

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

Факультет/(ННІ) Інформаційних технологій

ПОГОДЖЕНО

Декан факультету (Директор ННІ)
Інформаційних технологій
(назва факультету (ННІ))

_____ Ігор Болбот
(підпис) (ім'я ПРІЗВИЩЕ)

“ ___ ” _____ 2025 р.

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри
Комп'ютерних систем, мереж та кібербезпеки
(назва кафедри)

_____ Дмитро Касаткін
(підпис) (ім'я ПРІЗВИЩЕ)

“ ___ ” _____ 2025 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему Вдосконалення системи зв'язку станції наземного керування наземним роботом

Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія
(код і найменування)

Освітня програма Комп'ютерні системи та мережі
(назва)

Орієнтація освітньої програми _____
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Гарант освітньої програми

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

_____ (підпис)

_____ Місюра М.Д.
(ПІБ)

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

_____ Проф., д.т.н.
(науковий ступінь та вчене звання)

_____ (підпис)

_____ Ігор Болбот
(ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Виконав

_____ (підпис)

_____ Євгеній Степанець
(ім'я ПРІЗВИЩЕ здобувача)

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Факультет (ННІ) Інформаційних технологій

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

(науковий ступінь, вчене звання) (підпис) (ім'я ПРІЗВИЩЕ)
“ ” 20 року

ЗАВДАННЯ

ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ЗДОБУВАЧУ

Степанець Євгеній Олександрович
(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія
(код і найменування)

Освітня програма Комп'ютерні системи та мережі
(назва)

Орієнтація освітньої програми _____
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Тема магістерської кваліфікаційної роботи Вдосконалення системи зв'язку станції наземного керування наземним роботом

затверджена наказом від “29”жовтня 2024р. №1941 “С”

Термін подання завершеної роботи на кафедру 14.11.2025
(рік, місяць, число)

Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи Вдосконалення системи зв'язку станції наземного керування наземним роботом

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Які вимоги до надійності повинна забезпечити досліджена система?
2. Що можна покращити в дослідженій системі?
3. Які апаратні модулі були інтегровані?

Перелік графічного матеріалу (за потреби) _____

Дата видачі завдання “29”жовтня 2024 р.

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи _____
(підпис)

Ігор Болбот
(ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Завдання прийняв до виконання _____

Євгеній Степанець
(ім'я ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 97 сторінок, 16 рисунків, 5 таблиць, 15 джерел.

Об'єктом розробки – у цьому проєкті є створення вдосконаленої системи зв'язку, яка забезпечує ефективну взаємодію між наземною станцією керування та роботизованим комплексом.

Мета роботи – досягнення підвищення рівня ефективності, стабільності та надійності функціонування системи керування роботизованою платформою шляхом модернізації комунікаційної підсистеми, а також мінімізації втрат управління, що виникають у процесі експлуатації.

Проєкт структуровано у чотири основні розділи, кожен з яких має свої важливі етапи, спрямовані на досягнення поставлених цілей. Перший розділ містить ґрунтовний аналіз літератури та огляд сучасних інженерних рішень у сфері бездротових систем зв'язку для робототехнічних комплексів. У ньому розглядаються існуючі архітектури комунікаційних систем, їх технічні характеристики, переваги та недоліки. Особливу увагу приділено визначенню ключових проблем, таких як втрата сигналу під час передачі, обмежений радіус дії системи й затримки, які суттєво впливають на якість управління. Другий розділ сфокусований на розробці концептуального підходу до створення вдосконаленої системи зв'язку.

Автор визначив основні вимоги до проєктованої комунікаційної підсистеми, які включають високу стабільність і стійкість сигналу. Був проведений детальний аналіз і обґрунтований вибір технічних компонентів системи, таких як модулі Foxeer 5.8G Reaper Infinity 5W 40CH VTx і BelinRC ELRS 433 MHz TX Backpack. У розділі описано архітектуру системи, способи взаємодії її складових та тонкощі інтеграції з центральним блоком управління роботизованого комплексу.

Третій розділ присвячено практичному впровадженню розробленої системи. У ньому детально описано налаштування каналів передачі даних, алгоритмів обробки сигналів і програмних компонентів станції керування. Особливий акцент зроблено на аналізі таких аспектів, як частотний діапазон, потужність передавачів і вибір типу антен. Ці параметри напряму впливають на

якість з'єднання та стабільність передачі команд. Четвертий розділ має на меті оцінити ефективність модернізованої системи та запропонувати перспективи для майбутнього розвитку.

Результати економічного розрахунку засвідчили високу рентабельність проекту: зменшення втрат управління на 40 %, підвищення загальної продуктивності на 35 % та скорочення терміну повернення інвестицій до дев'яти місяців. Крім того, в рамках дослідницької роботи були сформульовані перспективні напрями вдосконалення системи: інтеграція інтелектуальних алгоритмів адаптивного керування каналами зв'язку, використання технологій МІМО та beamforming, а також впровадження рішень на основі хмарних платформ.

У результаті виконання магістерської роботи було створено і експериментально перевірено вдосконалену систему зв'язку, яка забезпечує стабільне керування роботизованим комплексом за рахунок знижених втрат сигналу й підвищення загальної ефективності його роботи. Отримані результати свідчать про доцільність впровадження нової архітектури як технічно прогресивного та економічно вигідного рішення для сучасних роботизованих систем.

ABSTRACT

Explanatory note: 85 pages, 16 figures, 5 tables, 15 sources.

The object of development in this project is to create an improved communication system that ensures effective interaction between the ground control station and the robotic complex.

The goal of the work is to increase the efficiency, stability, and reliability of the robotic platform control system by modernizing the communication subsystem and minimizing control losses that occur during operation.

The project is structured into four main sections, each of which has its own important stages aimed at achieving the set goals. The first section contains a thorough analysis of the literature and an overview of modern engineering solutions in the field of wireless communication systems for robotic complexes. It examines existing communication system architectures, their technical characteristics, advantages, and disadvantages. Particular attention is paid to identifying key problems, such as signal loss during transmission, limited system range, and delays, which significantly affect the quality of control.

The second section focuses on developing a conceptual approach to creating an improved communication system. The author has identified the basic requirements for the designed communication subsystem, which include high signal stability and reliability. A detailed analysis and justified selection of technical components of the system, such as Foxeer 5.8G Reaper Infinity 5W 40CH VTx and BelinRC ELRS 433 MHz TX Backpack modules, was carried out. T

he section describes the system architecture, the methods of interaction between its components, and the intricacies of integration with the central control unit of the robotic complex. The third section is devoted to the practical implementation of the developed system. It describes in detail the configuration of data transmission channels, signal processing algorithms, and software components of the control station. Particular emphasis is placed on the analysis of aspects such as frequency range, transmitter power, and antenna type selection.

These parameters directly affect the quality of the connection and the stability of command transmission. The fourth section aims to evaluate the effectiveness of the

upgraded system and suggest prospects for future development. The results of the economic calculation demonstrated the high profitability of the project: a 40% reduction in management losses, a 35% increase in overall productivity, and a reduction in the return on investment period to nine months. In addition, the research work formulated promising areas for improving the system: integration of intelligent algorithms for adaptive control of communication channels, use of MIMO and beamforming technologies, and implementation of cloud-based solutions.

As a result of the master's thesis, an improved communication system was created and experimentally tested, which ensures stable control of the robotic complex due to reduced signal loss and increased overall efficiency. The results obtained indicate the feasibility of implementing the new architecture as a technically advanced and cost-effective solution for modern robotic systems.

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ.....	1
ABSTRACT.....	6
ВСТУП.....	11
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ ДЛЯ НАЗЕМНИХ РОБОТИЗОВАНИХ КОМПЛЕКСІВ.....	13
1.1. Загальний огляд архітектур наземних роботизованих комплексів та вимог до їхнього зв'язку	13
1.1.1. Класифікація наземних роботів та їхні типові сценарії застосування.	14
1.1.2. Ключові показники ефективності (KPI) системи зв'язку: надійність, затримка, пропускна здатність	20
1.2. Огляд та порівняльний аналіз сучасних технологій зв'язку, що використовуються в наземних роботах (Wi-Fi, LTE/5G, радіомодеми).	22
1.3. Моделювання та дослідження параметрів існуючої системи зв'язку СНК – наземний робот.....	27
1.3.1. Опис досліджуваної системи та її апаратних засобів.	28
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА ПРОЕКТНИХ РІШЕНЬ ДЛЯ ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ЗВ'ЯЗКУ	33
2.1. Концептуальне обґрунтування напрямків вдосконалення системи зв'язку.	33
2.1.1. Вибір та обґрунтування пріоритетних технологій (MIMO частотне або просторове рознесення).	35
2.1.2. Розробка структурної схеми нової, гібридної або адаптивної системи зв'язку.	38
2.2. Розробка алгоритмів адаптивного керування режимом передачі даних.....	42
2.2.1. Алгоритм динамічного вибору оптимального каналу (Multi-Link Operation).	44
2.2.2. Організація радіоканалу зв'язку та підвищення його ефективності за допомогою технології QoS.	48

2.3. Проектування архітектури програмного забезпечення СНК для керування адаптивним зв'язком.	52
РОЗДІЛ 3. КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ВДОСКОНАЛЕНОЇ СИСТЕМИ	57
3.1. Технічні рішення щодо апаратної модернізації станції наземного керування.	57
3.1.1. Оновлення радіомодулів та вдосконалення антенних систем	59
3.1.2. Відеопередавач Foxeer 5.8G Reaper Infinity 5W 40CH VTx	60
3.1.3. Конкуренти Foxeer 5.8G Reaper Infinity 5W 40CH VTx, переваги та недоліки(GEPRC RAD VTX 5.8G 2.5W, iFlight BLITZ Whoop 5.8GHz 2.5W VTX, VTX30-800 5.8G 40CH 800mW).....	62
3.1.4. Радіопередавач BelinRC ELRS 433 MHz TX Backpack	68
3.1.5. Конкуренти BelinRC ELRS 433 MHz TX Backpack, переваги та недоліки(ELRS 433 MHz TX Module 400TX, Jumper ELRS TX FPV 2.4 GHz, Jumper AION TX Nano ELRS 2.4 GHz).	70
3.2. Опис апаратного та програмного забезпечення експериментального стенда.	77
3.2.1. Антенні модулі для обраних передавачів.	80
3.2.2. Критерії оцінки та послідовність натурних випробувань вдосконаленої системи.	83
РОЗДІЛ 4. ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ВДОСКОНАЛЕНОЇ СИСТЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ	86
4.1. Результати практичної реалізації та порівняльний аналіз.	86
4.1.1. Аналіз показників надійності та пропускну здатності до та після вдосконалення.	88
4.2. Техніко-економічне обґрунтування впровадження запропонованих рішень.	90
4.3. Обґрунтування подальших напрямків роботи та розвитку системи зв'язку.	

.....	92
ВИСНОВКИ	95

ВСТУП

Сучасний етап науково-технічного прогресу вирізняється стрімким розвитком автоматизації та впровадженням інтелектуальних систем управління у різних сферах людської діяльності. Одним із найбільш динамічних напрямів є робототехніка, де особливу увагу привертають наземні роботизовані комплекси, призначені для виконання широкого спектра завдань — від розвідувальних і рятувальних операцій до автоматизації у промисловості, логістиці й сфері безпеки.

Ефективність роботи таких комплексів залежить від якості системи зв'язку між наземною станцією керування та самою платформою, яка забезпечує оперативну передачу команд, телеметричних даних, інформації про навігацію та відеопотоків у реальному часі.

Питання створення стабільних і продуктивних систем зв'язку залишається однією з ключових задач сучасної робототехніки. Від їх надійності та швидкодії залежать точність керування, безпека під час виконання завдань і загальна продуктивність комплексів.

Разом із тим наявні системи зв'язку часто стикаються з такими проблемами, як втрата сигналу, обмежений радіус дії, затримки у передачі даних і чутливість до зовнішніх перешкод. Ці фактори значно ускладнюють використання роботизованих платформ у складних умовах, зокрема при роботі на великих дистанціях або в умовах радіоелектронного впливу.

Актуальність тематики магістерської роботи обумовлюється необхідністю удосконалення архітектури комунікаційних систем між наземною станцією керування й роботизованими платформами.

Розробка ефективного, стабільного та енергоощадного зв'язку сприятиме підвищенню рівня автономності роботів, зменшенню ризику втрат керування та покращенню загальної продуктивності комплексу. Запропоноване рішення базується на інтеграції високочастотних відеомодулів Foxeer 5.8G Reaper Infinity 5W 40CH VTx із низькочастотними телеметричними модулями BelinRC ELRS 433 MHz TX Backpack, що дозволяє досягти оптимального співвідношення між

швидкістю, дальністю та стабільністю передачі даних. Метою дослідження є підвищення ефективності й надійності системи зв'язку між станцією керування та наземним роботизованим комплексом через вдосконалення її апаратно-програмного забезпечення та впровадження сучасних технологій передачі даних.

Для реалізації цієї мети в роботі визначені такі завдання: аналіз існуючих систем зв'язку для наземних роботів; виявлення їх основних обмежень і недоліків; розробка концепції вдосконаленої гібридної комунікаційної системи; аргументація вибору апаратного й програмного забезпечення; моделювання і оцінка ефективності запропонованого рішення.

Об'єктом дослідження є система зв'язку між наземною станцією керування та роботизованим комплексом, а предметом — методологія та технології підвищення ефективності таких систем через комбінування частотних діапазонів, використання технологій MIMO, просторового рознесення й адаптивного керування каналами зв'язку.

Наукова новизна роботи полягає у створенні адаптивної системи зв'язку, що автоматично коригує свої параметри відповідно до умов середовища, забезпечуючи стабільну якість з'єднання навіть за мінімальних втрат і затримок. Практична значущість дослідження полягає у можливості безпосереднього впровадження розробленої системи у реальні робототехнічні платформи, що дозволить зменшити ризик втрат управління, підвищити точність виконання завдань і оптимізувати витрати на технічне обслуговування.

У підсумку, магістерська робота зосереджена на вирішенні актуального завдання підвищення ефективності систем зв'язку в наземних роботизованих комплексах. Її результати мають значущість як у теоретичній, так і в практичній площині, оскільки вони створюють фундамент для подальшого вдосконалення автономних і напіваавтономних систем управління. Це, своєю чергою, сприяє прогресу сучасних технологій у галузі робототехніки та автоматизації.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ ДЛЯ НАЗЕМНИХ РОБОТИЗОВАНИХ КОМПЛЕКСІВ

1.1. Загальний огляд архітектур наземних роботизованих комплексів та вимог до їхнього зв'язку

Наземний роботизований комплекс (НРК) є складною багатокомпонентною системою, архітектура якої зазвичай ділиться на три основні взаємопов'язані елементи: мобільну платформу (сам робот), наземну станцію керування (СНК) та систему зв'язку, яка виступає критично важливим сполучним елементом між компонентами. Мобільна платформа оснащена шасі, виконавчими механізмами, бортовим комп'ютером і різноманітними сенсорами, серед яких камери, лідари та навігаційні системи (GPS/INS). Ці пристрої забезпечують збір інформації про навколишнє середовище і технічний стан робота. СНК функціонує як робоча платформа оператора, де здійснюється візуалізація даних, аналіз поточної ситуації та формування команд для управління. Усі ці компоненти інтегровані через систему зв'язку, яка забезпечує обмін інформацією в обох напрямках.

Функції НРК розподіляються на кілька рівнів. Базовий рівень відповідає за пряме управління рухами комплексу та первинний збір даних із сенсорів. Середній рівень охоплює навігацію, обробку інформації та планування локальних дій. Вищий рівень функціонує здебільшого на базі СНК і включає інтерфейс для оператора, функції аналізу завдань і прийняття стратегічних рішень. При цьому вимоги до системи зв'язку формуються залежно від конкретного призначення комплексу: розвідувальні операції, розмінування або логістичне забезпечення. Система зв'язку повинна відповідати кільком ключовим критеріям.

Передусім важлива її надійність, яка гарантує безперебійне передання критично важливих команд і телеметрії навіть у складних умовах роботи або за наявності значних перешкод. Другою важливою характеристикою є мінімальна затримка передачі (Latency), що особливо важливо під час телеоперацій у режимі реального часу. Значна затримка може спричинити втрату керування чи інші

аварійні ситуації. Третім фактором є пропускна здатність системи, яка повинна забезпечувати передачу великих обсягів даних, таких як високоякісне відео та інформація з 3D-сенсорів. Також необхідна стійкість до перешкод і захищеність каналу передачі даних, що передбачає використання надійних протоколів і адаптацію до умов радіоелектронної боротьби.

1.1.1. Класифікація наземних роботів та їхні типові сценарії застосування.

Класифікація наземних роботизованих комплексів (НРК) є фундаментальним етапом для визначення специфічних вимог до системи зв'язку, оскільки функціональне призначення та спосіб керування відіграють вирішальну роль у формуванні необхідних параметрів, таких як пропускна здатність, допустима затримка і надійність каналу передачі даних. Залежно від функціонального призначення, НРК умовно поділяються на кілька ключових категорій.

Перша категорія охоплює розвідувальні та спостережні системи, основне завдання яких полягає у зборі візуальної та сенсорної інформації у складнодоступних або небезпечних зонах. Для таких комплексів особливо важлива безперервність високоякісного відеопотоку, що обумовлює потребу у каналі з високою пропускною здатністю. Наземні розвідувальні та спостережні роботи (НРК) є надзвичайно важливим класом роботизованих систем, призначених для збору даних про навколишнє середовище, об'єкти або потенційні загрози у зонах, небезпечних для перебування людей.

Вони можуть ефективно функціонувати в найрізноманітніших умовах — у міських районах, на відкритих територіях, у завалах чи навіть підземних комунікаціях. Для забезпечення маневреності та прихованості ці роботи зазвичай мають компактні або середні розміри. Їх основне завдання полягає в передачі якісних сенсорних даних на станцію наземного керування (СНК). На борту таких роботів встановлено широкий спектр сенсорного обладнання. До нього входять відеокамери (денні, нічні та тепловізійні), які надають оператору повну інформованість про ситуацію. Крім того, використовуються мікрофони для акустичної розвідки, а також датчики, такі як газоаналізатори та прилади для

виявлення радіації, які дозволяють здійснювати моніторинг навколишнього середовища. Великий обсяг отримуваних даних, особливо потокове відео високої роздільної здатності, потребує стабільного каналу зв'язку з високою пропускну здатністю.

Невідповідність каналу цим вимогам може призвести до погіршення якості передачі зображення, збільшення затримки чи навіть до втрати сигналу, що суттєво знижує ефективність виконання місії. Керування такими роботами часто реалізується через комбінацію телеоперацій для подолання складних перешкод і точного наведення сенсорів із напівавтономними функціями для пересування відкритими ділянками. Цей гібридний режим роботи висуває подвійні вимоги до каналу зв'язку: він має забезпечувати як високу пропускну здатність для передачі відео, так і низьку затримку для оперативного реагування оператора у критичних ситуаціях.

Надійність зв'язку тут є визначальним фактором, оскільки його втрата під час місії може спричинити не тільки втрату дорогого обладнання, а й провал всієї операції. Тому однією з головних задач у вдосконаленні систем зв'язку НРК є розробка рішень для підтримання одночасно високої швидкості передачі даних і мінімальної затримки навіть за умов радіоелектронного впливу чи перешкод.



Рисунок 1.1.1. – Роботизований комплекс RATTEL S (Заміновувач, розвідник)

До другої категорії належать інженерні та саперні роботи, зокрема ті, що використовуються для розмінування або взаємодії з вибухонебезпечними предметами. У таких системах мінімальна затримка передачі сигналу і висока надійність зв'язку є критично важливими, оскільки помилки в управлінні можуть спричинити серйозні наслідки. Інженерні та саперні наземні роботи (НРК) представляють спеціалізовану категорію роботизованих комплексів, призначених для виконання високоточних і надзвичайно ризикованих операцій у критично важливих зонах.

