

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

**Радіотехнічний факультет
Кафедра прикладної радіоелектроніки**

До захисту допущено:

Зав. кафедри

_____ Андрій МОВЧАНЮК

«___» _____ 20__ р.

**Дипломна робота
на здобуття ступеня бакалавра
за освітньою програмою «Інтелектуальні технології радіоелектронної те-
хніки»,
за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка»
на тему
«Універсальний електронний модуль керування гібридною безпілотною
платформою для задач розмінування»**

Виконав (-ла):

студент (-ка) IV курсу, групи РЕ-21

Марковець Валентин Сергійович _____

Керівник: асистент, Лемеха Владислав Олександрович _____

Посада, науковий ступінь, вчене звання,
Прізвище, ім'я, по батькові

Рецензент: Олійник Максим Віталійович _____

Посада, науковий ступінь, вчене звання,
Прізвище, ім'я, по батькові

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.

Студент (-ка) _____

Київ – 2026 року

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4	PE21.469375.001.T3	Завдання на дипломний проєкт	5	
2	A4	PE21.469375.001 ПЗ	Пояснювальна записка	72	
3	A4	PE21.469375.001 E1	Схема структурна	1	
4	A3	PE21.469375.001 E3	Схема електрична принципова	1	
5	A3	PE21.103142.001	Корпус. Верхня частина	1	
6	A2	PE21.103142.002	Корпус. Нижня частина	1	
7	A4	PE21.469375.001ПЕ	Перелік елементів	2	

				PE21.469375.001		
	ПІБ	Підп.	Дата	Універсальний електронний модуль керування гібридною безпілотною платформою для задач розмінування	Лист	Листів
Розробн.	Марковець				1	1
Керівн.	Лемеха				КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф.ПРЕ ,Гр. PE-21	
Н/контр.						
Зав.каф.						

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Радіотехнічний факультет
Кафедра прикладної радіоелектроніки

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Освітня програма «Інтелектуальні технології радіоелектронної техніки»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри

_____ Андрій МОВЧАНЮК

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студента

1. Тема проєкту Універсальний електронний модуль керування гібридною безпіотною платформою для задач розмінування

2. Керівник проєкту Лемеха Владислав Олександрович, затверджені наказом по університету від «29» травня 2026 р. № 1089-с

Строк подання студентом проєкту 08 червня 2026 року

3. Вихідні дані до проєкту: Напруга живлення керуючої частини: +6...+36 В; напруга живлення силової частини: +12 В; кількість PWM-виходів: 2; кількість релейних каналів: 6; роз'єми живлення: XT60PW; сигнальні роз'єми: серія GX (авіаційні); роз'єм налаштування: USB Type-C; протоколи зв'язку: MAVLink, UART, I2C, SBUS; прошивка: ArduPilot Rover.

4. Зміст пояснювальної записки 1) Огляд існуючих рішень, 2) Розробка схеми електричної принципової 3) Проєктування друкованого вузла 4) Конструювання корпусу та пристрою 5) Результати експериментів.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) Складальний кресленик плати, складальний кресленик пристрою, презентація 11 сторінок.

6. Дата видачі завдання 14 квітня 2026 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Огляд існуючих рішень	14.04.26-06.05.26	
2	Розробка та аналіз завдання на проєкт	07.05.26-10.05.26	
3	Розробка функціональної схеми та вибір компонентів	11.05.26-18.05.26	
4	Розробка схеми електричної принципової	19.05.26-23.05.26	
5	Розробка друкованої плати	24.05.26-29.05.26	
6	Розробка конструкторської документації	30.05.26-05.06.26	
7	Оформлення текстової та графічної документації	06.06.26-08.06.26	

Студент

Марковець Валентин Сергійович

Керівник

Лемеха Владислав Олександрович

АНОТАЦІЯ

На основі аналізу існуючих аналогів на українському та закордонному ринках розроблено універсальний електронний модуль дистанційного керування гібридною платформою для розмінування з одночасним ШІМ-керуванням електроприводами та релейним керуванням двигуном внутрішнього згоряння. Проведено обґрунтований вибір компонентів системи, включно з політним контролером Matek H743 SLIM V4, оптронами PC817, MOSFET-транзисторами IRLZ24N, захисними діодами 1N4007 та контролером двигунів ходу YS-BLD80AT. Підібрані компоненти відповідають технічним вимогам щодо стабільності, надійності та завадостійкості пристрою. Розроблено концепцію металевого корпусу з урахуванням вібростійкості, тепловідведення, видимої діагностики через індикаторні світлодіоди та можливості швидкого монтажу на платформі.

Створено структурну та електричну принципову схему, обґрунтовано рішення щодо схемотехнічної реалізації оптичної розв'язки та транзисторних каскадів, проведено трасування двосторонньої друкованої плати з розділеними полігонами загального проводу керуючої та силової частин. В межах проєкту виконано 3D-моделювання корпусу та передбачено підключення периферійних пристроїв через авіаційні роз'єми серії GX, силових кіл через роз'єми XT60PW та доступ до політного контролера через USB Type-C.

Проведено експериментальні дослідження макету в лабораторних умовах та на складі реальної безпілотної платформи для розмінування, які підтвердили стабільну та безвідмовну роботу всіх функціональних блоків системи. Окрему увагу приділено модульності конструкції та можливості подальшого розширення функціоналу за рахунок інтеграції GPS-навігації, відеоспостереження та напівавтонних режимів керування.

ANNOTATION

Based on the analysis of existing analogues on the Ukrainian and foreign markets, a universal electronic module for remote control of a hybrid platform for demining with simultaneous PWM control of electric drives and relay control of the internal combustion engine has been developed. A well-founded selection of system components has been made, including the Matek H743 SLIM V4 flight controller, PC817 optocouplers, IRLZ24N MOSFET transistors, 1N4007 protective diodes and the YS-BLD80AT traction motor controller. The selected components meet the technical requirements for stability, reliability and noise immunity of the device. The concept of a metal case has been developed taking into account vibration resistance, heat dissipation, visible diagnostics through indicator LEDs and the possibility of quick installation on the platform.

A structural and electrical schematic diagram was created, a solution was substantiated for the circuit implementation of the optical isolation and transistor cascades, a double-sided printed circuit board was traced with separated polygons of the common wire of the control and power parts. Within the framework of the project, 3D modeling of the case was performed and provision was made for connecting peripheral devices via GX series aviation connectors, power circuits via XT60PW connectors and access to the flight controller via USB Type-C.

Experimental studies of the model were carried out in laboratory conditions and on the premises of a real unmanned platform for demining, which confirmed the stable and trouble-free operation of all functional blocks of the system. Special attention was paid to the modularity of the design and the possibility of further expansion of the functionality through the integration of GPS navigation, video surveillance and semi-autonomous control modes.

Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: «Універсальний електронний модуль керу-
вання гібридною безпіотною платформою для задач ро-
змінування»

Київ — 2026 року

ЗМІСТ

Перелік скорочень.....	3
Вступ.....	4
1 Огляд аналогів у сфері дистанційного керування автоматизованими платформами.....	5
1.1 Огляд аналогів	5
1.1.1 Багаторазовий мобільний розміновувач КНРО «Змій»	5
1.1.2 Безпілотний наземний комплекс UNEX UGV	6
1.1.3 Комплект керуючої електроніки UGV Kit	7
1.1.4 Роботизований комплекс МВ-10	8
1.1.5 Комплекс Vozena 5	9
1.1.6 Дистанційно керована система Germina URCM-3000.....	10
1.1.7 Узагальнення та висновки.....	11
2 РОЗРОБЛЕННЯ СТРУКТУРНОЇ ТА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ.....	13
2.1 Призначення та опис схеми	13
2.2 Обґрунтування структурної схеми пристрою	15
2.3 Вибір електронних компонентів	17
2.3.1 Політний контролер: принцип роботи та вибір типу FC	17
2.3.2 Керування релейними модулями з оптичною розв'язкою: варіанти реалізації та вибір оптимального	21
2.3.3 Принцип керування ходом машини розмінування.....	24

					РЕ21.469375.001 ПЗ			
ЗМ.	Лис	№ докum.	Підпис	Дата				
Розробив	Марковець				Універсальний електронний модуль керування гібридною безпіотною платформою для задач розмінування	Лім.	Лист	Листів
Перевірів	Лемеха						1	72
Н. Контр.								
Затвер-	Лемеха					РЕ-21, РТФ		

2.3.4 Обґрунтування вибору оптимального варіанту	26
2.4 Схема електрична принципова	28
3 Проєктування електронного модуля	35
3.1 Визначення мінімальної площі друкованої плати	35
3.2 Розрахунок ширини провідника	37
3.3 Трасування плати в системі автоматизованого проєктування Altium Designer.....	38
4 Проєктування корпусу.....	44
4.1 Опис ідеї корпусу	45
4.2 Конструктивні особливості корпусу	46
5 Результати експериментів	53
5.1 Випробування макету друкованої плати	53
5.2 Випробування у складі безпілотної платформи для розмінування	54
Висновки	56
Перелік джерел посилання.....	58
Додаток А. Технічне завдання.....	61
Додаток Б. Схема Електрична структурна	67
Додаток В. Схема електрична принципова	68
Додаток г. Креслення деталей корпусу	69
Додаток Д. Перелік елементів	71

					РЕ21.469375.001 ПЗ	Лис
						2
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АЦП — аналого-цифровий перетворювач

ДВЗ — двигун внутрішнього згоряння

ДП — друкована плата

НРК — наземний роботизований комплекс

CAN — Controller Area Network

EMC — Electromagnetic Compatibility (електромагнітна сумісність)

PWM — широтно-імпульсна модуляція (широтно-імпульсна модуляція)

FC — Flight Controller (політний контролер)

GND — Ground (загальний провід)

GPIO — введення/виведення загального призначення (порти введення/виведення загального призначення)

GPS — Global Positioning System (глобальна система позиціонування)

I2C — Inter-Integrated Circuit (послідовна шина міжмікросхемного зв'язку)

IPC — Institute of Printed Circuits (стандарт проєктування друкованих плат)

MAVLink — Micro Air Vehicle Link (протокол телеметричного зв'язку)

PCB — Printed Circuit Board (друкована плата)

ШИМ — широтно-імпульсна модуляція (широтно-імпульсна модуляція)

SBUS — Serial Bus (послідовна радіошина передачі даних керування)

SMD — Surface Mount Device (компонент поверхневого монтажу)

SSR — Solid State Relay (твердотіле реле)

UART — Universal Asynchronous Receiver-Transmitter (універсальний асинхронний приймач-передавач)

USB — Universal Serial Bus (універсальна послідовна шина)

КНРО –Комплекс Наземного Роботизованого Очищення

					<i>РЕ21.469375.001 ПЗ</i>	Лис
						3
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Сучасний стан мінної загрози, зокрема на постконфліктних територіях, визначає гостру потребу в ефективних засобах розмінування. Ручне розмінування залишається вкрай небезпечним і вільним процесом, що обумовлює потребу широкого впровадження створеної платформи. Аналіз зарубіжного досвіду роботи про активний розвиток дистанційно керованих комплексів, однак вітчизняні розробки в цій галузі є обмеженими, а закордонні рішення — дорогими та складними в адаптації. Патентний пошук підтверджує, що інтегровані гібридні системи керування з уніфікованим електронним модулем залишаються малодослідженими, що обумовлює необхідність цієї розробки [1, 2, 3].

В основі проєкту закладено концепцію уніфікованого електронного модуля керування гібридною платформою, що об'єднує управління електроприводами та двигуном внутрішнього згоряння (ДВЗ). Центральним вузлом є політний контролер, який генерує ШІМ-сигнали і передає їх одночасно до контролерів електродвигунів без проміжної обробки, що скорочує час реакції системи [4]. Керування ДВЗ реалізовано через релейні модулі, які забезпечують гальванічну розв'язку силових та керуючих кіл і захищають електроніку від імпульсних перешкод [5]. Модульна архітектура дозволяє масштабувати рішення без повного перепроєктування, а окрему увагу приділено захисту компонентів від перевантаження та електромагнітних завдань.

Розроблений модуль може бути використаний у гуманітарному розмінуванні, військово-інженерних операціях, аварійно-рятувальних роботах у небезпечних зонах, а також у промислових роботизованих платформах із гібридними силовими установками. Модульність системи створює основу для подальшої інтеграції телеметрії, відеоспостереження, GPS-навігації та напіваавтономних режимів керування.

					<i>РЕ21.469375.001 ПЗ</i>	Лис
						4
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

1 ОГЛЯД АНАЛОГІВ У СФЕРІ ДИСТАНЦІЙНОГО КЕРУВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНИМИ ПЛАТФОРМАМИ

1.1 Огляд аналогів

Аналіз існуючих рішень є необхідним етапом проєктування будь-якого електронного модуля керування, не дозволяє встановити рівень технічної досконалості наявних систем, виявити їх переваги та недоліки, а також обґрунтувати доцільність нової розробки. У рамках даного огляду розглядаються як українські, так і закордонні рішення у сфері керуючої електроніки для наземних створених платформ (НРК) та машин для розмінування. Такий підхід дозволяє сформувати повну картину ринку ринку, застосувати загальносвітові тенденції та з'ясувати, поки що немає рішень щодо вимог щодо використання гібридної платформи з одночасним використанням електроприводу та двигуна внутрішнього згоряння. За результатами порівняльного аналізу сформульовано вимоги до розробленого модуля та обґрунтовано його відмінність від аналогів.

1.1.1 Багаторазовий мобільний розміновувач КНРО «Змій»

Одним із найбільш відомих представників українських роботизованих платформ для розмінування є комплекс віртуального автоматизованого очищення «Змій» версії 1.2, який виготовляється українською компанією RoverTech. Цей пристрій призначений для дистанційного розмінування території в умовах активних бойових дій та гуманітарних операцій без окремої участі оператора в небезпечній зоні.

Платформа оснащена бронекорпусом підвищеної міцності, системою дистанційного керування з радіусом дії до 3 км, а також можливістю інтеграції з безпілотними літальними апаратами для точного планування очищення маршрутів [6]. Конструкція платформи виробляє вибухи протитанкових мін, залишаючи функціональну після кількох детонацій, що підтверджено в реальних бойових умовах [7]. Система керування платформою є повністю закритою та власністю, що унеможливорює її адаптацію або інтеграційні компоненти силової установки. Усі параметри керування реалізовані через фірмове програмне

					РЕ21.469375.001 ПЗ	Лис
						5
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

забезпечення та не допускають змін протоколів взаємодії між підсистемами. Зовнішній вигляд платформи зображено на малюнку 1.1.



Рисунок 1.1 — Зовнішній вигляд КНРО «Змій»

1.1.2 Безпілотний наземний комплекс UNEX UGV

Одним із представників українських універсальних роботизованих платформ є безпілотний наземний комплекс UNEX UGV, що виготовляється українським виробником. Цей пристрій призначений для виконання широкого спектру завдань в умовах бойових дій, зокрема розмінування, логістики, евакуації та спостереження без повторної участі оператора в зоні уражень.

Платформа оснащена броньованим корпусом амфібійного типу з низьким тиском на підставі, надійною системою радіоуправління та програмним автопілотом, що дозволяє працювати в різних умовах місцевості [8]. Система радіокерування UNEX UGV є стійкою до засобів радіотехнічної боротьби, що має критично важливу електронну характеристику для застосування в умовах сучасного збройного конфлікту [9]. Платформа може створюватися в кількох модифікаціях залежно від поставленого завдання, проте система управління архітектурою закрита і не передбачає відкритого інтерфейсу для самостійної інтеграції сторонніх компонентів або альтернативних силових установок. Налаштування системи створення виробником і не може змінюватися

					РЕ21.469375.001 ПЗ	Лис
						6
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

користувачем у польових умовах. Зовнішній вигляд платформи зображено на малюнку 1.2..



Рисунок 1.2 — Зовнішній вигляд безпілотного наземного комплексу
UNEX UGV

1.1.3 Комплект керуючої електроніки UGV Kit

Із найближчих функціональних аналогів розроблюваного модуля на українському ринку є комплект керуючої електроніки UGV Kit, що виготовляється однією компанією 2UxV. пристрій, призначений для забезпечення дистанційного водіння на землі цими автоматизованими комплексами та підтримує підключення різноманітних варіантів систем водіння і зв'язку. Модуль працює на прошивці ArduPilot, підтримує протоколи керування MavLink та CRSF, має вхідну напругу 24–110 В та оснащений 8 виходами PWM/GPIO для керування регуляторами обертів електродвигунів [10]. Для забезпечення зв'язку та розширення функціональності модуль має у своєму складі 5 портів Ethernet для підключення до мережі, LTE-модемів та IP-камер, а також інтерфейси CAN,

					PE21.469375.001 ПЗ	Лис
						7
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

I2C, UART та USB для підключення периферійних пристроїв. Модуль не містить вбудованих засобів керування двигуном внутрішнього згоряння та релейних виходів для допоміжних виконавчих механізмів, що неможливе його безпосереднє застосування для керування гібридною платформою з ДВЗ без суттєвого доопрацювання. Зовнішній вигляд модуля зображено на рисунку 1.3.



Рисунок 1.3 — Зовнішній вигляд комплекту керуючої електроніки UGV Kit

1.1.4 Роботизований комплекс MB-10

Одним із найпотужніших представників закордонних спеціалізованих машин для розмінування є важкий роботизований комплекс MB-10, що виготовляється хорватською компанією DOK-ING. Цей пристрій призначений для механічного розмінування території шляхом знищення протипіхотних та протитанкових мін за допомогою подвійного робочого інструменту — переднього ціпового барабана та заднього фрезерного барабана [11]. Платформа оснащена двигуном Caterpillar C18 потужністю 570,5 кВт (766 к.с.) з крутним моментом 3495 Нм, має масу близько 20950 кг і забезпечує продуктивність очищення до 5000 м² на годину [12]. Завдяки своїм габаритам, ширині очищення 2450 мм і

					PE21.469375.001 ПЗ	Лис
						8
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

глибині обробки ґрунту до 400 мм, платформа здатна працювати цілорічно практично в будь-яких умовах місцевості. Система керування MV-10 є повністю закритою та реалізована на базі власного програмного забезпечення виробника, що унеможливлює її модифікацію або інтеграцію компонентів. Платформа використовує двигун внутрішнього згоряння без електричного приводу, що обмежує гнучкість керування з гібридними рішеннями. Зовнішній вигляд платформи зображено на малюнку 1.4.



