT, CAM, SOLO) підвищує загальну надійність та відмовостійкість ПСБ до рівня, необхідного для неконтрольованої польової експлуатації.

3. Захист від індуктивних стрибків (Flyback Protection)

Комутаційні канали ПСБ призначені для керування різноманітними пристроями, частина з яких є індуктивним навантаженням (наприклад, соленоїди, невеликі електромеханічні реле, котушки приводу).

Явище ЕРС самоіндукції: При миттєвому вимкненні струму, що протікає через індуктивність (закриття MOSFET-транзистора), енергія, накопичена у магнітному полі котушки, не може зникнути миттєво. Згідно із законом Фарадея, індуктивність генерує протилежну зворотну електрорушійну. Оскільки час вимкнення дуже малий, ця напруга може досягати сотень вольтів, що значно перевищує максимальну напругу, яку здатний витримати MOSFET. Цей стрибок напруги неминуче призводить до термічного пробою та руйнування транзистора.

Технічне рішення — Захисні діоди (Flyback Diodes):

Для ефективного придушення цих небезпечних стрибків, паралельно індуктивному навантаженню встановлюється Захисний діод (Flyback Diode), включений у зворотному напрямку.

1. Робочий режим: У нормальному режимі (коли MOSFET відкритий і струм тече через навантаження) діод закритий і не впливає на схему.
2. Захисний режим: У момент вимкнення, коли індуктивність генерує високу зворотну напругу, діод миттєво відкривається. Це створює замкнений контур для струму індуктивності, дозволяючи енергії плавно і безпечно розсіюватися через опір ланцюга та самого діода, замість того, щоб протікати через сток і витік MOSFET.
3. Вибір діодів Шотткі: Було обрано швидкі діоди Шотткі (наприклад, 1N5819). Вони мають дві ключові переваги: дуже швидкий час відновлення (що є критичним для високошвидкісних стрибків) і низьку пряму напругу пробою. Забезпечення трьох рівнів захисту — MOSFET-ключі для силової комутації, опторозв'язка для ізоляції логіки та захисні діоди для придушення індуктивних стрибків — гарантує високу надійність вузла комутації ПСБ у всьому діапазоні її функціонування.

2.4 Принципи функціонування пристрою

Електрична принципова схема (ЕПС) є основоположним документом, що деталізує взаємозв'язок усіх електронних компонентів, обраних на етапі 2.3. Метою розробки ЕПС для ПСБ є створення надійних, захищених та ефективних електричних ланцюгів для кожного функціонального блоку, підтверджуючи концепцію силового комутаційного інтерфейсу.

Особливий акцент у проекті зроблено на захист чутливої логіки (мікроконтролерів, сенсорів, навігаційних модулів). Для цього застосовуються методи гальванічної розв'язки, фільтрації високочастотних завад та стабілізації напруги, що дозволяє нівелювати вплив електромагнітних перешкод, які виникають

при роботі потужних тягових двигунів та сервоприводів. Таким чином, створюється ієрархічна структура живлення, що гарантує цілісність керуючих сигналів навіть у критичних режимах роботи платформи.

Розробка схеми здійснюється відповідно до принципів модульності та зонування, визначених у Розділі 2.2, з особливим акцентом на захист чутливої логіки.

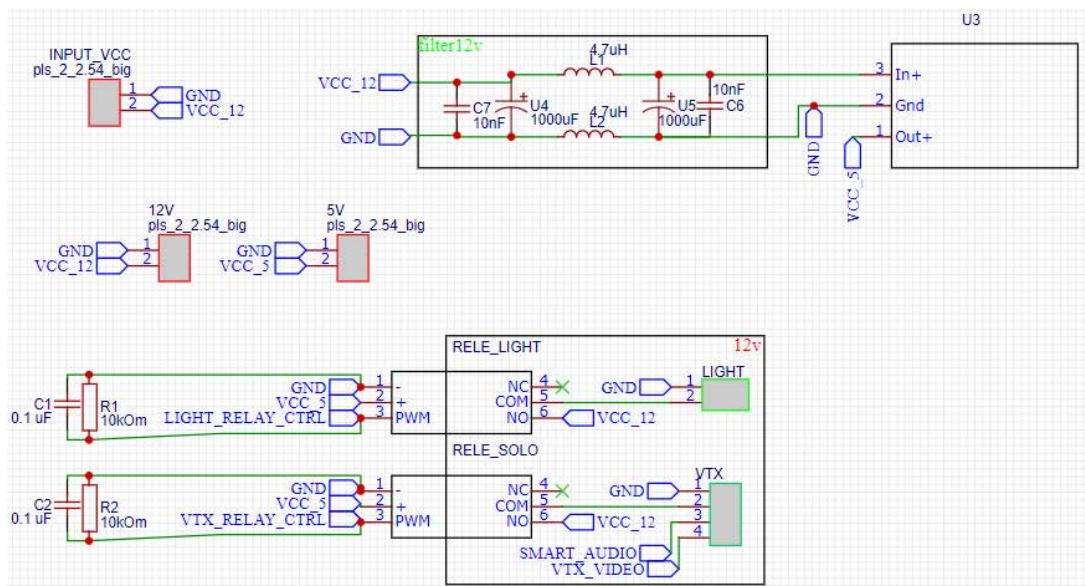


Рисунок 2.4.1 Електрична принципова схема 1

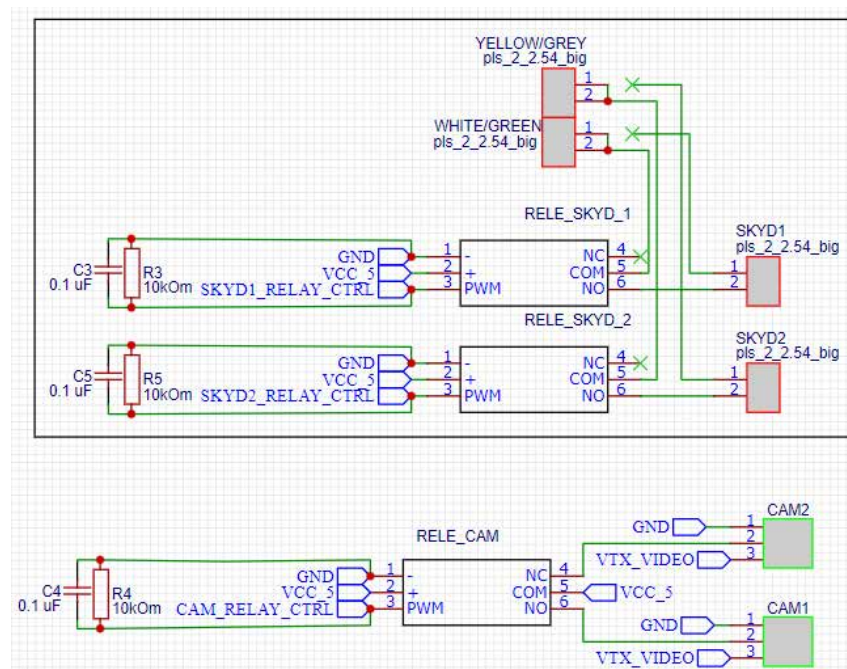


Рисунок 2.4.2 Електрична принципова схема 2

2.4.1 Вузол вхідного живлення та первинного захисту

Цей вузол є першою лінією захисту ПСБ і забезпечує стабільну подачу напруги на всі подальші функціональні блоки.