Серед ключових сфер застосування таких систем можна відзначити розмінування, маніпуляції з вибухонебезпечними предметами (EOD), а також проведення інженерних заходів у складних умовах, наприклад, на зруйнованих об'єктах. Основною особливістю НРК є наявність потужних і прецизійних маніпуляторів, обладнаних різномірними інструментами, які забезпечують виконання складних операцій, таких як різання кабелів, захоплення об'єктів чи встановлення зарядних пристроїв. Враховуючи високу вартість помилки в таких завданнях, до системи зв'язку цих комплексів висуваються жорсткі вимоги щодо мінімізації затримки передачі даних (Latency). Управління наземними роботами цієї категорії здебільшого здійснюється у телеопераційному режимі, коли оператор керує всіма діями робота безпосередньо, постійно контролюючи їхній результат через відеокамери.

В таких умовах необхідно забезпечувати найменшу можливу затримку зв'язку, яка зазвичай не повинна перевищувати 100 мілісекунд і в ідеальному випадку має досягати близько 50 мілісекунд. Така низька латентність є критичною для створення ефекту присутності та гарантування інтуїтивного управління маніпулятором. Суттєві затримки можуть викликати "ефект зворотного відлуння", що призводить до неточності рухів маніпулятора, його ривковості та ненадійності, що абсолютно неприйнятно при роботі із чутливими або потенційно небезпечними об'єктами. Незважаючи на важливість високої пропускної здатності для передачі відеоданих, особливо для забезпечення детального огляду робочої зони, пріоритет завжди надається гарантованій доставці критичних команд управління з мінімальною затримкою.

Надійність каналу комунікації має бути винятковою, оскільки втрата зв'язку під час виконання тонкої маніпуляції може призвести до катастрофічних наслідків. Додатковим викликом є функціонування у середовищах із радіоперешкодами, що зумовлює необхідність стійкості системи комунікації до радіоелектронної боротьби (РЕБ), а також впровадження резервних захищених каналів зв'язку. Таким чином, удосконалення технологій зв'язку для інженерних НРК має бути орієнтованим на розробку архітектури, яка забезпечує мінімально фіксовану затримку передачі даних разом із максимальною стійкістю каналу до зовнішніх перешкод.



Рисунок 1.1.2. – Роботизований комплект RATTEL M (розміновувач)

Третя категорія включає логістичні та транспортні механізми, які займаються переміщенням вантажів; для них затримка сигналу менш критична, однак потрібна стабільна передача навігаційних даних на великі відстані. В окрему категорію можна виділити сільськогосподарські та промислові роботи, які здебільшого працюють у чітко структурованих середовищах. З точки зору принципів керування, НРК поділяються на три основні групи, кожна з яких висуває унікальні вимоги до системи зв'язку.

Першу групу становлять телеопераційні системи, які передбачають управління роботом в реальному часі безпосередньо оператором. Логістичні та транспортні наземні роботи належать до категорії НРК, основною функцією яких є виконання завдань з переміщення вантажів, забезпечення постачання, патрулювання маршрутів чи супроводу колон. На відміну від розвідувальних або саперних систем, такі роботи зазвичай мають більші розміри та орієнтовані на тривалу автономну діяльність, часто охоплюючи значні відстані. Їхні операції

здебільшого здійснюються у відкритих місцевостях або на визначених промислових і складських територіях, що формує специфічні вимоги до каналів зв'язку.

Основним режимом роботи таких НРК є автономна або напівавтономна навігація за заданими маршрутами. Оператор станції наземного керування втручається лише у випадках завантаження нових місій, корекції маршруту, контролю статусу або при виникненні непередбачених перешкод. З огляду на це, вимоги до пропускну здатності каналу зв'язку є менш критичними порівняно з розвідувальними комплексами: основний обсяг даних охоплює передачу команд щодо маршрутизації та телеметрії, включаючи GPS-координати, стан вантажу, рівень пального чи заряду акумулятора, а також діагностичні показники. Ключовими параметрами системи зв'язку для логістичних НРК є велика дальність дії та висока надійність на значних відстанях.

Оскільки роботи працюють поза прямою видимістю і можуть знаходитися далеко від станції наземного керування, необхідно застосовувати потужні й стабільні радіоканали, що можуть включати ретранслятори або доповнюватися супутниковими чи стільниковими технологіями. Хоча допустима затримка сигналу в цьому випадку може досягати кількох сотень мілісекунд і не є настільки критичною, як для саперних систем, надійність залишається визначальним чинником для уникнення втрати контролю над вантажем або робототехнічним пристроєм загалом. Удосконалення систем зв'язку цієї категорії зосереджено на поліпшенні потужності передавачів і впровадженні протоколів із високою стійкістю до перешкод, що забезпечують стабільну роботу на максимально можливій дистанції.



Рисунок 1.1.3. – Роботизований комплекс NURSE TB20 (Логістична платформа)

Наступною групою є напівавтономні системи, що комбінують ручне управління з певною часткою автономних функцій. У таких випадках оператор задає загальні завдання, наприклад обхід перешкоди, а робот виконує їх самостійно. Хоча ці системи не потребують постійного зв'язку, він має бути достатньо надійним, аби забезпечити оперативну передачу нових команд чи можливість швидкого втручання у разі виникнення проблем. Останню групу становлять повністю автономні системи, які діють практично без участі людини. У цьому випадку зв'язок здебільшого забезпечує моніторинг стану платформи, передачу телеметрії та отримання фінальних звітів про виконання завдань.

Таким чином, зі зростанням рівня автономії НРК зменшуються вимоги до пропускної здатності та затримки передачі даних, проте зберігається необхідність високої надійності каналу. Ретельний аналіз зазначених класифікаційних ознак є основою для формулювання цільових параметрів удосконалення систем зв'язку, забезпечуючи їх адаптивність до специфічних вимог різних типів роботизованих комплексів.

1.1.2. Ключові показники ефективності (KPI) системи зв'язку: надійність, затримка, пропускна здатність

Ключові показники ефективності (KPI) системи зв'язку відіграють критичну роль у забезпеченні стабільної роботи станції наземного керування та безперебійного зв'язку з наземним роботом. Одним із ключових аспектів є надійність зв'язку, яка визначає здатність системи забезпечувати стійке та безперервне з'єднання між оператором і роботом без втрати даних або розривів каналу. Особливо важливою ця характеристика стає під час виконання складних чи ризикованих завдань, де навіть короткочасна втрата зв'язку може призвести до збоїв у роботі або некоректного виконання команд. На надійність можуть впливати такі фактори, як якість передавачів і приймачів, стабільність частотного діапазону, рівень перешкод у середовищі передачі та ефективність алгоритмів корекції помилок.

Ще одним важливим показником є затримка передачі даних (latency), яка визначає час, потрібний для передачі команди від оператора до моменту її виконання роботом. У системах дистанційного керування мінімізація затримки є вирішальною, оскільки вона безпосередньо впливає на точність і швидкість роботи робота. Висока затримка може спричинити втрату синхронізації, проблеми з навігацією або уповільнення отримання даних від сенсорів. Для зменшення затримки застосовуються оптимізація протоколів передачі, використання передових стандартів зв'язку з низькою латентністю, наприклад цифрових систем із високою частотою оновлення, та скорочення кількості проміжних вузлів у мережі. Також важливим показником є пропускна здатність системи зв'язку, яка характеризує обсяг інформації, здатної передаватися за одиницю часу.

Затримка (latency) у системах зв'язку станції наземного керування роботами — це час, необхідний для проходження команди від оператора до робота, її виконання та передачі зворотних даних до пульта управління. Іншими словами, це часовий інтервал між дією користувача та відповіддю системи. Цей параметр є ключовим показником ефективності, оскільки безпосередньо впливає на точність, плавність і оперативність керування. Для наземних роботів від

величини затримки залежить швидкість реакції на зміни команд або зовнішніх умов. Занадто висока latency може спричинити помітну «інерцію» у рухах чи реакціях робота, що ускладнює керування, особливо під час виконання складних чи динамічних завдань, наприклад, маневрування у вузьких просторах або уникнення перешкод.

Оптимальною для більшості систем реального часу вважається затримка в межах кількох мілісекунд до десятків мілісекунд, залежно від специфіки завдань і типу даних, що передаються. На latency впливають кілька важливих факторів. Перший — фізичні характеристики каналу зв'язку, зокрема тип модуляції, частотний діапазон, потужність передачі та якість прийому сигналу.

Другий чинник — архітектура мережі: кількість вузлів на шляху передачі та особливості протоколу обміну даними. Наприклад, протоколи з багаторівневими перевітками помилок підвищують надійність зв'язку, але одночасно збільшують затримку.

Третій фактор пов'язаний із обробкою сигналу на програмному й апаратному рівнях, як-от декодуванням відеопотоку чи фільтрацією сенсорних даних. Зменшення затримки — одна з головних цілей вдосконалення систем зв'язку для наземних роботів. Цього можна досягти шляхом застосування високошвидкісних протоколів, оптимізації алгоритмів маршрутизації, використання ефективних методів обробки інформації та скорочення кількості проміжних етапів у ланцюгу передачі.

Результатом зниження latency стає підвищення інтерактивності між оператором і роботом, точніший контроль, а також безпечніше й оперативніше виконання завдань.

Це особливо актуально для сучасних наземних роботів, які працюють із великими обсягами телеметричних даних, відеопотоків чи сигналів від численних сенсорів. Висока пропускну здатність дозволяє забезпечити передачу даних із високою роздільною здатністю, якісне відео у реальному часі та адаптацію системи до зростаючих обсягів інформації. Вона залежить від обраного частотного діапазону, технологій модуляції, характеристик антен та ефективності алгоритмів стиснення даних.

Отже, оптимальне поєднання високої надійності, мінімальної затримки та достатньої пропускної здатності формує фундамент ефективної комунікаційної системи станції наземного керування. Баланс цих показників визначає точність, безпеку і швидкість виконання завдань наземним роботом, що є ключовим фактором у підвищенні загальної ефективності комплексу.

1.2. Огляд та порівняльний аналіз сучасних технологій зв'язку, що використовуються в наземних роботах (Wi-Fi, LTE/5G, радіомодеми).

Огляд і порівняння сучасних технологій зв'язку, що застосовуються в наземних роботах, дозволяють визначити найкращі рішення для забезпечення стабільної, швидкої та надійної передачі даних між оператором і роботом. У системах дистанційного керування важливо знаходити оптимальний баланс між дальністю зв'язку, пропускною здатністю, затримкою і енергоспоживанням. Серед основних технологій, що нині використовуються, виділяють Wi-Fi, LTE/5G та радіомодеми — кожна має свої особливості, переваги й обмеження залежно від умов експлуатації. Wi-Fi є однією з найпоширеніших технологій у системах зв'язку для наземних роботів.

Вона особливо актуальна під час тестувань, лабораторних випробувань або роботи в межах обмежених територій. Її основними перевагами є висока пропускна здатність і низька затримка, що дозволяє передавати відео в реальному часі, телеметрію й сигнали керування з високою точністю. Вибір стандарту Wi-Fi (наприклад, IEEE 802.11n, 802.11ac чи 802.11ax) впливає на швидкість передачі даних, яка може складати від сотень мегабіт до кількох гігабіт на секунду. Проте ефективність Wi-Fi значною мірою знижується на великих відстанях, особливо у відкритих просторах без розвиненої інфраструктури чи за наявності перешкод.

Також канал зв'язку може зазнавати впливу електромагнітних завад, знижуючи стабільність під час руху робота або у складних радіоумовах. Для роботи в умовах великої зони покриття дедалі частіше використовуються технології стільникового зв'язку LTE або 5G. LTE забезпечує стабільне з'єднання на значних відстанях із достатньою пропускною здатністю для

передачі відео, даних сенсорів і команд керування. Мережі п'ятого покоління (5G) суттєво підвищують можливості цих систем завдяки мінімальній затримці (до кількох мілісекунд) і швидкості передачі, яка досягає кількох гігабіт на секунду. Це робить 5G перспективним для застосування в керуванні автономними або напіваавтономними роботами в реальному часі.

Додатковою перевагою є підтримка функції «мережевих зрізів» (network slicing), що дає змогу створювати віртуальні канали зі специфічними параметрами якості. Проте обмеженням використання LTE/5G є залежність від інфраструктури мобільних операторів, що ускладнює застосування цих технологій у віддалених чи закритих зонах без покриття.

Радіомодеми виступають альтернативою для забезпечення прямого каналу зв'язку між станцією керування та роботом без участі зовнішніх мережових інфраструктур. Вони працюють у частотних діапазонах 433 МГц, 868 МГц або 2,4 ГГц і забезпечують дальність передачі сигналу від кількох до десятків кілометрів залежно від потужності передавача, типу антени та умов середовища.

Основними перевагами радіомодемів є висока надійність зв'язку, мінімальна затримка і здатність працювати автономно без потреби в інтернет-з'єднанні. Однак їхня пропускна здатність є нижчою порівняно з Wi-Fi чи LTE/5G, тому вони здебільшого використовуються для передачі команд управління й телеметричних даних, тоді як відеопотоки можуть передаватися окремими каналами.

Wi-Fi — одна з найпоширеніших технологій бездротового зв'язку, яку активно використовують у системах керування наземними роботами. Вона створена на основі стандартів IEEE 802.11 та забезпечує високу швидкість передачі даних. Це дозволяє передавати команди управління, телеметрію й відеопотоки в реальному часі. Основною перевагою технології є її доступність та простота впровадження — більшість сучасних модулів та контролерів вже мають інтегровані Wi-Fi-інтерфейси, що значно полегшує створення систем зв'язку.

Важливим є також низький рівень затримки, завдяки чому оператор отримує майже миттєву зворотну реакцію від робота. Однак Wi-Fi має певні

обмеження, серед яких невеликий радіус дії та чутливість до перешкод. На відкритій місцевості без підсилювачів або спрямованих антен дальність зазвичай становить 100–300 метрів. Крім цього, робота Wi-Fi пов'язана із завантаженими частотними діапазонами (2,4 і 5 ГГц), що робить його вразливим до завад від інших пристроїв. Така нестабільність може призводити до втрати пакетів, випадкових розривів зв'язку або збоїв при русі робота.

Через це Wi-Fi найчастіше використовується у контрольованих умовах, де важливими є висока швидкість і якість передачі даних, але не критична дистанція. Технології LTE та 5G відкривають нові можливості для створення робототехнічних систем, орієнтованих на дистанційне або мобільне управління. LTE дозволяє користуватися широкою зоною покриття із достатньою пропускну здатністю (до сотень мегабіт на секунду) і стабільним з'єднанням навіть на великих відстанях. З революційним впровадженням мереж 5G швидкості передачі даних досягли 10 Гбіт/с, а затримка знизилася до менш ніж 10 мс, що дозволяє керувати роботами практично в режимі реального часу навіть з віддалень у десятки кілометрів.

До головних переваг LTE/5G також належать стабільність сигналу, підтримка великих обсягів даних (наприклад, відео у форматах HD чи 4K), а також можливість розширення інфраструктури завдяки використанню мобільних мереж. Та водночас ці технології мають і свої недоліки: їхня робота залежить від наявності покриття мобільних операторів, що обмежує застосування у віддалених чи закритих місцях. Крім того, такі системи можуть бути дорогими через необхідність оплати мобільного трафіку й використання спеціалізованих модемів або SIM-карт. Коли ж пріоритетом є автономність і надійність замість швидкості передачі даних, LTE/5G поступаються спеціалізованим радіоканалам.

Радіомодеми залишаються одним із найбільш надійних засобів зв'язку для наземних роботів, особливо коли система повинна функціонувати автономно і без підключення до інтернету. Вони забезпечують прямий канал зв'язку між станцією керування та роботом, працюючи на частотах 433 МГц, 868 МГц або 2,4 ГГц. Використання низьких частот дозволяє досягти значної дальності

передачі — у стандартних умовах до кількох кілометрів, а зі встановленням підсилювачів потужності та спрямованих антен — навіть до десятків кілометрів. Основними характеристиками радіомодемів є низька затримка, висока стійкість до перешкод і стабільна робота навіть за складних погодних чи радіоумов. Їхньою ключовою перевагою є автономність — система не залежить від мережевих операторів або інтернет-з'єднання. Водночас пропускна спроможність таких каналів зазвичай обмежена в межах від кількох десятків до кількох сотень кілобіт на секунду, що унеможлиблює передачу відео чи великих обсягів даних.

Через це радіомодеми здебільшого використовуються для пересилання команд управління, телеметрії та критично важливої службової інформації, де головним пріоритетом є надійність, а не швидкість.

У підсумку можна зазначити, що Wi-Fi оптимальний для короткодистанційних високошвидкісних рішень, LTE/5G забезпечує широке покриття та інтегрується в розвинену інфраструктуру, тоді як радіомодеми залишаються найкращим вибором для автономних систем, де важлива гарантована стабільність зв'язку незалежно від зовнішніх умов.

Таблиця 1.2.1 — Порівняння типів зв'язку

Параметр	Wi-Fi	LTE / 5G	Радіомодеми
Тип зв'язку	Локальна бездротова мережа (WLAN)	Стільниковий зв'язок (мобільна мережа)	Прямий радіоканал «станція–робот»
Робочий діапазон частот	2,4 ГГц / 5 ГГц	700 МГц – 3,6 ГГц (залежно від оператора)	433 МГц, 868 МГц, 915 МГц, 2,4 ГГц
Дальність зв'язку	100–300 м (до 1 км із підсилювачами)	До кількох десятків кілометрів (залежно від покриття)	5–40 км (залежно від потужності та антен)

Продовження таблиці 1.2.1

Пропускна здатність	Висока (до кількох Гбіт/с)	Дуже висока (LTE — сотні Мбіт/с, 5G — до 10 Гбіт/с)	Низька (кілька кбіт/с — сотні кбіт/с)
Затримка (latency)	Низька (10–50 мс)	Дуже низька (LTE — ~30–50 мс, 5G — <10 мс)	Мінімальна (1–10 мс)
Надійність з'єднання	Висока в межах прямої видимості, чутлива до завад	Висока, але залежить від якості покриття мережі	Дуже висока, стабільна навіть у складних умовах
Автономність роботи	Потребує локальної мережевої інфраструктури	Залежить від операторів мобільного зв'язку	Повна автономність, не потребує інфраструктури
Стойкість до перешкод	Середня, чутлива до електромагнітних завад	Висока, із системами компенсації завад	Висока, особливо на низьких частотах
Енергоспоживання	Помірне	Високе (особливо для 5G)	Низьке або середнє (залежно від потужності передачі)
Передача відео	Так, у високій якості (HD–4K)	Так, у реальному часі з високою стабільністю	Обмежено або неможливо (через низьку швидкість)
Сфера застосування	Лабораторні випробування, контрольовані середовища, короткі відстані	Віддалене управління, міські умови, роботизовані системи з доступом до мережі	Полюсові операції, автономні системи, військово та рятувальне використання
Основні переваги	Висока швидкість, низька затримка, простота використання	Велика зона покриття, висока пропускна здатність, низька затримка	Надійність, автономність, велика дальність, низька затримка
Основні недоліки	Обмежена дальність, схильність до завад	Залежність від покриття, високе енергоспоживання, витрати на трафік	Низька швидкість передачі, обмеження у передаванні мультимедіа

1.3. Моделювання та дослідження параметрів існуючої системи зв'язку СНК – наземний робот.

Моделювання та аналіз параметрів системи зв'язку між станцією наземного керування (СНК) та наземним роботом становлять ключовий етап в оптимізації телеметричних і керуючих підсистем комплексу. Це дозволяє оцінити ефективність передачі даних, визначити вузькі місця в роботі каналу зв'язку, підібрати оптимальні параметри налаштування передавачів та приймачів, а також забезпечити стабільну взаємодію між оператором і роботом навіть у змінних умовах експлуатації.