Рисунок 1.4 — Зовнішній вигляд роботизованого комплексу MB-10

1.1.5 Комплекс Вожен 5

Одним із представників закордонних легких дистанційно керованих машин для розмінування є комплекс Вожен 5, що виготовляється фірмовою компанією WAY Industries. Цей пристрій призначений для механічного знищення протипіхотних та протитанкових мін, а також для виконання завдань із протидії саморобним вибуховим пристроям на великих забруднених територіях. Платформа забезпечує дистанційне керування на відстані до 5000 м та має вибуховість, еквівалентну 9 кг тротилу, а змінні робочі інструменти — ціповий барабан або фрезерний барабан — ефективно очищати різні типи місцевості [13]. Платформа оснащена турбодизельним двигуном Deutz BF 6L914 потужністю 110 кВт (147 к.с.) з крутним моментом 550 Нм, має загальну масу близько 6983 кг і ширину очищення 2655 мм [14]. Керування всіма механізмами

					PE21.469375.001 ПЗ	Лис
						9
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

запускається оператором за допомогою спеціального переносного пульта керування з клавіатурою та джойстиком [15]. Система керування Vožena 5 є повністю закритою та реалізована на базі власного програмного забезпечення виробника без підтримки відкритих протоколів або цифрових інтерфейсів для інтеграції сторонніх компонентів. Платформа використовує двигун внутрішнього згоряння без електричного приводу, що обмежує гнучкість керування з гібридними рішеннями. Зовнішній вигляд платформи зображено на малюнку 1.5.



Рисунок 1.5 — Зовнішній вигляд комплексу Vožena 5

1.1.6 Дистанційно керована система Germina URCM-3000

Одним із найновіших представників українських машин для розмінування є дистанційно керована система Germina URCM-3000, розроблена «Краматорським заводом важкого верстатобудування» Донецької області у 2025 році. Машина, призначена для очищення території від протипіхотних та протитранспортних мін, має висотність до 9 кг тротилу та здатна працювати в будь-яку пору року за температури від -20°C до +45°C з можливістю безперервної роботи протягом 10 годин. Машина оснащена комплексом спеціалізованих робочих органів, включаючи ланцюговий механізм, фрезу, маніпулятор та багатофункціональний ківш для переміщення підстави, а понад 60% її

					РЕ21.469375.001 ПЗ	Лис
						10
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

компонентів є українським виробництвом. Продуктивність машини становить до 5 гектарів за робочу зміну, а вартість у базовій комплектації становить близько 500 тис. євро, що в рази дешевше за іноземні аналоги. При зануренні робочого органу з підстави на 5 сантиметрів машина проходить 100-метрову ділянку за півтори хвилини, забезпечуючи ширину проходу 2,7 метра [16]. Система керування Germina URCM-3000 є закритою та реалізованою виробником без підтримки відкритих протоколів інтеграції, що унеможливорює самостійну адаптацію модуля керування під альтернативні силові установки. Зовнішній вигляд машини зображено на малюнку 1.6.



Рисунок 1.6 — Зовнішній вигляд дистанційно керованої системи Germina URCM-3000

1.1.7 Узагальнення та висновки

На основі аналізу вищезазначених рішень можна констатувати, що існуючі платформи та модулі керування реалізують лише частину функцій, що є для повноцінної гібридної системи дистанційного керування машиною для розмінування. Одні платформи, як-от КНРО «Змій» та UNEX UGV, забезпечують надійне дистанційне керування та високу вибуховість, однак мають повністю закриту архітектурну систему керування без можливості інтеграції сторонніх компонентів або альтернативних силових установок. Інші — як THEMIS від Milrem Robotics та MB-10 — володіють гібридною силовою

					РЕ21.469375.001 ПЗ	Лис
						11
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

установкою та модульною конструкцією, однак є дорогими комерційними продуктами з власними протоколами керування, що неможливе їх відтворення або адаптацію в польових умовах. Спеціалізовані машини розмінування, такі як Bozena 5 та Germina URCM-3000, орієнтовані на двигун внутрішнього згоряння без електричного приводу, що обмежує гнучкість керування та не дозволяє реалізувати єдиний уніфікований модуль управління гібридною платформою. Єдиним функціональним близьким рішенням на українському ринку є UGV Kit від 2UxV, який використовує відкриту прошивку ArduPilot та підтримує PWM-керування електродвигунами, однак не містить вбудованих засобів керування ДВЗ та релейних виходів для допоміжних виконавчих механізмів в єдиному корпусі.

Розроблений модуль має на меті поєднати переваги всіх зазначених підходів: використання відкритої прошивки ArduPilot Rover як центрального керуючого вузла, безпосередньо PWM-керування контролерами електродвигунів безпроміжної обробки сигналів, релейне керування двигуном внутрішнього згоряння та допоміжними виконавчими механізмами, а також модульну функцію з можливістю подальшого розширення функціоналу. Такий підхід забезпечує високу надійність, універсальність, відкритість архітектури та економічну доцільність у порівнянні з існуючими аналогами.

					РЕ21.469375.001 ПЗ	Лис
						12
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

2 РОЗРОБЛЕННЯ СТРУКТУРНОЇ ТА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ

2.1 Призначення та опис схеми

Розроблена система представляє собою електронний модуль, призначений для дистанційного керування гібридною робочою платформою для розмінування із забезпеченням безпечного виконання завдань без участі оператора в небезпечній зоні. Основна ідея полягає в об'єднанні керування електричними приводами та двигуном внутрішнього згоряння в єдиній системі дистанційного керування на базі політного контролера з відкритою прошивкою. Модуль не лише забезпечує передачу керуючих сигналів до виконавчих механізмів платформи, а й дозволяє контролювати стан системи через телеметричний протокол, тим самим підвищуючи загальний рівень безпеки та контрольованості машини розмінування.

Принцип дії системи базується на формуванні політним контролером керуючих ШІМ-сигналів, які іноді передаються на контролери безколекторних електродвигунів без проміжної мікроконтролерної обробки. Контролер працює в режимі диференційного керування, де кожна сторона платформи керується виділеним ШІМ-каналом: значення 1000 мкс відповідає повному ходу назад, 1500 мкс — нейтральному положенню, 2000 мкс — повному ходу вперед. Контролери електродвигунів сприймають стандартний RC PWM-напрямок сигналу, що забезпечує мінімальну затримку між командою оператора та реакцією платформи. Для керування двигуном внутрішнього згоряння та допоміжними виконавчими механізмами використовується шестиканальний релейний модуль, підключений до виходів GPIO політного контролера та живлення від окремої лінії електропостачання.

Система виконує кілька важливих завдань. По-перше, вона забезпечує пряме ШІМ-керування двома контролерами безколекторних електродвигунів для реалізації руху платформи вперед, назад та здійснення поворотів у режимі диференційного керування. По-друге, збереження дистанційного керування двигуном внутрішнього згоряння через шість релейних каналів, які забезпечують такі функції: запуск стартера, керування запалюванням, глушіння

					РЕ21.469375.001 ПЗ	Лис
						13
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

двигуна, керування зчепленням та керування подачею газу. По-третє, система забезпечує двосторонній обмін даними між пультом оператора та платформою через телеметричний протокол, що дозволяє передавати команди керування та отримувати інформацію про стан системи в режимі реального часу. без цієї системи підтримується гальванічна розв'язка між силовими колами ДВЗ та чутливою електронікою політного контролера за допомогою використання релейних модулів, що захищає керуючу електроніку від імпульсних перешкод, які відкриваються під час роботи системи запалювання.

Область застосування даного модуля є досить широкою. Він може бути використаний у гуманітарному розмінуванні для очищення постконфліктних територій від протипіхотних мін та вибухонебезпечних об'єктів. Також він підходить для військово-інженерних операцій, де необхідне дистанційне виявлення та знешкодження мін в умовах бойових дій. Модуль може бути застосований в аварійно-рятувальних роботах у зонах техногенних катастроф, де присутність людини є небезпечною. Завдяки модульній архітектурі та використанню відкритої прошивки система може бути адаптована для будь-яких промислових оброблених платформ із гібридними силовими установками.

Загальна архітектура модуля включає п'ять основних функціональних блоків. Першим є блок живлення, який забезпечує роздільне електропостачання: основна напруга подається на політний контролер, а лінія крему живить релейний модуль керування ДВЗ. Іншим — блок керування, реалізований на базі політного контролера із відкритою прошивкою, який відповідає для формування ШІМ-сигналів, обробку команди оператора та управління релейними виходами. Третій є блок приводу, що складається з двох контролерів безколекторних електродвигунів, які підтримують ШІМ-сигнали разом із політним контролером та забезпечують рух платформи. Четвертий блок — релейний модуль керування ДВЗ, який містить шість каналів для дистанційного керування стартером, запалюванням, глушінням, зчепленням та подачею газу. П'ятим є блок зв'язку, який забезпечує двосторонній обмін даними між оператором та платформою через телеметричний протокол. Усі ці блоки взаємодіють між собою для досягнення головної мети — забезпечення надійного, безпечного та

					РЕ21.469375.001 ПЗ	Лис
						14
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

ефективного дистанційного керування гібридною платформою для розмінування в умовах підвищених механічних навантажень, вібрацій та електромагнітних завад.

2.2 Обґрунтування структурної схеми пристрою

Структурна схема розробленого модуля дистанційного керування гібридною платформою для розмінування побудована за принципом функціонального розділення окремих блоків з чітко визначеними завданнями та роздільним електроживленням. Такий підхід забезпечує надійність, завадостійкість та безпеку роботи системи в умовах підвищених механічних навантажень та електромагнітних завад. Структурну схему модуля наведено на малюнку 2.1.



Рисунок 2.1 — Структурна схема

Центральним елементом системи є блок автопілота, який отримує живлення від джерела напруги 6–36 В. Автопілот виконує функцію головного керуючого вузла системи: після команди від оператора, обробляє їх та формує відповідні керуючі сигнали. На виході автопілот генерує три типи сигналів. Перший — PWM-сигнали, які подаються на контролери безколекторних електродвигунів для керування рухом платформи в режимі диференційного керування. Другий — сигнали для підключення периферійних пристроїв, що

забезпечують можливість розширення функціональності системи за допомогою телеметрії, GPS-навігації або відеоспостереження. Третій — логічні сигнали керування, які передаються на блок оптичної розв'язки для подальшого керування ДВЗ та допоміжними механізмами.

Блок оптичної розв'язки є важливим елементом структурної схеми, що забезпечує повну гальванічну ізоляцію між чутливою електронікою автопілота та силовими колами приводу двигуна внутрішнього згоряння. Під час роботи системи запалення ДВЗ виникають значні імпульсні перешкоди, які можуть пошкодити політний контролер або спричинити гальмування системи керування. Оптична розв'язка передає керуючий сигнал за допомогою світлового потоку, повністю виключаючи електричний зв'язок між вхідним та вихідним колами, що гарантує захист автопілота від зворотних перешкод силового кола.

Після оптичної розв'язки сигнал надходить на транзисторний каскад, який живе від окремого джерела напругою 12 В. Можливість застосування транзисторного каскаду обумовлена тим, що вихідний сигнал оптичної розв'язки має недостатню потужність для одночасного керування котушками реле. Транзисторний каскад виконує функцію підсилювача потужності, перетворюючи слабкий логічний сигнал у струм, достатній для надійного спрацьовування електромеханічних реле. Окреме живлення 12 В цьому каскаді додатково ізолює силову частину від керуючої, що забезпечує завадостійкість та надійність у всій системі.

Останнім елементом ланцюга є релейний модуль, який разом комутує силові кола двигуна внутрішнього згоряння та допоміжних механізмів платформи. Шість релейних каналів забезпечують дистанційне виконання таких функцій: запуск стартера, керування запалюванням, глушіння двигуна, керування зчепленням (двома каналами) та керування подачею газу. Застосування електромеханічних реле у вихідному каскаді обумовлено необхідністю комутації значних струмів, характерних для силових кіл ДВЗ.

					<i>РЕ21.469375.001 ПЗ</i>	Лис
						16
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

2.3 Вибір електронних компонентів

2.3.1 Політний контролер: принцип роботи та вибір типу FC

Політний контролер (FC — Flight Controller) виконує ключову функцію в загальній структурі системи дистанційного керування гібридною платформою для розмінування, забезпечення формування та передачі ШІМ-сигналів керування на контролери двигунів ходу та допоміжні виконавчі механізми. Основна задача FC забезпечує стабільну та швидку обробку команд оператора, формування керуючих сигналів і забезпечення надійної роботи в усій системі в умовах підвищених механічних навантажень та електромагнітних завдань.

Для визначення оптимального політного контролера, який відповідає вимогам розроблюваної системи, був проведений порівняльний аналіз декількох моделей, які представлені на сучасному та підтримуються на ринку програмного забезпечення ArduPilot. Використання FC дозволяє реалізувати централізовану систему дистанційного керування без необхідності застосування окремого мікроконтролера для обробки ШІМ-сигналів.

Політний контролер підключається до системи радіокерування та після команди від оператора. Після обробки отриманих даних FC формує PWM-сигнали відповідної тривалості, які перейшли на контролери двигунів ходу. Зміна параметрів PWM-сигналів дозволяє регулювати швидкість обертання електродвигунів, напрям руху та маневрування платформи. без цього FC може керувати релейними модулями запуску двигуна внутрішнього згоряння та допоміжними виконавчими механізмами.

При виборі політного контролера ключовими факторами є:

- кількість ШІМ-виходів для підключення контролерів двигунів та допоміжних систем;
- продуктивність процесора та швидкість обробки сигналів; – сумісність із сучасними системами радіокерування та телеметрії;
- підтримка програмного забезпечення ArduPilot;
- стійкість до електромагнітних завад і вібрацій;
- наявність додаткових інтерфейсів для підключення GPS, телеметрії та периферійних модулів;

					PE21.469375.001 ПЗ	Лис
						17
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

– доступність компонентів та простота інтеграції в систему.

1) Matek F405-TE: перевагами цієї моделі є використання високопродуктивного мікроконтролера STM32F405, який забезпечує швидку обробку сигналів та стабільну роботу системи керування в режимі реального часу. Політний контролер підтримує велику кількість ШІМ-виходів, що дозволяє одночасно керувати контролерами двигунів ходу, релейними модулями та допоміжними виконавчими механізмами. Завдяки цій широко використовуваній моделі в безпілотних системах, автоматизованих платформах та FPV-дронах.

Іншою перевагою є підтримка сучасної програмної платформи ArduPilot, що забезпечує гнучкість налаштувань та можливість інтеграції телеметрії, GPS-модулів і додаткових периферійних пристроїв. Також важливою особливістю є сумісність із покращеними типами систем радіокерування та підтримка сучасних протоколів передачі даних.

Ця модель FC характеризується компактними габаритами, низьким енергоспоживанням та високою швидкістю формування PWM-сигналів, що є для стабільного керування платформою розмінування. Крім цього контролер має вбудовані датчики стабілізації та інтерфейси для підключення зовнішніх модулів телеметрії та навігації.

Недоліком цієї моделі є обмежений обсяг оперативної пам'яті та Flash-пам'яті процесора STM32F405, що може створювати обмеження при одночасному використанні великої кількості периферійних модулів. Також при роботі з потужними електродвигунами та системою запалювання ДВЗ можна виникати потреба в додатковому захисті від електромагнітних заводів. Зовнішній вигляд політного контролера зображено на рисунку 2.2 [17].

					<i>РЕ21.469375.001 ПЗ</i>	Лис
						18
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

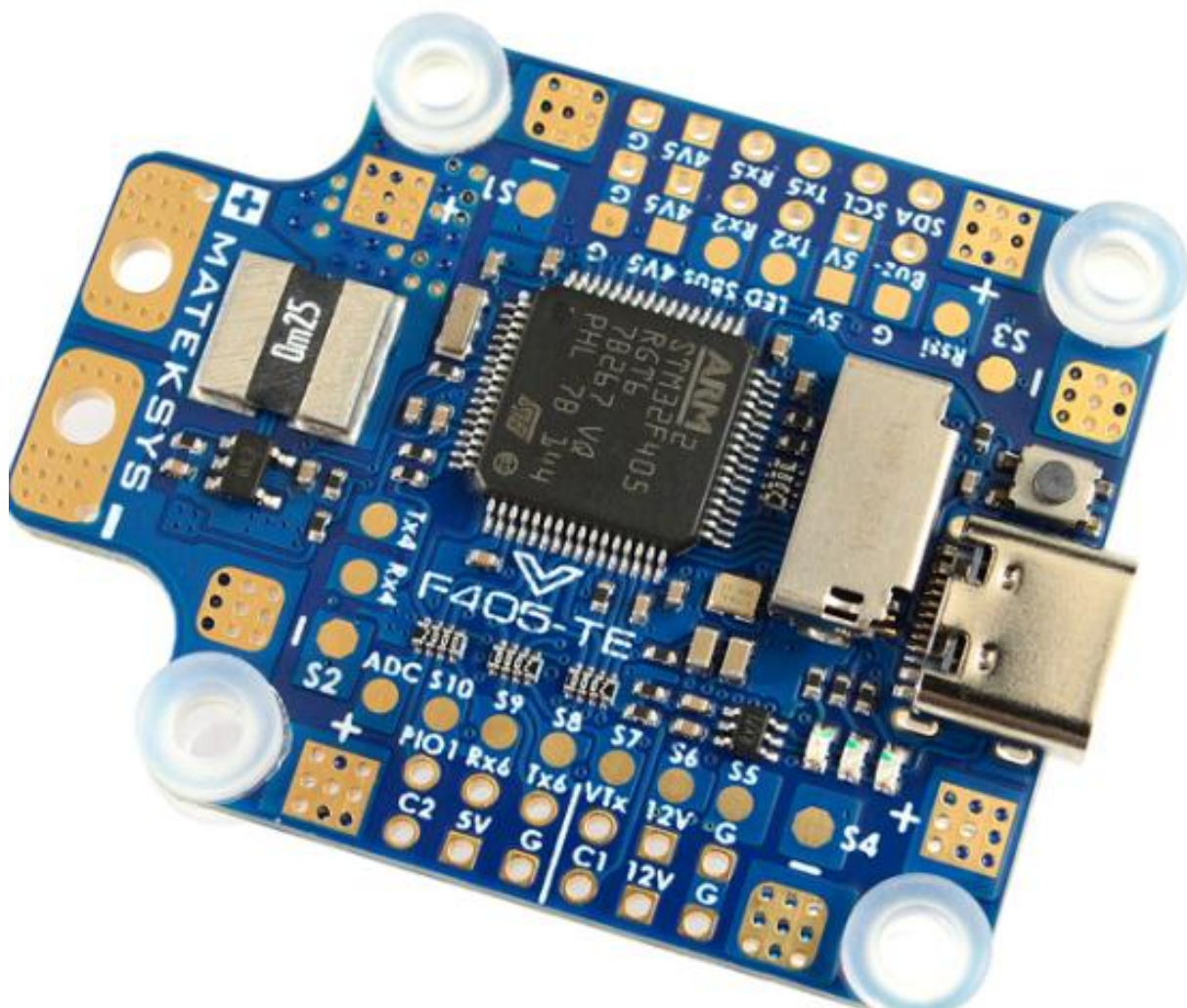


Рисунок 2.2 — Політний контролер Matek F405-TE

2) Matek H743-SLIM-V4: перевагами цієї моделі є використання високо-продуктивного мікроконтролера STM32H743, що забезпечує високу швидкість обробки сигналів і стабільну роботу системи управління в режимі реального часу. Завдяки потужному процесору ця модель здатна одночасно працювати з великою кількістю периферійних модулів, телеметрією та системами навігації. Політний контролер підтримує значну кількість ШІМ-виходів, що дозволяє керувати контролерами двигунів ходу, релейними модулями та допоміжними виконавчими механізмами.