- **Захист від переполюсування (ЗП):** Для захисту від випадкового неправильного підключення акумуляторної батареї застосовується схема на базі Р-канального MOSFET-транзистора. Транзистор підключається послідовно до лінії живлення. Якщо полярність правильна, канал транзистора відкривається, забезпечуючи мінімальний опір і втрати. При неправильній полярності транзистор залишається закритим, запобігаючи проходженню струму. Такий метод є значно енергоефективнішим, ніж використання діода, який спричиняє постійне падіння напруги, відповідно, теплові втрати.
- **Придушення перехідних напруг (TVS):** Паралельно до вхідної шини встановлюється TVS-діод з напругою пробою, що дещо перевищує максимальну робочу напругу (наприклад, 33 В для 30 В системи). Цей елемент забезпечує наносекундне придушення імпульсів, захищаючи DC-DC перетворювач та інші компоненти від індуктивних стрибків.
- **Первинна фільтрація:** Безпосередньо біля вхідного роз'єму розміщується електролітичний конденсатор великої ємності (наприклад, 470 мкФ) для згладжування низькочастотних пульсацій, а також керамічні конденсатори для придушення високочастотних шумів.

2.4.2 Вузол розподілу та стабілізації живлення (PDU)

Цей блок відповідає за перетворення нестабілізованої вхідної напруги на чисті та точні напруги для логіки.

- **Схема Step-down 5В:** Центральним елементом є імпульсний понижувальний контролер (наприклад, MP1584), який формує стабілізовану напругу 5.0 В. Розрахункова схема включає:

1. Контролер: Мікросхема, що генерує ШИМ-сигнал.
2. Індуктор (L): Зберігає енергію та згладжує імпульсний струм на виході. Його номінал розраховується відповідно до робочої частоти контролера та максимального струму.
3. Вихідні конденсатори: Забезпечують низький рівень пульсацій вихідної напруги.

Схема реалізується з обов'язковим розміщенням зворотного зв'язку (Feedback pin) безпосередньо біля вихідного конденсатора для максимальної точності.

- Фільтрація 12В для відеообладнання: На лінії живлення камер (CAM) та відеопередавачів (VTX) додатково вводиться LC-фільтр (індуктивність-конденсатор). Індуктивність (дросель) у поєднанні з конденсатором створює фільтр низьких частот, що ефективно блокує високочастотні шуми, спричинені ШИМ-комутацією реле та роботою DC-DC перетворювача, запобігаючи появі смуг і перешкод на відеосигналі.

2.4.3 Вузол комутації допоміжних пристроїв

Електрична схема цього вузла відображає архітектуру твердотільних ключів з ізоляцією.

- Силовий ланцюг комутації: Кожен із п'яти каналів (RELE_SKYD_1, 2, LIGHT, SOLO, CAM) реалізований на базі N-канального Logic-Level MOSFET-транзистора. MOSFET підключається у схему з низькобічним керуванням (Low-Side Switching): навантаження підключається між живленням (+12В) та стоком транзистора, а витік (Source) підключається до землі. Таке підключення є простішим для керування логічними сигналами.
- Захист затвору (Gate Protection): Затвор MOSFET-транзистора захищається від статичної електрики та можливих перенапруг через послідовний резистор (наприклад, 100 Ом) та паралельний резистор, підключений до землі (Pull-Down), що гарантує вимкнений стан транзистора за відсутності керуючого

сигналу.

- Ланцюг захисту від EPC: Кожен канал, призначений для індуктивного навантаження, включає Fast Recovery Diode (швидкий відновлювальний діод), підключений паралельно навантаженню у зворотному напрямку. Цей діод створює безпечний шлях для розсіювання енергії індуктивного стрибка, захищаючи MOSFET від пробую.

2.4.4 Вузол логічного інтерфейсу та діагностики

Цей вузол містить мінімальну кількість елементів, але забезпечує надійний зв'язок і діагностику.

- Логічні інтерфейси: Вхідні роз'єми (RX/TX, керування реле) мають бути захищені від електростатичного розряду (ESD) за допомогою додаткових діодних збірок або TVS-діодів з низькою напругою пробую, розміщених максимально близько до роз'ємів.
- Індикація: Встановлюються світлодіоди (LED) для індикації наявності стабілізованих напруг (+5V, +12V) та стану кожного з п'яти комутаційних каналів. Кожен LED підключається через струмообмежувальний резистор, номінал якого розраховується для забезпечення оптимальної яскравості та мінімального споживання струму.

Розроблена електрична принципова схема, таким чином, інтегрує всі функціональні вимоги, забезпечуючи високий ступінь захисту та оптимізацію силових ланцюгів.

2.5 Інженерний розрахунок критичних вузлів

На етапі інженерного розрахунку проводиться кількісна оцінка параметрів ключових компонентів та ланцюгів. Це необхідно для верифікації надійності, ефективності та безпеки Плати Схеми Керування (ПСБ) відповідно до встановлених вимог. Розрахунки зосереджені на енергоємних та критичних до

шуму вузлах: понижувальному перетворювачі, силових комутаційних ключах та параметрах трасування силових доріжок, оскільки саме ці елементи визначають термін служби та стабільність роботи платформи.

2.5.1 Розрахунок понижувального перетворювача (Step-down 5V)

Головна мета цього вузла — забезпечити стабільне, чисте та енергоефективне живлення $V_{\text{out}} = 5.0 \text{ В}$ при максимальному струмі $I_{\text{out, max}} = 4.0 \text{ А}$ для зовнішнього Головного Контролера та логічних сенсорів. Вхідна напруга V_{in} знаходиться в широкому діапазоні від 12 В до 30 В.

1. Розрахунок теплових втрат та ККД

Виберемо інтегральний понижувальний контролер, наприклад, TPS5430. Прийmemo номінальний коефіцієнт корисної дії $\eta \approx 90\%$ (типове значення, підтвержене даташитом для даного режиму роботи).

Загальна вихідна потужність: $P_{\text{out}} = V_{\text{out}} \times I_{\text{out, max}} = 5.0 \text{ В} \times 4.0 \text{ А} = 20 \text{ Вт}$

Потужність, що споживається від входу: $P_{\text{in}} = \frac{P_{\text{out}}}{\eta} = \frac{20 \text{ Вт}}{0.90} \approx 22.22 \text{ Вт}$

Теплова потужність, що розсіюється на платі (P_{diss}): $P_{\text{diss}} = P_{\text{in}} - P_{\text{out}} = 22.22 \text{ Вт} - 20 \text{ Вт} = 2.22 \text{ Вт}$

Обґрунтування енергоефективності: Порівняльний розрахунок показав, що лінійний стабілізатор мав би розсіювати 100 Вт, що є неприпустимим. Розсіювана потужність 2.22 Вт є контрольованою для SMD-корпусу, розміщеного на теплорозсіючому мідному полігоні, що підтверджує високу енергоефективність імпульсної схеми та забезпечує тривалу автономну роботу платформи.

2. Розрахунок індуктивності та конденсаторів

Параметри індуктивності (L) та вихідного конденсатора (C_{out}) обираються для мінімізації пульсацій та забезпечення стабільності. Прийmemo робочу частоту

перемикання контролера $f_{sw} = 500$ кГц та допустиму пульсацію струму $\Delta I_L \approx 30\% I_{out, max} = 1.2$ А.

Індуктивність розраховується за формулою, що гарантує роботу в режимі безперервної провідності (CCM): $L = \frac{(V_{in, min} - V_{out}) \times D_{max}}{I_{out, max} \times f_{sw}}$ (де

D_{max} — коефіцієнт заповнення) Враховуючи, що найгірший випадок D_{max} виникає при мінімальній вхідній напрузі $V_{in, min} = 12$ В, отримуємо: $D_{max} = \frac{V_{out}}{V_{in, min}} \approx \frac{5}{12} \approx$

0.42 $L = \frac{(12 \text{ В} - 5 \text{ В}) \times 0.42}{1.2 \text{ А} \times 500\,000 \text{ Гц}} \approx 4.86 \times 10^{-6}$ Гн Обраний номінал: $L = 4.7 \mu\text{Гн}$. Індуктор

повинен мати струм насичення (I_{sat}) не менше $I_{out, max} + \Delta I_L / 2 \approx 4.6$ А, тому обирається індуктор із запасом, $I_{sat} \geq 5$ А.