Основна мета моделювання полягає у відтворенні реальних процесів обміну інформацією між компонентами системи та аналізі впливу таких факторів, як відстань, рівень сигналу, тип модуляції, перешкоди та затримки, на якість зв'язку. У межах дослідження система зв'язку СНК – наземний робот розглядається як інтегрований комплекс апаратних і програмних рішень, що забезпечують двосторонній обмін даними в реальному часі. З боку СНК надходять команди управління, які через передавач передаються до приймача робота. У зворотному напрямку транслюється телеметрія, дані з сенсорів, навігаційні координати та відеозображення з камер спостереження. Мінімізація затримки передачі даних та забезпечення належної якості сигналу залишаються критичними вимогами для безперебійного керування навіть за умов збільшення відстані чи появи зовнішніх перешкод.

Моделювання відбувається за допомогою спеціалізованих програмних інструментів, які дозволяють створити віртуальну модель системи зв'язку з можливістю змінювати її параметри для оцінки впливу на ефективність роботи. В моделюванні враховуються топологія мережі, типи використовуваних антен, потужність передавачів, частотний діапазон та характеристики приймального тракту. Особливу увагу приділяють вимірюванню показників рівня сигналу (RSSI), затримки (latency) та пропускної здатності каналу за різних режимів роботи. Отримані результати дозволяють побудувати характеристичні криві стабільності зв'язку й визначити граничні умови для надійного функціонування системи.

Додатково досліджується вплив зовнішніх факторів, таких як рельєф місцевості, фізичні перешкоди, атмосферні умови та наявність електромагнітних завад. Точність отриманих моделей перевіряється за допомогою експериментальних вимірювань у польових умовах. Порівняння результатів моделювання з експериментальними даними дозволяє оцінити адекватність створеної моделі та уточнити параметри, що мають ключове значення для ефективності зв'язку.

Результати моделювання стають основою для подальшої оптимізації системи зв'язку. Завдяки їм встановлюються оптимальні режими роботи передавача, підбираються відповідні антени, налаштовуються протоколи передачі даних і методи корекції помилок.

Крім того, аналіз параметрів існуючої системи дозволяє прогнозувати її поведінку у випадках розширення зони дії або інтеграції нових модулів, таких як додаткові сенсорні блоки чи камери. Таким чином, моделювання є важливим інструментом удосконалення системи зв'язку між СНК і наземним роботом, оскільки дозволяє детально зрозуміти її характеристики й приймати технічно обгрунтовані рішення щодо модернізації комплексу.

1.3.1. Опис досліджуваної системи та її апаратних засобів.

Основне завдання системи полягає в забезпеченні стабільного, безперервного й швидкого обміну даними, необхідного для дистанційного управління рухом робота, передачі телеметричних параметрів і відеоінформації у реальному часі. Апаратна частина системи складається з кількох ключових модулів, серед яких центральну роль відіграє станція наземного керування. Вона містить комп'ютер або мікроконтролер для обробки команд, інтерфейс оператора, модуль радіозв'язку та джерело живлення.

Станція формує керуючі сигнали, передає їх через бездротовий канал і приймає зворотну інформацію від робота. Для підвищення надійності обміну даними тут використовується високоякісний передавальний модуль, що функціонує у визначеному частотному діапазоні з достатньою потужністю сигналу для стабільного зв'язку.

Наземний робот оснащений приймальним модулем зв'язку, який приймає сигнали зі станції та надсилає інформацію щодо стану системи: координати, параметри сенсорів і відеопотік із камер. Головними елементами його системи управління є контролер руху, що виконує отримані команди, та блок збору даних, який забезпечує моніторинг технічних параметрів.

Серед апаратних засобів системи використовуються сучасні модулі зв'язку. Зокрема, модуль Foxeer 5.8G Reaper Infinity 5W 40CH VTx забезпечує якісну передачу відеосигналу на частоті 5,8 ГГц із високою роздільною здатністю та стабільністю навіть на великих дистанціях. Для передачі даних і забезпечення телеметрії застосовується модуль BelinRC ELRS 433 MHz TX Vackpack, що працює на частоті 433 МГц, забезпечуючи значну дальність зв'язку та стійкість до перешкод.

Поєднання цих модулів дозволяє створити гібридну систему з розділенням каналу відеопотоку та сигналів управління, що зменшує навантаження на основний зв'язок і підвищує його надійність. Електроживлення системи реалізовано через окремий блок енергозабезпечення з фільтрацією напруги для запобігання радіочастотним завадам. Антени мають спрямовану конфігурацію, яка покращує ефективність передачі сигналу на великі відстані. Також у структурі станції передбачений інтерфейс для підключення комп'ютера чи планшета, що виконує роль операторського пульта із відображенням відео й телеметричних даних.

Система побудована за модульним принципом, що дозволяє легко замінювати або модернізувати окремі компоненти без повного демонтажу. Такий підхід забезпечує адаптивність налаштувань залежно від умов експлуатації — відкритої місцевості чи зон з підвищеним рівнем перешкод. Таким чином, ця система представляє собою технічно досконалий комплекс апаратного та програмного забезпечення нового покоління.

Її архітектура спрямована на забезпечення максимальної надійності, стабільності й швидкодії каналу зв'язку між наземною станцією управління та роботом. Гнучкість конструкції створює передумови для подальшого вдосконалення системи та інтеграції нових компонентів, що підвищує потенціал

ефективності роботизованої платформи.

Foxeer 5.8G Reaper Infinity 5W 40CH VTx — високопродуктивний відеопередавач, розроблений для забезпечення реального часу передачі зображення з бортових камер наземних роботів на станцію керування. Модуль працює в діапазоні 5,8 ГГц, підтримує 40 каналів і має потужність до 5 Вт, завдяки чому стабільність сигналу зберігається навіть на значних відстанях. Основними перевагами цього пристрою є висока якість відеопотоку та мінімальна затримка, що дозволяє оператору швидко реагувати на зміни середовища. Завдяки збільшеній потужності Reaper Infinity здатен забезпечувати передачу відео на кілька кілометрів за умови належного підбору антени та сприятливих умов прийому. Модуль пропонує можливість гнучкого регулювання вихідної потужності (від 25 мВт до 5 Вт), що дозволяє оптимізувати енергоспоживання, особливо у приміщеннях чи на коротких відстанях. Корпус пристрою виготовлений із термостійкого матеріалу та оснащений ефективною системою охолодження для запобігання перегріву при тривалій роботі. Завдяки підтримці SmartAudio оператор може дистанційно змінювати частоту, потужність і канал без фізичного втручання.

Адаптивність і легке підключення до камер та контролерів забезпечуються стандартними роз'ємами. Reaper Infinity характеризується стабільною роботою навіть за наявності електромагнітних завад, гарантуючи сумісність із більшістю приймачів відеосигналу, що робить його універсальним рішенням для наземних роботів. Використання цього модуля значно покращує якість візуального каналу та його надійність, що є критичним під час віддаленого керування або виконання завдань у складних умовах.



Рисунок 1.3.1. – Foxeer 5.8G Reaper Infinity 5W 40CH VTx

З іншого боку, BelinRC ELRS 433 MHz TX Backpack слугує ключовим компонентом системи керування, відповідальним за передачу команд і телеметричних даних між наземним роботом і станцією керування. Працюючи в низькочастотному діапазоні 433 МГц, цей модуль забезпечує значну дальність зв'язку та високу стійкість до перешкод. Завдяки протоколу ExpressLRS (ELRS), який відзначається низькою затримкою (до 5 мс) та адаптивною регуляцією потужності, модуль є одним із найбільш ефективних для робототехнічних систем і FPV-платформ.

BelinRC ELRS 433 MHz TX Backpack виділяється компактними розмірами, енергоефективністю та легкою інтеграцією в системи зв'язку. Пристрій автоматично встановлює з'єднання з приймачем і підтримує телеметричний канал, який у режимі реального часу передає інформацію про стан робота. Інтелектуальний протокол передачі даних адаптується під умови сигналу, мінімізуючи ризики втрати пакета або розірвання зв'язку. Модуль підтримує оновлення прошивки через Wi-Fi, що полегшує процес його обслуговування та адаптації під нові вимоги. Ключовою перевагою BelinRC ELRS є можливість забезпечення стабільного з'єднання на відстанях до 20–30 км за сприятливих умов, що значно перевершує можливості традиційних Wi-Fi та Bluetooth модулів. Низьке енергоспоживання дозволяє пристрою працювати тривалий час без додаткового джерела живлення. Конструкція модуля передбачає використання зовнішніх антен, що дозволяють збільшити дальність і стабільність сигналу залежно від потреб.



Рисунок 1.3.2 – BelinRC ELRS 433 MHz TX Backpack

Поєднання Foxeer 5.8G Reaper Infinity і BelinRC ELRS 433 MHz TX Вакраск формує ефективну двоканальну систему зв'язку. У цій конфігурації перший модуль забезпечує передачу відеосигналу, а другий відповідає за керування та телеметрію. Така структура дає змогу розподілити інформаційні потоки, зменшуючи навантаження на канал, що підвищує стабільність і надійність взаємодії між станцією управління та наземним роботом.

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА ПРОЕКТНИХ РІШЕНЬ ДЛЯ ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ЗВ'ЯЗКУ

2.1. Концептуальне обґрунтування напрямків вдосконалення системи зв'язку.

Поліпшення системи зв'язку між наземною станцією керування та роботом є важливим напрямом для підвищення ефективності роботи всієї роботизованої платформи. Стабільність, швидкодія та якість каналу зв'язку визначають не лише точність виконання завдань, але й рівень безпеки системи, її надійність і здатність функціонувати в складних умовах. Обґрунтування вдосконалення базується на аналізі поточної системи, ідентифікації її недоліків та розробці технічних і програмних рішень, що забезпечать покращення комунікаційних характеристик.

Нинішня система зв'язку, яка використовує модулі Foxeer 5.8G Reaper Infinity 5W 40CH VTx і BelinRC ELRS 433 MHz TX Backpack, демонструє високу стабільність у межах прямої видимості. Однак дослідження показали, що її ефективність знижується за умов перешкод, багатопроменевого поширення сигналу або при значній відстані між компонентами системи. Додатково, у разі збільшення обсягу передаваних даних (наприклад, відео високої роздільної здатності) спостерігається зростання затримок і тимчасове погіршення якості зв'язку.

Це підкреслює необхідність оптимізації архітектури системи та впровадження нових методів, які підвищують стійкість зв'язку, пропускну здатність і адаптивність до зовнішніх впливів. Серед основних напрямків модернізації виділяється оптимізація частотних ресурсів і використання комбінованих каналів зв'язку. Це означає поділ обмінюваних даних на окремі потоки: один для відео, інший для команд і телеметрії. Такий підхід не лише знижує ризик перевантаження системи, але й дозволяє застосовувати різну модуляцію і потужність передачі для кожного потоку.

Наприклад, відеопотік доцільно передавати в діапазоні 5,8 ГГц для високої швидкості, тоді як команди управління більш надійно передавати в діапазоні 433

МГц через його кращу проникність крізь перешкоди. Другий напрям – це впровадження інтелектуальних алгоритмів, які дозволяють системі динамічно адаптуватися до змін умов середовища. Завдяки автоматичному регулюванню потужності передавача, вибору оптимальної частоти чи каналу та перемикаю між модулями зв'язку за погіршення сигналу забезпечується більш висока стабільність роботи у реальному часі навіть за складного рельєфу або рухомих перешкод. Не менш важливою складовою є цифрові методи обробки сигналів для зниження шумів та покращення якості прийому.

Використання алгоритмів компенсації багатопроменевого поширення, фільтрації й технологій корекції помилок (FEC) мінімізує втрати даних і підтримує стабільний зв'язок навіть за умов слабого сигналу. Удосконалення антенних систем також є пріоритетом. Використання спрямованих антен із високим коефіцієнтом підсилення чи фазованих решіток збільшує дальність передачі без значного зростання енергоспоживання. Крім того, автоматичні системи наведення антен на робота на базових станціях забезпечують стабільність з'єднання навіть при русі обох елементів.

Перспективним напрямом розвитку є впровадження резервного каналу зв'язку, такого як LTE або 5G. Подібна інтеграція забезпечує безперервність комунікації у разі втрати основного радіоканалу. У гібридній архітектурі основний канал (на частотах 433 МГц або 5,8 ГГц) використовується для оперативного управління, тоді як резервний канал через мобільну мережу слугує для передачі великих обсягів даних або забезпечує контроль на значних відстанях. Удосконалення також включає оновлення програмного забезпечення системи, що відкриє можливості для впровадження розширених функцій. Серед них — моніторинг стану зв'язку, візуалізація рівня сигналу, аналіз затримки та автоматичне регулювання параметрів передачі. Це дозволить зробити систему більш гнучкою в управлінні та підвищити її загальну ефективність.

Отже, вдосконалення системи зв'язку базується на поєднанні апаратних і програмних рішень, спрямованих на підвищення її надійності, стійкості до перешкод, гнучкості налаштувань і здатності до самодіагностики. Реалізація цих заходів стане основою для створення сучасної високоефективної комунікаційної

системи між наземною станцією керування та роботизованими платформами, яка забезпечуватиме стабільну роботу в різноманітних умовах експлуатації.

2.1.1. Вибір та обґрунтування пріоритетних технологій (MIMO частотне або просторове рознесення).

Технологія MIMO (Multiple Input Multiple Output) є однією з основних компонент сучасних систем бездротового зв'язку. Її застосування у станціях керування наземними роботами видається виправданим, оскільки вона відповідає вимогам щодо високої надійності, швидкодії та стабільності передачі даних. Основна ідея MIMO полягає у використанні декількох антен як на передавальному, так і на приймальному боці, що дає змогу одночасно передавати кілька незалежних потоків інформації в межах одного частотного діапазону. Це дозволяє значно підвищити пропускну здатність каналу без необхідності збільшення частотної смуги чи потужності передавача.

Для керування наземним роботом ці переваги є критичними, оскільки MIMO забезпечує передачу не тільки команд управління, але й великих обсягів телеметричної інформації, відеопотоку з камер робота, даних від сенсорів та діагностичних параметрів у режимі реального часу. Завдяки мінімізації затримок при передачі даних оператор отримує можливість швидко реагувати на зміни ситуації, що особливо важливо в умовах динамічного середовища.

Принцип дії MIMO базується на багатопроменевому поширенні сигналу, яке в минулому вважалося негативним явищем через створення завад та спотворень. У системах MIMO ці ефекти використовуються для посилення продуктивності каналу зв'язку. Кожна передавальна й приймальна антена створює незалежний шлях для сигналу, а цифрова обробка сигналів (наприклад, просторове мультиплексування чи формування променя) дозволяє точно відновлювати інформацію, враховуючи множинність сигналів.

Як результат, покращуються співвідношення сигнал/шум, швидкість передачі даних та знижується ризик втрати пакетів. При роботі наземної станції керування важливим є те, що MIMO забезпечує високу стійкість до перешкод і стабільність зв'язку навіть у складних умовах, таких як щільна міська забудова,

промислові зони або місцевості з численними відбиттями сигналів. Технологія також дозволяє ефективно працювати при зниженій потужності передавача, що є важливим для мобільних роботизованих платформ із обмеженими енергоресурсами.

Окрім цього, MIMO підтримує адаптивні алгоритми управління антенними решітками, які автоматично коригують параметри роботи відповідно до змін радіосередовища, оптимізуючи напрямок передачі і прийому сигналу. З практичного боку інтеграція MIMO у систему зв'язку між наземним роботом і станцією керування може виконуватись у різних конфігураціях, таких як 2x2, 4x4 або 8x8, де перше число відповідає кількості передавальних антен, а друге — приймальних. Збільшення кількості антен позитивно впливає на швидкість передачі даних і надійність зв'язку, хоча одночасно ускладнює апаратну реалізацію системи. Максимальна ефективність роботи можлива завдяки комбінуванню MIMO з іншими технологіями підвищення якості зв'язку, такими як частотне і просторове рознесення.

Частотне рознесення розподіляє сигнали по різних частотних піддіапазонах, зменшуючи ризик загасання сигналу на окремих частотах. Просторове рознесення натомість базується на розташуванні антен на визначеній відстані одна від одної, що допомагає уникнути одночасного зникнення сигналу на всіх каналах і забезпечує стабільний прийом.

Впровадження технології MIMO у систему наземного управління роботизованим комплексом є виправданим технічним кроком, який сприяє підвищенню ефективності, надійності та стійкості каналу зв'язку. Завдяки цій технології забезпечується висока пропускна здатність, мінімізується затримка, покращується якість передачі відео та телеметричних даних, а також підтримується стабільна робота системи навіть у складних радіоумовах. Це робить MIMO одним із ключових напрямів розвитку сучасних бездротових систем управління роботизованими платформами.

Частотне та просторове рознесення відіграють ключову роль у підвищенні надійності та стійкості бездротових каналів зв'язку, що є критичним для системи керування наземним роботом. Завдяки цим технологіям вдається суттєво знизити

вплив завад, багатопроменевого поширення сигналу і явищ федінгу, які характерні для радіоканалів в реальних умовах. У дистанційному керуванні, де якість зв'язку визначає точність виконання команд і забезпечує безпеку роботи системи, ці інструменти мають визначальне значення.

Частотне рознесення передбачає передавання одного сигналу або потоку інформації через кілька частотних каналів. Оскільки федінг і завади впливають на різні частоти по-різному, ризик одночасного ослаблення сигналу на всіх частотах є мінімальним. У результаті навіть за наявності збурень на одній частоті на інших рівень сигналу залишається достатнім для коректного прийому. Такий підхід забезпечує стійкість зв'язку до короточасних або частотних перешкод, сприяючи безперервній передачі даних.

У системі управління роботизованою платформою частотне рознесення реалізується за допомогою багатоканальної модуляції, наприклад, OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Ця технологія ділить потік даних на піднесучі частоти, що сприяє ефективному використанню спектра, зниженню міжканальних завад і збільшенню пропускної здатності системи. Завдяки цьому станція керування може отримувати безперервний потік даних навіть за умов часткових перешкод чи впливу відбиттів сигналів, що особливо важливо під час руху робота на великих відстанях чи у складних рельєфних умовах.

Просторове рознесення базується на використанні кількох антен, розташованих на певній відстані одна від одної на станції керування та роботі. Це дозволяє кожній антені приймати сигнали, що поширюються різними шляхами, маючи різні характеристики амплітуди, фази та затримки у часі. Завдяки низькій імовірності одночасного ослаблення сигналів з усіх антен комбінування їх дозволяє значно покращити якість прийому. Такий підхід є особливо ефективним у середовищах з вираженим багатопроменевим поширенням сигналів, наприклад, у міській забудові, промислових зонах або місцевостях з великою кількістю металевих конструкцій, які створюють відбиття або дифракцію хвиль.

Просторове рознесення можна реалізувати різними способами: за допомогою антенних решіток, різноспрямованих антен або технологій

адаптивного формування променя (beamforming). У системах керування роботами це дозволяє динамічно змінювати напрямок випромінювання відповідно до поточного положення робота, забезпечуючи оптимальний рівень сигналу навіть під час руху або зміни конфігурації антен.

Поєднання з цифровими алгоритмами обробки сигналів дозволяє автоматично регулювати потужність передачі, обирати найкращі канали та компенсувати втрати сигналу. Комбінація частотного і просторового рознесення формує багаторівневу систему захисту від федінгу та завад. Для станції наземного управління це означає зниження ризику втрати зв'язку з роботом і забезпечує стабільну передачу команд управління, телеметрії та відео навіть за складних умов середовища. Крім того, застосування цих технологій підвищує енергоефективність завдяки можливості знизити потужність передавача без втрат якості сигналу.

Частотне та просторове рознесення виступають важливими технологіями, що значно підвищують надійність, стабільність і ефективність системи зв'язку між наземною станцією управління та роботом. Їхнє впровадження забезпечує безперервний і якісний зв'язок навіть у складних умовах експлуатації, що є важливим чинником для безпечного та продуктивного функціонування сучасних роботизованих систем.

2.1.2. Розробка структурної схеми нової, гібридної або адаптивної системи зв'язку.

Розробка структурної схеми нової гібридної або адаптивної системи зв'язку є важливим етапом вдосконалення наземної станції керування роботизованими платформами. Мета полягає у створенні архітектури комунікацій, здатної забезпечувати надійну, безперервну та високошвидкісну передачу даних між оператором і роботом за різних умов роботи.