Іншою перевагою є підтримка сучасної програмної платформи ArduPilot, що забезпечує широкі можливості налаштування та інтеграції різних систем керування. Також важливою особливістю є підтримка сучасних інтерфейсів зв'язку, зокрема UART, CAN, I2C та SPI, що дозволяє підключати GPS-модулі, цифрову телеметрію, датчики та системи передачі відеосигналу.

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

PE21.469375.001 ПЗ

Лис
19

Ця модель FC характеризується високою стабільністю роботи, точністю формування ШІМ-сигналів та підвищеною стійкістю до електромагнітних завад. Завдяки цьому контролер може використовуватись у складі створених платформ спеціального призначення, які працюють в умовах значних механічних навантажень та вібрацій. Крім цього, контролер має компактні габарити та оптимізоване енергоспоживання.

Недоліком цієї моделі є вища вартість у порівнянні з політними контролерами середнього класу, а також потрібна більша настройка програмного забезпечення при використанні великої кількості периферійних пристроїв. При роботі з потужними системами живлення та двигунами внутрішнього згоряння також необхідно приділити увагу додатковому захисту від імпульсних завад та стабілізації живлення. Зовнішній вигляд політного контролера зображено на рисунку 2.3 [18].



Рисунок 2.3 — Політний контролер Matek H743-SLIM-V4

					<i>PE21.469375.001 ПЗ</i>	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		20

2.3.2 Керування релейними модулями з оптичною розв'язкою: варіанти реалізації та вибір оптимального

Керування релейними модулями з оптичною розв'язкою є важливою складовою системою дистанційного керування роботизованими платформами та електронними пристроями, які працюють в умовах підвищених електромагнітних навантажень і значних комутаційних навантажень. Використання оптичної розв'язки дозволяє забезпечити електричну ізоляцію між низьковольтною частиною керування та силовими колами виконавчих механізмів, що значно надійніше та безпечніше для роботи системи.

Основна функція цього блоку відбувається у прийманні керуючого сигналу від політного контролера та подальшого керування релейними модулями через оптронну розв'язку. У випадку подачі керуючого сигналу активується оптрон, який передає сигнал на транзисторний каскад, який у своєму режимі забезпечує комутаційне реле. Це дозволяє дистанційно керувати двигуном внутрішнього згоряння, електромагнітними клапанами, освітленням, актуаторами та іншими допоміжними системами платформи.

Таким чином, блок керування релейними модулями з оптичною розв'язкою є проміжною ланкою між системою цифрового керування та силовими виконавчими механізмами. Він забезпечує захист поліконтролера від імпульсних перенапруг, паразитних струмів та електромагнітних перешкод, які можуть виникати під час комутації індуктивних навантажень. У структурі пристрою цей блок тісно взаємодіє з політним контролером, транзисторними каскадами, релейними модулями та системою живлення.

При виборі апаратного рішення для реалізації керування релейними модулями були враховані такі технічні вимоги: – сумісність із логічними рівнями політного контролера (3,3–5 В); – наявність гальванічної розв'язки між силовою та керуючою частинами; – мінімальна підтримка передачі сигналу; – стійкість до електромагнітних завад та імпульсних перенапруг; – можливість керування релейними модулями різної потужності; – простота інтеграції в систему дистанційного керування; – надійність роботи в умовах вібрацій та механічних навантажень.

					РЕ21.469375.001 ПЗ	Лис
						21
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

У дослідженні було виявлено найменшу кількість розширених варіантів реалізації керування релейними модулями з оптичною розв'язкою. Кожен із варіантів має власні технічні особливості, переваги та недоліки, що дозволяють обрати оптимальні рішення для використання в складі гібридної платформи розмінування.

1) Оптична розв'язка із транзисторним ключем на базі 2N2222: Цей варіант є одним із розширених способів керування релейними модулями від політного контролера. Реалізується схема за допомогою оптрона PC817 [19], яка забезпечує гальванічну розв'язку між керуючою частиною та силовим колом, а також транзисторного ключа на базі 2N2222 [20], що використовується для керування котушкою реле.

Принцип роботи схеми виконується в тому, що керуючий сигнал надходить на вхід оптрона PC817. Після активації внутрішнього світлодіода оптрона відкривається його фототранзистор, який подає сигнал на базу транзистора 2N2222. У результаті транзистор відкривається і через котушку реле починає протікати струм. Після спрацювання реле його контакти можуть комутувати зовнішні навантаження або додаткові виконавчі механізми. Схематична реалізація оптичної розв'язки із транзисторним ключем на базі 2N2222 зображено на малюнку 2.4.

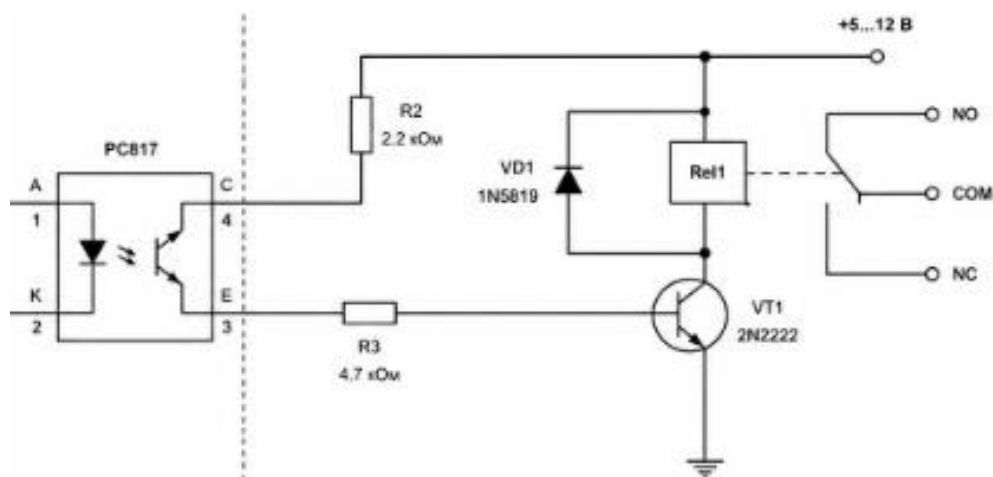


Рисунок 2.4 — Схема оптичної розв'язки із транзисторним ключем на базі 2N2222

Перевагами цієї схеми є наявність гальванічної розв'язки між політним контролером і релейною частиною, захист керуючої електроніки від

					РЕ21.469375.001 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		22

імпульсних перенапруг і завад, проста та доступна елементна база, сумісність з логічними рівнями 3,3–5 В, а також можливість використання окремого живлення релейної частини.

Недоліками є обмеження по струму навантаження транзистора 2N2222, менша ефективність при роботі з потужними реле в порівнянні з MOSFET-ключами, установка захисного діода паралельно котушці реле, наявність додаткових компонентів у схемі та потреба в правильному підборі номіналів резисторів та режимів роботи транзистора.

Цей варіант є доцільним для керування малопотужними та середньопотужними релейними модулями, де не вимагаються великі струми комутації. Схема забезпечує базовий рівень електричного захисту та може використовуватися в системах дистанційного керування з помірними навантаженнями.

2) Оптична розв'язка із MOSFET-ключем на базі IRLZ24N: варіант є більш удосконаленою реалізацією керування релейними модулями в цьому порівнянні зі схемою на біполярному транзисторі 2N2222. Схема реалізується за допомогою оптрона PC817, який забезпечує гальванічну розв'язку між політним контролером та силовою частиною, а також MOSFET-транзистора IRLZ24N [21], який використовується як силовий ключ для керування реле або іншими потужними навантаженнями.

Принцип роботи схеми виконується в тому, що керуючий сигнал від політного контролера подається на вхід оптрона PC817. Після активації внутрішнього світлодіода оптрона відкривається його фототранзистор, який формує сигнал керування для закриття MOSFET-транзистора IRLZ24N. Після відкриття MOSFET через навантаження почати протікати струм, в результаті чого відбувається спрацювання реле або активація іншого виконавчого механізму.

На основі схеми з транзистором 2N2222, MOSFET IRLZ24N має значно менший опір відкритого каналу та здатний працювати з більшими потоками навантаження. Це дозволяє використовувати цю схему для приводу потужними релейними модулями, електромагнітними клапанами, двигунами та іншими силовими пристроями. Схематична реалізація оптичної розв'язки із MOSFET-ключем на базі IRLZ24N зображено на малюнку 2.5.

					PE21.469375.001 ПЗ	Лис
						23
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

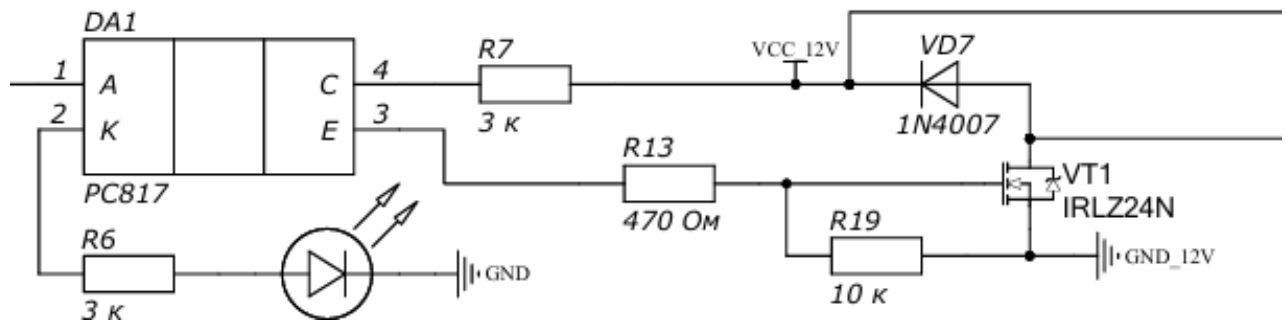


Рисунок 2.5 — Схема оптичної розв'язки із MOSFET-ключем на базі IRLZ24N

Перевагами цієї схеми є наявність гальванічної розв'язки між політним контролером та силовою частиною, можливість керування потужними реле та силовими навантаженнями, менш втрачена потужність у порівнянні з біполярними транзисторами, висока швидкість комутації, низький нагрів MOSFET при роботі з великими струмами, сумісність із логічними рівнями 3,3–5 В, підвищена стійкість до імпульсних завад та перевантаження, а також можливість роботи з потужними системами живлення 12 В і більше.

Недоліками є більш складна схема в порівнянні з транзисторним ключем на 2N2222, вища вартість компонентів, потреба у правильному підборі MOSFET-транзистора, встановлення захисного діода для індуктивних навантажень та потреба у правильному розведенні силових ланцюгів плати.

2.3.3 Принцип керування ходом машини розмінування

Керування ходом машини розмінування виробляють за допомогою ШІМ-сигналів, які формуються політним контролером та передаються на контролери електродвигунів ходу. Такий підхід дозволяє реалізувати плавне регулювання швидкості руху, зміну напрямку обертання двигунів та маневрування платформи.

У складі системи використовують контролери безколекторних електродвигунів, які забезпечують перетворення ШІМ-сигналів у керуючі сигнали для силових ключів електроприводу. Контролер двигунів типу YS-BLD80AT є двоканальним та використовується для керування двигунами ходової платформи. Зовнішній вигляд контролера зображено на рисунку 2.6 [22].

					PE21.469375.001 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		24



Рисунок 2.6 — Контролер двигунів ходу YS-BLD80AT

Принцип роботи системи відбувається в тому, що політний контролер формує ШІМ-сигнали певної тривалості імпульсу залежно від команди оператора. Значення 1000 мкс відповідає повному ходу назад, 1500 мкс — нейтральному положенню, 2000 мкс — повному ходу вперед. Контролер двигунів аналізує ці сигнали та змінює параметри живлення безколекторних електродвигунів відповідно до отриманих команд. Зміна ширини ШІМ-імпульсів дозволяє регулювати швидкість обертання двигунів, а також реалізувати рух вперед, назад і повороти розмінування машини.

Для реалізації диференціального керування використовують окреме регулювання лівого та правого двигунів ходу. При однаковій швидкості обертання обох двигунів платформа рухається прямолінійно. Зміна швидкості одного з двигунів дозволяє уникнути повороту, а подача протилежних сигналів на лівий та правий двигуни забезпечує розворот платформи на місці. Такий принцип керування широко використовується в автоматизованих платформах та безпілотних високих наземних системах, після чого забезпечується маневреність на обмеженому просторі.

Перевагами PWM-керування ходом машини є плавне регулювання швидкості руху, висока точність керування електроприводами, можливість реалізації диференційного керування, висока швидкість системи, сумісність із сучасними політними контролерами та системами радіокерування, а також можливість інтеграції автоматичних та напівавтонних режимів руху.

Недоліками такого підходу є залежність стабільності роботи від якості ШІМ-сигналу, необхідні правильні налаштування контролерів двигунів та можливість виникнення електромагнітних зарядів при роботі потужних електроприводів. Для мінімізації впливу на завдання в системі фільтрація живлення, екранування сигнальних ліній та оптична розв'язка допоміжних виконавчих механізмів.

2.3.4 Обґрунтування вибору оптимального варіанту

Підсумок огляду кожного FC на рисунку 2.7.

Характеристика	Matek F405-TE	Matek H743-SLIM-V4
Тип мікроконтролера	STM32F405	STM32H743
Продуктивність процесора	Висока	Дуже висока
Швидкодія обробки сигналів	Достатня для більшості задач	Вища, оптимальна для складних систем
Кількість PWM-виходів	11	13
Підтримка телеметрії	Так	Так
Підтримка GPS та периферії	Так	Розширена підтримка
Підтримка ArduPilot	Так	Так
Підтримка прошивки ArduPilot Ground Rover	Так	Так
Сумісність із Mission Planner	Так	Так
Інтерфейси підключення	UART, I2C, SPI	UART, CAN, I2C, SPI
Стійкість до навантажень	Висока	Дуже висока
Робота з великою кількістю модулів	Обмежена при складних конфігураціях	Оптимізована для великої кількості модулів
Енергоспоживання	Нижче	Дешо вище
Вартість	Нижча	Вища
Складність налаштування	Середня	Вища
Основне застосування	FPV-дрони, базові роботизовані системи	Професійні БПЛА та спеціалізовані платформи

Рисунок 2.7 – Табличне порівняння кожного FC

Після проведення порівняльного аналізу політних контролерів, схеми керування релейними модулями та контролерами електродвигунів були визначені оптимальні компоненти для реалізації системи дистанційного керування гібридною платформою для розмінування.

Порівняння політних контролерів Matek F405-TE та Matek H743-SLIM-V4 показало, що обидві моделі мають достатні технічні характеристики для використання в складі системи дистанційного керування автоматизованими платформами. Обидва контролери підтримують прошивку ArduPilot, роботу з телеметрією, GPS-модулями та сучасними системами радіокерування. Matek

F405-TE є більш доступним та енергоефективним рішенням, яке забезпечує достатню продуктивність для реалізації базових та середніх за надійністю систем керування. Цей контролер має достатню кількість ШІМ-виходів, підтримує основні інтерфейси підключення та може ефективно використовуватися у FPV-дронах і роботизованих платформах із невеликою кількістю периферійних модулів. Крім того, Matek H743-SLIM-V4 має значну вищу продуктивність, кращу швидкість обробки сигналів і розширені можливості підключення периферійних пристроїв. Наявність додаткових інтерфейсів, підтримка більшої кількості PWM-виходів і підвищена стабільність роботи дозволяють використовувати цей FC у складних системах управління спеціалізованими платформами. Контролер краще підходить для роботи з великою кількістю телеметричних модулів, систем навігації, релейних блоків та допоміжного обладнання. Для розмінування гібридної платформи особливою є стабільність роботи, висока швидкість, можливість підключення додаткових модулів та надійність в умовах вібрацій та електромагнітних заводів. Найбільш оптимальним вибором для цього проєкту є Matek H743-SLIM-V4, який забезпечує більшу запасну продуктивність, кращу масштабованість системи та дозволяє реалізувати подальше розширення функціональності платформи без необхідності заміни основного обладнання.

Порівняння керування релейними модулями показало, що обидва схеми схематичних варіантів забезпечують гальванічну розв'язку між політним контролером та силовою частиною системи. Схема на базі біполярного транзистора 2N2222 характеризується простою реалізацією, низькою вартістю та достатньою ефективністю при роботі з малопотужними реле. Проте її можливості обмежуються допустимим струмом біполярного транзистора та більшими втратами потужності при роботі з високими навантаженнями. Схема на базі MOSFET-транзистора IRLZ24N є більш ефективним рішенням для системи керування гібридною платформою розмінування. Використання MOSFET дозволяє зменшити нагрів елементів і забезпечує енергоефективність системи. Крім цієї схеми, ця схема має кращу швидкість і забезпечує стабільну роботу при

					<i>PE21.469375.001 ПЗ</i>	Лис
						27
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

керуванні потужними релейними модулями й іншими виконавчими механізмами.

Для керування ходом платформи було обрано двоканальний контролер безколекторних електродвигунів YS-BLD80AT. Вибір цього контролера обумовлений ключовими факторами. По-перше, контролер підтримує стандартний RC PWM-вхід із зоною сигналу 1000–2000 мкс, що забезпечує пряму сумісність із виходами політного контролера Matek H743-SLIM-V4 без необхідності додаткового перетворення сигналів. По-друге, двоканальна конструкція дозволяє керувати лівим та правим двигунами ходу від одного модуля, що спрощує загальну архітектуру системи та зменшує кількість з'єднань. По-третє, контролер розрахований на роботу з потужними безколекторними електродвигунами, що відповідає вимогам привідної системи платформи розмінування. в цьому контролері вбудований захист від перевантаження та перегріву, що гарантує надійність роботи системи в складних умовах експлуатації.

Таким чином, для реалізації системи дистанційного керування гібридною платформою для розмінування вибрано політний контролер Matek H743-SLIM-V4 як центральний керуючий вузол, схему оптичної розв'язки з MOSFET-ключем на базі IRLZ24N для керування релейними модулями ДВЗ та двоканальний контролер безколекторних електродвигунів YS-BLD80AT для керування ходом платформи. З'єднання цих компонентів забезпечує високу надійність, достатню швидкість, стійкість до електромагнітних завад і можливість роботи з потужними виконавчими механізмами в складних умовах експлуатації.