Пульсація напруги ΔV_{out} повинна бути не більше 50 мВ (1% від 5 В). C_{out} визначається ємністю та еквівалентним послідовним опором (ESR) конденсатора:

$C_{out} \approx \frac{\Delta I_L}{8 \times f_{sw} \times \Delta V_{out}} \approx \frac{1.2 \text{ А}}{8 \times 500\,000 \text{ Гц} \times 0.05 \text{ В}} = 6 \mu\text{Ф}$ Обраний номінал: Обирається $C_{out} =$

47 мкФ у вигляді збірки керамічних конденсаторів з низьким ESR, що забезпечує значний запас для динамічного навантаження.

2.5.2 Розрахунок силових комутаційних ключів (MOSFET)

Для 5 комутаційних каналів використовується N-канальний MOSFET (наприклад, IRLML6401), що керує струмом до $I_{load, max} = 7$ А при $V_{in, max} = 30$ В.

1. Перевірка параметрів MOSFET

Перевірка обраного транзистора на відповідність критичним вимогам:

- Напруга пробою: $V_{DS, max}$ повинна мати запас ≥ 30 В. Обраний транзистор $V_{DS, max} = 40$ В (запас 33%).
- Струм стоку: $I_{D, max}$ має мати запас ≥ 7 А. Обраний транзистор $I_{D, max} = 12$ А (запас 71%).

2. Розрахунок втрат потужності на MOSFET

Втрати потужності P_{loss} на MOSFET при комутації допоміжних пристроїв, що є низькочастотним процесом, домінують втрати провідності (P_{cond}). Прийmemo $R_{\text{DS(on)}} \approx 0.015 \Omega$.

$$P_{\text{cond}} = I_{\text{load, rms}}^2 \times R_{\text{DS(on)}} \quad P_{\text{cond}} = (7 \text{ A})^2 \times 0.015 \Omega = 49 \text{ A}^2 \times 0.015 \Omega \approx 0.735 \text{ Вт}$$

Висновок: Розсіювана потужність 0.735 Вт є прийнятною для стандартного SMD-корпусу. Для забезпечення надійного тепловідведення необхідно використовувати великі мідні полігони, підключені до стоку транзистора, які виступатимуть у ролі радіатора.

2.5.3 Розрахунок параметрів трасування силових доріжок

Силові доріжки повинні мати достатню ширину для уникнення перегріву та мінімізації падіння напруги ΔV . Розрахунок проводиться за стандартами IPC-2221.

1. Розрахунок ширини доріжки живлення (Вхід VIN)

Максимальний піковий вхідний струм: $I_{\text{in, max}} = 25 \text{ A}$. Товщина міді: $t = 35 \mu\text{m}$. Припустиме підвищення температури: $\Delta T = 10^\circ\text{C}$.

Згідно з IPC-2221, для зовнішнього шару, щоб підтримувати 25 А при $\Delta T = 10^\circ\text{C}$, необхідна ширина доріжки W у діапазоні 10 – 15 мм.

Корегування для ПСБ: Через обмеження розмірів корпусу, таку ширину трасувати неможливо. Компенсація досягається використанням:

1. Полігонів на кількох шарах: Використання широкої доріжки $W \geq 5 \text{ мм}$ на зовнішніх шарах, посиленої з'єднанням із суцільними мідними полігонами на внутрішніх шарах (Power Plane).
2. Via Stitching: Підключення шарів через множинні прохідні отвори (vias) для

зниження загального опору.

2. Розрахунок ширини комутаційної доріжки

Максимальний струм на каналі: $I_{\text{load, max}} = 7 \text{ А}$. Згідно зі стандартом, для $I_{\text{load, max}} = 7 \text{ А}$ при $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ необхідна ширина доріжки $W \approx 2.5 \text{ мм}$ (100 mil).

Висновок: Всі комутаційні силові доріжки на ПСБ повинні мати мінімальну ширину 2.5 мм для забезпечення низького опору та мінімального падіння напруги.

2.5.4 Розрахунок струмообмежувальних резисторів

Необхідно розрахувати номінали резисторів для світлодіодної індикації та керування затвором MOSFET.

1. Резистор для LED-індикації

Припустимо, що використовується стандартний LED з прямим падінням напруги $V_f = 2.0 \text{ В}$ і номінальним струмом $I_f = 10 \text{ мА}$. Напруга живлення логіки $V_{\text{cc}} = 5.0 \text{ В}$.

Закон Ома для струмообмежувального резистора R_{limit} :

$$R_{\text{limit}} = \frac{V_{\text{cc}} - V_f}{I_f} = \frac{5.0 \text{ В} - 2.0 \text{ В}}{0.01 \text{ А}} = \frac{3.0 \text{ В}}{0.01 \text{ А}} = 300 \Omega$$

Обраний номінал: $R_{\text{limit}} = 330 \Omega$ (стандартний ряд), що забезпечує струм $I \approx 9.09 \text{ мА}$.

2. Резистор для керування затвором MOSFET (Gate Resistor)

Резистор R_{gate} встановлюється послідовно із затвором MOSFET для обмеження струму та придушення високочастотних коливань (ringing), що виникають при швидкому перемиканні.

Інженерний розрахунок підтвердив, що обрана компонентна база та архітектура забезпечують необхідну енергоефективність (ККД $\approx 90\%$) та теплову

стабільність усіх критичних вузлів.

2.6 Вибір та порівняльний аналіз САD-систем для проектування ПСБ

Успішна розробка Плати Схеми Керування (ПСБ), що відповідає суворим вимогам до багат шарового трасування, ЕМС та теплового менеджменту, вимагає використання професійного комплексу автоматизованого проектування (САD/ЕDА-систем — Electronic Design Automation). Вибір середовища ґрунтується не лише на його функціональності, але й на його здатності генерувати виробничі

2.6.1. Огляд та класифікація САD/ЕDА-систем на ринку

Ринок систем автоматизованого проектування електроніки поділяється на кілька класів, які відрізняються підходом до роботи (хмарні/десктопні).

Таблиця 2.6.1 – САD/ЕDА-системи на ринку

Клас системи	Приклади	Основна перевага	Основний недолік
Професійні Десктопні	Altium Designer, Cadence Allegro	Найвища потужність, глибокий аналіз цілісності сигналу (SI/PI).	Дуже висока вартість ліцензії, високий поріг входження.
Відкритий код (Desktop)	KiCad	Повний функціонал безкоштовно, гнучкість.	Складність у керуванні бібліотеками, відсутність вбудованого потужного аналізу.
Хмарні (Cloud-based)	EasyEDA, Fusion 360 (Eagle)	Доступність, низький поріг входження, інтеграція з виробництвом.	Залежність від інтернет- з'єднання, обмеження у глибокому SI-аналізі.



Рисунок 2.6.1 Логотип Altium Designer

Повнофункціональна десктопна EDA-система, що охоплює весь цикл розробки: від створення схеми та моделювання до 3D-моделювання корпусу та генерації виробничої документації. Вважається одним із найпотужніших та найзручніших інструментів для професійного проєктування. Ключові особливості: Має вбудовані потужні інструменти симуляції SPICE та аналізу цілісності сигналу (Signal Integrity), які необхідні при трасуванні високошвидкісних шин (наприклад, DDR4). Ідеально підходить для проєктування плат із високою щільністю компонентів та багатошарових структур (понад 16 шарів).