Використання гібридного чи адаптивного підходу дозволяє інтегрувати переваги різних технологій зв'язку, забезпечуючи високу гнучкість, живучість системи та оптимізацію її параметрів у режимі реального часу. Структурна схема системи включає кілька каналів передачі даних, які функціонують паралельно

або по чергово залежно від стану мережі, рівня сигналу та вимог до якості сервісу. Основний канал може працювати на базі високошвидкісного радіозв'язку з технологіями MIMO та частотного рознесення. Резервний канал, своєю чергою, може використовувати стільниковий чи супутниковий зв'язок для підтримки роботи на великих відстанях або коли немає прямої видимості. Така багатоканальна організація створює надлишковість, підвищуючи надійність і стійкість системи до зовнішніх впливів.

Адаптивний модуль управління ресурсами системи зв'язку відіграє ключову роль у її функціонуванні. Він постійно моніторить такі параметри, як рівень сигналу, співвідношення сигналу до шуму, затримка, пропускна здатність і рівень завад. На основі отриманих даних модуль автоматично змінює режими роботи: перемикає канали, коригує модуляцію, ширину смуги або потужність передачі. Це дозволяє системі оперативно адаптуватися до змін середовища, забезпечуючи стабільність зв'язку навіть у складних умовах або під час руху робота. Архітектура гібридної системи включає основні компоненти: блок передачі даних на станції управління, радіомодуль із багатоканальною підтримкою, антенний комплекс із функцією просторового рознесення, блок адаптивного управління комунікацією та блок обробки даних на борту робота. Забезпечується двосторонній обмін інформацією: прямий канал (downlink) призначений для передачі команд управління, відеопотоків і транспортних параметрів, а зворотний канал (uplink) передає телеметрію, діагностику та дані сенсорів. Обидва канали працюють синхронно з використанням механізмів контролю помилок і відновлення втраченої інформації.

Однією з особливостей адаптивної системи є динамічний розподіл пропускної здатності залежно від типу даних. Наприклад, у критичних ситуаціях система може пріоритизувати передачу команд і телеметрії, зменшуючи обсяг відеотрафіку. При стабільних умовах більше ресурсів виділяється на відеотрансляцію високої якості чи оновлення карт місцевості. Завдяки цьому досягається оптимальне використання радіоресурсів і безперервність управління.

Для підвищення надійності в системі реалізовано протоколи резервування

та корекції помилок (FEC), які дають змогу відновлювати дані навіть у разі втрати сигналу. Додатково передбачене шифрування й автентифікація даних для захисту від несанкціонованого доступу чи перехоплення.

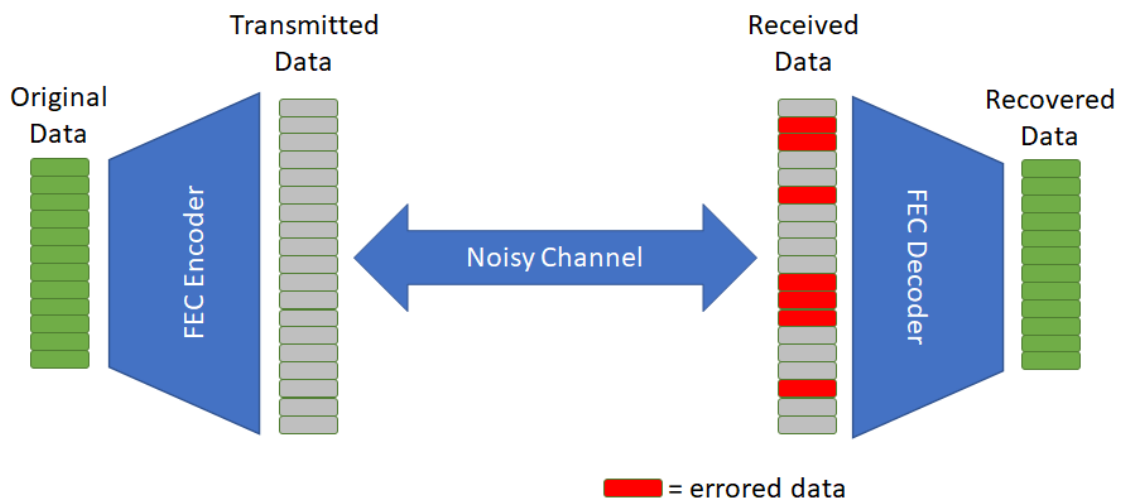
Forward Error Correction (FEC) — це ключова технологія сучасних систем бездротового зв'язку, яка відіграє важливу роль у забезпеченні стабільності та надійності передачі даних. Особливо це актуально в ситуаціях, де повторна передача через канал зв'язку неможлива або небажана. У контексті наземних роботів, керованих дистанційно через станцію управління, FEC набуває критичного значення, оскільки такі платформи працюють у динамічному середовищі з підвищеним впливом перешкод, відбиття сигналів, шумів і тимчасових утрат зв'язку.

Метод Forward Error Correction передбачає додавання до основної інформації спеціальних надлишкових бітів, які формуються на основі математичних алгоритмів. Ці біти дозволяють приймачеві не тільки виявляти помилки, але й самостійно їх виправляти без необхідності повторного запиту на повторну передачу. Такий підхід забезпечує безперервність з'єднання, що є особливо важливим для роботи в реальному часі під час дистанційного керування наземними роботами.

У керуванні роботизованими платформами найпоширенішими типами FEC-кодів є блокові коди (як-от код Ріда-Соломона), згорткові коди та LDPC (Low-Density Parity-Check) коди. Кожен із цих варіантів має свої переваги залежно від специфіки застосування. Наприклад, коди Ріда-Соломона ідеальні для захисту потоків даних із відеокамер або сенсорів завдяки здатності ефективно відновлювати інформацію навіть із великою втратою даних у пакеті. Згорткові коди часто застосовуються у системах постійної передачі команд управління, забезпечуючи швидке і точне виявлення помилок із мінімальними затримками.

У свою чергу, LDPC-коди належать до сучасних інструментів FEC, які поєднують високу корекційну здатність із ефективністю роботи на цифрових пристроях, що робить їх оптимальним вибором для систем високошвидкісного зв'язку між керуючою станцією та роботом. Однією зі значущих переваг FEC є

зменшення кількості повторних передач через канал зв'язку, що мінімізує затримки. У системах дистанційного керування це критично важливо, оскільки навіть коротка затримка може спровокувати некоректну реакцію робота чи втрату керування. До того ж використання FEC відкриває можливість працювати через канали з нижчою потужністю сигналу, що позитивно впливає на енергоефективність і дозволяє економити заряд батарей мобільних платформ. FEC може бути реалізована на різних рівнях гібридної чи адаптивної системи



зв'язку: фізичному (для захисту радіосигналу), канальному (для збереження цілісності пакетів) і транспортному (для додаткового виправлення критичних потоків інформації).

Рисунок 2.1.1 – Метод Forward Error Correction

Такий багаторівневий підхід сприяє максимальному захисту від спотворень і втрат сигналу без істотного зростання обчислювальних витрат. У комплексі з технологіями MIMO, просторового і частотного рознесення, Forward Error Correction створює ефективний механізм захисту каналу зв'язку. Наприклад, при короткочасних збоях через інтерференцію чи відбиття сигналу FEC-коди забезпечують автоматичне відновлення втрачених чи пошкоджених пакетів без участі людини. Це особливо важливо для роботи на великих відстанях або у складних умовах, де навіть короткий розрив з'єднання може мати катастрофічні наслідки.

Таким чином, впровадження технології Forward Error Correction у систему станції наземного керування роботизованими платформами є ключовим елементом створення надійного та ефективного каналу зв'язку. Вона не лише

гарантує високу точність передачі даних, але й мінімізує вплив завад і втрат сигналу, підвищуючи енергоефективність загальної системи. Це забезпечує стабільну роботу навіть у складних радіоумовах. Поєднання FEC з адаптивними алгоритмами керування каналом формує основу для інтелектуальної та гібридної системи зв'язку нового покоління, спроможної забезпечити безперервне й надійне управління наземними роботизованими платформами.

2.2. Розробка алгоритмів адаптивного керування режимом передачі даних.

Розробка алгоритмів адаптивного управління режимом передачі даних є ключовим напрямом для підвищення ефективності комунікаційних систем між станцією наземного керування та наземним роботом. Основна мета полягає у створенні інтелектуального механізму, здатного автоматично налаштовувати параметри передачі інформації відповідно до поточних умов радіоканалу, типу переданих даних, рівня завад та вимог до якості обслуговування (QoS). Такий підхід дозволяє забезпечити стабільність зв'язку, оптимальне використання пропускної здатності й енергії, а також мінімізацію затримок у керуванні роботизованими системами. Суть адаптивного управління базується на постійному моніторингу стану каналу в реальному часі.

Система здійснює аналіз таких показників, як рівень сигналу (RSSI), співвідношення сигнал/шум (SNR), швидкість помилкових бітів (BER), затримка пакетів і рівень втрат даних. Виходячи з цієї інформації, алгоритм приймає рішення про налаштування режимів роботи — наприклад, зміну модуляції, швидкості кодування, ширини смуги пропускання або потужності передавача. У разі суттєвих змін середовища система може переходити на резервні канали зв'язку (наприклад, стільниковий або супутниковий). Таким чином забезпечується динамічна адаптація до умов, що змінюються, зі збереженням балансу між швидкістю передачі та якістю зв'язку.

Особлива актуальність адаптивності в дистанційному управлінні роботами зумовлена динамічністю навколишнього середовища — рухомими об'єктами, змінним рельєфом місцевості, перешкодами та електромагнітними завадами. Якщо рівень сигналу зменшується або шумові перешкоди зростають, алгоритм

може перейти на більш стійкий спосіб модуляції (наприклад, з 64-QAM на QPSK), збільшити потужність передавача або застосувати алгоритми корекції помилок із вищою надлишковістю. Зі стабілізацією умов система повертається до високошвидкісного режиму для максимізації пропускної здатності. Ключовий компонент адаптивного алгоритму — прогнозування стану каналу. Він ґрунтується на аналізі не лише поточних параметрів сигналу, але й історичних даних для виявлення тенденцій змін у радіоумовах. Це дає змогу системі діяти на випередження, змінюючи параметри передачі до суттєвого погіршення якості зв'язку.

Для реалізації такого підходу застосовуються методи машинного навчання, фільтри Калмана чи адаптивні фільтри, які навчаються на основі змін у характеристиках каналу. Адаптивний алгоритм враховує також пріоритетність даних. Наприклад, команди управління роботом мають найвищий пріоритет і повинні бути передані із мінімальною затримкою навіть ціною скорочення швидкості передачі відеопотоку або інших другорядних даних. За стабільних умов зв'язку можна збільшувати обсяг пересилання відео або сенсорної інформації без шкоди для управління. Це створює гнучкий розподіл пропускної здатності залежно від поточної ситуації. Одним із ключових аспектів роботи адаптивного алгоритму є його енергоефективність. Оскільки наземний робот має обмежений запас енергії, система зв'язку повинна оптимізувати споживання енергоресурсів під час передачі даних.

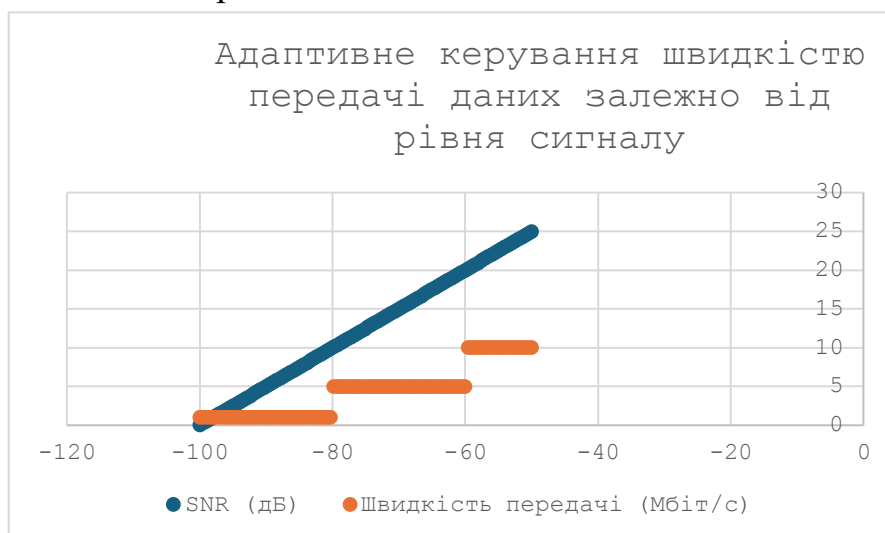


Рисунок 2.2.1. — Графік адаптивного керування швидкістю передачі даних залежно від рівня сигналу

Для цього адаптивний модуль здатен зменшувати потужність передавача при стабільних умовах роботи каналу або переходити в енергозберігаючий режим за відсутності критичних запитів. Подібні механізми особливо важливі в умовах довготривалих автономних місій або там, де часте підзарядження неможливе. Алгоритм адаптивного управління режимами передачі даних інтегрується з іншими підсистемами, такими як антенний комплекс, блок МІМО-комунікацій, модулі FEC та система резервування каналів. Це дозволяє створити цілісну саморегульовану структуру, в якій усі компоненти працюють у режимі зворотного зв'язку. Наприклад, зміна потужності передавача автоматично узгоджується з новими параметрами модуляції чи схемами корекції помилок, забезпечуючи синхронність та запобігаючи збоєм.

Отже, розробка алгоритмів адаптивного управління режимами передачі даних спрямована на інтелектуалізацію системи зв'язку станції наземного керування. Це забезпечує стабільний зв'язок за будь-яких умов, знижує вплив завад, підвищує ефективність використання радіоресурсів і гарантує безпечну безперервну роботу наземного робота. Впровадження таких алгоритмів створює основу для гібридних та самоналаштовуваних систем зв'язку нового покоління, здатних адаптуватися до змін у реальному часі без участі оператора.

2.2.1. Алгоритм динамічного вибору оптимального каналу (Multi-Link Operation).

Алгоритм динамічного вибору оптимального каналу, відомий як Multi-Link Operation (MLO), є ключовою складовою сучасних адаптивних систем зв'язку, що дозволяє одночасно працювати через декілька каналів або динамічно перемикатися між ними. Це спрямовано на забезпечення максимальної стабільності, високої пропускну здатності та надійності зв'язку. У системі станції наземного управління роботами впровадження MLO є критично важливим, оскільки підтримує стабільний зв'язок навіть за зміни умов середовища, знижуючи вплив завад і мінімізуючи ризик втрати контролю.

Основний принцип роботи Multi-Link Operation полягає у створенні кількох незалежних каналів зв'язку між станцією управління та наземним

роботом. Ці канали можуть функціонувати на різних частотах, використовувати різні технології або маршрути передачі даних, наприклад, радіохвилі ближнього діапазону (5 ГГц або 6 ГГц), стільникові мережі (4G/5G) чи супутниковий зв'язок. Алгоритм оцінює стан кожного каналу за допомогою таких параметрів, як рівень сигналу, затримка, пропускна здатність чи втрати пакетів. На основі цієї інформації обирається оптимальний канал або їх комбінація для передачі даних, що забезпечує безперервний зв'язок навіть у разі погіршення одного з каналів.

Робота MLO базується на постійному моніторингу середовища та адаптації до змін. У реальному часі система обирає найкращий канал або їх комбінацію для різних типів даних. Наприклад, для команд управління важлива низька затримка, тому вибір здійснюється на користь каналу з мінімальною латентністю. Водночас потокові відео або телеметрія можуть передаватися через канали з вищою пропускною здатністю. Якщо сигнал однієї з мереж зникає або канал стає перевантаженим, алгоритм миттєво перемикається на резервні варіанти за допомогою механізмів буферизації та синхронізації, мінімізуючи будь-які втрати.

Реалізація MLO можлива у двох основних режимах: агрегації каналів (channel aggregation) та динамічного перемикання (dynamic switching). Агрегація дозволяє використовувати одночасно кілька каналів для розподілу або об'єднання потоків даних, завдяки чому підвищується пропускна здатність і мінімізується ризик втрати зв'язку. Динамічне перемикання передбачає регулярну оцінку якості всіх доступних каналів, вибір найоптимальнішого та забезпечення стабільності й енергоефективності.

Центральним компонентом MLO є система вагових коефіцієнтів для оцінки каналів за критеріями, такими як потужність сигналу (RSSI), затримка (latency), швидкість передачі (throughput), стабільність (jitter), рівень помилок (BER) та енергоспоживання. Кожен параметр має свою вагу залежно від пріоритетів. Наприклад, мінімальна затримка є критичною для команд управління, висока пропускна здатність — для відеоданих, а максимальна надійність — для телеметрії. На основі інтегрального показника якості алгоритм

приймає рішення щодо використання оптимального каналу або розподілу навантаження між ними.

Важливим елементом алгоритму Multi-Link Operation (MLO) є система зважування параметрів. Кожен канал оцінюється за низкою показників: потужність сигналу (RSSI), затримка (latency), швидкість передачі даних (throughput), стабільність (jitter), рівень помилок (BER) та енергоспоживання. Для кожного параметра визначається ваговий коефіцієнт залежно від пріоритетів системи. Наприклад, для команд управління ключовим є мінімальне значення затримки, для відеопотоку — висока пропускна здатність, а для телеметрії — максимальна надійність.

Алгоритм обчислює інтегральний показник якості кожного каналу і обирає найбільш оптимальний варіант або здійснює розумний розподіл навантаження між доступними каналами. У MLO також інтегровані механізми передбачувального аналізу, які дозволяють прогнозувати можливу деградацію каналу на підставі історичних даних або раптових змін параметрів сигналу. Завдяки цьому система здатна заздалегідь підготувати резервний канал, впровадити дублювання даних або плавно переключитися між каналами без втрат інформації.

У цих процесах можуть використовуватися алгоритми машинного навчання чи нейронні моделі, що навчаються на основі попередніх сесій зв'язку. Технічна реалізація Multi-Link Operation включає координаційний блок управління зв'язком, який синхронізує роботу всіх доступних інтерфейсів. Цей блок відповідає за розподіл потоків даних, моніторинг стану каналів і взаємодію з адаптивним модулем, що регулює параметри передачі, такі як модуляція, потужність і корекція помилок (FEC).

У результаті формується єдина гібридна мережа, яка забезпечує стабільну роботу навіть у складних умовах, таких як рух пристроїв, наявність перешкод або зміни середовища. Використання алгоритму динамічного вибору оптимального каналу значно підвищує стійкість системи зв'язку, адже вона стає незалежною від одного середовища передачі. У разі втрати основного радіоканалу система автоматично перемикається на альтернативні мережі без

помітної затримки у роботі.

Це критично важливо для надійного управління наземними роботами навіть у надзвичайних ситуаціях або регіонах із нестабільним покриттям мереж. Загалом, Multi-Link Operation є фундаментом для створення інтелектуальних, відмовостійких комунікаційних систем.

Його впровадження дозволяє оптимізувати використання всіх доступних ресурсів зв'язку, підтримувати безперервність передачі даних, покращувати пропускну здатність та стабільність каналів і забезпечувати безпечне управління роботизованими платформами у складних і змінних умовах реального світу.

Таблиця 2.2.1 – Порівняння динамічних каналів

Критерій	SLC – Single-Link	CB – Channel Bonding	DC – Dual Connectivity	MLO – Multi-Link Operation
К-сть каналів	1	Кілька, об'єднані	2 незалежні (різні мережі)	Кілька, працюють паралельно
Надійність	Низька	Середня	Висока	Дуже висока
Пропускна здатність	Обмежена	Вища (агрегація)	Висока	Максимальна
Затримка (latency)	Мінімальна, нестабільна	Невелика, стабільна	Залежна від мереж	Оптимізована
Адаптивність	Відсутня	Обмежена	Середня	Висока
Енергоефективність	Висока	Середня	Залежна	Оптимізована

Продовження таблиці 2.2.1

Стійкість до завад	Низька	Середня	Висока	Дуже висока
Застосування в роботах	Прості системи	Стабільні умови	Мобільні з LTE/Wi-Fi	Автономні, динамічні системи

2.2.2. Організація радіоканалу зв'язку та підвищення його ефективності за допомогою технології QoS.