2.4 Схема електрична принципова

На рисунку 2.8 зображено електричну принципову схему електронного модуля керування безпілотною системою, який виконує функцію передачі керуючих PWM-сигналів від політного контролера до контролера двигунів ходу YS-BLD80AT та забезпечує подачу GPIO-сигналів для керування релейними модулями через оптичну розв'язку і MOSFET-транзистори. Схема забезпечує

					PE21.469375.001 ПЗ	Лис
						28
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

PCB Diagram sys. keruv. razm. P4xP4b
 Розроб. №
 Підп. Дата
 Інв. № опр.
 Зам. інв. №
 Підп. Дата

PE.21.469375.001.E3

Підп. Застосування

Коло	Конт.
VCC 6-36V	1
GND	2

X2
V760PW

Коло	Конт.
Vin 6-36V	1
GND	2
S1	3
S2	4
S3	5
S4	6
S5	7
S6	8
S7	9
S8	10

FC H743 SLIM V4

Коло	Конт.
PWM Left	1
PWM Right	2
GND	3

X3

Коло	Конт.
VCC 12V	1
GND	2

X4
V760PW

Коло	Конт.
SV	1
GND	2
TX1	3
RX1	4
TX2	5
RX2	6
SCL	7
SDA	8
SBUS	9

X5
Periphery

Конт.	Коло
1	R1+
2	R1-
3	R2+
4	R2-
5	R3+
6	R3-
7	R4+
8	R4-
9	R5+
10	R5-
11	R6+
12	R6-

X6
Relay

Конт.	Коло
1	1
2	2
3	3
4	4
5	5
6	6
7	7
8	8
9	9
10	10
11	11
12	12

K7
FC H743 SLIM V4

Зм. Арк.	№ докум.	Підп.	Дата
Розроб.	Марковець		
Перевір.	Вемеха		
Т. контр.			
Н. контр.			
Затв.			

PE.21.469375.001.E3

Електронний модуль Керування безпілотною системою

Схема електрична принципова

Літ.	Маса	Масштаб

Файл:Schematic_SchDoc

Копіював

Формат

Важливою конструктивною особливістю модуля є спосіб підключення сигнальних та силових ліній. На контактних майданчиках роз'ємів X1, X3, X5, X6 та X7 проводиться пайка і є звичайною до друкованої плати, а їх протилежні кінці підключаються до роз'ємів, встановлених на корпусі пристрою. Такий підхід забезпечує значну вищу механічну міцність разом зі стандартними роз'ємними з'єднаннями на платі, що є критично класом для роботи модуля в умовах постійних вібрацій та механічних навантажень, характерних для розмінування машини. Роз'єми живлення X2 та X4 типу XT60PW залишаються роз'ємними батареями, потім потребують можливості оперативного від'єднання акумуляторних батарей.

Основою системи є політний контролер Matek H743 SLIM V4, який виконує функцію центрального керуючого вузла та формує всі необхідні сигнали

для роботи модуля. Підключення політного контролера до плати модуля створюється через контактні майданчики X1, до яких западає 10 провідників: вхід живлення Vin 6–36 В, загальний провід GND та вісім сигнальних ліній S1–S8, що є GPIO-виходами політного контролера. Саме через ці виходи контролер передає логічні сигнали керування на шість каналів оптичної розв'язки для подальшого керування релейними модулями.

Живлення політного контролера здійснюється через роз'єм X2 типу XT60PW, який забезпечує подачу постійної напруги в області 6–36 В. Широкий розділ вхідної напруги дозволяє жити контролер від різних типів акумуляторних батарей без необхідності використання додаткових стабілізаторів напруги на вході модуля.

Для підключення периферійних пристроїв передбачено контактні майданчики X5 та X7, які забезпечують доступ до основних інтерфейсів політного контролера. Від кожної групи контактних майданчиків виходять запаєні провідники, які з'єднуються з відповідними роз'ємами на корпусі пристрою. Кожна група містить 9 ліній: живлення 5 В, загальний провід GND, два канали UART (TX1/RX1 та TX2/RX2), шину I2C (SCL та SDA) та вхід SBUS. Наявність двох UART-каналів дозволяє одночасно підключати телеметричний модуль та GPS-приймач. Шина I2C забезпечує можливість підключення додаткових датчиків, таких як компас, барометр або датчик струму. Вхід SBUS використовується для підключення приймача системи радіокерування, через яку надходять команди від пульта оператора. Дублювання периферійних ліній X5 та X7 забезпечує зручність монтажу та дозволяє організувати прохідне підключення периферійних пристроїв.

Передача PWM-сигналів до контролерів безколекторних електродвигунів ходу будується через контактні майданчики X3, з яких виходять три запаєні провідники: PWM Left (керування лівим двигуном), PWM Right (керування правим двигуном) та загальний провід GND. Протилежні кінцеві провідники підключаються до роз'єму на корпусі пристрою, що забезпечує надійне та вібростійке з'єднання з контролером двигунів YS-BLD80AT. PWM-сигнали формуються політним контролером Matek H743 SLIM V4 в режимі ArduPilot

					<i>PE21.469375.001 ПЗ</i>	Лис
						30
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

Rover із функцією Skid Steering та передаються лише на контролер двигунів без будь-якої проміжної обробки. Тривалість імпульсу 1000 мкс відповідає повному ходу назад, 1500 мкс — нейтральному положенню, 2000 мкс — повному ходу вперед [23]. Відсутність проміжних каскадів обробки в тракті ШІМ-сигналів забезпечує мінімальну затримку між командою оператора та реакцією електроприводів платформи.

Блок оптичної розв'язки є ключовим елементом захисту політного контролера від імпульсних перешкод силового кола та складається з шести ідентичних каналів, побудованих на базі оптронів DA1–DA6 типу PC817. Кожен канал оптичної розв'язки працює за однаковим принципом. GPIO-сигнал від політного контролера через відповідний струмообмежувальний резистор R1–R6 номіналом 3 кОм надходить на анод внутрішнього світлодіода оптрона PC817. Резистор R1–R6 забезпечує функцію обмеження струму через світлодіод оптрона безпечного рівня, що запобігає його пошкодженню та забезпечує надійну яскравість випромінювання. При подачі логічного сигналу високого рівня на вхід оптрона його внутрішній світлодіод випромінює інфрачервоне світло, яке відкривається на фототранзисторі, розташованому в тому ж корпусі, але електрично повністю ізольований від входу кола. Фототранзистор відкривається під дією світлового потоку та формує сигнал керування для наступного каскаду — MOSFET-транзистора.

Паралельно виходу кожного оптрона встановлено індикаторний світлодіод VD1–VD6 з послідовним струмообмежувальним резистором R7–R12 номіналом 470 Ом. Індикаторні світлодіоди забезпечують контроль стану кожного каналу керування, що значно покращує діагностику системи та пошук несправностей як під час налагодження, так і в процесі експлуатації модуля.

Застосування оптронів PC817 забезпечує повну гальванічну ізоляцію між низьковольтною керуючою частиною системи (політний контролер, напруга 3,3–5 В) та силовою частиною (релейні модулі, напруга 12 В). Це критично для захисту чутливої електроніки політного контролера від імпульсних перенапруг, які виявляються під час комутації індуктивних навантажень — котушок

					<i>РЕ21.469375.001 ПЗ</i>	Лис
						31
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

реле, електромагнітних клапанів та системи запалювання двигуна внутрішнього згоряння.

Після проходження сигналу через оптичну розв'язку він надходить на шість MOSFET-транзисторів VT1–VT6 типу IRLZ24N, що забезпечує функцію силових електронних ключів. Кожен транзисторний каскад побудований за ідентичною схемою. Сигнал від фототранзистора оптрона через резистор R13–R18 номіналом 3 кОм подається на затвор MOSFET-транзистора IRLZ24N. Для забезпечення закриття транзистора у відображенні керу надійного сигналу між затвором та витоком встановлено підтягуючий резистор R19–R24 номіналом 10 кОм, який утримує потенціал затвора на рівні загального проводу при посиленні активного сигналу від оптрона. Такий підхід гарантує, що один релейний канал не буде хибно активований при відключенні або перезавантаженні політного контролера.

MOSFET-транзистор IRLZ24N є N-канальним польовим транзистором з логічним рівнем управління, що дозволяє повністю відкрити його при напрузі на затворі 5 В або навіть 3,3 В. Цей транзистор характеризується низьким опором відкритого каналу, що забезпечує мінімальні втрати потужності та незначні нагрівання елементів при комутації струмів, ще більше для спрацювання котушок реле. Стік кожного MOSFET-транзистора підключено до відповідного релейного виходу, а витік з'єднаний із загальним проводом силового кола живлення 12 В.

Живлення транзисторних каскадів та релейних модулів створюється від окремого джерела постійної напруги 12 В через роз'єм X4 типу XT60PW. Окреме живлення силової частини є принципово індивідуальним рішенням, що дозволяє повністю виключити вплив кидків струму, що забезпечує при одночасному спрацюванні кількох реле, на стабільність роботи політного контролера та інших чутливих електронних компонентів.

Для захисту MOSFET-транзисторів від імпульсних перенапруг, які виводяться під час комутації індуктивних навантажень, у схемі передбачено шість захисних діодів VD7–VD12 типу 1N4007 [24]. Кожен діод встановлено паралельно відповідному релейному виходу у зворотному включенні — катодом

					PE21.469375.001 ПЗ	Лис
						32
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

до лінії живлення, анодом до стоку MOSFET-транзистора. При розмиканні кола котушки реле в індуктивності накопичена енергія створює імпульс зворотної ЕРС, який може досягти значення у десятки та всі вольти. Захисний діод шунтує цей імпульс, забезпечуючи безпечний шлях для розряду індуктивності та запобігаючи пробой MOSFET-транзистора. Діоди 1N4007 обрано за рахунок їх високої зворотної напруги (до 1000 В), достатнього прямого струму (до 1 А) і широкої доступності на ринку електронних компонентів.

Виходи MOSFET-транзисторів підключаються до релейних модулів через контактні площадки Х6, з яких виходять дванадцять запаєних провідників — по два (R+, R–) на кожен із шести релейних каналів. Протилежні кінці провідників з'єднуються з роз'ємами на корпусі пристрою, що забезпечує надійне та вібростійке підключення релейних модулів. Шість каналів забезпечують дистанційне виконання таких функцій керування двигуном внутрішнього згоряння та допоміжними механізмами: перший канал (R1) — керування стартером, другий канал (R2) — керування запаленням, третій канал (R3) — глушіння двигуна, четвертий та п'ятий канали (R4, R5) — керування зчепленням, шостий канал (R6) — керування подачею газу. Кожен релейний канал є незалежним, що дозволяє одночасно активувати будь-яку комбінацію виконавчих механізмів відповідно до команди оператора.

Таким чином, повний ланцюг проходження керуючого сигналу виконується у схемі наступним чином. Команда від оператора надходить через систему радіокерування на вхід SBUS поліконтролера Matek H743 SLIM V4. Контролер обробляє команду отримання та формує логічний сигнал на відповідному GPIO-виході (S1–S6). Далі сигнал через струмообмежувальний резистор (R1–R6) подається на вхід оптрона PC817 (DA1–DA6), який забезпечує гальванічну розв'язку та передає сигнал на затвор MOSFET-транзистора IRLZ24N (VT1–VT6). Після відкриття транзистора відбувається комутація котушки реле через контактні майданчики Х6, внаслідок чого реле спрацьовує та активує відповідний виконавчий механізм двигуна внутрішнього згоряння. Паралельно з цим політний контролер формує PWM-сигнали, які через контактні

					PE21.469375.001 ПЗ	Лис
						33
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

площадки Х3 передаються на контролер двигунів ходу YS-BLD80AT для керування рухом платформи.

Роздільне електроживлення (6–36 В для політного контролера через роз'єм Х2 та 12 В для силовій частини через роз'єм Х4) в поєднанні з оптичною розв'язкою на базі PC817, захисними діодами 1N4007 та підтягуючими резисторами на затворах MOSFET-транзисторів створює багаторівневу систему захисту електроніки від перешкод та забезпечує стабільну та безпечну роботу модуля модуля. в складних умовах використання машини розмінування.

					РЕ21.469375.001 ПЗ	Лис
						34
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

3 ПРОЄКТУВАННЯ ЕЛЕКТРОННОГО МОДУЛЯ

3.1 Визначення мінімальної площі друкованої плати

Визначення мінімально необхідної площі друкованої плати є обов'язковим кроком при проєктуванні електронного модуля. Головною задачею цього етапу є раціональне використання монтажного простору, що безпосередньо впливає на габарити готового виробу, витрати матеріалів та собівартість виготовлення.

Зменшення розмірів плати дозволяє отримати компактний пристрій, який легше розмістити у корпусі з обмеженими габаритами. Скорочення довжини провідників між компонентами позитивно впливає на електромагнітну сумісність системи та зменшує паразитні ємності й індуктивності доріжок. Крім того, щільніше розміщення елементів підвищує механічну стійкість плати до вібраційних та ударних навантажень, що є особливо важливим для пристроїв, що експлуатуються у складних польових умовах.

Водночас при мінімізації площі необхідно дотримуватись балансу між щільністю монтажу та можливістю ефективного тепловідведення від силових компонентів, дотриманням мінімальних зазорів між провідниками та зручністю виробництва і подальшого технічного обслуговування. Правильно виконаний розрахунок мінімальної площі дозволяє досягти оптимального співвідношення між технічними характеристиками плати та економічними показниками її виробництва.

Формула для розрахунку мінімальної площі плати:

$$S_{\text{дп}} = \Sigma S_{\text{мг}} + 1,5 \cdot \Sigma S_{\text{сг}} + 2 \cdot \Sigma S_{\text{вг}} + S_{\text{кр}} \quad (3.1)$$

де: $S_{\text{дп}}$ – мінімальна площа друкованої плати; $S_{\text{мг}}$ – площа малогабаритних компонентів; $S_{\text{сг}}$ – площа середньогабаритних компонентів; $S_{\text{вг}}$ – площа великогабаритних компонентів; $S_{\text{кр}}$ – площа кріпильних елементів.

Згідно з технічним завданням плата є двосторонньою, проте для спрощення монтажу та підвищення ремонтпридатності в умовах експлуатації всі компоненти розміщені на одній стороні друкованої плати. ТНТ-компоненти, такі як оптрони, MOSFET-транзистори, роз'єми живлення та контактні

					PE21.469375.001 ПЗ	Лис
						35
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

майданчики для запаювання провідників, встановлюються з верхнього боку плати. Зворотний бік використовується для прокладання провідників та створення полігонів живлення і загального проводу. Такий підхід забезпечує зручність перевіреного контролю, проводить діагностику несправностей та дозволяє за необхідності оперативно замінити пошкоджений компонент у польових умовах.

Результати розрахунку наведені в таблиці 3.1

Таблиця 3.1— Розрахунки площі компонентів плати

	Найменування	Площа (S)	Коефіцієнт (K)	Кількість (N)	Сума
Малогабаритні	Резистори розміру 1206	7,98	1	24	191,52
	Діоди 1N4007	42,93	1	6	257,58
	Оптопара PC817	45,83	1	6	274,98
	Світлодіод	37	1	6	222
	Роз'єм для керування PWM	25,62	1	1	25,62
Середньогабаритні	Роз'єми перефрмії 9 pin	69,39	1,5	2	208,17
	Роз'єм вихід з FC 10 pin	76,99	1,5	1	115,485
	Роз'єм реле 12 pin	92,19	1,5	1	138,285
	MOSFET_N_IRLZ24N	52,51	1,5	6	472,59
Великогабаритні	Роз'єм XT60PW-M	311,66	2	1	623,32
	Matek H743	1296	2	1	2592
	Місце для кріплення плати	86,5	1	4	346
	Загальна площа плати (мм2)	5467,55			

Відповідно до розрахунків, мінімальна площа плати становить 5500 мм². Відповідно до технічного завдання маємо наступні вимоги та обмеження корпусу:

- а) Прилад має монтуватися в блок з електронікою до стінки;
- б) В корпусі мають бути отвори під роз'єми живлення, роз'єми підключення перефрмії, реле, програмування політного контроллера;
- р) Плата має містити кріплення для політного контроллера.

Виходячи з вище наведених вимог доцільно буде взяти плату прямокутної форми з габаритними розмірами 100мм x 75мм. Кріплення плати буде здійснено за допомогою гвинтів М3. Фіксація плати за допомогою гвинтів – це простий, надійний і ефективний спосіб кріплення до корпусу. Він характеризується швидким монтажем, універсальністю та економічністю.

					РЕ21.469375.001 ПЗ	Лис
						36
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

Контур плати з місцями під кріплення зображений на рисунку 3.1

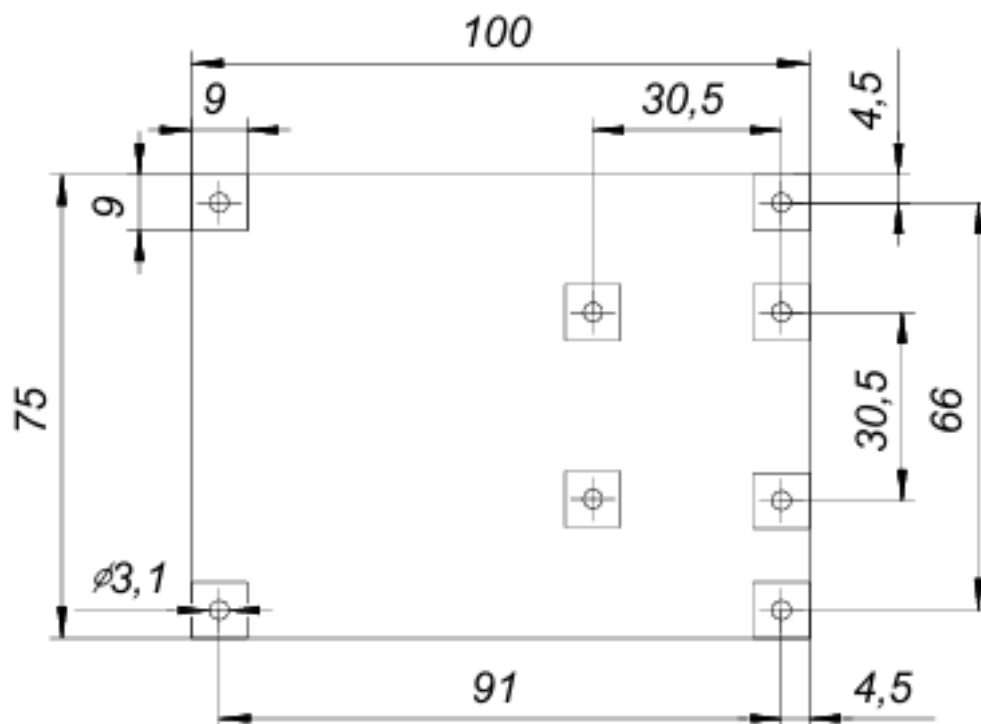


Рисунок 3.1 — Контур плати з місцями під кріплення

3.2 Розрахунок ширини провідника

Розрахунок геометричних параметрів провідників виконується для забезпечення теплової стабільності та завадозахищеності плати. Геометрія силових доріжок визначається за критерієм допустимого температурного перегріву мідної фольги відносно навколишнього середовища, який для портативної техніки приймається на рівні 10°C. Для проектування топології обрано ламінат FR-4 із товщиною 1,6 мм товщиною міді 35 мкм.