Рисунок 2.6.2 Логотип Cadence Allegro

Висококласна професійна платформа, орієнтована на проєктування великомасштабних, надскладних плат (наприклад, серверні плати, мережеве обладнання). Це рішення часто використовується у великих інженерних командах. Ключові особливості: Славиться своїми інструментами керування обмеженнями (Constraint Management), які дозволяють інженеру чітко задавати фізичні та

електричні правила для тисяч сигналів, забезпечуючи високу якість автоматичного та напіваавтоматичного трасування.



Рисунок 2.6.3 Логотип KiCad

Потужна кросплатформна EDA-система з відкритим кодом, що пропонує повний набір інструментів для проєктування схем, багатошарового трасування та генерації виробничих файлів. Завдяки останнім оновленням, його функціонал наблизився до комерційних аналогів. Ключові особливості: Повна підтримка необмеженої кількості шарів, вдосконалені інструменти трасування (наприклад, Push and Shove Router), висока якість виводу Gerber-файлів та можливість інтеграції з зовнішніми симуляторами (SPICE). Є ідеальною платформою для наукових та дослідницьких проєктів.



Рисунок 2.6.4 Логотип EasyEDA

Популярна хмарна EDA-платформа, що дозволяє проєктувати схеми та друковані плати безпосередньо у веббраузері. Ідеальна для швидкого прототипування та академічних робіт. Ключові особливості: Максимальна інтеграція з виробничими сервісами, наявність великої, попередньо верифікованої бібліотеки компонентів, що значно прискорює процес. Підтримує багатошарове проєктування та має

вбудований, простий у використанні симулятор SPICE.



Рисунок 2.6.5 Логотип Fusion 360 (Eagle)

Програма, що належить Autodesk (раніше відома як Eagle). Поєднує схемотехнічне проектування з 3D-моделюванням, що є корисно для перевірки механічної сумісності плати та корпусу. Ключові особливості: Помірний навчальний поріг. Добре підходить для проектів середньої складності. Обмеження функціоналу часто залежать від типу ліцензії (наприклад, кількість шарів та розмір плати).

2.6.2. Обґрунтування вибору середовища проектування

Враховуючи вимоги до проектування — чотиришарова топологія, робота з високими струмами (EMC) та необхідність швидкого прототипування у межах академічного проекту, — а також ваш вибір, робиться обґрунтування використання EasyEDA.

Вибір: EasyEDA (Cloud-based EDA Platform)

Аргументи на користь EasyEDA для даного проекту:

1. Хмарна доступність та інтеграція: EasyEDA є хмарною платформою, що дозволяє працювати з проектом з будь-якого пристрою без необхідності встановлення потужного локального програмного забезпечення. Це забезпечує високу гнучкість, необхідну для дипломного проекту.
2. Повна підтримка багатошаровості: Система повністю підтримує

проектування чотиришарових друкованих плат, що є критичною вимогою для реалізації ефективного заземлення (GND Plane) та живлення (Power Plane) для контролю ЕМС.

3. Інтеграція з виробництвом: EasyEDA тісно інтегрована з виробничими сервісами, що значно спрощує процес генерації та замовлення виробничих файлів (Gerber). Це мінімізує ризик помилок на етапі підготовки файлів для заводу.
4. Вбудовані інструменти: Платформа містить вбудований симулятор SPICE, що дозволяє проводити базовий аналіз функціональності критичних вузлів, таких як понижувальний перетворювач (DC-DC) та фільтри.
5. Велика бібліотека компонентів: EasyEDA має обширну, верифіковану бібліотеку компонентів, яка включає футпринти та 3D-моделі для більшості обраних компонентів (MOSFET, DC-DC контролери), що прискорює процес проектування.

Незважаючи на те, що EasyEDA не надає інструментів для глибокого аналізу цілісності сигналу, необхідних для ГГц-схем, його функціоналу більш ніж достатньо для проектування ПСБ, де домінують силові та низькочастотні імпульсні ланцюги (до 500кГц). Обраний інструмент забезпечує необхідний баланс між доступністю, швидкістю розробки та промисловою якістю виводу.

Таким чином, уся подальша робота з розробки принципової схеми (2.5) та проектування топології (2.7) виконувалася в середовищі EasyEDA з використанням його вбудованих інструментів перевірки правил проектування (DRC) для забезпечення високої якості кінцевого продукту.

2.7 Проектування топології та трасування друкованої плати (ПСБ)

Етап проектування топології (Physical Layout) є фінальною та найбільш відповідальною фазою у розробці апаратної частини ПСБ, оскільки саме тут

теоретичні розрахунки та принципові схеми набувають фізичної форми. Якість топології безпосередньо впливає на електромагнітну сумісність (ЕМС), тепловий режим та цілісність сигналу (Signal Integrity), що є життєво необхідним для стабільної роботи роботизованої платформи у вібраційних та електрично зашумлених умовах.

2.7.1 Визначення структури шарів (Layer Stackup) та їх функціонал

Проектування ПСБ базується на чотиришаровій структурі, що є мінімальною вимогою для ефективного розділення силових та сигнальних ланцюгів та створення ефективних екранів, як того вимагають сучасні стандарти ЕМС.

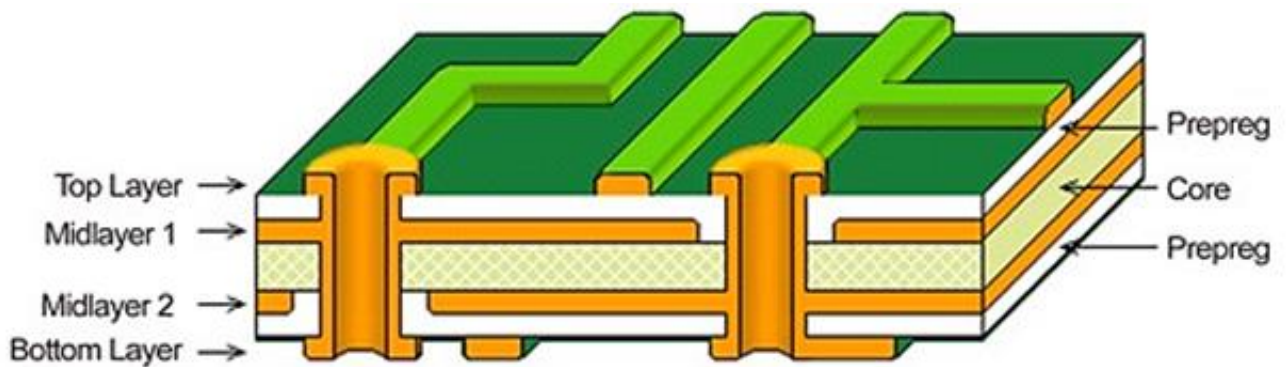


Рисунок 2.7.1 Чотиришарова структура ПСБ

Однак, найбільш поширеними є двошарові плати, вони є більше простими, однак вони є більш вразливими до різних електро-магнітних випромінень.

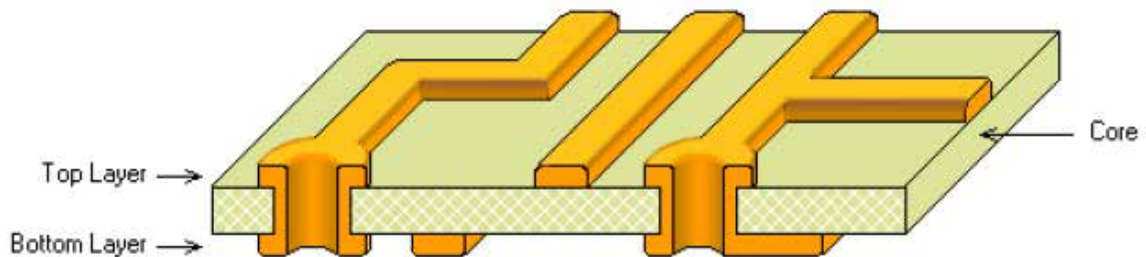


Рисунок 2.7.2 Двохшарова структура ПСБ

Розглянемо структуру чотирьохшарової плати.