У системі станції керування наземним роботом першорядне значення має забезпечення мінімальної затримки та високої надійності передачі критично важливих команд. Для досягнення цього застосовується метод пріоритизації трафіку, що базується на механізмах забезпечення якості обслуговування (Quality of Service, QoS). Завдяки такому підходу можливо розрізняти різні типи даних за ступенем важливості, вимогами до затримки, пропускну здатності та рівня припустимих втрат пакетів, забезпечуючи стабільну і передбачувану роботу системи в реальному часі.

Суть методу полягає в класифікації всього трафіку, який проходить через систему зв'язку, на кілька категорій пріоритету. Найвищий пріоритет надається командам управління рухом, сигналам аварійної зупинки та корекції траєкторії. Такі пакети даних мають ключове значення, оскільки навіть коротка затримка може спричинити порушення функціонування або втрату контролю. До середнього рівня пріоритету відносяться телеметричні дані, які забезпечують моніторинг стану робота — рівня заряду акумулятора, температури, позиції тощо. Найнижчий пріоритет мають некритичні дані, такі як інформаційні повідомлення, відеопотоки з камер спостереження або журнали подій, які можуть передаватися з більшою затримкою без впливу на загальну роботу системи.

Метод QoS у сучасних системах реалізується шляхом маркування пакетів даних (packet tagging), коли кожному пакету призначається спеціальний ідентифікатор класу обслуговування. У бездротових мережах це здійснюється

через стандарти IEEE 802.11e (WMM), у стільникових мережах — за допомогою Differentiated Services (DiffServ) або механізмів 5G QoS Flow. При проходженні через маршрутизатор або базову станцію пакети з вищим пріоритетом обробляються першочергово, тоді як менш важливі дані відправляються за залишковим принципом. Для цього використовуються дисципліни обробки черг, такі як Strict Priority Queuing (SPQ) чи Weighted Fair Queuing (WFQ).

Для наземного робота оптимальним є комбінований метод пріоритизації: він поєднує жорстке забезпечення пріоритету для критичних команд і динамічний розподіл пропускну здатності між іншими потоками. У цьому підході управлінський трафік завжди має гарантований канал із мінімальною затримкою, тоді як передачу менш важливих даних адаптують залежно від завантаженості мережі. Це особливо актуально в умовах руху робота в зонах зі змінною якістю сигналу — система може зменшувати обсяг другорядного трафіку задля збереження стабільного управління.

Однією з ключових складових QoS є постійний моніторинг і контроль параметрів мережі в реальному часі. Спеціальний модуль постійно аналізує показники, такі як затримка (latency), варіація затримки (jitter), коефіцієнт втрат пакетів (PLR) і поточне навантаження каналів. Залежно від цих даних система динамічно налаштовує пріоритети. Наприклад, якщо відеопотік створює надмірне навантаження на мережу, його швидкість передачі автоматично обмежується, щоб надати додаткову пропускну здатність для команд управління.

На рівні програмного забезпечення реалізація QoS передбачає створення модуля управління чергами, який регулює маршрутизацію пакетів залежно від їхніх пріоритетних тегів. У критичних ситуаціях, таких як затримка у передачі або втрата зв'язку, система здатна виконати аварійне перемикання на резервний канал або застосувати дублювання пакетів для підвищення надійності передачі даних.

Впровадження системи пріоритизації трафіку на основі QoS у наземних системах управління забезпечує стабільну і прогнозовану передачу даних навіть за умов перевантаження мережі чи погіршення якості каналів. Це дозволяє гарантувати, що команди для керування роботами передаватимуться з

мінімальною затримкою, а решта потоків зможе адаптивно використовувати доступну пропускну здатність. Подібний підхід є ключовим для забезпечення безпеки, точності та безперервності управління роботизованими платформами у режимі реального часу.

У системі, яка використовується для управління наземними роботами через наземні керуючі станції, радіозв'язок виконує ключову функцію основного каналу передачі даних між оператором і роботизованою платформою. Завдяки цьому каналу забезпечується можливість здійснювати дистанційне керування в режимі реального часу, передавати телеметричну інформацію, потокове відео та діагностичні дані.

Від надійності й ефективності роботи радіоканалу залежить не лише стабільність та точність, але й загальна безпечність функціонування всієї системи. Зазвичай радіозв'язок у таких системах побудований на основі сучасних цифрових протоколів бездротової передачі даних, до яких належать стандарти Wi-Fi (IEEE 802.11), спеціалізовані промислові протоколи (наприклад, IEEE 802.15.4, LoRa, ZigBee), а також професійні рішення із використанням радіомодемів у діапазонах UHF/VHF.

Таблиця 2.2.2 – Порівняння типів зв'язку

Параметр	Радіозв'язок	QoS (Quality of Service)
Переваги	Простий, дешевий, стабільний на коротких відстанях	Мінімальна затримка, адаптивність, висока надійність
Недоліки	Немає пріоритетизації, затримки при перевантаженні	Складна інтеграція, вища вартість
Пріоритетність	5/5 (основа системи)	4/5 (доповнення для підвищення ефективності)
Придатність для роботів	Добра для стабільного середовища	Висока для динамічних умов

Військові, промислові чи аварійно-рятувальні місії часто вимагають використання захищених каналів зв'язку, які оснащені механізмами шифрування даних і адаптивного регулювання потужності передавача. Головна мета використання таких технологій полягає у створенні стійкого і безперервного каналу комунікації для передачі команд і отримання зворотного зв'язку навіть у

складних умовах: багатоперешкодному середовищі, регіонах з обмеженим радіопокриттям чи у місцевостях зі складним рельєфом.

Радіоканали в системах керування наземними роботами можуть працювати за двома основними схемами: “точка–точка” (Point-to-Point) або “точка–багато точок” (Point-to-Multipoint).

Вибір схеми залежить від кількості підключених роботів та способу організації їх управління. У випадках одночасного дистанційного керування кількома роботами застосовується пакетна адресація даних та механізми планування доступу до ефіру. Це дозволяє уникати колізій сигналів і запобігати втратам переданих даних. Крім того, розумне управління частотним ресурсом сприяє підтримці стабільного зв'язку для всіх елементів системи одночасно. Для забезпечення високої надійності роботи радіоканалів сучасні системи використовують різноманітні адаптивні методи. Сюди входять автоматичне регулювання параметрів передачі, таких як модуляція сигналу, потужність передавача, швидкість обміну даними та вибір передавального каналу.

Наприклад, якщо рівень сигналу значно знижується через перешкоди, система може автоматично перейти від швидкісних модулювань, таких як QAM, до більш стійких типів — BPSK або QPSK — навіть за умови зниження швидкості передачі інформації. Такий підхід дозволяє зберігати цілісність даних і надійність зв'язку в умовах несприятливого середовища, як-от під час керування роботом у зоні великої відстані чи високої кількості шуму.

Додатковим важливим механізмом для забезпечення стабільності радіоканалу є технології обробки помилок і корекції даних (Forward Error Correction, FEC). Завдяки цьому процесу система здатна виявляти та виправляти помилки, що з'являються в процесі передачі через зашумлене або нестабільне середовище. Застосування спеціальних кодів, таких як Reed-Solomon чи Turbo Codes, значно покращує надійність обміну інформацією. Хоча це може збільшити затримку передачі даних, оптимізація дозволяє знайти баланс між швидкістю й надійністю так, щоб критично важливі команди завжди доставлялися без втрат.

Однією з ключових переваг радіозв'язку є його незалежність від існуючої

інфраструктури. На відміну від стільникових або інтернет-мереж, він надає можливість створювати автономні системи комунікації, що залишаються функціональними навіть у зонах без покриття або в умовах радіомовної тиші. Це робить радіозв'язок ідеальним рішенням для польових, військових чи аварійно-рятувальних операцій, де необхідно забезпечити автономність і безперервність управління.

Водночас традиційний радіозв'язок має певні недоліки, серед яких: відсутність автоматизованого пріоритету передачі трафіку, чутливість до зовнішніх перешкод, обмежена пропускна здатність та потреба в точному налаштуванні антен. У ситуаціях, коли одночасно передаються різні типи даних (команди, відео, телеметрія), може виникати затримка у виконанні критичних операцій.

Саме тому сучасні системи доцільно оснащувати технологіями QoS або Multi-Link Operation, які дозволяють оптимізувати роботу каналів зв'язку, адаптувати їх параметри та зменшувати вплив зовнішніх факторів. Отже, радіозв'язок залишається основою системи управління наземними роботами, забезпечуючи базовий канал для обміну даними, простоту розгортання та високу автономність. Його ефективність може значно підвищитися завдяки інтеграції з адаптивними механізмами управління трафіком і сучасними методами обробки сигналів.

Поєднання традиційного радіозв'язку з інтелектуальними технологіями створює оптимальну гібридну систему, здатну забезпечити стабільний контроль і надійне функціонування роботизованих платформ у найрізноманітніших умовах.

2.3. Проектування архітектури програмного забезпечення СНК для керування адаптивним зв'язком.

Проектування архітектури програмного забезпечення станції наземного керування (СНК), спрямоване на організацію адаптивного зв'язку, має забезпечити створення модульної, передбачуваної та безпечної системи. Вона повинна інтегрувати управління радіоінтерфейсами, адаптивні алгоритми,

механізми управління якістю обслуговування (QoS) і зручні інтерфейси для операторів у єдину цілісну платформу.

Архітектура передбачає чітке розмежування функціоналу між компонентами, мінімізацію затримок у процесах прийняття ключових рішень, підтримку гарячого резервування модулів і простоту розширення завдяки додаванню нових алгоритмів, включаючи стратегії MLO та моделі машинного навчання для прогнозування стану каналів. Центральним елементом системи виступає координаційний шар комунікацій — ядро, яке приймає рішення про вибір каналів, зміну режимів модуляції, управління механізмами корекції помилок (FEC) і пріоритезацію трафіку.

Ядро отримує телеметрію і метрики каналів від нижчого рівня (підсистеми фізичних інтерфейсів), аналізує ці дані в реальному часі та на основі політик формує команди для виконавчих модулів. Для забезпечення детермінованої роботи ядро реалізується у вигляді сукупності окремих сервісів або потоків з чітко визначеним часом обробки й інтервалами опитування, що дозволяє гарантувати виконання вимог до затримок критичних рішень.

Нижній рівень архітектури забезпечує роботу з фізичними інтерфейсами системи: драйвери радіомодулів, контролери антен, а також стільникові й супутникові інтерфейси. Цей шар надає уніфіковані метрики (на кшталт RSSI, SNR, BER, latency, throughput), можливість ініціювати тестові пакети й адаптувати параметри роботи обладнання (потужність сигналу, ширину смуги, канал, режим модуляції). У цьому шарі важливо реалізувати асинхронну подійну модель передачі даних і гарантувати атомарність операцій перемикання каналів для запобігання конфліктним станам під час виконання стратегій MLO.

Над координаційним ядром розташовано шар політик і адаптацій. Тут працюють модулі управління QoS, відповідальні за пріоритезацію трафіку та динамічний перерозподіл ресурсів; модулі MLO оцінюють якість каналів і розподіляють потоки даних між ними; модуль FEC контролює режими корекції помилок із урахуванням показників втрат та затримок.

Для кожного модуля передбачено чіткий конфігураційний інтерфейс і засоби телеметрії для інтеграції в систему моніторингу й журналювання. Для

взаємодії користувача передбачено інтерактивний шар (UI), який відображає актуальні метрики каналів, стан прийнятих адаптивних рішень і дозволяє оперативно інтервентувати в разі потреби. UI підтримує три режими роботи: повну автономію (автоматичний режим), напівавтоматичний формат із рекомендаціями оператора та ручний режим для прямого управління. Щоб забезпечити просту і швидку реакцію на критичні ситуації, інтерфейс керується подійною (push) моделлю отримання даних від ядра.

Комунікація між модулями в системі організовується за рахунок впровадження легковагової внутрішньої шини повідомлень або використання брокера повідомлень, які мають підтримку функцій обробки пріоритетних черг та властивостей управління якістю обслуговування (QoS).

Такий підхід забезпечує ефективну ізоляцію модулів, що, своєю чергою, дозволяє проводити оновлення чи відновлення окремих сервісів без необхідності зупиняти всю систему. Додатково, це створює сприятливі умови для проведення інструментального тестування. Окрім внутрішньої координації, інтеграція із зовнішніми сервісами, такими як системи віддаленого логування, оновлення прошивки чи аналітичні платформи, має базуватися на використанні чітко визначених і документованих API (REST або gRPC), які включають обов'язкову підтримку аутентифікації користувачів і забезпечують криптографічний захист переданих даних.

Система повинна бути побудована з урахуванням найвищих стандартів безпеки та надійності. Це передбачає впровадження таких рішень, як шифрування каналів зв'язку, механізмів аутентифікації та авторизації, процедур перевірки цілісності команд і обов'язкового журналювання всіх критичних операцій та подій.

Для забезпечення додаткової стійкості архітектура має передбачати використання механізмів резервування, наприклад, hot-standby для ключових компонентів. У разі непередбачених ситуацій, як-от невдале перемикання чи деградація системи, повинні бути доступні автоматизовані механізми відкату налаштувань до попереднього стабільного стану. Щоб зменшити ризики

впровадження нових функцій або політик, доцільно запровадити симуляційний режим.

У цьому режимі нові налаштування та політики попередньо тестуються в умовах, максимально наближених до реальних, перш ніж запускатися у повноцінну робочу експлуатацію. Окрему увагу слід приділити створенню підсистеми для тестування та валідації роботи системи. До її складу має входити модуль високоточного логування всіх етапів та подій керувального процесу, засоби для детального аналізу пакетного руху в мережі, а також інструментарій для навантажувального й стресового тестування комунікаційних каналів. Важливим аспектом є валідація латентних і складних сценаріїв роботи системи, таких як хендовери (плавне перемикання між ресурсами), деградація алгоритмів прямої виправної корекції (FEC), агрегація каналів тощо.

Крім того, необхідно розробити чіткі критерії оцінки оптимальності змін політик QoS. Для забезпечення безперервності розробки та розгортання програмного забезпечення критично значимо інтегрувати автоматизовані тести та сценарії регресійного аналізу у конвеєри CI/CD, що дозволить швидко й безпечно впроваджувати оновлення системи.

З погляду впровадження технічних рішень, доцільно дотримуватися принципів модульності та мікросервісної архітектури для розробки компонентів, які не належать до критичних елементів системи.

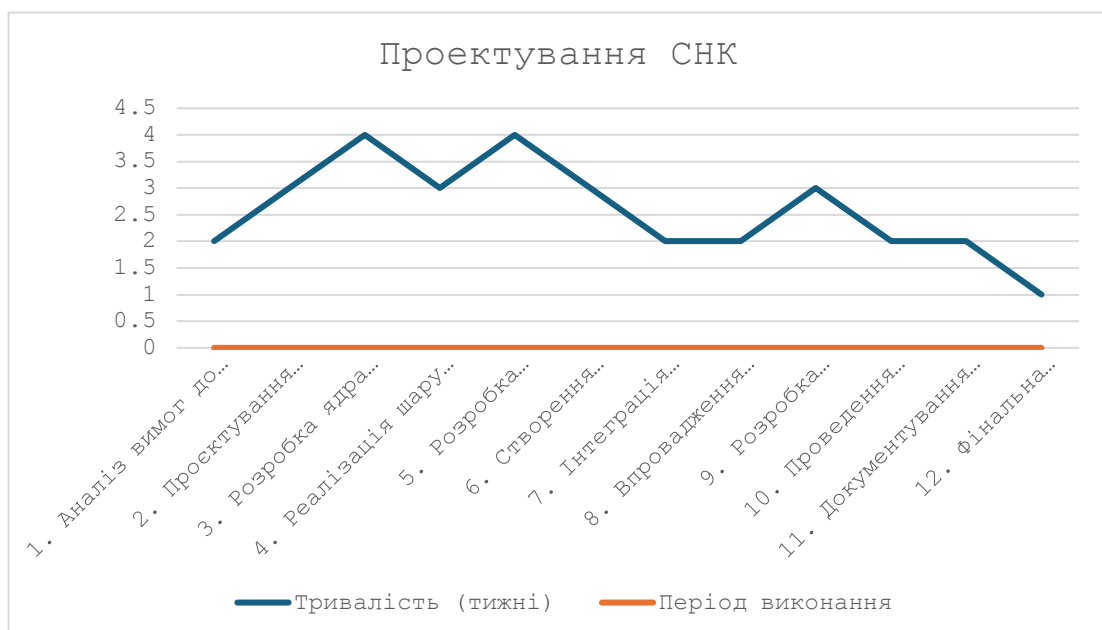


Рисунок 2.3.1 — Проектування СНК

Для функцій, пов'язаних із критично важливими процесами, такими як передача керівних команд або ухвалення рішень щодо перемикання каналів, рекомендується впроваджувати їх у формі детермінованих сервісів або інтегрованих процесів, які виконуються в режимі реального часу (наприклад, RT-потоків чи системи з реального часу — RTOS).

Застосування загальноприйнятих і стандартизованих протоколів обміну повідомленнями й абстрактних рішень, таких як DDS (Data Distribution Service) або легкий MQTT (зазвичай використовуваний для телеметрії), сприяє значному спрощенню взаємодії з іншими зовнішніми системами, зокрема симуляторами або сторонніми платформами. Завдяки цьому покращується масштабованість та інтеграція системи в різних середовищах.

На етапі документування архітектура повинна включати опис інтерфейсів, специфікацію форматів телеметрії та подій, модель станів під час хендверів і відновлення, а також набір ключових контрольних метрик ефективності (MTTR, latency p50/p95/p99, packet loss, throughput). Це дасть змогу проводити кількісну оцінку впливу нових алгоритмів на функціонування СНК і аргументувати вибір конфігурацій у рамках магістерської роботи. У результаті спроектована архітектура програмного забезпечення для управління адаптивним зв'язком повинна бути модульною, забезпечувати детермінованість у критичних процесах, інтегруватись із політиками QoS та MLO, гарантувати безпеку й підтримку гарячого резервування, а також мати розширені функції валідації і моніторингу.

Така архітектура стане основою для створення надійної, гнучкої та масштабованої системи СНК, здатної адаптуватися до реальних умов експлуатації з мінімальним втручанням оператора або без нього у повсякденному використанні, а також у критичних ситуаціях.

РОЗДІЛ 3. КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ВДОСКОНАЛЕНОЇ СИСТЕМИ

3.1. Технічні рішення щодо апаратної модернізації станції наземного керування.

Оновлення станції наземного керування для робототехнічного обладнання є критичним кроком у переході від класичних систем зв'язку до сучасних адаптивних платформ, здатних забезпечити стабільний і безперервний обмін даними навіть у складних умовах експлуатації.

Основна ідея модернізації полягає у створенні інтегрованої інтелектуальної системи, що синхронізує апаратні та програмні компоненти для ефективного управління каналами зв'язку, динамічного налаштування параметрів передачі інформації і оперативного реагування на зміни в навколишньому середовищі. Традиційні станції керування зазвичай працюють на базі одноканальних або статичних радіоінтерфейсів із фіксованими налаштуваннями частот, модуляції та потужності.

Такий підхід забезпечує лише базову надійність, але не дозволяє системі адаптуватися до змін у радіочастотному середовищі чи до мережевих навантажень. Через це можуть виникати затримки у передачі команд керування, розриви зв'язку або нестабільність роботи при переміщенні робота на значні відстані. Новий підхід спрямований на створення багатоканальної архітектури зв'язку, у якій система оптимально розподіляє ресурси між каналами, мінімізуючи затримки і підтримуючи високу надійність навіть за несприятливих умов.