Щоб визначити необхідну ширину друкованих провідників, потрібно враховувати максимальні значення струму та напруги, які протікають через силові та сигнальні ланцюги. Наявні ланцюги та максимальна сила струму для розроблюваної плати вказані в таблиці 3.3.

					РЕ21.469375.001 ПЗ	Лис
						37
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.2 — Ланцюги схема та їх струм

Назва ланцюга	I, A
Силовий(+6-36V)	1,2
Силовий(+5V)	1
Силовий(+12V)	4
Сигнальний	0,1

Згідно отриманих значень можна обрахувати мінімальну ширину провідника для коректної роботи друкованої плати. Розрахунок виконано за допомогою онлайн калькулятора[25]. Товщина доріжок ланцюгів вказана в таблиці 3.3.

Назва ланцюга	Мінімальна ширина провідника, мм
Силовий(+6-36V)	1,3
Силовий(+5V)	0,95
Силовий(+12V)	2,03
Сигнальний	0,11

Слід зазначити, що для сигнальних ліній допускається застосування провідників вузких за табличні нормативні значення. Проте зменшення ширини доріжок нижче стандартних норм вимагає використання прецизійного виробничого обладнання, що призводить до суттєвого зростання вартості виготовлення плати. Значення 0,127 мм є нижньою межею ширини провідника, яку більшість виробників друкованих плат підтримує у рамках базового технологічного процесу без додаткових надбавок до вартості. З огляду на це, прийнятним компромісом між технологічністю виготовлення та мінімізацією ширини сигнальних доріжок є вибір значення 0,127 мм як нижньої допустимої межі при трасуванні.

3.3 Трасування плати в системі автоматизованого проєктування Altium Designer

Трасування друкованої плати є одним із визначальних етапів розробки електронного пристрою, в ході якого виконується розведення електричних

					РЕ21.469375.001 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		38

з'єднань між компонентами відповідно до принципової схеми. Якість виконання цього етапу безпосередньо визначає надійність функціонування пристрою, технологічність його виготовлення та зручність подальшого технічного обслуговування. Для вирішення цих завдань застосовуються спеціалізовані САПР-інструменти, одним із найбільш функціонально розвинених серед яких є середовище проєктування Altium Designer.

Altium Designer охоплює повний цикл розробки друкованого вузла — від введення електричної схеми до формування виробничої документації у форматі Gerber. Вбудовані засоби трасування забезпечують точне розміщення доріжок, контроль їх ширини відповідно до струмового навантаження, дотримання вимог щодо електромагнітної сумісності, розводки шин живлення та заземлення, а також коректне розміщення міжшарових перехідних отворів.

У даному розділі описано послідовність виконання трасування друкованої плати електронного модуля керування в середовищі Altium Designer. Розглянуто підготовку посадкових місць компонентів, їх розміщення на платі, налаштування правил проєктування, обґрунтування вибору ширини провідників та формування остаточного вигляду плати з урахуванням технологічних вимог виробництва.

Трасування верхнього та нижнього металізованого шару друкованої плати зображено на рисунку 3.2 та 3.3 відповідно.

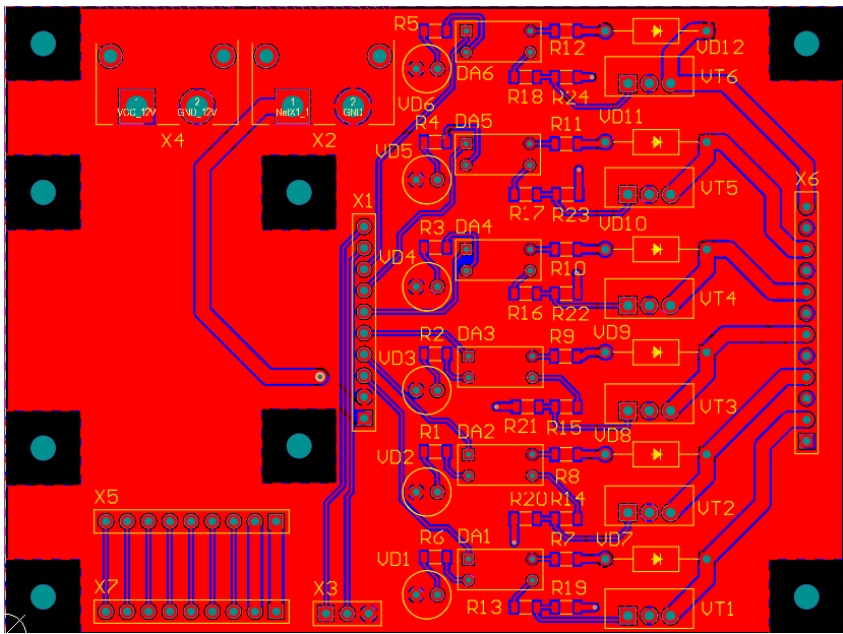


Рисунок 3.2 — Трасування верхнього шару друкованої плати

					PE21.469375.001 ПЗ	Лис
						39
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

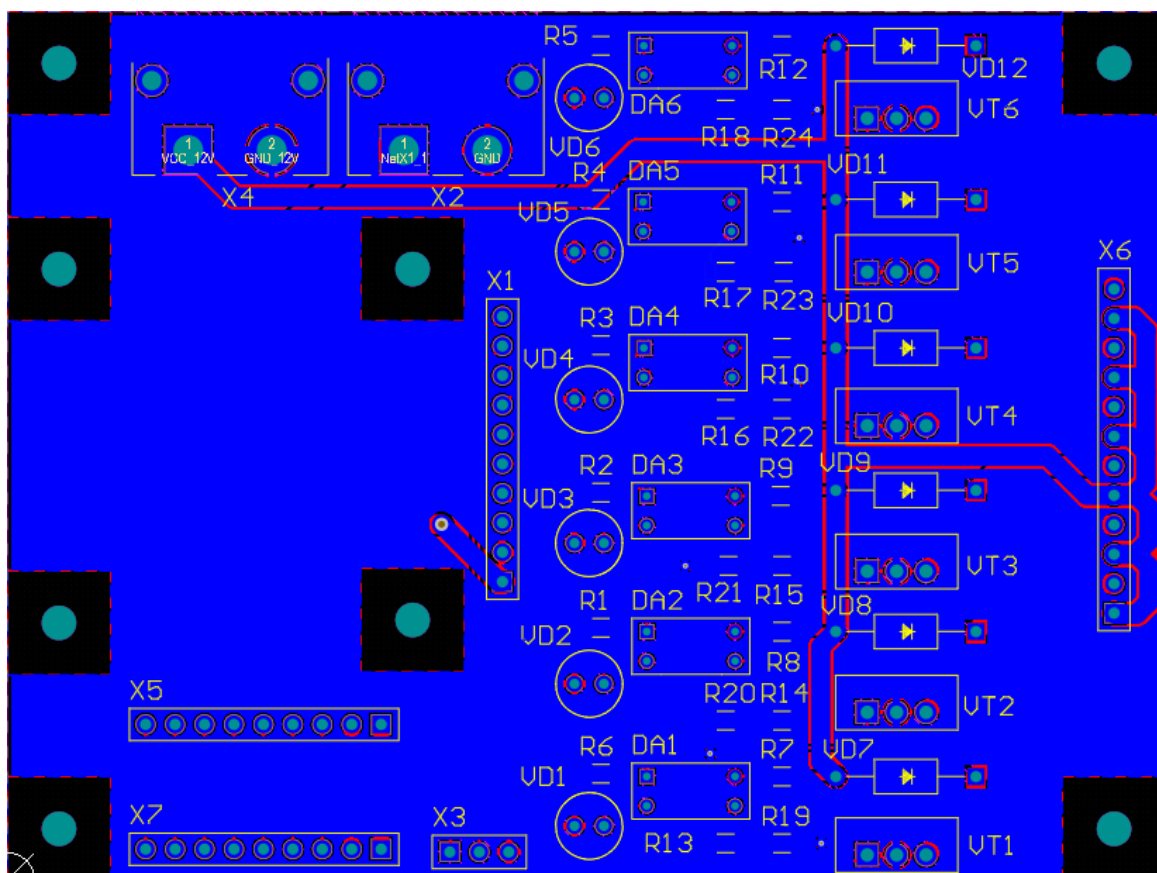


Рисунок 3.3 — Трасування нижнього шару друкованої плати

На обох шарах друкованої плати реалізовано раціональне розведення провідників з дотриманням вимог щодо мінімізації їх довжини, виключення взаємних перехресть та забезпечення надійності електричних з'єднань між компонентами. Провідники з мінімальною шириною використовуються для передачі сигнальних ліній з малим струмовим навантаженням, тоді як силові кола живлення та комутації виконані доріжками збільшеного перерізу відповідно до розрахованих значень допустимого струму. З'єднання між верхнім та нижнім шарами плати реалізовано за допомогою перехідних отворів (via), що забезпечує коректну маршрутизацію провідників у тих ділянках плати, де розведення в межах одного шару є неможливим або недоцільним.

Однією з виявлених особливостей конструкції є використання суцільних полігонів загального проводу на обох шарах друкованої плати з розділенням на дві незалежні "землі". На верхньому шарі плати виконано суцільний полігон GND, який є загальним проводом керуючої частини системи — політного контролера, оптронів PC817, сигнальних ліній та периферійних інтерфейсів. На нижньому шарі виконано окремий суцільний полігон GND_12V, який є

					PE21.469375.001 ПЗ	Лис
						40
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

загальним проводом силової частини — MOSFET-транзисторів IRLZ24N, релейних виходів та кола живлення 12 В. Таке розділення загальних провідників керує та силової частини є принципово ефективним конструктивним рішенням, запобігає проникненню імпульсних перешкод від комутації реле та індуктивних навантажень у чутливого кола політного контролера.

Суцільні полігони загального проводу можуть значно зменшити імпеданс загального провідника, підвищити електромагнітну сумісність та захистити сигнальні лінії від перешкод. Крім того, такий підхід забезпечує наявність зворотного шляху для струму з мінімальним рівнем шуму, що є критичним для стабільної роботи системи керування. Також полігони використовують як теплова маса, що ефективно відводить тепло від потужних компонентів, зокрема MOSFET-транзисторів при комутації релейних модулів. З'єднання між полігонами та контактними майданчиками компонентів виконується за допомогою термобар'єрів (термічних рельєфів), що покращує якість пайки та запобігає перегріву компонентів під час монтажу.

Загалом, трасування друкованого електронного модуля керування виконано відповідно до стандартів проєктування: оптимізоване доріжок, мінімізована кількість розміщених перехресть, використано розділені суцільні полігони загального проводу на верхньому та нижньому шарах, що забезпечує якісну та стабільну роботу пристрою в умовах зовнішніх електромагнітних навантажень та значних комутаційних навантажень.

На Рис. 3.4, 3.5 показано об'ємний вигляд друкованої плати розроблюваного пристрою.

					<i>РЕ21.469375.001 ПЗ</i>	Лис
						41
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

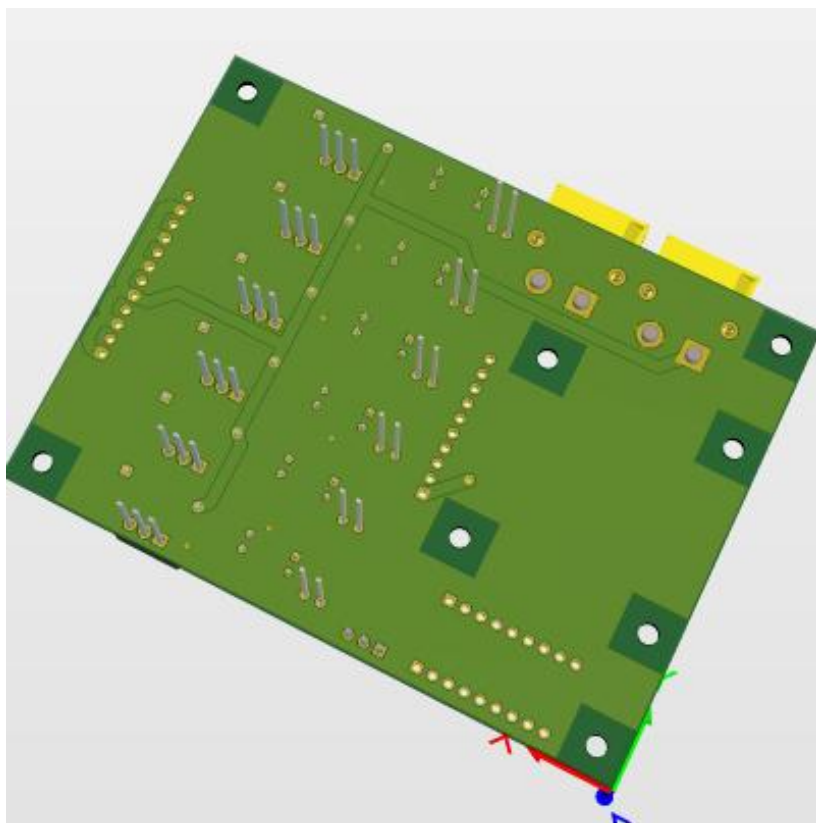


Рисунок 3.4 — Об'ємний вигляд ДП (нижній шар)

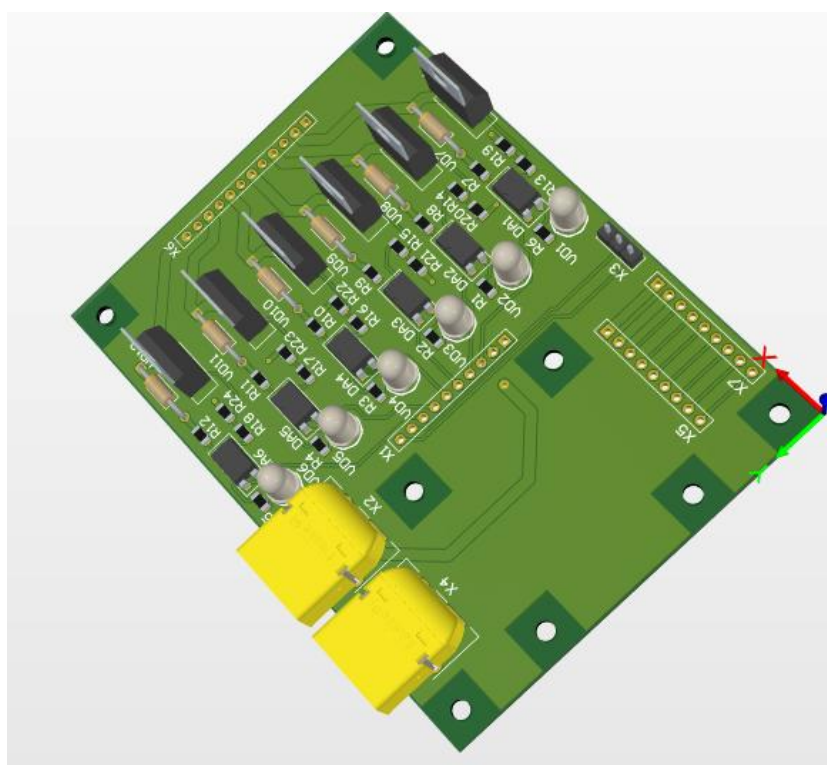


Рисунок 3.5 — Об'ємний вигляд ДП (верхній шар)

Усі компоненти електронного модуля розміщені на верхньому шарі, друкованому в конфігурації логічно впорядкованих функціональних груп відповідно до структурної схеми пристрою. Шість оптронів PC817 (DA1–DA6)

					<i>РЕ21.469375.001 ПЗ</i>	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		42

із відповідними струмообмежувальними резисторами (R1–R6) та індикаторними світлодіодами (VD1–VD6) розташовані компактною групою поблизу контактних майданчиків X1, що забезпечує мінімальну довжину сигнальних доріжок від GPIO-виходів політного контролера до входів оптичних розв'язок. Шість MOSFET-транзисторів IRLZ24N (VT1–VT6) із підтягуючими резисторами (R19–R24) та захисними діодами 1N4007 (VD7–VD12) розміщено окремою групою поблизу контактних майданчиків X6 релейних виходів, що скорочує силові доріжки та зменшує втрату потужності в колу комутації.

Роз'єми живлення X2 та X4 типу XT60PW винесено на крайову частину плати, що полегшує доступ при підключенні акумуляторних батарей та сприяє відведенню тепла від силових кіл. Контактні майданчики X3 для підключення PWM-сигналів до контролера двигунів ходу YS-BLD80AT розташовані окремо від релейної частини, що мінімізує вплив імпульсних перешкод силового кола на сигнали керування електроприводами. Контактні майданчики периферійних інтерфейсів X5 та X7 розташовані симетрично з протилежними сторінками плати, що забезпечує зручність монтажу та прокладання кабелів до зовнішніх периферійних пристроїв.

Усі силові компоненти розташовані на безпечній відстані від сигнальних кіл, а міжвузлові з'єднання виконуються з такими ізоляційними відстанями між доріжками керуючого кола 6–36 В та силового кола 12 В. Такий компонент забезпечує високу ремонтпридатність, зручність візуальної діагностики та можливість оперативної заміни пошкоджених компонентів у польових умовах експлуатації.

					РЕ21.469375.001 ПЗ	Лис
						43
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

4 ПРОЄКТУВАННЯ КОРПУСУ

Корпус є єдиним з ключових складових будь-якого електронного пристрою, оскільки саме він вимагає лише зовнішнього вигляду, а й забезпечує захист внутрішніх компонентів, зручність експлуатації, ремонтпридатність та довговічність системи роботи. У випадку електронного модуля дистанційного керування гібридною платформою для розмінування корпусу використовується відразу кілька критично важливих функцій. Він захищає друковану плату та електронні компоненти від пилу, вологи, механічних пошкоджень, вібрацій та інших зовнішніх чинників, характерних для польових умов експлуатації. без винятку, цей корпус організовує ефективне відведення тепла від силових компонентів, забезпечує надійну фіксацію плати та створює зручний доступ до зовнішніх роз'ємів підключення.

Особливість розробленої системи зведена в об'єднані кілька функціональних вузлів в єдиному модулі: блок керування, блок оптичної розв'язки, силових транзисторних каскадів, роз'ємів живлення для двох незалежних кіл електроживлення та контактних майданчиків для підключення периферійних пристроїв та виконавчих механізмів. Кожен з цих елементів потребує належного розміщення, електроізоляції між силовими та сигнальними колами, а також забезпечення достатнього тепловідведення, що ставить до конструкції корпусу високі вимоги.

Крім того, модуль працює в складі створеної платформи, яка працює в умовах постійних вібрацій, ударних навантажень, перепадів температури та впливу пилу. Це обумовлює застосування міцних матеріалів корпусу, надійного кріплення друкованої плати всередині та герметизації місць виведення кабелів. Конструкція корпусу також повинна забезпечувати можливість швидкого монтажу та демонтажу модуля на платформі, а також оперативного доступу до внутрішніх компонентів для діагностики та заміни в польових умовах.