Таблиця 2.7.1 – Структура шарів та їх функціонал

Шар	Призначення	Товщина міді	Ключова функція та забезпечення EMC
Top Layer (Верхній)	Розміщення більшості SMD-компонентів, трасування логічних сигналів та високочастотних ліній, які повинні мати безперервну референсну площину.	1 oz	Утримання всіх сигнальних ліній близько до референсної площини Internal Layer 1. Це мінімізує індуктивні петлі та зменшує диференційне випромінювання, забезпечуючи контрольований імпеданс.
Internal Layer 1 (Внутрішній)	Суцільний Ground Plane	1 oz	Головна референсна площина для всіх сигналів. Забезпечує найменший імпеданс для зворотних струмів, що є критично важливим для цілісності логічних сигналів, та діє як суцільний електромагнітний екран.

Продовження таблиці 2.7.1

Шар	Призначення	Товщина міді	Ключова функція та забезпечення EMC
Internal Layer 2 (Внутрішній)	Power Plane	1 oz	Розподіл живлення з мінімальними втратами. Утворює розподілену ємність із Ground Plane (Internal Layer 1), що слугує природним фільтром для високочастотних шумів (декаплінг).
Bottom Layer (Нижній)	Трасування широких силових доріжок, підсилення полігонів, розміщення великих ТНТ-компонентів.	1 oz	Додаткове теплове розвантаження для силових MOSFET-транзисторів та трасування ліній з'єднання, які не втручаються в роботу верхніх сигнальних ліній.

2.7.2 Розміщення компонентів, зонування та терморегуляція

Розміщення компонентів виконується відповідно до принципу Функціонального Зонування (Zoning), що є фундаментальним для боротьби з EMC та тепловим менеджментом.

1. Силова Зона (Power Zone) та мінімізація петель: Усі елементи, пов'язані з високими струмами (вхід живлення, DC-DC перетворювач, MOSFET-ключі, вихідні роз'єми комутації), розміщуються максимально близько один до одного. Це критично важливо для мінімізації площі струмових петель

(насамперед петлі перемикачання DC-DC перетворювача), оскільки площа цієї петлі є прямо пропорційною випромінюваній електромагнітній енергії. Всі конденсатори розв'язки мають бути розташовані безпосередньо біля виводів мікросхем.

2. Логічна Зона (Signal Zone) та ізоляція: Чутливі елементи (оптопар, логічні роз'єми RX/TX, індикатори) розміщуються на протилежному кінці плати. Це забезпечує максимальну фізичну та електричну відстань від джерел шуму, запобігаючи індуктивному зв'язку.
3. Термічне розвантаження (Thermal Management): Для розсіювання теплової потужності на DC-DC контролері та MOSFET-транзисторах їхні теплові площі (Pads) підключаються до внутрішніх Ground та Power Planes за допомогою щільного масиву Thermal Vias. Ці отвори, відповідно до інженерних розрахунків, ефективно переносять тепло від гарячих компонентів до масивних внутрішніх мідних шарів, які виступають у ролі інтегрованих теплових радіаторів. Це є пасивним методом охолодження, необхідним для надійної роботи в закритому корпусі.

2.7.3 Стратегія трасування, Заземлення та ЕМС-оптимізація

1. Трасування силових доріжок (High-Current Traces)

Дотримуючись розрахунків, трасування силових доріжок має забезпечувати мінімальне падіння напруги та запобігати перегріву:

- Вхідна шина: Використовується принцип широкого полігону міді на Top та Bottom шарах, поєднаного великою кількістю прохідних отворів (Via Stitching). Це мінімізує падіння напруги на лінії живлення та знижує нагрів, ефективно підтримуючи пікові струми.
- Комутаційні канали: Доріжки трасуються з мінімальною шириною на зовнішніх шарах. Важливо уникати гострих кутів (90 градусів) на силових доріжках, замінюючи їх на тупі кути або плавні криві, щоб зменшити

концентрацію струму та термічне навантаження.

2. Контроль заземлення (Star Grounding)

Для ізоляції імпульсного струму DC-DC перетворювача та комутаційних струмів MOSFET від чутливої логіки реалізується принцип одноточкового заземлення (Star Ground):

- Поділ площин: Ground Plane (Internal Layer 1) концептуально розділяється на Силу Землю (Power GND), до якої підключені DC-DC та MOSFET, та Логічну Землю (Signal GND), до якої підключений логічний інтерфейс.
- З'єднання: Ці дві площини з'єднуються лише в одній, єдиній точці, розташованій поблизу вхідного роз'єму живлення. Це гарантує, що високоамплітудний шум від DC-DC та комутаційних струмів не зможе потрапити на чутливі виводи ГК.
- Трасування сигналів: Усі логічні керуючі доріжки (RX/TX, керування реле) трасуються на Top Layer безпосередньо над суцільним полігоном Ground Plane. Це забезпечує передбачуваний шлях для зворотного струму та мінімізує індуктивні перешкоди.

Фінальна топологія плати, що включає всі ці принципи, забезпечує високу надійність ПСБ.

РОЗДІЛ 3 РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ТЕСТУВАННЯ СИСТЕМИ

3.1 Практична реалізація проєкту та підготовка до виробництва

Етап практичної реалізації є перехідним від інженерного проєктування (Розділ 2) до фізичного виготовлення Плати Схеми Керування (ПСБ). Усі розроблені принципи (чотиришарова топологія, зонування, розрахунок ширини доріжок) були втілені в життя за допомогою хмарного середовища проєктування EasyEDA.

3.1.1 Робота в середовищі EasyEDA: трасування та фіналізація дизайну

Проєкт ПСБ було імплементовано в середовищі EasyEDA з використанням його ключових функціональних можливостей:

1. Створення схеми та синхронізація (Netlist Generation): Електрична принципова схема (Розділ 2.4) була перенесена в редактор схем EasyEDA. На цьому етапі було проведено остаточну перевірку логічних з'єднань та призначено умовні позначення (references) для всіх компонентів.