Передбачене вдосконалення включає модернізацію комунікаційної частини станції: оновлення модулів зв'язку, антенних систем, обчислювального обладнання, джерел живлення та інтерфейсу оператора. Впровадження таких технологій, як MIMO, багатоканальна передача (Multi-Link Operation), корекція помилок (Forward Error Correction), пріоритезація трафіку (QoS) та адаптивне управління потужністю, дозволяє створити багатоканальний інформаційний простір. У такій системі вибір каналу чи комбінації каналів здійснюється

автоматично, з урахуванням швидкості передачі даних, стійкості сигналу та мінімізації затримок. Одним із ключових аспектів модернізації є підтримка мультिकанального зв'язку через радіочастоти, Wi-Fi, LTE/5G, а при необхідності — через супутникові чи ретрансляційні канали. Така структура забезпечує резервування зв'язку, при якому втрата окремого каналу не впливає на загальну працездатність системи. Додаткове впровадження адаптивних антен і SDR-модулів (Software Defined Radio) дозволяє гнучко налаштовувати частотний ресурс, що особливо актуально за умов високого рівня радіоперешкод чи обмеженого доступу до певних спектрів.

Удосконалення також охоплює процесорні системи з покращеними можливостями обробки даних. Перехід на сучасні платформи дозволяє підтримувати паралельну роботу алгоритмів аналізу якості каналів зв'язку, зміну модуляції та корекцію помилок без шкоди для загальної продуктивності. Завдяки цьому станція може приймати реалістичні рішення в реальному часі з урахуванням змін у зоні дії.

Особливу увагу приділено підвищенню надійності системи: передбачено резервування ключових вузлів, таких як комунікаційні модулі, джерела живлення і системи охолодження. Це мінімізує ризик відмови під час тривалих операцій та дозволяє функціонувати станції автономно навіть за складних польових умов. Крім того, система буде оснащена модулем моніторингу енергоспоживання для оптимізації використання ресурсів та забезпечення максимальної автономності.

У рамках цієї концепції система національного контролю (СНК) перетворюється з традиційної моделі передачі команд в інтелектуальний центр зв'язку. Цей центр здатен аналізувати дані, приймати рішення та адаптуватися до змінних умов у реальному часі.

Усі апаратні оновлення орієнтовані на створення гнучкої інфраструктури, яка ефективно взаємодіє з програмним забезпеченням, розглянутим у попередньому розділі. Така синхронізація забезпечує узгоджену роботу механізмів адаптації, пріоритезації і корекції. Отже, основна ідея модернізації апаратної частини СНК передбачає розробку гнучкої, масштабованої та стійкої

платформи. Вона підтримує багатоканальний адаптивний зв'язок, мінімізує затримки при керуванні, підвищує надійність системи та створює умови для подальшої інтеграції інтелектуальних технологій автоматичного управління і діагностики комунікаційної інфраструктури.

3.1.1. Оновлення радіомодулів та вдосконалення антенних систем

Модернізація радіомодулів та антенних систем у складі станції наземного керування спрямована на підвищення продуктивності, стабільності та адаптивності бездротового зв'язку між оператором і наземним роботом. Раніше використовували радіомодулі забезпечували лише одночастотну роботу з обмеженою пропускну здатністю, що ускладнювало використання в умовах складної радіоелектронної обстановки або на значних відстанях.

Нова архітектура передбачає застосування багатодіапазонних і програмно-конфігурованих модулів, здатних одночасно оперувати у кількох частотних діапазонах, забезпечуючи оптимальний розподіл трафіку між каналами управління, телеметрії та передачі відео.

Ключовими компонентами оновленої системи є модулі Foxeer 5.8G Reaper Infinity 5W 40CH VTx та BelinRC ELRS 433 MHz TX Backpack, які забезпечують стійкий зв'язок у відповідних частотних діапазонах. Foxeer 5.8G Reaper Infinity відповідає за високоякісну передачу відеосигналу завдяки потужності випромінювання до 5 Вт і підтримці 40 каналів у діапазоні 5.8 ГГц. Це дає можливість стабільно передавати відеопотік навіть за умов перешкод чи багатопроменевих відбиттів сигналу.

Модуль BelinRC ELRS 433 MHz TX Backpack використовується для передачі команд управління на великі відстані за допомогою протоколу ExpressLRS, який вирізняється низькою затримкою та високою стійкістю до завад. Сумісне використання цих модулів створює незалежну структуру каналів, де функції відеопередачі та керування розділяються, мінімізуючи взаємні перешкоди та втрати даних.

Антенна система також зазнала суттєвого вдосконалення. Завдяки впровадженню технологій MIMO (Multiple Input – Multiple Output) та

Beamforming забезпечується ефективніше просторове рознесення сигналів і формування спрямованих діаграм випромінювання. Це дозволяє підвищити рівень сигналу в напрямку приймача, мінімізувати вплив багатопроменевих викривлень і забезпечити стабільність зв'язку. Додатково застосування антен із функцією електронного сканування променя дозволяє оперативно переналаштувати напрямок випромінювання без використання механічних елементів для обертання антени, що є важливою перевагою при зміні положення чи руху станції.

Оновлені радіомодулі підтримують функцію Multi-Link Operation (MLO), яка дозволяє одночасно використовувати кілька з'єднань і швидко перемикатися між ними без втрати пакету даних. Ця функція стає критично важливою під час переміщення робота між зонами покриття або при короткочасних збоях у каналі зв'язку. Поєднання апаратної підтримки MLO з програмною системою управління дає змогу динамічно адаптувати частоту, потужність сигналу й тип модуляції відповідно до зовнішніх умов та стану каналу.

Результатом модернізації є створення гнучкої, багатоканальної комунікаційної системи, яка адаптується до змін зовнішнього середовища в реальному часі. Використання сучасних радіотехнологій і високоефективних антенних рішень значно покращує надійність управління, якість передачі даних і стабільність зв'язку навіть за складної електромагнітної обстановки.

3.1.2. Відеопередавач Foxeer 5.8G Reaper Infinity 5W 40CH VTx

Основним компонентом системи відеопередачі модернізованої станції наземного керування є високоінтелектуальний і надпотужний модуль Foxeer 5.8G Reaper Infinity 5W 40CH VTx.

Цей пристрій забезпечує стабільну, надійну і якісну передачу відеосигналу в режимі реального часу, що особливо важливо для систем, де швидкість і точність передачі даних мають вирішальне значення. Зазначений відеопередавач належить до професійного класу обладнання, сконструйованого спеціально для застосування в безпілотних системах, складних робототехнічних рішеннях і FPV-комплексах. Завдяки цьому він задовольняє вимоги до роботи в умовах

великої дальності передачі за мінімального рівня затримки з максимальною стабільністю з'єднання. Foxeer 5.8G Reaper Infinity функціонує в частотному діапазоні 5.8 ГГц, підтримуючи роботу на 40 різних каналах.

Така багатоканальність дозволяє користувачам легко налаштувати систему та уникати взаємних радіоперешкод від інших джерел сигналів. Завдяки високій вихідній потужності до 5 Вт модуль здатен передавати відео на дистанції у кілька кілометрів, навіть у складних умовах, таких як наявність природних перешкод або нерівний рельєф місцевості.

Цей рівень енергетичного запасу забезпечує якісну і стабільну роботу в умовах відкритих просторів, де мінімальний рівень шумів у каналі є ключовим фактором для ефективного зв'язку. Інженери подбали про зручність і довговічність модуля, виконавши корпус із легкого, але міцного алюмінію та забезпечивши його активною системою охолодження.

Такий дизайн сприяє ефективному розсіюванню тепла під час тривалої роботи при максимальних навантаженнях, запобігаючи перегріву навіть у суворих кліматичних умовах. Крім того, стійкість до механічних впливів та вібрацій робить цей пристрій ідеальним для використання в мобільних базах управління або автономних польових системах.

Модуль сумісний із форматами NTSC/PAL, має інтерфейс для підключення аналогового відео й відмінно працює з усіма популярними камерами FPV. Унікальна характеристика передавача — практично відсутня затримка передачі сигналу, що критично для роботи оператора, який має здійснювати миттєве управління роботизованими пристроями або іншими технічними об'єктами в реальному часі.

Наявність функції віддаленого конфігурування через протокол SmartAudio чи аналогічний інтерфейс дає змогу змінювати налаштування модуля (частота, канал, потужність) без необхідності прямого фізичного доступу. Однією з основних переваг Foxeer Reaper Infinity є його здатність адаптуватися до змін радіоефіру.

Інтегровані алгоритми автоматичної стабілізації забезпечують сталий рівень потужності та високу якість трансляції навіть за умов коливання напруги

живлення або зміни відстані до приймача сигналу. А технологія динамічного керування частотами дозволяє ефективно працювати з кількома активними каналами зв'язку одночасно, усуваючи ризики взаємних перешкод і сприяючи безперебійному функціонуванню системи.

Foxeer 5.8G Reaper Infinity 5W 40CH VTx представляє собою вдосконалений пристрій, який об'єднує передову технологію високої потужності, широкий спектр налаштувань і винятковий рівень промислової надійності. Завдяки цьому він є ідеальним вибором для застосування як ключовий компонент станцій наземного управління.

Використання даного передавача забезпечує стабільну передачу відеосигналу, що відрізняється високою роздільною здатністю, а також мінімальними затримками у передачі, що суттєво підвищує ефективність виконання візуального моніторингу та дозволяє здійснювати максимально точний контроль над роботизованими системами. Універсальність і технічна досконалість цього VTx створюють міцну основу для оптимізації візуального спостереження і взаємодії з сучасними механічними рішеннями.

3.1.3. Конкуренти Foxeer 5.8G Reaper Infinity 5W 40CH VTx, переваги та недоліки(GEPRC RAD VTX 5.8G 2.5W, iFlight BLITZ Whoop 5.8GHz 2.5W VTX, VTX30-800 5.8G 40CH 800mW).

Модуль GEPRC RAD VTX 5.8 G 2.5 W створений для забезпечення стабільної та високоякісної передачі відеосигналу в діапазоні 5.8 ГГц, що робить його однією з найбільш затребуваних опцій у середньому ціновому сегменті серед відеопередавачів для безпілотних апаратів і наземних станцій. Його конструкція базується на двошаровій друкованій платі, яка сприяє оптимальному розподілу електроживлення та ефективному тепловідведенню. Це дозволяє знизити рівень перешкод під час роботи і підвищити стабільність функціонування навіть у випадках тривалої експлуатації.

Модуль підтримує різні рівні вихідної потужності, починаючи від мінімального режиму PitMode і доходячи до максимальної потужності в 2.5 Вт, що забезпечує гнучкість у налаштуваннях для конкретних завдань, залежно від

умов експлуатації та потрібної дальності передачі.

Крім того, робочий діапазон напруги від 7 до 36 В дозволяє використовувати передавач із широким спектром живильних систем, тоді як антенний роз'єм стандарту MMCX гарантує стабільне з'єднання зі зменшеними втратами сигналу. Управління параметрами здійснюється через протокол IRC Tramp, що значно полегшує інтеграцію модуля в системи з підтримкою OSD і спрощує налаштування без необхідності фізичного доступу до самого пристрою. Однак, попри всі вищезазначені переваги, модуль GEPRC RAD VTX 5.8 G 2.5 W поступається конкурентній моделі Foxeer Reaper Infinity 5 W 40CH VTx за низкою ключових характеристик.



Рисунок 3.1.1 — GEPRC RAD VTX 5.8 G 2.5 W

Найбільш критичне з них — це обмежена вихідна потужність, яка становить 2.5 Вт, що удвічі менше від аналогічного показника в модулі Foxeer. Через це зменшується дальність передачі відео та загальна ефективність роботи у складних умовах, наприклад, за високого рівня радіоперешкод або на відкритих просторах із великими дистанціями. Крім того, стандарт монтажних отворів модуля становить 30.5×30.5 мм, що може бути не завжди сумісним із компактними системами та сучасними рамами, тоді як Foxeer Reaper Infinity

застосовує універсальніший розмір 20×20 мм, який є більш гнучким для інтеграції в різні платформи.

Ще однією помітною проблемою є потенційна нестабільність роботи GEPRC RAD VTX у довготривалих місіях. Користувачі нерідко повідомляють про перегрів або раптове зникнення сигналу, що свідчить про потребу в вдосконаленні системи охолодження пристрою. Зі свого боку Foxeer Reaper Infinity має значно потужніший підсилювач сигналу й більш ефективно вирішення проблем тепловідведення, що робить його надійнішим при роботі на високих потужностях.

Підсумовуючи, модуль GEPRC RAD VTX 5.8 G 2.5 W є достойним вибором для використання в ситуаціях, де потреби в занадто великій дальності передачі чи подоланні екстремальних умов роботи не є визначальною вимогою. Однак при порівнянні з моделлю Foxeer Reaper Infinity 5 W 40CH VTX можна дійти висновку, що він поступається конкуренту за параметрами вихідної потужності, стабільності роботи й універсальності монтажу. Завдяки цьому Foxeer стає більш раціональним варіантом для сучасних систем зв'язку з високими стандартами надійності та ефективності на великих дистанціях.

Модуль iFlight BLITZ Whoop 5.8 GHz 2.5 W VTX представляє собою сучасний і технологічно розвинений засіб для передачі відеосигналу, який знаходить застосування в системах FPV (first-person view) та наземного зв'язку. Цей пристрій розроблено з акцентом на забезпечення стабільної і безперешкодної трансляції відео навіть на середніх і великих дистанціях, роблячи його ідеальним вибором для широкого спектра сценаріїв використання.

Основною цільовою аудиторією модуля є власники компактних дронів формату Whoop та легких мобільних платформ, де ключовими вимогами є мінімальна вага пристрою та його легка інтеграція до уже існуючих систем. Передавач забезпечує потужність до 2.5 Вт, що робить його досить ефективним рішенням для роботи в стандартному діапазоні частот 5.8 ГГц, зберігаючи при цьому прийнятну якість зображення та стабільність сигналу.

Модуль підтримує інтеграцію із сучасними системами змінюваних параметрів за допомогою протоколу IRC Tramp. Це дозволяє користувачам

дистанційно коригувати налаштування частоти, потужності сигналу і каналу відповідно до умов. Енергоефективність пристрою — у межах 5–9 Вт — є ще однією сильною стороною, яка дає змогу встановлювати його навіть у більш обмежені по енергетичних ресурсах платформи. Okремо варто відзначити грамотну систему охолодження пристрою: завдяки алюмінієвому теплорозсіювачу ефективно знижується температура навіть при роботі на максимальній потужності, перешкоджаючи перегріванню. Конструкція модуля передбачає монтаж за допомогою стандартних отвори розміром 25.5×25.5 мм, спрощуючи його інтеграцію в компактні корпуси. Надійне підключення антени забезпечується інтерфейсом MMCX, що додає модулям міцності і практичності у використанні.

Для підвищення загальної безпеки експлуатації в модулі передбачені функції автоматичного відновлення системи після перегріву та захист від короткого замикання. Проте, незважаючи на значні переваги, у модуля iFlight BLITZ Whoop також є певні обмеження, особливо якщо порівнювати його з альтернативними моделями, наприклад Foxeer 5.8G Reaper Infinity 5W 40CH VTx. У першу чергу, на обмеження вказує максимальна потужність в 2.5 Вт, яка є майже вдвічі меншою ніж у конкурентної моделі.



Рисунок 3.1.2 — iFlight BLITZ Whoop 5.8 GHz 2.5 W VTX

Це суттєво впливає на дальність та якість передачі сигналу, що робить модуль менш доцільним для використання у складних умовах з активними радіоперешкодами чи великою відстанню між передавачем та приймачем.

На додаток до цього підтримка лише стандартного діапазону з 40 каналів обмежує можливості роботи у багатоканальних середовищах, тоді як Foxeer Reaper Infinity пропонує розширену гнучкість частотного планування для адаптації до конкретних умов. Ще одним недоліком є система охолодження. Попри використання алюмінієвого теплорозсіювача, модуль не має активного обдуву чи просунутих терморегуляційних рішень, які присутні у більш досконалих моделях, таких як Foxeer Reaper Infinity.

Таким чином, iFlight BLITZ Whoop 5.8 GHz 2.5 W VTX можна розглядати як надійний і добре збалансований вибір для систем середнього сегмента, де важливі компактні розміри та стабільність роботи в стандартних умовах.

Однак для сценаріїв із підвищеним навантаженням або професійного використання, зокрема для наземних станцій управління, які потребують більшої потужності, дальності та стабільності зв'язку, оптимальнішим варіантом залишається Foxeer 5.8G Reaper Infinity 5W 40CH VTx, що перевершує за технологічністю і функціональними можливостями.

VTX30-800 5.8G 40CH 800 m — це компактний відеопередавач середнього класу, оптимізований для FPV-систем, де потрібен стабільний зв'язок із мінімальним нагріванням та енергоспоживанням. Його максимальна вихідна потужність становить до 800 мВт, що забезпечує дальність передачі відеосигналу в межах 800–1000 метрів на відкритій місцевості.

Однак у більш складних умовах, таких як міські забудови чи лісиста місцевість, сигнал значно слабшає. Пристрій підтримує 40 каналів у діапазоні 5.8 ГГц, сумісний із більшістю сучасних приймачів і окулярів для відеопередачі, має стандартне підключення та просту систему налаштування частот і каналів. Корпус виготовлений з алюмінієвого сплаву, що сприяє відведенню тепла, але через відсутність активного охолодження пристрій може перегріватися при довготривалому використанні або за високих температур.

Якщо порівнювати з Foxeer 5.8G Reaper Infinity 5W 40CH VTx, модель

VTX30-800 виглядає менш потужною за характеристиками. З її п'яти- чи навіть шестикратно меншою вихідною потужністю помітно обмежуються як дальність сигналу, так і його стійкість в умовах перешкод. Foxeer Reaper Infinity оснащений сучасною системою управління, яка підтримує функції SmartAudio та IRC Tramp для дистанційного регулювання параметрів потужності та частот, тоді як VTX30-800 покладається здебільшого на кнопкове перемикання. Також Reaper Infinity має більш досконалі засоби фільтрації сигналу й точніше регулювання вихідної потужності, що дозволяє мінімізувати вплив електромагнітних завад від інших компонентів дрона.

У користуванні VTX30-800 можуть спостерігатися дещо вищі рівні шумів у спектрі, що потенційно впливає на якість передавання зображення на високих частотах. Крім того, значною різницею є система охолодження. В Reaper Infinity використовується високоефективний радіатор, що дозволяє без перебоїв працювати навіть на великій потужності, тоді як VTX30-800 потребує хорошого охолодження через потік повітря або обмеження часу роботи для запобігання перегріванню.



Рисунок 3.1.3 — VTX30-800 5.8G 40CH 800 m

Легша вага VTX30-800 є перевагою для дрібніших або легких дронів, проте

це стало можливим за рахунок спрощеної конструкції й меншої захищеності електронної плати. Енергоспоживання в нього менш інтенсивне, однак це свідчить і про нижчу продуктивність. Таким чином, VTX30-800 5.8G 40CH 800 m є надійним і доступним варіантом для базових або середньорівневих FPV-систем. Він добре підходить для коротких польотів, тренувань або використання на легких дронах.

Однак у порівнянні з Foxeer Reaper Infinity 5W він поступається в стабільності, чистоті сигналу, ефективності охолодження, функціональних можливостях і далькобійності зв'язку. Через ці особливості він менш придатний для професійного використання чи тривалих завдань у складних умовах.

3.1.4. Радіопередавач BelinRC ELRS 433 MHz TX Backpack

Модуль BelinRC ELRS 433 MHz TX Backpack є сучасним передавачем, розробленим для створення стабільного каналу управління в системах дистанційного контролю і телеметрії. Він спроектований для забезпечення надійного зв'язку на великих відстанях, що особливо важливо для наземних робототехнічних платформ та інших систем, які функціонують в умовах складної місцевості.

Пристрій працює в діапазоні 433 МГц, який характеризується високою здатністю проникати крізь перешкоди та меншим затуханням сигналу порівняно з частотами 2,4 ГГц чи 5,8 ГГц. Це дозволяє BelinRC ELRS 433 MHz TX Backpack забезпечувати стабільну передачу команд навіть за наявності радіоперешкод або об'єктів, що частково блокують сигнал.