Дизайн корпусу має бути функціональним, компактним та технологічним. Він повинен мати необхідний швидкий доступ до роз'ємів живлення,

					РЕ21.469375.001 ПЗ	Лис
						44
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

периферійних інтерфейсів та контактних з'єднаних релейних виходів, водночас забезпечуючи надійний захист електроніки від зовнішніх впливів. Розміщення роз'ємів на корпусі повинно відповідати ергономічним вимогам та забезпечувати зручність підключення кабелів при обмеженому просторі в середині платформи.

Таким чином, при розробці корпусу було враховано як технічні параметри системи, так і жорсткі вимоги до експлуатації в умовах підвищених механічних навантажень та електромагнітних заводів. Це дозволило створити конструкцію, яка поєднує в собі практичність, захищеність, ремонтпридатність і компактність, а також стабільну та безпечну роботу електронного модуля керування в будь-яких умовах використання машини розмінування.

4.1 Опис ідеї корпусу

Основною ідеєю при проектуванні корпусу електронного модуля керування було створено компактну, міцну та функціональну конструкцію, яка забезпечує надійну роботу пристрою в жорстких умовах використання машини розмінування. Корпус має не тільки захистити електроніку від пилу, вологи, вібрацій та механічних пошкоджень, а й забезпечити зручний доступ до всіх останніх роз'ємів, ефективне тепловідведення та можливість швидкої діагностики без розбирання пристрою.

Як основну форму корпусу обрано прямокутний металевий бокс із роз'ємною верхньою кришкою на гвинтових з'єднаннях. Металевий корпус одночасно вирішує декілька завдань — забезпечує механічну міцність конструкції, екранує чутливу електроніку від зовнішніх електромагнітних полів та сприяє відведенню тепла від силових компонентів.

Ідея розміщення роз'ємів на корпусі відбувається в їх логічному групуванні за функціональним призначенням по різних панелях. На передню панель виведено дві силові роз'єми живлення з маркуванням напруги, що дозволяє оператору швидко та безпомилково підключити два незалежні кола живлення — для блоку керування та для силової частини. На бічну панель виведено авіаційні роз'єми з маркуванням "Periphery" для периферійних пристроїв та

					РЕ21.469375.001 ПЗ	Лис
						45
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

"PWM" для сигналів керування двигунами ходу. Вибір авіаційних роз'ємів продиктований їх високою вібростійкістю, надійністю фіксації та захистом від пилу і вологи. На протилежну бічну панель виведено роз'єм USB з маркуванням "FC" для налаштування та оновлення прошивки політного контролера без розбирання корпусу, а також кабельний ввід з різьбовою фіксацією для герметичного виведення кабелів. На окрему панель виведено великий багатоконтактний авіаційний роз'єм з маркуванням "Relay" для підключення всіх релейних каналів керування двигуном внутрішнього згоряння та допоміжними механізмами через єдине з'єднання, що забезпечує швидкий монтаж і демонтаж модуля.

Важливою частиною ідеї корпусу є забезпечення візуальної діагностики стану системи. Для цього у верхній кришці передбачено відкриття для виведення індикаторних світлодіодів, розташованих двома рядами. Оператор має змогу бачити кожен релейний канал через корпус, що значно спрощує несправності пошуку в польових умовах. Також на верхній кришці розташовано вентиляційні отвори для забезпечення природної конвекції повітря та ефективного охолодження силових компонентів.

Для забезпечення вібростійкості внутрішнього монтажу друкована плата фіксується на гвинтових стійках, а всі провідники від контактних майданчиків плати до роз'ємів на корпусі закриті повністю, що повністю виключає можливість самовільного від'єднання під дією вібрацій та ударного навантаження.

Така ідея конструкції дозволяє отримати компактний, захищений та зручний в обслуговуванні модуль, який легко інтегрується в конструкцію гібридної платформи для розмінування та забезпечує надійну роботу в будь-яких умовах експлуатації.

4.2 Конструктивні особливості корпусу

Корпус електронного модуля керування виготовлено з алюмінієвого сплаву методом фрезерування, що забезпечує високу механічну міцність, малу вагу, ефективне відведення тепла та екранування від електромагнітних завад. Конструкція складається з основи та верхньої кришки, яка фіксується за

					<i>РЕ21.469375.001 ПЗ</i>	Лис
						46
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

допомогою гвинтових з'єднань по периметру. Друкована плата закріплена в середині корпусу на стійках корпусу, забезпечує надійну фіксацію та запобігає зміщенню плати під дією вібрацій та ударних навантажень.

Передня панель

На передній панелі корпусу розташовано дві силові роз'єми типу XT60PW для підключення двох незалежних кіл живлення [26]. Роз'єми мають маркування "IN 6–36V" для підключення основного живлення політного контролера та "12V" для підключення живлення силової частини релейних модулів та транзисторних каскадів. Роз'єми XT60PW обрано за рахунок їх компактних габаритів, можливості монтажу одночасно на друковану плату, номінального струму до 30 А та надійної фіксації відповідної частини роз'єму, що запобігає самовільному від'єднанню під дією вібрацій. Маркування напруги виконується гравіюванням разом на корпусі, що запобігає помилковому підключенню живлення та завершує безпеку використання джерела. Зовнішній вигляд передньої панелі зображено на малюнку 4.1.

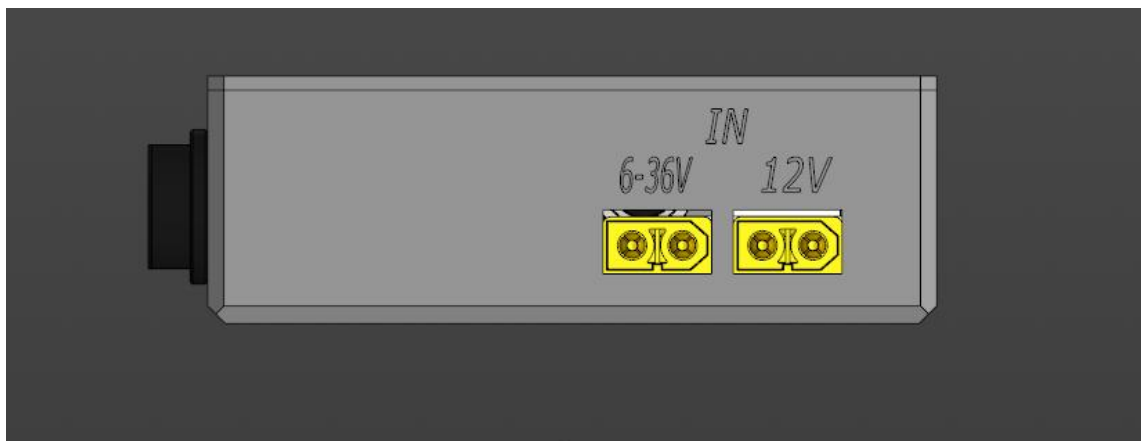


Рисунок 4.1 — Передня панель корпусу з роз'ємами живлення XT60PW

На одній із бічних панелей корпусу розміщено дві авіаційні роз'єми [27]. Перший роз'єм — багатоконтактний GX16-9 з маркуванням «Периферія» — забезпечує підключення периферійних пристроїв до інтерфейсів політного контролера: двох каналів UART для телеметрії та GPS-приймача, шини I2C для додаткових датчиків, входу SBUS для приймача системи радіокерування та лінії живлення 5 В. Другий роз'єм — GX12-3 з маркуванням «PWM» — забезпечує виведення двох PWM-сигналів керування лівим та правим двигуном

					<i>PE21.469375.001 ПЗ</i>	Лис
						47
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

ходу та загального проводу GND до контролера двигунів [28]. Авіаційні роз'єми серії GX вибрані за рахунок їх високої вібростійкості (підтримують вібрацію з прискоренням до 100 м/с^2 на частоті 10–100 Гц), різьбового механізму фіксації, корпусу із цинкового сплаву з нікелевим покриттям та стійкості до пилу і вологи. Номінальний струм контактів становить 5–7 А при робочій напрузі до 250 В, що є достатнім для передачі сигнальних ліній. Зовнішній вигляд бічної панелі з периферійними роз'ємами зображено на малюнку 4.2.

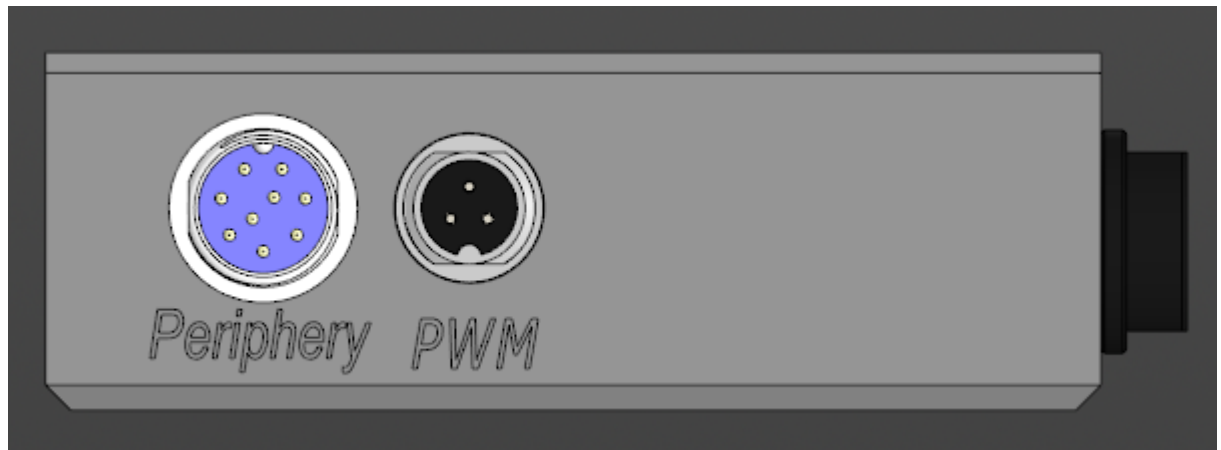


Рисунок 4.2 — Бічна панель корпусу з роз'ємами «Periphery» та «PWM»

На протилежній панелі розміщено роз'єм USB Type-C з маркуванням "FC", який забезпечує прямий доступ до політного контролера для налаштування прошивки ArduPilot, калібрування параметрів системи, перегляду логів та оновлення програмного забезпечення без необхідності розбирання корпусу. Виведення USB-порту на зовнішню панель є одним з конструктивних рішень, що не дозволяє оперативно діагностувати та переналаштувати систему в польових умовах. Зовнішній вигляд бічної панелі з роз'ємом USB зображено на малюнку 4.3.

					РЕ21.469375.001 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		48



Рисунок 4.3 — Бічна панель корпусу з роз'ємом USB Type-C

На задній панелі корпусу розміщений великий багатоконтактний авіаційний роз'єм GX20-12 з маркуванням «Relay», який забезпечує виведення всіх шести релейних каналів для підключення виконавчих механізмів двигуна внутрішнього згоряння [29]. Два десятих контактів роз'єму (по два на кожному каналі — R+ та R-) забезпечують підключення лінії керування стартером, запаленням, глушінням, зчепленням (два канали) та подачею газу. Вибір роз'єму серії GX20 для релейних виходів обумовлений більшою кількістю контактів з GX16 та вищою допустимою струмовою навантаженістю. Застосування єдиного багатоконтактного роз'єму для всіх релейних виходів спрощує процедуру підключення модуля до платформи та забезпечує швидкий монтаж і демонтаж у польових умовах за допомогою одного різьбового з'єднання. Зовнішній вигляд задньої панелі зображено на малюнку 4.4.

					<i>РЕ21.469375.001 ПЗ</i>	Лис
						49
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

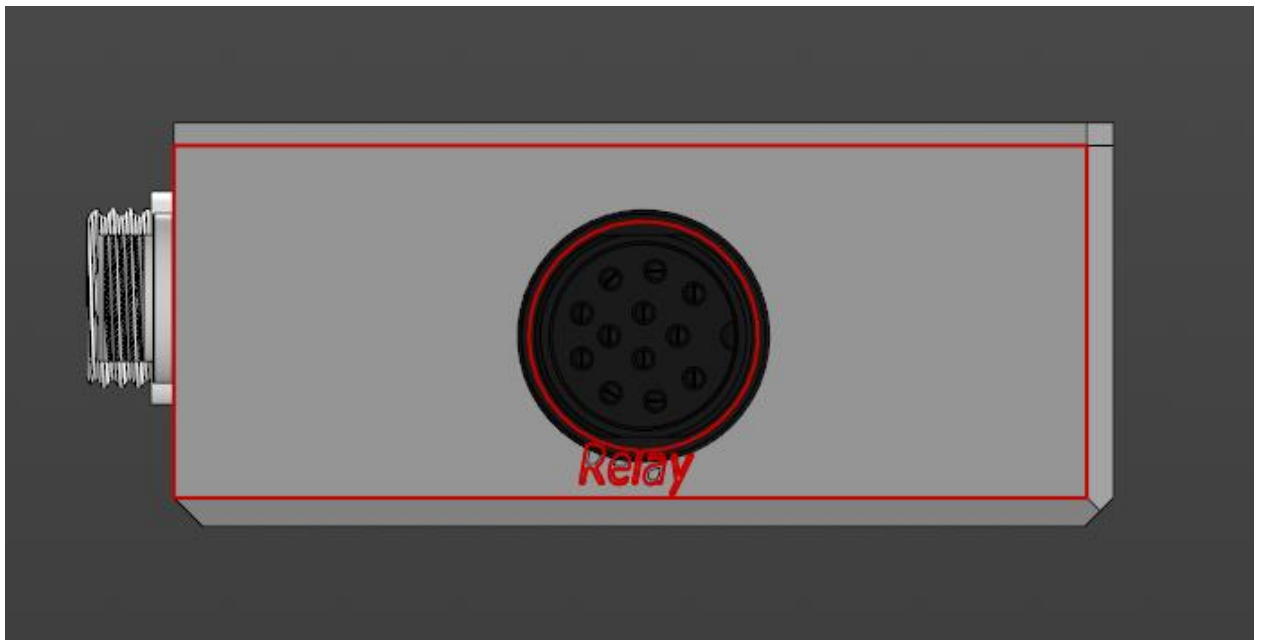


Рисунок 4.4 — Задня панель корпусу з релейним роз'ємом GX20-12

На верхній кришці корпусу виконано два ряди по шість отворів для виведення індикаторних світлодіодів, які отримали шість каналів оптичної розв'язки. Верхній ряд відображує стан подачі керуючого світлодіодного сигналу від політного контролера, нижній — стан із відповідним рядом MOSFET-транзистора та релейного каналу. Таке дублювання індикації дозволяє оператору оперативної обробки, на якому саме етапі проходження сигналу виникла несправність — на рівнях оптичної розв'язки чи на рівнях транзисторного каскаду.

Верхня кришка фіксується до основи корпусу за допомогою восьми гвинтів по периметру, що забезпечує рівномірний притиск і можливість швидкого доступу до внутрішніх компонентів для діагностики та обслуговування. Зовнішній вигляд верхньої кришки зображено на малюнку 4.5.

					РЕ21.469375.001 ПЗ	Лис
						50
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

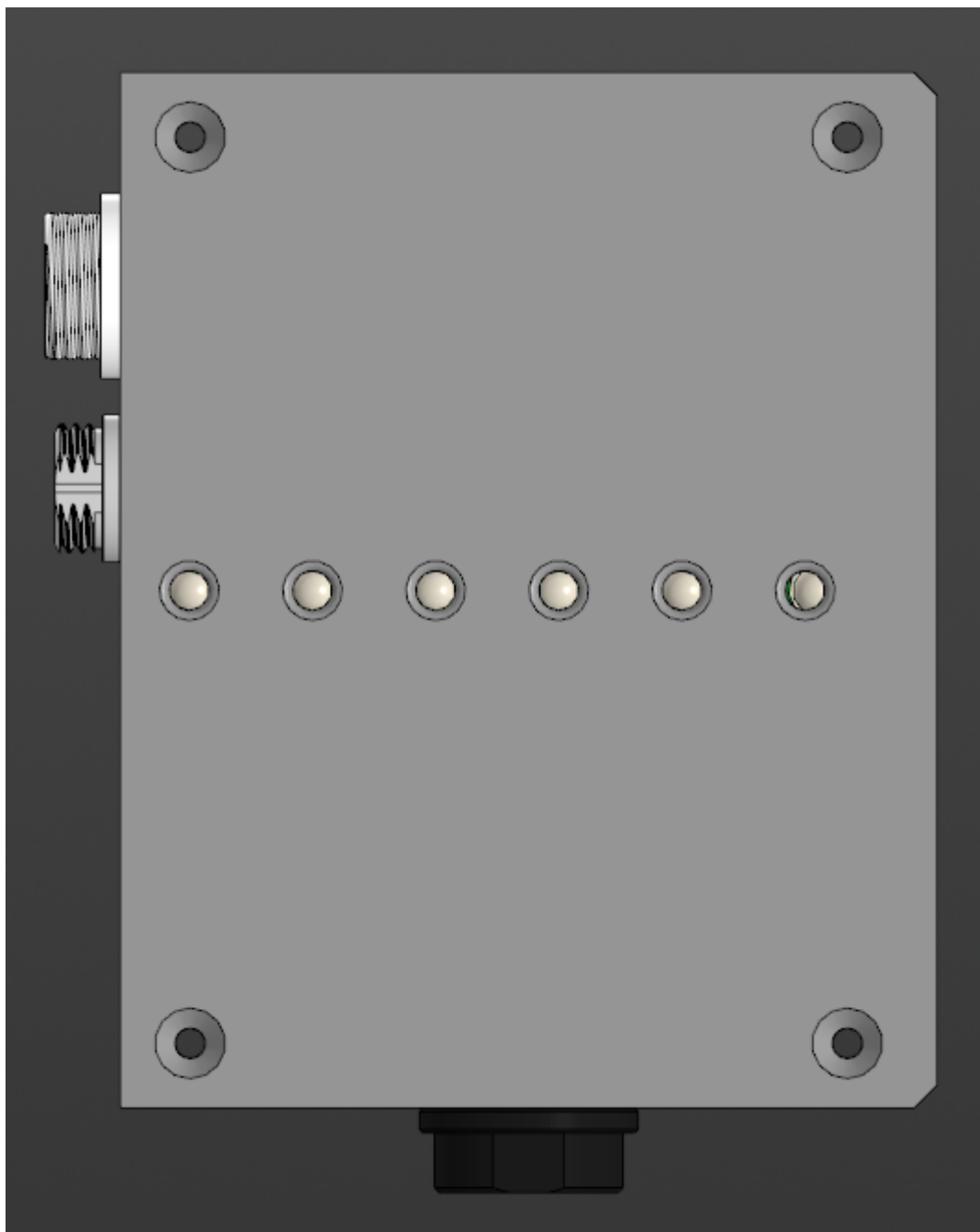


Рисунок 4.5 — Верхня кришка корпусу з індикаторними та вентиляційними отворами

Загальний вигляд зібраного корпусу електронного модуля, зображеного на малюнку 4.6.