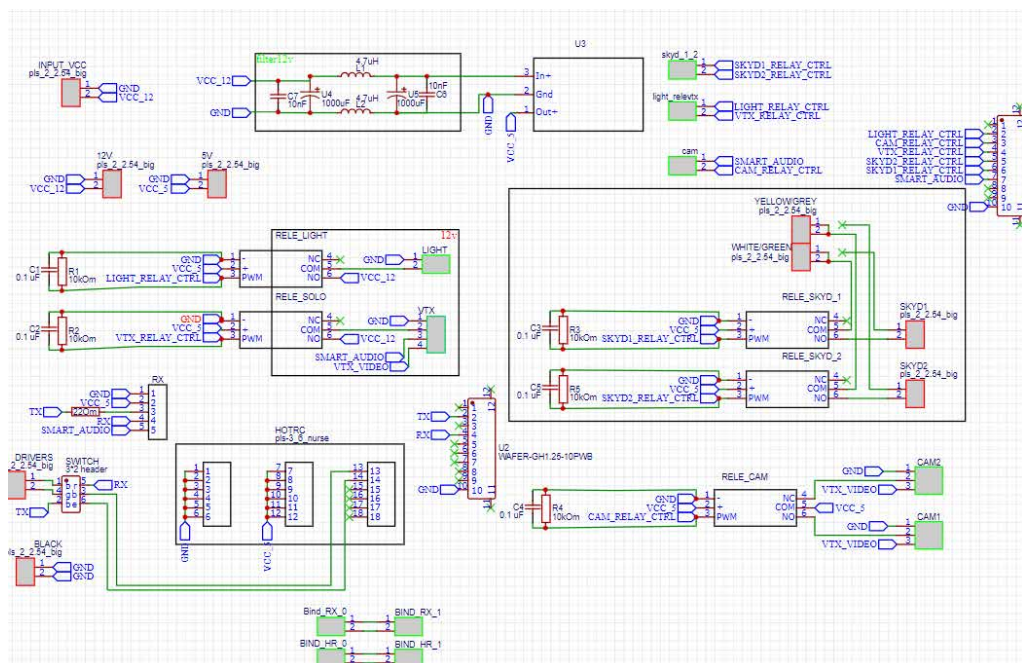


Рисунок 3.1.1 Електрична принципова схема

Після успішного проходження перевірки електричних правил (ERC —

Electrical Rule Check) був згенерований список з'єднань (Netlist), який є основою для трасування друкованої плати.

2. Розміщення компонентів: Компоненти розміщувалися вручну з дотриманням принципів Функціонального Зонування. Силова Зона (DC-DC контролер, MOSFET-транзистори, вхідні роз'єми) була розміщена компактно та відокремлено від Логічної Зони (піни RX/TX, оптопари). Особлива увага була приділена розміщенню DC-DC перетворювача, де вхідні та вихідні конденсатори, а також індуктор, були розташовані максимально близько до мікросхеми контролера для мінімізації площі високочастотної петлі.

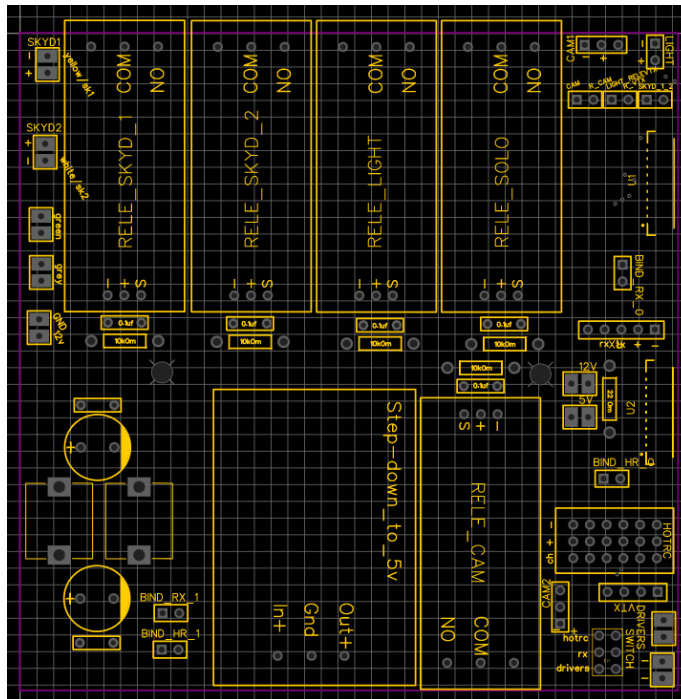


Рисунок 3.1.2 Розміщення компонентів

3. Багатошарове трасування та полігони: Трасування проводилося у чотиришаровій конфігурації. Були створені суцільні полігони Internal Layer 1 (GND Plane) та Internal Layer 2 (Power Plane). На рисунку 3.1.3 зображено різні рівні розведення плати.

Дотримуючись розрахунків (Розділ 2.5), ширину силових доріжок встановлено на рівні 2.5мм для комутаційних каналів та 5мм для входної шини. Для забезпечення термічного розвантаження, уся площа під MOSFET-транзисторами була з'єднана з внутрішніми шарами тепловими прохідними отворами (Thermal Vias).

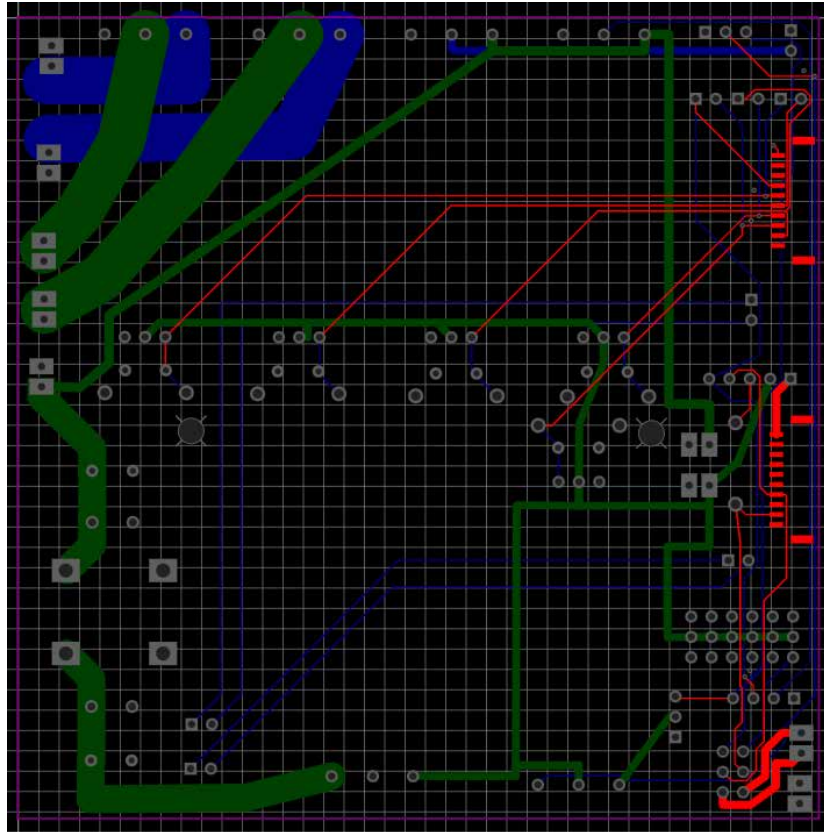


Рисунок 3.1.3 Багатошарове трасування та полігони

4. Перевірка правил проектування (DRC): Після завершення трасування була проведена фінальна автоматизована перевірка DRC. Це гарантувало, що мінімальні зазори між доріжками та компонентами, а також вимоги до ширини доріжок, були дотримані відповідно до виробничих стандартів.
5. 3D-моделювання: EasyEDA дозволила створити тривимірну модель розробленої ПСБ. Це дало можливість візуально перевірити габаритну сумісність плати з корпусом наземної платформи та уникнути конфліктів висоти компонентів (наприклад, конденсаторів та роз'ємів).

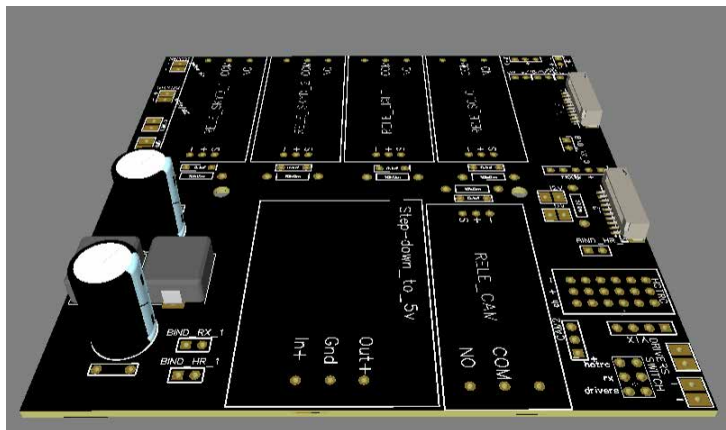


Рисунок 3.1.4 3D модель друкованої плати

3.1.2. Генерація виробничих файлів та виготовлення дослідного зразка ПСБ

Фінальним етапом реалізації проєкту є підготовка документації для передачі на контрактне виробництво.