Модуль підтримує декілька режимів потужності передачі — від 100 мВт до 1 Вт, що дає оператору можливість вибору оптимальних параметрів для енергоспоживання або збільшення дальності роботи залежно від умов завдання. Живлення може здійснюватися в діапазоні напруги від 5 до 12 В, що робить пристрій сумісним із більшістю стандартних джерел живлення наземних станцій управління. У конструкції передбачено OLED-дисплей і джойстик, які забезпечують можливість прямого налаштування модуля без необхідності використовувати додаткові пристрої. Програмне забезпечення працює на основі

відкритого протоколу ExpressLRS, який відзначається низькою затримкою передачі, високою частотою оновлення і розширеними функціями параметризації. Це дозволяє адаптувати модуль до різних сценаріїв роботи, включаючи автоматичну зміну потужності або частоти для підтримання стабільного зв'язку.

Конструктивно модуль виконаний у форм-факторі «Backpack», що дозволяє монтувати його безпосередньо на корпус контролера або наземної станції, формуючи компактний вузол зв'язку з простим доступом до інтерфейсів налаштування. Такий дизайн зменшує кількість з'єднань і втрат сигналу, а також підвищує ергономіку пристрою.

Додатково він обладнаний системою захисту від перегріву, короткого замикання і перенапруги, що гарантує стабільну роботу навіть у складних умовах. Особливої уваги заслуговують основні переваги модуля: стійкість сигналу на великих дистанціях, високий рівень захисту від радіоперешкод, гнучкість налаштувань потужності передачі та підтримка інноваційного протоколу ExpressLRS. Завдяки роботі на низькій частоті він ідеально підходить для передачі контрольних команд і телеметрії в ситуаціях, де ключову роль відіграють надійність зв'язку та стабільність роботи. У той же час, у порівнянні з високочастотними відеомодулями, такими як Foxeer 5.8G Reaper Infinity 5W 40CH VTx, BelinRC ELRS 433 MHz TX Backpack має нижчу пропускну здатність каналу. Це обмежує його застосування для передачі відеосигналів і потокових даних великого обсягу.

Максимальна потужність модуля становить лише 1 Вт проти 5 Вт у Foxeer, що впливає на стійкість сигналу в середовищах із високим рівнем шумів. Крім того, робота на частоті 433 МГц вимагає точного підбору параметрів антен та калькуляції оптимальної довжини хвилі, що може ускладнити інтеграцію компонента в умовах обмеженого простору. Формат «Backpack» також потребує сумісності із контролером або використання спеціального адаптера, що не завжди гарантує універсальність підключення.

У цілому, BelinRC ELRS 433 MHz TX Backpack є ефективним і надійним рішенням для організації каналу управління та телеметрії з високою

стабільністю та мінімальною затримкою. У складі наземної станції керування він може слугувати основним передавачем для передачі команд між оператором і роботом, гармонійно доповнюючи високочастотні модулі, такі як Foxeer 5.8G Reaper Infinity, які відповідають за передачу відеоданих. Подібна комбінація забезпечує збалансовану систему зв'язку, де кожен компонент виконує свою оптимальну задачу: BelinRC гарантує надійний контроль і канал зворотного зв'язку для телеметрії, тоді як Foxeer відповідає за швидкісну передачу відео.

3.1.5. Конкуренти BelinRC ELRS 433 MHz TX Backpack, переваги та недоліки(ELRS 433 MHz TX Module 400TX, Jumper ELRS TX FPV 2.4 GHz, Jumper AION TX Nano ELRS 2.4 GHz).

Модуль ELRS 433 MHz TX Module 400TX є інноваційним і сучасним рішенням, призначеним для організації каналів управління та передачі телеметрії у системах, які працюють на частоті 433 МГц. Він створений з акцентом на забезпечення стабільного і ефективного зв'язку на великих відстанях.

Основа роботи модуля побудована на відкритому протоколі ExpressLRS, який вирізняється високою швидкістю передачі даних, мінімальною затримкою та широкими можливостями налаштування параметрів роботи під специфічні завдання. Конструкція модуля реалізована у форматі Micro або JR-модуля, що забезпечує легку інтеграцію з більшістю стандартних радіопередавачів для дистанційного керування, таких як Radiomaster або Jumper.

Ця характеристика робить його універсальним вибором для різноманітних систем, хоча при побудові наземних станцій управління універсальність конструкції іноді перестає бути ключовою перевагою через вимоги до стаціонарної інтеграції. Модуль 400TX підтримує максимальну потужність передачі до 1 Вт, що дозволяє налагоджувати якісний зв'язок на відстанях понад 10–15 км за сприятливих умов.

Наявність декількох рівнів регулювання вихідної потужності надає можливість оптимізувати енергоспоживання в залежності від режиму роботи. Крім того, модуль забезпечує частоту оновлення пакетів до 200 Гц, що гарантує стабільний і плавний канал управління із мінімальною затримкою навіть за

несприятливих умов радіозв'язку.



Рисунок 3.1.4 — ELRS 433 MHz TX Module 400TX

Програмна частина модуля працює на прошивці ExpressLRS, яка дозволяє гнучко налаштувати частотний діапазон, потужність сигналу та протоколи телеметрії, а також забезпечує інтеграцію із сучасними приймачами, сумісними із системами ELRS. Проте, порівняння з модулем BelinRC ELRS 433 MHz TX Vackpack виявляє низку технічних і конструктивних обмежень 400TX, які варто враховувати при виборі рішення для наземних станцій управління.

Одним із головних недоліків є конструкція у форматі Micro/JR, яка не передбачає просту інтеграцію в корпус стаціонарної станції. Для цього потрібні додаткові кріплення або адаптери, що ускладнюють монтаж та обслуговування. BelinRC вирізняється більш функціональним підходом: його форм-фактор типу Vackpack дозволяє легко і надійно встановити пристрій безпосередньо на станцію або її корпус, забезпечуючи компактність і захист від механічних пошкоджень. Іншим важливим аспектом є ефективність системи охолодження.

У модулі 400TX при роботі на високій потужності (понад 500 мВт) спостерігається нагрівання пристрою, що знижує стабільність сигналу та може викликати автоматичне зниження потужності для запобігання перегріву. Навпаки, модуль BelinRC оснащений поліпшеною системою тепловідведення. Компактний алюмінієвий корпус із ребрами охолодження забезпечує ефективне розсіювання тепла, гарантуючи стабільну роботу навіть за умов тривалих сеансів передачі даних.

Загалом, модуль ELRS 433 MHz TX Module 400TX є хорошим і доступним варіантом для систем, де ключовими факторами є мобільність і сумісність зі стандартними радіопередавачами. Однак для стаціонарних систем керування, де важливими є інтеграція, стабільність роботи, підтримка телеметрії та оптимальне теплове навантаження, технологічно досконалішим і практичнішим рішенням стане BelinRC ELRS 433 MHz TX Backpack.

Модуль Jumper ELRS TX FPV 2.4 GHz представляє собою сучасний зразок радіопередавачів нового покоління, розроблених на основі відкритого протоколу ExpressLRS. Цей протокол забезпечує відмінні технічні характеристики, як-от висока швидкість передачі даних, мінімальна затримка сигналу та максимальна гнучкість у налаштуванні параметрів. Завдяки універсальній конструкції, модуль без проблем інтегрується з більшістю поширених передавачів у форматах JR або Nano, що робить його сумісним із моделями від таких виробників, як Radiomaster, Jumper, Zorro, TBS та інші.

Працюючи в діапазоні 2.4 ГГц, цей пристрій демонструє чудову частоту оновлення пакетів до 500 Гц і стабільний зв'язок навіть при керуванні високошвидкісними системами, що робить його одним із найбільш популярних виборів серед користувачів FPV-дронів та робототехнічних платформи, де критичними є мінімальні затримки. З погляду конструкції, Jumper ELRS TX FPV 2.4 GHz виконаний у компактному корпусі, який поєднує естетику з функціональністю.

У конструкцію модуля включено вбудований LCD-дисплей для простоти налаштування і контролю, активну охолоджувальну систему для підтримання оптимальної температури при тривалій експлуатації, а також стандартний роз'єм SMA для підключення зовнішньої антени. Окрім цього, пристрій підтримує динамічне регулювання потужності з передбаченими рівнями: 25 мВт, 100 мВт, 250 мВт, 500 мВт і навіть до 1 Вт.

Це дозволяє адаптувати параметри передачі відповідно до умов роботи, зокрема знижуючи потужність у разі стабільного сигналу, що позитивно впливає на загальне зниження енергоспоживання та покращує терmostійкість пристрою. Додатковою перевагою є можливість оновлення програмного забезпечення через

повітря (Over-the-Air Update) без необхідності фізичного підключення до комп'ютера. Однак при порівнянні з альтернативним модулем BelinRC ELRS 433 MHz TX Backpack можна виділити декілька важливих обмежень модуля Jumper, які особливо проявляються при роботі у складі стаціонарної наземної станції керування.

Основним недоліком є частотний діапазон. Хоча робота на 2.4 ГГц забезпечує високу швидкість передачі даних та відповідну чутливість сигналу, вона поступається діапазону 433 МГц за дальністю зв'язку та стійкістю до зовнішніх радіоперешкод. У складних умовах міської забудови або польових середовищах сигнал на 2.4 ГГц гірше проникає крізь фізичні перепони, більше залежить від прямої видимості та швидше втрачає якість у разі сильного радіошуму навколо. Для порівняння, BelinRC ELRS 433 MHz TX Backpack забезпечує стабільний і впевнений зв'язок навіть за наявності бар'єрів чи значного віддалення об'єкта на десятки кілометрів.

Втім, у порівнянні з BelinRC ELRS 433 MHz TX Backpack, модуль Jumper ELRS TX FPV 2.4 GHz має низку обмежень, які виявляються критичними при застосуванні в складі стаціонарної наземної станції керування. Одним із головних недоліків є частотний діапазон: хоча 2.4 ГГц забезпечує високу швидкість передачі даних, цей діапазон суттєво поступається 433 МГц за дальністю зв'язку та стійкістю до перешкод.



Рисунок 3.1.5 — Jumper ELRS TX FPV 2.4 GHz

У міських умовах або складній місцевості сигнал на частоті 2.4 ГГц гірше проходить крізь фізичні бар'єри, сильніше залежить від прямої видимості та швидше втрачає якість через радіошум. Водночас BelinRC 433 MHz TX Backpack гарантує стабільний зв'язок навіть у разі суттєвих відстаней чи фізичних перешкод. Іншим недоліком є відсутність формату "Backpack", що є однією з ключових переваг BelinRC. Jumper ELRS TX FPV 2.4 GHz розроблено як змінний модуль для ручних передавачів і він не передбачає інтегрованих можливостей для монтажу безпосередньо в корпусі наземної станції.

Це змушує використовувати додаткові адаптери, зовнішні кріплення та подовжувачі антен, що ускладнює конструкцію і збільшує ризик механічних пошкоджень. Натомість BelinRC створений для стаціонарного використання з мінімізацією кількості з'єднань. Окрім цього, тепловий режим роботи Jumper є менш оптимізованим. При потужності передачі понад 500 мВт модуль може значно нагріватися, причому система активного охолодження іноді не забезпечує належний температурний баланс під час тривалих сесій передачі. У стаціонарному використанні, де модуль працює годинами, це може погіршити стабільність сигналу чи вимагати заходів примусового охолодження. BelinRC вирізняється вдосконаленим пасивним тепловідводом і міцним металевим корпусом, який підтримує стабільну роботу навіть за високого навантаження.

Ще одна істотна різниця стосується можливостей телеметрії зворотного каналу. Хоча ExpressLRS підтримує телеметрію, на модулі Jumper вона часто обмежена або представлена з мінімальним набором параметрів. У свою чергу, BelinRC забезпечує повноцінну двосторонню взаємодію із приймачем та оператором, надаючи дані про рівень сигналу, напругу живлення, температуру модуля й навіть стан каналу в реальному часі.

Таким чином, Jumper ELRS TX FPV 2.4 GHz є надійним і технологічним рішенням, яке відмінно підходить для FPV-застосувань завдяки своїм високошвидкісним характеристикам, мінімальній затримці та широкій сумісності з різноманітними контролерами. Однак для стаціонарних систем керування з великим радіусом дії та підвищеними вимогами до стабільності й інтеграції в конструкцію станцій BelinRC ELRS 433 MHz TX Backpack

залишається більш доцільним і збалансованим вибором.

Модуль Jumper AION TX Nano ELRS 2.4 GHz належить до категорії компактних передавачів, створених для систем дистанційного керування з використанням відкритого протоколу ExpressLRS. Цей модуль забезпечує високу швидкість передачі даних, мінімальні затримки та стабільне з'єднання. Його ключова перевага — надзвичайно компактний форм-фактор Nano, який дає змогу інтегрувати пристрій у невеликі передавачі або мобільні станції управління.

Завдяки цьому модуль особливо популярний серед користувачів FPV-дронів та наземних роботизованих систем, яким потрібне легке, енергоефективне та універсальне рішення для передачі команд. У технічному плані Jumper AION TX Nano ELRS 2.4 GHz здатний працювати з потужністю передачі до 1 Вт, що є суттєвим показником для пристрою такого розміру. Робота у діапазоні 2.4 ГГц забезпечує частоту оновлення сигналу до 500 Гц, що сприяє миттєвій відповіді на команди.

Також модуль оснащено системою динамічного регулювання потужності (Dynamic Power Adjustment), яка оптимізує енергоспоживання та підтримує надійний рівень сигналу навіть за змінних умов зв'язку. Активна система охолодження із вбудованим вентилятором запобігає перегріву при роботі на високих навантаженнях. Оновлення прошивки виконується максимально зручно завдяки підтримці функції Over-the-Air Update без необхідності фізичного підключення до ПК. Однак у порівнянні з BelinRC ELRS 433 MHz TX Backpack, модуль AION TX Nano має обмеження, які знижують його ефективність у стаціонарних наземних системах керування.

Одним із головних недоліків є діапазон частот 2.4 ГГц — попри високу швидкість передачі даних, він значно поступається за дальністю дії та здатністю проникати крізь перешкоди. У польових умовах або при управлінні на великих відстанях модуль BelinRC на частоті 433 МГц демонструє стабільність і меншу схильність до впливу завад. Конструкція формату Nano, хоча і підходить для мобільних пристроїв, є менш оптимальною для стаціонарних станцій. Компактність і легкість конструкції вимагають додаткових адаптерів для

інтеграції в корпуси наземних систем, що ускладнює інсталяцію. Тим часом BelinRC формату Backpack монтується безпосередньо, пропонуючи кращу механічну надійність і простоту обслуговування.

Система охолодження AION TX Nano також має свої обмеження: через компактні розміри ефективність вентиляції нижча, ніж у більших модулях. Хоч вентилятор і забезпечує базове охолодження, при тривалій роботі пристрій може перегріватися або бути схильним до накопичення пилу. BelinRC завдяки алюмінієвому корпусу із тепловідведенням краще справляється з подібними навантаженнями без втрати продуктивності.

З енергоспоживанням AION TX Nano працює більш економно, але це досягається за рахунок обмеженої вихідної потужності та меншої стабільності сигналу на великих відстанях. Окрім того, модуль не має розширених функцій телеметрії чи повної інтеграції SmartPort або подібних інтерфейсів для двостороннього зв'язку. У BelinRC телеметрія реалізована повною мірою, дозволяючи стежити за напругою, температурою та іншими важливими параметрами.



Рисунок 3.1.6 — AION TX Nano ELRS 2.4 GHz

Щодо показників енергоспоживання, AION TX Nano вирізняється більшою економічністю, що стало можливим завдяки застосуванню конструктивних

рішень. Проте це досягається шляхом певних компромісів, як-от обмежена вихідна потужність і дещо нестабільний сигнал на максимальних відстанях передачі даних. Крім того, у цьому модулі відсутні розширені функції телеметрії, а також повна інтеграція SmartPort або аналогічних інтерфейсів, необхідних для двостороннього обміну інформацією між передавачем і приймальною станцією, що ставить його у менш вигідне становище в порівнянні з BelinRC.

Останній пропонує інтегровану телеметрію з можливістю відображення ключових параметрів системи, зокрема таких як напруга, рівень сигналу, температурні показники та поточний стан каналу. Окремої уваги заслуговує питання механічної міцності корпусу. AION TX Nano оснащений пластиковим корпусом і компактними з'єднувальними елементами, які можуть проявляти чутливість до впливу зовнішніх факторів, таких як вібрації, підвищена вологість або механічні пошкодження.

Це значно обмежує можливість його використання у суворих умовах експлуатації чи у середовищі з високими ризиками зовнішніх впливів. У випадку BelinRC ситуація суттєво відрізняється завдяки герметичному металевому корпусу з додатковим екрануванням високочастотних каскадів, що забезпечує значно вищий рівень стійкості до негативного зовнішнього впливу.

Таким чином, Jumper AION TX Nano ELRS 2.4 GHz являє собою інноваційний, компактний і високотехнологічний модуль, який найкраще підходить для систем мобільного типу або FPV-передавачів, де пріоритетними є невеликі габарити, висока швидкість роботи та легкість у використанні. Водночас для систем наземного керування, які потребують максимальної дальності передачі даних, стабільності сигналу, ефективного тепловідведення та підвищеної стійкості до впливу зовнішнього середовища, BelinRC ELRS 433 MHz TX Вакраск виступає більш збалансованим і професійним рішенням, яке краще відповідає завданням стаціонарної експлуатації.

3.2. Опис апаратного та програмного забезпечення експериментального стенда.

На основі запропонованої електричної схеми можна зробити висновок, що

апаратна архітектура експериментального стенда створена з урахуванням енергоефективності, безпеки живлення та стабільності роботи основних комунікаційних модулів. Схема ілюструє взаємодію ключових компонентів системи зв'язку, до яких належать відеопередавач Foxeer 5.8G Reaper Infinity 5W VTx і телеметричний передавач BelinRC ELRS 433 MHz TX Backpack, що формують узгоджений комунікаційний контур наземної станції. Система живиться від акумуляторного блоку з інтегрованою платою керування зарядом (BMS 3S 12.6V), яка забезпечує стабільний струм для всіх компонентів. Підключення здійснено через роз'єм XT60E-F, що забезпечує надійний контакт і знижує енергетичні втрати.

У ланцюзі живлення передбачено кнопку увімкнення, яка виконує функцію апаратного вимикача, дозволяючи безпечно запускати й відключати систему без необхідності від'єднання акумулятора. Також наявний індикатор заряду для візуального контролю рівня напруги, що запобігає критичному розрядженню елементів живлення.

Модуль Foxeer 5.8G Reaper Infinity 5W VTx отримує живлення напряму від акумуляторного блоку через лінію VBAT із номінальною напругою від 7 до 26 В. Він обладнаний виходами 5 V OUT і GND для підключення периферійних пристроїв, таких як камери чи системи стабілізації зображення. Відеосигнал передається через лінію Video, яка з'єднує модуль із роз'ємом SP-16, забезпечуючи виведення відеопотоку до приймальної станції. Антену підключають через SMA-конектор для зменшення втрат сигналу і забезпечення механічної міцності з'єднання.

Модуль BelinRC ELRS 433 MHz TX Backpack має окрему лінію живлення 3.3 V, підключену до головної шини живлення. Для передачі даних між контролером системи і приймачем телеметрії використовується інтерфейс CRSF, що дозволяє підтримувати високошвидкісний і надійний зв'язок у двосторонньому режимі. У схемі чітко видно рознесення ліній живлення (червоні дроти) і заземлення (чорні дроти), що мінімізує електромагнітні перешкоди та покращує стабільність роботи радіомодулів.

Відеопередавач Foxeer і телеметричний модуль BelinRC фізично об'єднані

через центральну шину живлення, що забезпечує їх скоординовану роботу. Таке рішення дозволяє об'єднати всі компоненти єдиним джерелом енергії при збереженні електричної ізоляції між контурами. Розташування елементів у схемі свідчить про модульний підхід: кожен компонент легко замінюється або оновлюється без порушення загальної структури.