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

РЕ21.469375.001 ПЗ

Лис

51

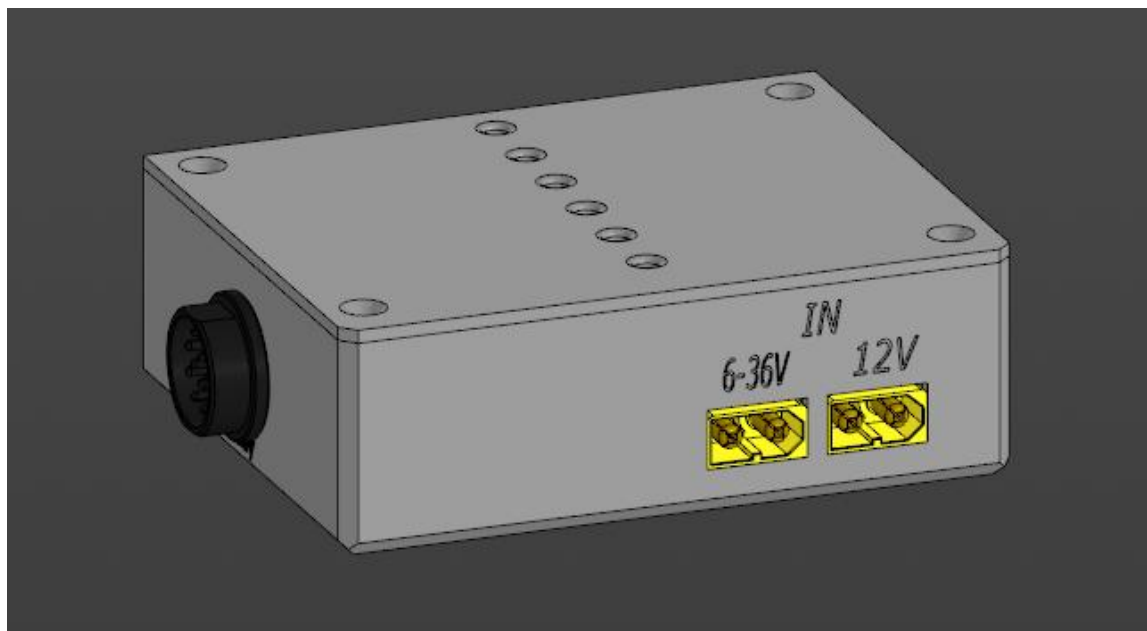


Рисунок 4.6 — Загальний вигляд корпусу електронного модуля керування

					РЕ21.469375.001 ПЗ	Лис
						52
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

5 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

Для перевірки працездатності розробленого електронного модуля керування було створено експериментальний макет на базі друкованої плати та проведено серію випробувань у лабораторних умовах з подальшим тестуванням у складі реальної безпілотної платформи для розмінування.

5.1 Випробування макету друкованої плати

На першому етапі експериментальних досліджень було створено макет друкованого платного електронного модуля керування та змонтовано всі компоненти відповідно до схеми електричного принципу. Після монтажу проведено оглядовий огляд якості пайки, перевірку білих коротких замикань між доріжками та контроль цілності всіх з'єднань. Зовнішній вигляд виготовленого макету друкованої плати зображено на малюнку 5.1.

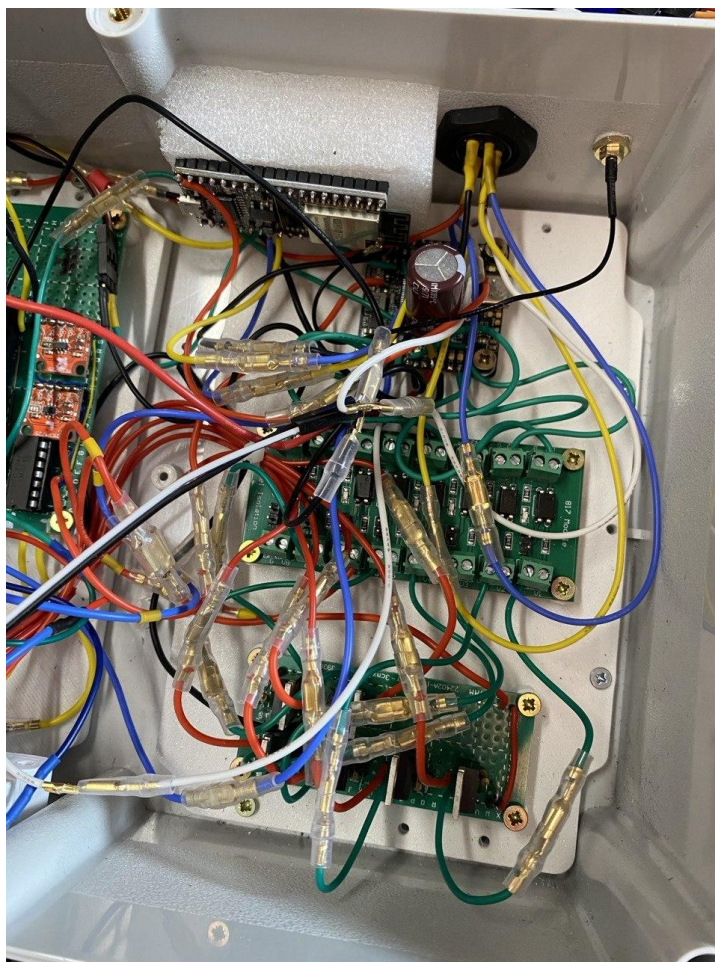


Рисунок 5.1 — Макет друкованої плати електронного модуля керування
Під час лабораторних випробувань перевірено роботу кожного блоку системи окремо та у взаємодії. Перевірку блоку оптичної розв'язки діє шляхом

					РЕ21.469375.001 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		53

подачі логічних сигналів на входи оптронів PC817 та контролю за спрацюванням відповідних індикаторних світлодіодів. Усі шість каналів оптичної розв'язки продемонстрували стабільну роботу та коректну передачу сигналів від керуючої частини до транзисторних каскадів. Перевірку блоку транзисторів каскадів дійсно здійснюється шляхом вимірювання напруги на стоках MOSFET-транзисторів IRLZ24N при подачі та знятті керуючого сигналу. Усі шість транзисторних каскадів забезпечили надійну комутаційну навантаження з мінімальним часом перемикання та відсутністю хибних спрацювань. Підтягуючі резистори на закритих транзисторах забезпечили надійне утримання закритого місця при кері сигналу, що підтвердило правильність вибраних номіналів.

Перевірку передачі PWM-сигналів здійснено шляхом підключення контролера двигунів ходу YS-BLD80AT до виходів PWM Left та PWM Right. Політний контролер Matek H743 SLIM V4 з прошивкою ArduPilot Rover стабільно формував ШІМ-сигнали в функціях 1000–2000 мкс, які правильно сприймалися контролером двигунів. Регулювання швидкості обертання електродвигунів відбувалося плавно, без ривків та затримок, що підтвердило відсутність спотворення сигналу в тракці передачі.

5.2 Випробування у складі безпілотної платформи для розмінування

На другому етапі експериментальних досліджень електронний модуль керування було встановлено в складі реальної безпілотної платформи для розмінування та проведеного комплексного тестування систем в умовах, наближених до експлуатації. Зовнішній вигляд безпілотної платформи з встановленим модулем зображення зображено на малюнку 5.2.

					РЕ21.469375.001 ПЗ	Лис
						54
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 5.2 — Безпілотна платформа для розмінування з встановленим модулем керування

Під час випробувань перевірено роботу всіх підсистем модуля в реальних умовах експлуатації. Дистанційне керування рухом платформи через ШІМ-сигнали забезпечило плавне та точне маневрування в режимі диференційного керування. Платформа стабільно виконувала рух вперед, назад, повороти та розвороти на місці відповідно до команди оператора з пультом керування. Підтримка між командами подачі та реакцією платформи була мінімальною, що підтвердило ефективність прямої передачі ШІМ-сигналів без проміжної обробки.

Тестування релейних каналів керування двигуном внутрішнього згоряння продемонструвало коректну роботу всіх шести каналів. Послідовність дистанційного запуску ДВЗ — увімкнення запалювання, активація стартера, керування зчепленням та подачею газу — виконувалась стабільно та без збоїв. Глушіння двигуна також використовувалося правильно за командою оператора. Оптична розв'язка ефективно захищала політний контролер від імпульсних перешкод системи запалювання ДВЗ — жодного хибного спрацювання або збою у роботі контролера під час комутації релейних каналів зафіксовано не було.

ВИСНОВКИ

У дипломному проєкті розроблено універсальний електронний модуль дистанційного керування гібридною платформою для розмінування, яка забезпечує одночасне керування електроприводами за допомогою PWM-сигналів та ДВЗ через релейні модулі з оптичною розв'язкою на базі політного контролера з відкритою прошивкою ArduPilot Rover.

Проведений аналіз існуючих рішень на українському та закордонному ринках у сфері дистанційного керування роботизованими платформами для розмінування показав, що останні існуючі системи є або повністю закритими комерційними продуктами з власницькими протоколами керування, або орієнтовані на один тип приводу. Жодне з розглянутих рішень не реалізує в єдиному відкритому модулі одночасно ШІМ-керування електроприводами та релейним керуванням ДВЗ, що підтверджує актуальність та новизну даної розробки.

За результатами порівняльного аналізу обґрунтовано вибір елементної бази модуля: політний контролер Matek H743 SLIM V4, схему оптичної розв'язки на базі оптронів PC817 із MOSFET-ключами IRLZ24N для керування релейними модулями та двоканальний контролер безколекторних електродвигунів YS-BLD80AT для керування ходом платформи. Обрані компоненти відбору сучасному рівню технічних знань у сфері проєктування систем керування безпілотними наземними платформами.

У процесі виконання дипломного проєкту розроблено схему електричного принципового модуля, яка включає шість каналів оптичної розв'язки з індикаторними світлодіодами, шість транзисторних каскадів із захисними діодами, роздільне електроживлення керуючої та силової частин, вихід ШІМ-сигналів для контролерів двигунів ходу та периферії та інтерфейси для підключення телеметрії, GPS-навігації та системи, радіокерування.

Виконано трасування двосторонньої друкованої плати в середовищі Altium Designer з вимогою розділення силових та сигнальних кіл, розрахунку

					<i>PE21.469375.001 ПЗ</i>	Лис
						56
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

ширини провідників відповідно до стандарту IPC-2221 та створення розділених полігонів загального проводу на верхньому та нижньому шарах плати.

Розроблено конструкцію корпусного модуля із застосуванням авіаційних роз'ємів серії GX для забезпечення вібростійкості, секційних силових роз'ємів для двох кіл живлення, виведенням USB-порту для налаштування прошивки без розбирання корпусу та індикаторних світлодіодів для візуальної діагностики стану релейних каналів.

Проведено експериментальні дослідження макету модуля в лабораторних умовах та на складі реальної безпілотної платформи для розмінування. Результати випробувань підтвердили стабільну та безвідмовну роботу всіх функціональних блоків системи. PWM-керування електроприводами забезпечило плавне та точне маневрування платформи, а релейне керування ДВЗ — коректне виконання комп'ютерної функції запуску, роботи та глушіння двигуна. Оптична розв'язка ефективно захистила електроніку політного контролера від імпульсних перешкод силового кола.

Розроблений модуль може бути впроваджений у гуманітарне розмінування постконфліктних територій, військово-інженерних операцій з дистанційного знешкодження мін та саморобних вибухових пристроїв, аварійно-рятувальних робіт у зонах техногенних катастроф, а також у промислових роботизованих платформах із гібридними силовими установками. Модульна та використання відкритої архівної прошивки ArduPilo забезпечує можливість адаптації модуля під різні типи платформ без системи повного перепроєктування.

За результатами виконання дипломного проєкту всі поставлені задачі вирішено в повному обсязі. Розроблено функціональний та технічно обґрунтований електронний модуль, архітектура якого передбачає можливість подальшого масштабування та розширення функціоналу. Отримане рішення відповідає актуальним вимогам щодо надійності роботи, безпеки експлуатації та гнучкості адаптації до різних умов застосування, що створює передумови для його практичного впровадження у складі реальних роботизованих платформ спеціального призначення.

					<i>РЕ21.469375.001 ПЗ</i>	Лис
						57
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Розенблут Д. Універсальний робототехнічний модуль керування : пат. US9043016B2 США / D. Rosenbluth — Опубл. 2015. — Режим доступу: <https://patents.google.com/patent/US9043016B2/ua>
2. Безпілотний багатоцільовий наземний апарат з різними рівнями керування : пат. US20110144828A1 США — Опубл. 2011. — Режим доступу: <https://patents.google.com/patent/US20110144828>
3. Системи та методи керування рухом безпілотних транспортних засобів : пат. US8965620B2 США — Опубл. 2015. — Режим доступу: <https://patents.google.com/patent/US8965620>
4. Команда розробки ArduPilot. Motor and Servo Configuration — Rover [Електронний ресурс] / ArduPilot — Режим доступу: <https://ardupilot.org/rover/docs/rover-motor-and-servo-configuration.html>
5. Команда розробки ArduPilot. Servo Outputs and Relay — Rover [Електронний ресурс] / ArduPilot — Режим доступу: <https://ardupilot.org/rover/docs/common-servo.html>
6. RoverTech. Комплекс наземного роботизованого очищення «Змій» v1.2 [Електронний ресурс] / RoverTech — Режим доступу: <https://rovertch.co.ua/en/military-en/>
7. Змій (розміновувач) [Електронний ресурс] / Вікіпедія — Режим доступу: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Змій_\(розміновувач\)](https://uk.wikipedia.org/wiki/Змій_(розміновувач))
8. Texty.org.ua. У ЗСУ з'явився український броньований робот-амфібія UNEX UGV [Електронний ресурс] / Texty.org.ua. — 2025. — Режим доступу: <https://texty.org.ua/fragments/114908/u-zsu-zyavyvsya-ukrayinskyj-bronovanyj-robot-amfibiya-unex-ugv-foto/>
9. УкрМілітарі. НРК-амфібію UNEX допущено до експлуатації в армії [Електронний ресурс] / UkrMilitary. — 2025. — Режим доступу: <https://www.ukrmilitary.com/2025/04/unex.html>
10. 2UxV. UGV Kit — комплект керуючої електроніки для НРК [Електронний ресурс] / 2UxV — Режим доступу: <https://2uxv.com/home/ugvkit>

					РЕ21.469375.001 ПЗ	Лис
						58
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

11. ДОК-ИНГ. MV-10 Mine Clearing System [Електронний ресурс] / DOK-ING Ltd. — Режим доступу: <https://dok-ing.hr/defence-security/mv-10/>
12. Гусениця. DOK-ING MV-10 Mine Clearing System — Cat C18 Engine [Електронний ресурс] / Caterpillar Inc. — Режим доступу: https://www.cat.com/en_US/by-industry/industrial-power/engines/power-profiles/dok-ing-mv-10-mine-clearing-system.html
13. TankNutDave. The Slovakian Bozena 5 Mine Clearing Vehicle [Електронний ресурс] / TankNutDave — Режим доступу: <https://tanknutdave.com/the-slovakian-bozena-5-mine-clearing-vehicle/>
14. Оборонний експрес. Slovakian Bozena 5 Remote-controlled Mine Clearing Vehicle [Електронний ресурс] / Defense Express. — 2023. — Режим доступу: https://en.defence-ua.com/news/slovakian_bozena_5_remote_controlled_mine_clearing_vehicle_was_spotted_in_ukraine-7888.html
15. Гавлік Ш. Land Robotic Vehicles for Demining [Електронний ресурс] / Š. Havlík — Режим доступу: https://cdn.intechopen.com/pdfs/817/intech-land_robotic_vehicles_for_demining.pdf
16. Донецька обласна державна адміністрація. Машина розмінування Germina URCM-3000 [Електронний ресурс] / Донецька ОДА. — 2025. — Режим доступу: <https://dn.gov.ua/news/kramatorskij-zavod-vazhkogovestatobuduvannya-rozrobiv-mashinu-rozminuvannya-germina-urcm-3000>
17. Mateksys. F405-TE Datasheet [Електронний ресурс] / Mateksys — Режим доступу: https://www.mateksys.com/downloads/Manual/F405-TE_Manual.pdf
18. Посібники+. MATEKSYS H743-SLIM V4 [Електронний ресурс] / Manuals+ — Режим доступу: <https://manuals.plus/ae/1005004321741295>
19. Уся таблиця даних. PC817 Datasheet [Електронний ресурс] / Alldatasheet — Режим доступу: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1288713/FS/PC817S.html>

					<i>РЕ21.469375.001 ПЗ</i>	Лис
						59
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

- 20.Rcscomponents. P2N2222A Datasheet [Електронний ресурс] / Rcscomponents — Режим доступу: <https://www.rcscomponents.kiev.ua/datasheets/P2N2222A.pdf>
- 21.Infineon. IRLZ24N Datasheet [Електронний ресурс] / Infineon Technologies — Режим доступу: <https://www.infineon.com/assets/row/public/documents/24/49/infineon-irlz24n-datasheet-en.pdf>
- 22.Alibaba. YS-BLD80AT Double Brushless Motor Controller [Електронний ресурс] / Alibaba — Режим доступу: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/Double-Brushless-Brushed-Motor-ATV-Crawler-1601122890070.html>
- 23.Команда розробки ArduPilot. Motor and Servo Configuration — Rover [Електронний ресурс] / ArduPilot — Режим доступу: <https://ardupilot.org/rover/docs/rover-motor-and-servo-configuration.html>
- 24.Rcscomponents. 1N4001-1N4007 Datasheet [Електронний ресурс] / Rcscomponents — Режим доступу: <https://www.rcscomponents.kiev.ua/datasheets/1N4001-ds.pdf>
- 25.PCBway. PCB Trace Width Calculator [Електронний ресурс] / PCBway — Режим доступу: https://www.pcbway.com/pcb_prototype/trace-width-calculator.html
- 26.Амас. XT60PW Connector Datasheet [Електронний ресурс] / Amass — Режим доступу: <https://www.amass.com.hk/product/xt60pw>
- 27.Handsontec. GX16 Aviation Connector Datasheet [Електронний ресурс] / Handsontec — Режим доступу: <https://www.handsontec.com/dataspecs/connector/GX16.pdf>
- 28.Handsontec. GX12 Aviation Connector Datasheet [Електронний ресурс] / Handsontec — Режим доступу: <https://www.handsontec.com/dataspecs/connector/GX12.pdf>
- 29.Sunrom. GX20 Aviation Connector Datasheet [Електронний ресурс] / Sunrom — Режим доступу: <https://www.sunrom.com/m/5594>

					РЕ21.469375.001 ПЗ	Лис
						60
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТОК А. ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

Міністерство освіти і науки України

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Радіотехнічний факультет

Кафедра Прикладної Радіоелектроніки

ПОГОДЖЕНО

Асистент, к.т.н., Лемеха С. В.