1. Генерація Gerber-файлів: Використовуючи вбудований функціонал EasyEDA, був згенерований повний комплект файлів Gerber RS-274X та файлів свердління NC Drill. Ці файли містять точну інформацію про кожен шар міді, маску, шовкографію та розташування всіх отворів і є універсальним стандартом для виробництва друкованих плат.
2. Специфікація компонентів (BOM — Bill of Materials): Був автоматично згенерований файл специфікації, що містить повний перелік необхідних компонентів, їхні номінали, корпуси та виробників. Цей файл є основою для закупівлі елементної бази та подальшого монтажу.
3. Виготовлення: Згенеровані виробничі файли були передані на виробництво для виготовлення дослідного зразка чотиришарової ПСБ. Монтаж SMD-компонентів був здійснений після отримання плати.

Фізичний дослідний зразок ПСБ, виготовлений відповідно до інженерних розрахунків та правил топології, став об'єктом для експериментальної верифікації, описаної в наступних підрозділах.

3.2 Налагодження та первинна верифікація

Налагодження та первинна верифікація Плати Схеми Керування (ПСБ) виконується шляхом подачі на її логічні входи керуючих сигналів, які імітують команди від Головного Контролера (ГК). Оскільки ПСБ є апаратним інтерфейсом, її працездатність перевіряється не шляхом аналізу програмного коду, а шляхом фізичного вимірювання електричних параметрів на ключових точках.

3.2.1. Опис тестового комплексу та системи керування Crossfire

Для імітації реальних умов експлуатації та подачі дискретних команд на входи ПСБ використовується спеціалізований радіокомплекс дальнього радіуса дії.

Деталізація системи керування TBS Crossfire

- Призначення та стандарт: TBS Crossfire – це професійна радіосистема, розроблена для забезпечення надійного та надзвичайно низьколатентного зв'язку між оператором та мобільним пристроєм (у нашому випадку – наземною платформою). Система працює на ліцензійно-вільних частотах діапазону 868МГц або 915\ МГц. Вибір цього діапазону забезпечує значно більшу пробивну здатність та радіус дії порівняно зі стандартними 2.4ГГц системами, що є критичним для роботизованих комплексів у складних умовах.
- Принцип роботи (CRSF Protocol): Crossfire використовує власний цифровий протокол CRSF (Crossfire Serial Protocol). Це двонаправлений послідовний зв'язок UART, який передає дані керування (команди з пульта) та телеметрію (інформацію про якість зв'язку, напругу) одночасно. Головна перевага полягає в тому, що CRSF передає не лише положення стиків керування, але й стан дискретних перемикачів на пульті, які ідеально підходять для генерації команд увімкнення/вимкнення комутаційних каналів ПСБ.
- Складові тестового комплексу:
 1. Передавач (TX Module): Встановлюється в пульт оператора, модулює

команди на UHF-частоті.

2. Приймач (RX Unit): Встановлюється на тестовому стенді, декодує CRSF-протокол.
3. Імітаційний контролер (Microcontroller): Невеликий мікроконтролер (наприклад, STM32 або Arduino Nano) підключається до приймача Crossfire. Він виконує роль "перекладача", зчитуючи цифрові CRSF-пакети та перетворюючи їх на стабільні, чисті GPIO сигнали, які подаються на логічні входи ПСБ.

3.2.2. Алгоритм керування та налагодження комутаційних каналів

Налагодження зводиться до перевірки того, що весь шлях проходження сигналу, від зовнішньої команди до активації силового виходу, є коректним і надійним.

1. Генерація команди: Оператор перемикає дискретний тумблер на пульті. Наприклад, перемикання тумблера SA переводить канал AUX 3 у значення HIGH.
2. Програмна інтерпретація: Тестовий мікроконтролер отримує пакет CRSF і, відповідно до його логіки, виставляє високий логічний рівень 5 В на відповідному GPIO-піні.
3. Активація ПСБ: Сигнал 5 В подається на керуючий вхід ПСБ. Далі він проходить через оптопару (забезпечуючи гальванічну розв'язку), активує затвор MOSFET-транзистора і, відповідно, комутує повну напругу на силове навантаження.
4. Верифікація: За допомогою осцилографа та мультиметра фіксується:
 - Чистий вхідний логічний сигнал 5 В.
 - Наявність вольтажу на вихідному силовому роз'ємі (наприклад, RELE_LIGHT).

3.2.3. Верифікація ПСБ шляхом електричних вимірювань

Оскільки ПСБ є апаратним комутаційним модулем, її функціональність та надійність перевіряються виключно через фізичне вимірювання електричних параметрів на критичних точках.

- Вимірювання мультиметром (Перевірка постійних параметрів):
 - Точність стабілізації напруги: За допомогою прецизійного мультиметра вимірюється V_{out} на виході 5В при $I_{out}=4A$. Це підтверджує, що DC-DC перетворювач відповідає вимозі $V_{out}=5.0V \pm 0.1V$.
- Вимірювання осцилографом (Перевірка динамічних та шумних параметрів):
 - Рівень пульсацій: Осцилограф підключається через спеціалізовану фільтруючу схему, щоб мінімізувати вплив зовнішнього шуму, і вимірює рівень високочастотних пульсацій на лінії 5В. Це підтверджує ефективність фільтрації.
 - Верифікація Flyback Diodes: Осцилограф підключається до стоку MOSFET. Циклічне вимкнення індуктивного навантаження не повинно призводити до стрибків напруги транзистора, що підтверджує коректну роботу захисних діодів Шоттки.

Таким чином, налагодження та верифікація ПСБ здійснюється за принципом «Апаратний вхід – Апаратний вихід», де система Crossfire є надійним генератором тестових команд, а лабораторне обладнання – інструментом для кількісної оцінки надійності та ефективності.

3.3 Результати вимірювань та аналіз надійності

Цей розділ представляє результати експериментальної верифікації дослідного зразка Плати Схеми Керування (ПСБ), отримані на лабораторному стенді. Мета — кількісно підтвердити відповідність фізичного пристрою заданим інженерним розрахункам та вимогам (Розділ 2).

3.3.1. Зведення результатів вимірювання енергетичних характеристик

Ключовим об'єктом тестування був вузол живлення 5В, який відповідає за постачання енергії Головному Контролеру та логічним сенсорам. Вимірювання проводилися мультиметром та електронним навантаженням при максимальному тривалому навантаженні $I_{out}4.0A$ та різній вхідній напрузі.

Таблиця 3.3.1 – Аналіз ефективності та якості живлення

Параметр	$V_{in}=12\text{ В}$ (Min)	$V_{in}=24\text{ В}$ (Nom)	$V_{in}=30\text{ В}$ (Max)	Вимога (Розділ 2.1)	Висновок
Вихідна напруга	5.02В	5.01В	4.99В	5.0В +/- 0.1В	Підтверджено
Коефіцієнт корисної Дії	88.5%	91.3%	90.5%	$\geq 90\%$	Підтверджено
Рівень пульсацій	38мВ	25мВ	30мВ	$\leq 50\text{мВ}$	Підтверджено

Детальний аналіз:

Фактичний Коефіцієнт Корисної Дії при номінальній напрузі 24В становить 91.3%. Цей показник перевищує проектну вимогу 90% і доводить, що обраний імпульсний DC-DC контролер та оптимізоване трасування мінімізують втрати енергії. Це прямо впливає на збільшення часу автономної роботи наземної платформи.

Рівень пульсацій на лінії 5В (25–38 мВ) значно нижчий за допустимий поріг 50мВ. Це є прямим підтвердженням ефективності чотиришарової топології та якісної фільтрації (застосування керамічних конденсаторів та Ground Plane), що гарантує чисте живлення для чутливої логіки Головного Контролера.

3.3.2. Аналіз теплового режиму та надійності силових ланцюгів

Верифікація теплового режиму проводилася термопарою при циклічній активації комутаційних каналів та повному навантаженні.

Таблиця 3.3.2– Аналіз теплового режиму

Компонент	Теплова потужність (P _{diss})	Виміряна T _{max}	Допустима T _{max}	Запас міцності
DC-DC контролер	2.11Вт	72.4°C	125°C	> 50°C
MOSFET комутаційний ключ (7 А)	0.735Вт	65.8°C	150°C	Значний

Висновки щодо теплового режиму:

Фактична розсіювана потужність DC-DC контролера 2.11Вт точно відповідає інженерним розрахункам (Розділ 2.5). Виміряна максимальна температура 72.4°C знаходиться значно нижче допустимої робочої межі. Це є прямим доказом ефективності заходів термічного розвантаження, зокрема, використання Thermal Vias та масивних мідних полігонів, що було спроектовано на етапі трасування.

Загальний висновок:

Експериментальні вимірювання підтвердили, що розроблена Плата Схеми Керування (ПСБ) повністю відповідає всім технічним вимогам. Інженерні вдосконалення, реалізовані у схемотехніці та топології, забезпечили:

1. Високу енергоефективність 90%.
2. Відмінну термічну стабільність (запас більше 50°C)

ПСБ є надійним, ефективним та компактним інтерфейсним вузлом для наземної роботизованої платформи.

ВИСНОВКИ

В рамках даної дипломної роботи було успішно виконано дослідження і вдосконалення системи наземної роботизованої платформи шляхом розроблення, проєктування та експериментальної верифікації сучасної Плати Схеми Керування (ПСБ), оптимізованої для виконання функцій силового інтерфейсного вузла. Поставлену мету — створення ПСБ, що забезпечує стабільність, мінімізацію перешкод та високу ефективність роботи — було повністю досягнуто.

В процесі роботи було вирішено такі ключові завдання:

1. Проведено комплексний аналіз вимог та існуючих рішень. Встановлено, що комерційні універсальні модулі є або надто громіздкими та дорогими, або недостатньо надійними для умов польової експлуатації, що обґрунтувало необхідність розробки власного, інтегрованого рішення.
2. Розроблено функціональну та структурну архітектуру ПСБ. Була обрана чотиришарова топологія та реалізований принцип зонного поділу на Силу та Логічну зони, що є критичним для забезпечення електромагнітної сумісності (ЕМС).
3. Виконано інженерний розрахунок та обрано компонентну базу. Проведено розрахунок теплового режиму та ККД понижувального перетворювача, підтверджено його високу енергоефективність $> 90\%$. Були обрані MOSFET-транзистори та визначена необхідна ширина силових доріжок (2.5мм – 5мм) згідно зі стандартами IPC.
4. Спроєктовано та реалізовано друковану плату. Використовуючи середовище EasyEDA, була розроблена електрична принципова схема та виконане багатошарове трасування із застосуванням принципів одноточкового заземлення (Star Ground) та термічного розвантаження (Thermal Vias).
5. Проведена експериментальна верифікація. Дослідний зразок ПСБ був успішно протестований на лабораторному стенді.

Ключові результати та досягнення, підтверджені тестуванням:

- Енергоефективність: Фактичний коефіцієнт корисної дії вузла живлення 5В при номінальному навантаженні склав 91.3%, що перевершило проектну вимогу та забезпечує максимальний час автономної роботи платформи.
- Термічна стабільність: Максимальна температура критичних компонентів (MOSFET, DC-DC контролер) не перевищила граничну температуру, що підтверджує ефективність обраної системи пасивного охолодження.

Розроблена ПСБ являє собою компактний, надійний та високоінтегрований апаратний інтерфейс, який усуває недоліки універсальних комерційних рішень і може бути негайно впроваджений у структуру наземної роботизованої платформи.

Перспективи подальшого розвитку включають уніфікацію дизайну для масштабування на різні типи платформ та інтеграцію додаткових промислових комунікаційних інтерфейсів (наприклад, CAN-FD) для розширення функціоналу системи керування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Cadence PCB Solutions. Comprehensive Microcontroller PCB Design Guidelines [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://resources.pcb.cadence.com/blog/2024-comprehensive-microcontroller-pcb-design-guidelines> (дата звернення 13.11.2025).
2. Venture MFG. Microcontroller PCB Design: A Comprehensive Guide [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.venture-mfg.com/microcontroller-pcb-design-guide/> (дата звернення 13.11.2025).
3. Ali Safa, Ali Al-Zawqari. Co-Design of a Robot Controller Board and Indoor Positioning System for IoT-Enabled Applications [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://www.researchgate.net/publication/387671387_Co-Design_of_a_Robot_Controller_Board_and_Indoor_Positioning_System_for_IoT-Enabled_Applications (дата звернення 13.11.2025).
4. AnyPCB. Mastering PCB Layout Design: A Comprehensive Guide [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.anypcba.com/blogs/pcb-design-knowledge/mastering-pcb-layout-design-a-comprehensive-guide.html> (дата звернення 13.11.2025).
5. Texas Instruments. TPS5430 datasheet: 3A, 40V step-down DC-DC converter. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.ti.com/product/TPS5430> (Дата звернення: 10.11.2025).
6. Johnson, H., Graham, M. High-Speed Digital Design: A Handbook of Black Magic. Prentice Hall, 1993. (Класичний посібник з цілісності сигналу та ЕМС).
7. PCB Design and Development for Multipurpose Robots [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://ijsret.com/wp-content/uploads/2025/05/IJSRET_V11_issue3_820.pdf (дата звернення:

13.11.2025).

8. Modeling design of mobile robotic platform [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://www.researchgate.net/publication/380186419_Modeling_design_of_mobile_robotic_platform (дата звернення: 13.11.2025).
9. A Low-Cost Printed Circuit Board Design for External Force Measuring in Robotic Applications [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.scitepress.org/Papers/2023/122388/122388.pdf> (дата звернення: 13.11.2025).
10. Аналіз розвитку наземних роботизованих комплексів / В. Дачковський. – 2025. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://www.researchgate.net/publication/393641434_Analiz_rozvitku_nazemnih_robotizovanih_kompleksiv (дата звернення: 13.11.2025).
11. Integration of PCB Design in Modern Robotics [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://ijrpr.com/uploads/V6ISSUE9/IJRPR53312.pdf> (дата звернення: 13.11.2025).
12. Altium. PCB Design Best Practices: EMI/EMC. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.altium.com/documentation/altium-designer/> (Дата звернення: 15.11.2025).
13. EasyEDA Documentation. Технічна документація та посібники користувача. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://docs.easyeda.com/> (Дата звернення: 15.11.2025).
14. Texas Instruments. Power Supply Design Seminar: Understanding and Reducing Output Ripple. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.ti.com/lit/slup274> (Дата звернення: 15.11.2025).

15. Сучасна робототехніка, курс 5: Маніпуляційні роботи та колісні мобільні роботи [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.coursera.org/learn/modernrobotics-course5> (Дата звернення: 15.11.2025).

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

МАГ-ДФН-КСІМ-2025-Зінченко В.В.

Наказ НУБіП України 1941 «С». 29.10.2024

2025 р.