(керівник)

(підпис)

ЗАТВЕРДЖЕНО

Професор, к.т.н. Мовчанюк А.В.

(Завідувач кафедри
прикладної радіоелектроніки)

(підпис)

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

ДЛЯ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

«Універсальний електронний модуль керування гібридною безпілотною платформою для задач розмінування»

Марковець В. С.

(виконавець)

(підпис)

Київ – 2026

					РЕ21.469375.001 ПЗ	Лис
						61
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

1. НАЗВА, ШИФР ТА ПІДСТАВА ДЛЯ ВИКОНАННЯ

Назва проєкту: «Електронний модуль дистанційного керування гібридною платформою для розмінування».

Шифр проєкту: PE21.469375.001.

Підстава для виконання: завдання, видане кафедрою прикладної радіоелектроніки радіотехнічного факультету КПІ ім. Ігоря Сікорського відповідно до навчального плану; виконання дипломного проєкту.

2. ВИКОНУВАЧ

Виконавець дипломного проєкту — Марковець Валентин Сергійович.

3. ПРИЗНАЧЕННЯ ВИРОБУ ТА МЕТА ПРОЄКТУ

Визначення виробу: пристрій, призначений для дистанційного керування гібридною роботизованою платформою для розмінування, що поєднує електричні приводи та двигун внутрішнього згоряння. Модуль забезпечує формування та передачу ШІМ-сигналів до контролерів електродвигунів ходу, керування ДВЗ та допоміжними виконавчими механізмами через релейні модулі з оптичною розв'язкою, а також двосторонній телеметричний зв'язок з пультом оператора. Пристрій орієнтований на використання у складі безпілотних наземних платформ для гуманітарного та військового розмінування.

Мета проєкт: розробка конструкції та схемотехнічного рішення універсального електронного модуля дистанційного керування гібридною платформою для розмінування на базі політного контролера з відкритою прошивкою ArduPilot Rover та оформлення комплекту конструкторської документації.

4. ТЕХНІЧНІ ВИМОГИ

4.1. Вимоги призначення

Вхідна напруга живлення блоку керування: 6–36 В поточному струмі;

Вхідна напруга живлення силової частини: 12 В постійному струмі;

Тип живлення: зовнішнє, від акумуляторних батарей платформи;

Кількість каналів PWM-керування електродвигунами: 2 (лівий та правий двигуни ходу);

Діапазон ШІМ-сигналів: 1000–2000 мкс;

					PE21.469375.001 ПЗ	Лис
						62
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

Режим керування рухом: диференційне керування (Skid Steering);

Кількість релейних каналів керування ДВЗ: 6 (стартер, запалення, глушіння, зчеплення — 2 канали, подача газу);

Тип оптичної розв'язки: оптрони PC817, шість каналів;

Тип силових ключів: MOSFET IRLZ24N, шість каналів;

Протокол телеметричного зв'язку: MAVLink;

Прошивка політного контролера: ArduPilot Rover;

Периферійні інтерфейси: UART $\times$ 2, I2C, SBUS, USB Type-C.

4.2. Вимоги стійкості до зовнішніх факторів

Пристрій повинен зберігати працездатність в умовах підвищених механічних вібрацій та ударних навантажень, характерних для роботи машини, розмінування;

Пристрій повинен зберігати працездатність в умовах електромагнітних заводів, що забезпечують під час роботи системи запалювання ДВЗ та комутації потужних електродвигунів;

Діапазон робочих температур: від -20°C до $+50^{\circ}\text{C}$;

Діапазон відносної вологості: від 0% до 85%.

4.3. Вимоги надійності

Пристрій повинен бути відновлюваним та ремонтпридатним у польових умовах;

Гальванічна ізоляція між керуючою та силовою частинами повинна бути забезпечена оптичною розв'язкою;

роздільне електроживлення блоку керування та силової частини повинно виключати взаємний вплив;

Захисні діоди повинні запобігти пошкодженню MOSFET-транзисторів від зворотної ЕРС при комутації індуктивних навантажень;

Підтягуючі резистори на затворах MOSFET-транзисторів повинні запобігти гальмівному спрацьовуванню при вільному кері виклику сигналу.

4.4. Вимоги до конструкції

Усі компоненти повинні бути розміщені на одній стороні двосторонньої друкованої плати;

					<i>PE21.469375.001 ПЗ</i>	Лис
						63
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

Зворотний бік плати використовується для прокладання провідників та полігонів загального проводу;

На верхньому шарі плати повинен бути виконаний полігон GND керуючої частини, на нижньому — полігон GND_12V силової частини;

Сигнальні та силові засоби від контактних майданчиків плати до роз'ємів на корпусі повинні бути замінені разом для забезпечення вібростійкості з'єднання;

Роз'єми живлення типу XT60PW повинні залишитися роз'ємними для оперативного від'єднання акумуляторних батарей;

Друкована плата повинна фіксуватися в середині корпусу на гвинтових стійках.

4.5. Вимоги до корпусу

Корпус повинен бути виконаний з металевого матеріалу для забезпечення механічної міцності та екранування від електромагнітних завад;

Конструкція корпусу повинна складатися з основи та роз'ємної верхньої кришки на гвинтових з'єднаннях;

На передній панелі повинні бути наявні дві силові роз'єми живлення з маркуванням напруги;

На бічних панелях повинні бути розміщені авіаційні роз'єми серії GX для підключення периферійних пристроїв, ШІМ-виходів та релеєвих каналів;

На одній із бічних панелей має бути виведений роз'єм USB Type-C для доступу до політного контролера без розбирання корпусу;

На верхній кришці повинні бути передбачені вентиляційні отвори та отвори для виведення індикаторних світлодіодів стану релеєвих каналів.

4.6. Вимоги до технологічності

Пристрій має бути оптимізований під умови дрібносерійного виробництва;

Конструкція повинна базуватися на використанні розширених електронних компонентів, що є доступними на ринку.

5. ВИМОГИ ДО ЕРГОНОМІЧНОСТІ

					РЕ21.469375.001 ПЗ	Лис
						64
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

Розміщення роз'ємів на корпусі повинно забезпечувати зручність підключення кабелів в умовах обмеженого простору всередині платформи;

Маркування на корпусі повинно чітко ідентифікувати місце кожного роз'єму;

Індикаторні світлодіоди повинні бути видимі оператору при зовнішньому огляді модуля без розбирання корпусу;

Конструкція повинна забезпечувати можливість швидкого монтажу та демонтажу модуля на платформі.

6. ВИМОГИ ДО ЕКСПЛУАТАЦІЇ, ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ТА РЕМОНТУ

Конструкція корпусу повинна забезпечувати швидкий доступ до друку платної для проведення діагностичних та ремонтних робіт у польових умовах;

Пристрій не повинен потребувати спеціалізованого регламентного технічного обслуговування;

Заміна шкідливих компонентів повинна бути можливою без спеціалізованого обладнання.

7. ВИМОГИ ДО ВЗАЄМОЗАМІННОСТІ

При проєктуванні топології друкованої плати необхідно використовувати стандартні елементи корпусу, що дозволяє провести швидку заміну несправних компонентів на аналогічні без зміни конструкції плати;

Для збирання конструкції корпусу та фіксації друкованої плати необхідно використовувати стандартизовані кріпильні вироби розширених метричних номіналів.

8. ВИМОГИ БЕЗПЕКИ

Гальванічна ізоляція між керуючою та силовою частинами повинна забезпечувати захист оператора та електронних компонентів від уражень електричним струмом та імпульсних перенапруг;

Роздільне електроживлення повинно виключати можливість виходу з ладу блоку керування при короткому замиканні у силовому колі;

Маркування роз'ємів живлення має запобігти помилковому підключенню джерела напруги.

					РЕ21.469375.001 ПЗ	Лис
						65
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

9. ТРАНСПОРТУВАННЯ ТА ЗБЕРІГАННЯ

Транспортувати виріб допускається автомобільним, залізничним та видом транспорту в упакованому вигляді;

Під час зберігання та транспортування слід уникати сильної вологості, високо високої чи низької температури та її різких перепадів.

10. ВИМОГИ ДО МАТЕРІАЛІВ ТА КОМПЛЕКТУВАЛЬНИХ ВИРОБІВ

У конструкції повинні бути використані компонентна база та матеріали, які є розширеними на ринку, випускаються серійно та є доступними для закупівлі в Україні;

11. ВИМОГИ ДО ПАКУВАННЯ ТА МАРКУВАННЯ

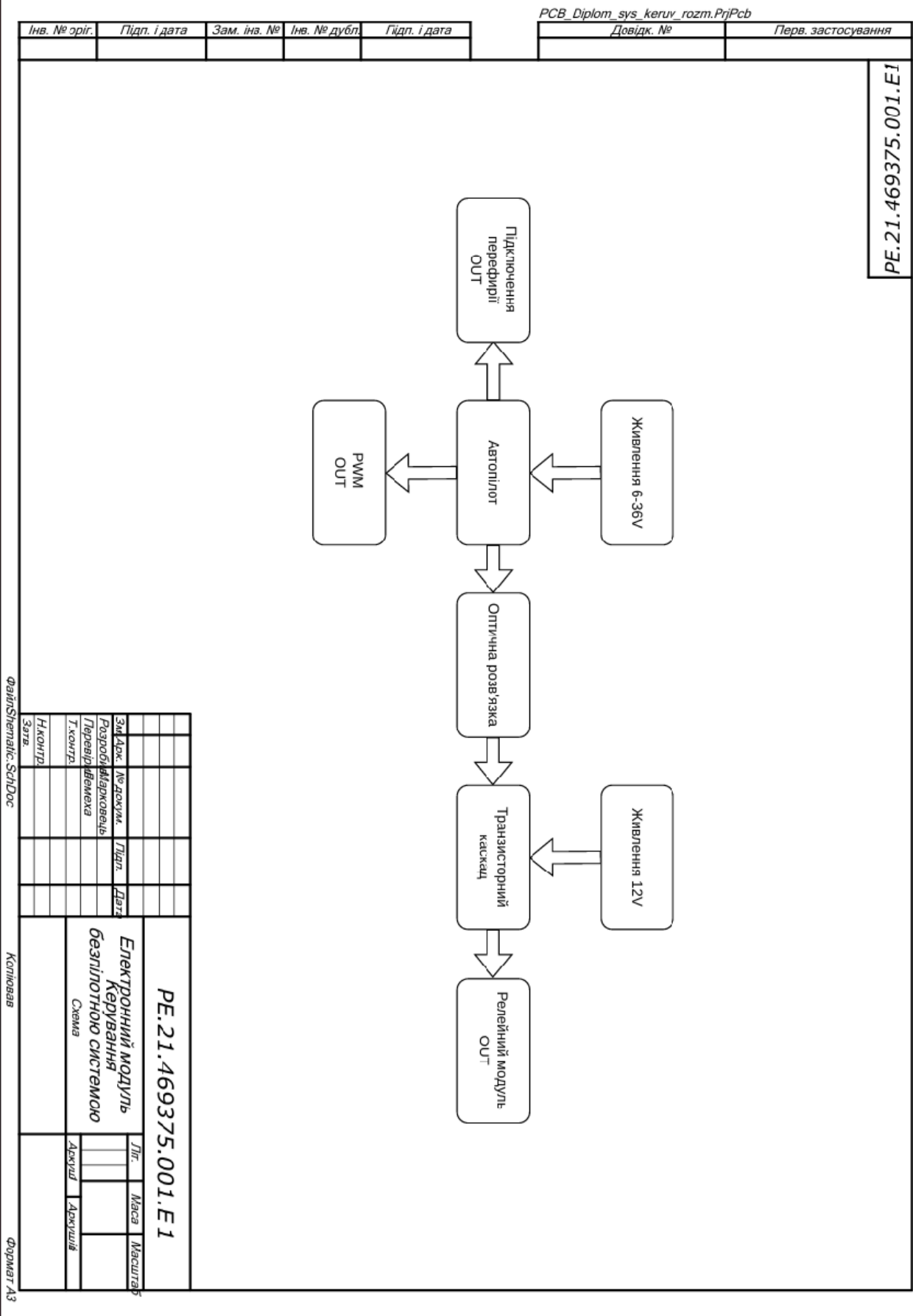
Консервація пристрою не передбачена;

Пакування повинно мати достатню міцність для захисту виробу при транспортуванні;

На корпусі пристрою має бути нанесено маркування із зазначенням кожного призначення роз'єму, напруги живлення та шифру виробу.

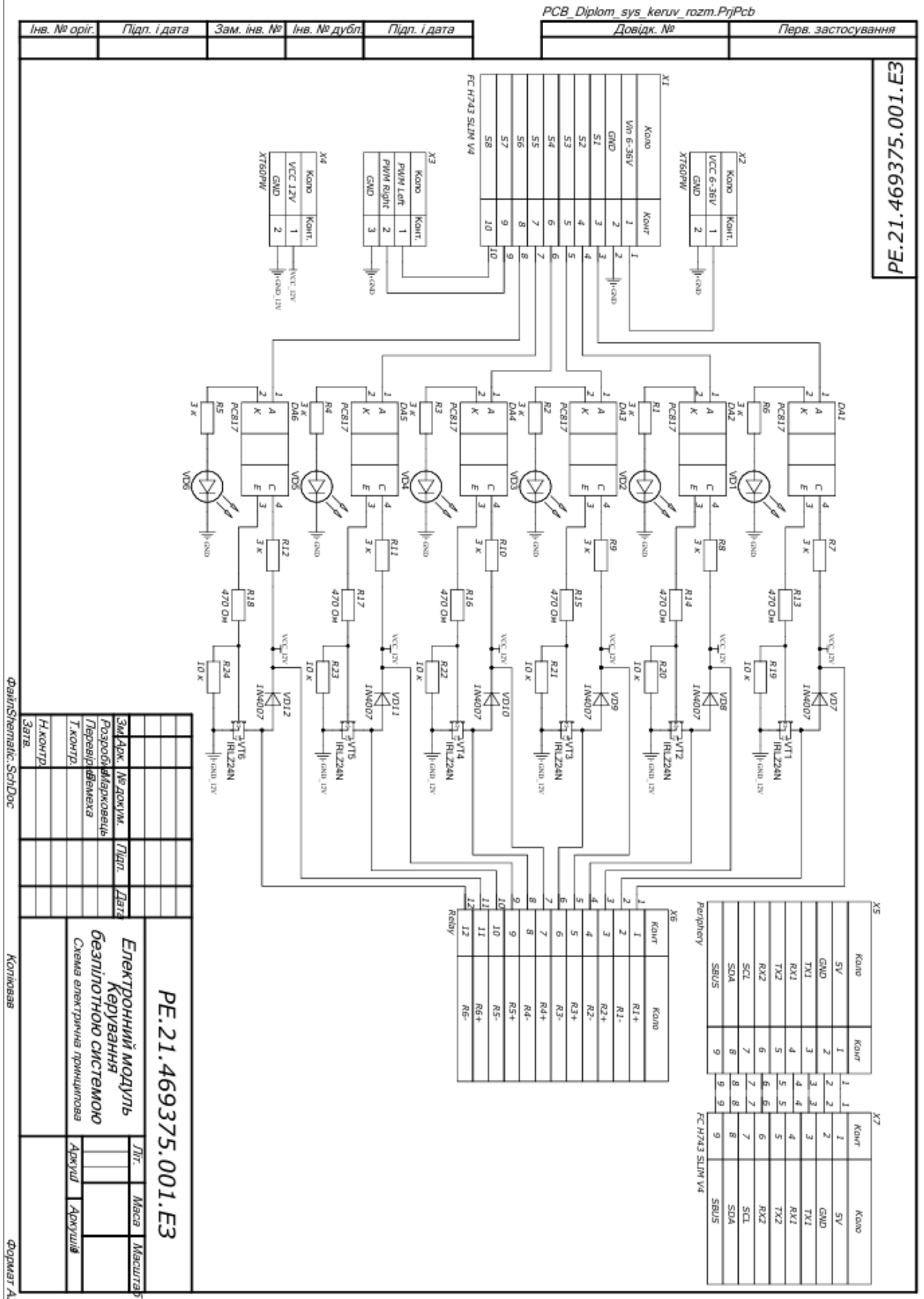
					РЕ21.469375.001 ПЗ	Лис
						66
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТОК Б. СХЕМА ЕЛЕКТРИЧНА СТРУКТУРНА



РЕ.21.469375.001.Е1

ДОДАТОК В. СХЕМА ЕЛЕКТРИЧНА ПРИНЦИПОВА



ДОДАТОК Г. КРЕСЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ КОРПУСУ

Technical drawing of a metal cabinet (PE.21.103142.001) showing front, side, and top views with dimensions. The front view shows a cabinet with a door, handle, and lock. The side view shows the depth and internal components. The top view shows the width and height. Dimensions are in mm. The drawing is labeled 'PE.21.103142.001'.

ДОДАТОК Д. ПЕРЕЛІК ЕЛЕМЕНТІВ

Первинне застосування	Поз. позн.	Найменування	Кільк.	Примітка		
		<u>Роз'єми</u>				
	X2, X4	XT60PW-M, AMASS	2			
	X3	PLS-40 (ZL201-3G), CviLux	1			
Довідковий №		<u>Резистори</u>				
	R1, R2, R3, R4, R5, R6, R7, R8, R9, R10, R11, R12	RC1206FR-3KR (RC1206, 3 кОм, 0.25Вт, ±1%), Hitano	12			
	R13, R14, R15, R16, R17, R18	RC1206FR-470R (RC1206, 470 Ом, 0.25Вт, ±1%), Hitano	6			
	R19, R20, R21, R22, R23, R24	RC1206FR-10KR (RC1206, 10 кОм, 0.25Вт, ±1%), Hitano	6			
Підпис і дата		<u>Діоди</u>				
	VD1, VD2, VD3, VD4, VD5, VD6	10034R1C-CSE-E, PCHUI YUAN ELECTRONIC CO., LTD.	6			
	VD7, VD8, VD9, VD10, VD11, VD12	1N4007, MIC	6			
		<u>Мікросхеми</u>				
Інв. № дубл.						
	DA1, DA2, DA3, DA4, DA5, DA6	PC817A, Sharp	6			
Зам. інв. №						
Підпис і дата						
Інв. № орг.						
РЕ21.469375.001 ПЕ						
Зм. Арк.	№ докум.	Підпис	Дат	Літера	Аркуш	Аркушів
Розроб.	Марковець				1	2
Перевір.	Лемеха					
Т.контр						
Н.контр						
Затв.	Лемеха					
Універсальний електронний модуль керування гібридною безпілотною платформою для задач розмінування						

					РЕ21.469375.001 ПЗ	Лис
						72
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		