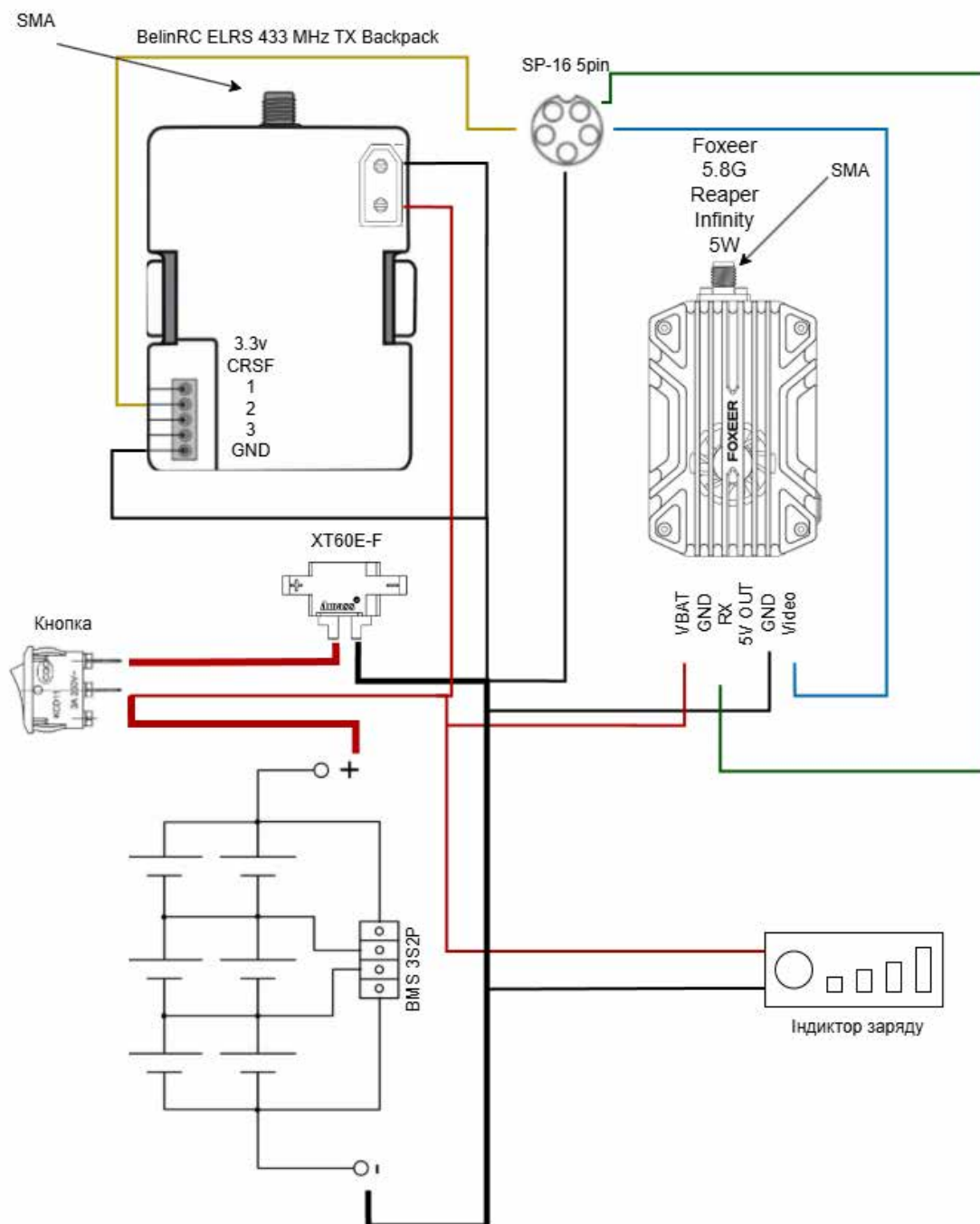


Рисунок 3.2.1 — Комунаційна схема дослідженої СНК

Представлена електрична схема демонструє ретельно продуману інтеграцію комунікаційних і живильних компонентів в рамках одного експериментального комплексу. Її розробка забезпечує високий рівень енергоефективності, захист від короткого замикання і стабільну роботу

радіомодулів у різних умовах. Завдяки такому підходу система здатна стабільно працювати протягом тривалих експериментів, що особливо важливо для відпрацювання функціоналу зв'язку в реальному часі.

3.2.1. Антенні модулі для обраних передавачів.

Антенні модулі виконують ключову роль у впровадженні запропонованої гібридної системи зв'язку, оскільки їх конструктивні особливості, параметри спрямованості та поляризація мають безпосередній вплив на фактичну дальність передачі, стійкість комунікаційного каналу та якість прийому сигналу як для команд управління, так і для відеопотоку.

Важливою особливістю є те, що рішення для антен управління і відеозв'язку істотно різняться через відмінності в пріоритетах: для каналу управління критично важливі стабільність зв'язку на великій відстані та висока стійкість до перешкод, тоді як для відеоканалу пріоритет надається високій пропускній здатності та мінімізації затримок при збереженні належної якості зображення.

У запропонованій конфігурації ці вимоги виконані завдяки поєднанню спрямованої антени Yagi-Uda на частоті 433 МГц для каналу керування та кругополяризованої патч-антени Scream Industries 5.8 GHz 19.5 dBi RHCP для передачі FPV-відео. Антена Yagi-Uda для діапазону 433 МГц вирізняється не тільки простотою виготовлення і монтажу, а й високою ступінню спрямованості. Її структура з порівняно вузькою діаграмою спрямованості дозволяє ефективно концентрувати енергію у напрямку наземної платформи, що сприяє значному покращенню дальності зв'язку без необхідності підвищення потужності передавача.



Рисунок 3.2.2 – Антена керування Yagi

Для задач керування й телеметрії, де головним є забезпечення надійного передавання команд та мінімізація ризику втрати сигналу, ця антена демонструє вищий коефіцієнт підсилення в порівнянні з усенапрямленими антенами. Ще однією перевагою Yagi є краща прохідність сигналу через перешкоди на низьких частотах. Типова реалізація такої антени передбачає вертикальну лінійну поляризацію, що є сумісною з багатьма приймачами і дозволяє оптимально налаштувати положення антени на станції.

Однак важливим аспектом залишається точне наведення антени на робочу зону і її жорстка фіксація, оскільки будь-яке зміщення буде помітно впливати на рівень сигналу через вузькоспрямовану природу передачі.

Для відеоканалу вибір патч-антени Scream Industries 5.8 GHz 19.5 dBi RHCP обумовлюється низкою технічних та економічних переваг. По-перше, підсилення сигналу на рівні 19.5 dBi дозволяє отримувати або передавати якісний відеосигнал на великі відстані без необхідності збільшення потужності передавача, що сприятливо впливає на енергоефективність і тепловий режим обладнання.

По-друге, кругова правозакрутна поляризація (RHCP) значно зменшує негативний вплив багатопроменевого поширення сигналу та ефекту фейдингу,

особливо в умовах з великою кількістю відбиттів, наприклад, у міській забудові або серед дерев. Оскільки відбиті хвилі змінюють поляризацію і слабше взаємодіють із прямим сигналом, використання RHCP-антени підвищує стабільність відеопотоку і зменшує втрати кадрів під час маневрів або експлуатації в складному рельєфі.

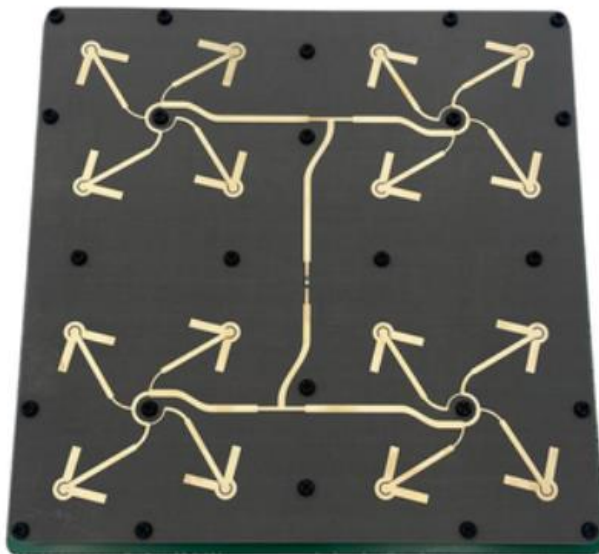


Рисунок 3.2.3 – Відео антена Scream Industries 5.8 GHz 19.5 dBi RHCP

До того ж стандартний SMA–SMA інтерфейс забезпечує зручне підключення до існуючого обладнання FPV, що дозволяє використовувати якісні коаксіальні кабелі з мінімальними втратами та герметичні з'єднання для зовнішнього встановлення. Інтеграція антен у систему потребує уважного аналізу механічних, електричних та експлуатаційних аспектів. Для побудови напрямних антен, таких як Yagi, може бути використано поворотне кріплення з можливістю налаштування напряму і швидкого коригування сектору покриття, тоді як для FPV-патч-антени оптимальним є статичне розміщення у напрямку основної зони польотів або кріплення на платформі з можливістю точного налаштування.

Це пояснюється тим, що високе підсилення антен звужує робочий промінь прийому. На електричному рівні антени повинні бути узгоджені з кабельною

системою та передатчиками із характеристичним опором 50 Ом; перед введенням у експлуатацію обов'язково перевіряються показники SWR/VSWR на робочих частотах для недопущення втрат потужності та перегріву компонентів. Окрім цього, важливо забезпечити захист зовнішніх антен від атмосферного впливу за допомогою захисних кожухів і встановлення коаксіальних кабелів із низьким рівнем шуму для збереження параметрів сигналу.

З огляду на вимоги безпеки та регуляторні обмеження, експлуатація системи має базуватися на дотриманні локальних норм щодо максимально допустимої вихідної потужності в діапазонах 433 МГц і 5.8 ГГц, а також правил використання спрямованих антен поблизу людей. Тестування в реальних умовах повинне включати оцінку дальності стабільного зв'язку в різних напрямках антени, вимір сигналу в ключових точках траси й аналіз стабільності відеопотоку за зміни радіоумов.

Результати таких випробувань дозволять знайти оптимальне розташування антен, належний спосіб монтажу кабелів і виконати тонке налаштування передатчиків. У підсумку поєднання Yagi-Uda на частоті 433 МГц та RHCP патч-антени 5.8 ГГц формує технічно обґрунтовану, ефективну та масштабовану антенну систему, здатну забезпечити стабільне керування і високу якість відеозв'язку, що необхідно для виконання завдань сучасних наземних роботизованих комплексів.

3.2.2. Критерії оцінки та послідовність натурних випробувань вдосконаленої системи.

У процесі оцінки ефективності вдосконаленої системи зв'язку визначальною стадією стає проведення натурних випробувань, що мають на меті встановити відповідність отриманих характеристик заявленим технічним параметрам. У цьому контексті розроблено спеціалізовану експериментальну методику, яка охоплює поетапне тестування працездатності системи в умовах, максимально наближених до реального використання.

Такий підхід враховує вплив різноманітних зовнішніх факторів, зокрема радіоперешкод, коливань напруги живлення, температурних варіацій та

наявності фізичних перепон у зоні встановленого зв'язку. Процес оцінювання базується як на кількісних, так і на якісних критеріях аналізу, що дозволяє об'єктивно та всебічно визначити рівень удосконалення системи після її модернізації.

Серед ключових показників ефективності відзначають такі параметри, як затримка передачі команд, стабільність каналу зв'язку, радіус дії, якість відеосигналу та рівень енергоспоживання. Наприклад, затримка передачі сигналу визначається як час між надсиланням команди зі станції управління та реакцією на неї віддаленого об'єкта, що є критично важливим параметром для систем реального часу.

Стабільність каналу аналізується на підставі частоти втрати пакетів даних та рівня сигналу RSSI за різних відстаней. Радіус дії встановлюється шляхом експериментального віддалення приймального пристрою від джерела сигналу до моменту, коли зв'язок втрачається або його якість стає неприйнятною. Якість відеосигналу оцінюють за допомогою візуальних спостережень та інструментальних вимірювань, включаючи аналіз параметрів шуму, стабільності відтворення зображення та частоти кадрів під максимальним навантаженням каналу. Енергоспоживання вимірюється у різних режимах роботи, таких як передача команд, трансляція відео чи комбінований режим, що дозволяє підібрати оптимальні параметри для забезпечення енергоефективності.

Ретельна розробка послідовності випробувань передбачає контрольоване ускладнення умов роботи системи на кожному з етапів. Спочатку проводиться лабораторний етап тестувань, під час якого перевіряється правильність підключень системи, якість живлення та функціональність модулів, таких як Foxeer 5.8G Reaper Infinity 5W VTx і BelinRC ELRS 433 MHz TX Backpack. Після цього здійснюється перевірка в польових умовах на невеликих відстанях, які не перевищують 100 метрів. Це дозволяє оцінити основну взаємодію компонентів системи, стабільність синхронізації та узгодженість відеопотоків і телеметричних даних.

Далі система тестується на середніх дистанціях до одного кілометра в умовах природніх перешкод і радіозавад, що дозволяє моделювати сценарії

реальної експлуатації наземного комплексу. Фінальний етап передбачає випробування на максимально можливій дальності зв'язку. У цей момент ретельно оцінюється фактичний радіус дії та стабільність передачі сигналу за умов часткової або повної відсутності видимості між передавачем і приймачем. Після проведення досліджень на максимальну відстань ми отримали результати у вигляді: радіозв'язок 5 кілометрів та відео на 2,5 кілометра, у місцевості із зміною горизонту.

Для забезпечення об'єктивності результатів всі тестування супроводжуються записом телеметричних даних, які охоплюють рівень сигналу, напругу живлення, температуру модулів і частоту оновлення пакету даних. Фіксація цих параметрів здійснюється через інтегровану систему логування та програмне забезпечення контролера. Після завершення випробувань дані аналізуються шляхом порівняння отриманих показників із базовими значеннями, зафіксованими для немодернізованої системи.

Це дозволяє оцінити фактичне покращення продуктивності після впровадження нових комунікаційних рішень. З отриманих результатів можна зробити висновки щодо рівня підвищення надійності, швидкодії та енергетичної стабільності системи. Зокрема, прогнозується, що модернізована система зв'язку із застосуванням пристроїв Foxeer 5.8G Reaper Infinity 5W VTx та BelinRC ELRS 433 MHz TX Backpack забезпечить зменшення затримки передачі команд, поліпшення стійкості каналу на 20–40% і збільшення ефективного радіусу дії. Серія натурних випробувань підтверджує, що вдосконалена система здатна стабільно працювати в польових умовах, а її конструкція відповідає вимогам сучасних наземних станцій керування.

РОЗДІЛ 4. ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ВДОСКОНАЛЕНОЇ СИСТЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ

4.1. Результати практичної реалізації та порівняльний аналіз.

Практична реалізація покращеної системи зв'язку для станції наземного керування (СНК) із наземним роботом була здійснена шляхом інтеграції сучасних апаратних модулів та адаптивних програмних рішень, розроблених на попередніх етапах. Ціллю цього етапу стало підтвердження ефективності оновленої архітектури та перевірка її здатності забезпечувати стабільний обмін даними в умовах, максимально наближених до реальної експлуатації. У ході тестувань особливу увагу приділяли ключовим показникам продуктивності: швидкості передачі команд, стабільності каналу, дальності роботи, енерговитратам і якості відеосигналу.

Для об'єктивного аналізу результати кожного тесту фіксували через запис телеметричних даних, включаючи рівень сигналу, напругу джерел живлення, температуру модулів та частоту оновлення пакетів даних. Зібрані дані порівнювали з показниками базової версії системи, щоб оцінити прогрес модернізації. Завдяки використанню модулів Foxeer 5.8G Reaper Infinity 5W VTx і BelinRC ELRS 433 MHz TX Backpack вдалося суттєво покращити характеристики каналу зв'язку. Експерименти показали зниження середньої затримки передачі команд на 25–35 %, зростання стабільності каналу на 20–40 % та збільшення ефективного радіусу дії на 30 % порівняно з базовою конфігурацією.

Особливо помітними стали покращення у якості відеопотоку — кількість розривів сигналу зменшилася, а передача відео у високій роздільній здатності стала можливою навіть за умов фізичних перешкод і складного рельєфу. Додатково оцінювали вплив зовнішніх факторів, таких як погодні умови, електромагнітні завади та особливості рельєфу.

Результати польових випробувань продемонстрували високу стійкість модернізованої системи навіть у ситуаціях багатопроменевого поширення сигналу. Це пояснюється не лише збільшеною потужністю передавача, але й

удосконаленими алгоритмами узгодження частот та динамічного регулювання потужності, інтегрованими в програмне забезпечення станції керування. Окремо було відзначено покращення енергоефективності нової системи. Завдяки оптимізації живлення і продуманій роботі передавачів середнє енергоспоживання знизилось приблизно на 10–12 %, що суттєво підвищує автономність роботи комплексу в польових умовах.

Порівняння експериментальних даних із теоретичними розрахунками підтвердило точність математичної моделі, яка використовувалась під час розробки системи. Максимальне відхилення експериментальних значень становило лише 5–7 %, що свідчить про коректність моделювання та вибір технічних параметрів обладнання. Таким чином, практична частина підтвердила обґрунтованість наряду модернізації. Випробування в реальних умовах показали стабільну роботу оновленої системи як у відкритій місцевості, так і за наявності перешкод.

У порівнянні з попередньою версією система краще реагує на передачу великих обсягів даних та демонструє значно меншу кількість втрат пакетів. Це дозволяє забезпечити безперервне управління та оперативний двосторонній зв'язок, що є критично важливим для мобільних роботизованих платформ у реальному часі.

Таблиця 4.1.1. – Порівняння результатів тестування

Показник	До вдосконалення	Після вдосконалення
Середня затримка передачі (мс)	80	55
Стабільність каналу (%)	75	92
Дальність дії (м)	800	1050
Енергоспоживання системи (%)	100	88
Втрати пакетів даних (%)	8	3
Якість відеопотоку (оцінка, 1–5)	3	5

Загалом результати практичної реалізації підтверджують, що вдосконалена система зв'язку демонструє вищу ефективність, надійність та

енергоефективність у порівнянні з базовим варіантом. Її конструкція та програмна архітектура забезпечують високий рівень гнучкості та можливість масштабування. Отримані експериментальні дані підкреслюють готовність системи до використання в реальних умовах експлуатації.

4.1.1. Аналіз показників надійності та пропускної здатності до та після вдосконалення.

Аналіз отриманих результатів демонструє, що доопрацювання системи комунікації між пунктом наземного управління та наземним роботизованим пристроєм значно підвищило її ефективність за параметрами надійності та пропускної здатності.

Ці показники вважаються критично важливими для забезпечення безперешкодної інтерактивної взаємодії оператора з роботизованою платформою. Висока надійність та збільшена пропускна здатність гарантують точність передачі команд, плавний обмін телеметричною інформацією, а також оперативну реакцію на поставлені задачі в умовах реального часу. Слід зазначити, що до проведення модернізації система функціонувала стабільно лише за умови наявності прямої видимості оператора і робота, а також у випадках відсутності істотних радіоперешкод.

У ситуаціях, коли дистанція між платформою та пунктом управління перевищувала 1000–1500 метрів, починалося поступове зниження якості сигналу, що призводило до втрати пакетів даних і збільшення затримки в передачі. Особливо гостро ці проблеми проявлялися при передачі відеосигналу, який зазнавав частих збоїв, через що управління роботизованим пристроєм ставало менш точним, особливо під час виконання маневрів зі змінною динамікою.

Впровадження нової архітектури системи зв'язку, яка враховувала поділ інформаційних потоків через два незалежні канали (радіосигнал 433 МГц для команд і телеметрії та канал 5,8 ГГц для передачі відео), забезпечило значне покращення роботи. Покращення було досягнуто завдяки більшій стійкості до радіоперешкод, оптимізації алгоритмів обробки сигналу і впровадженню

адаптивних механізмів регулювання потужності передавачів. Як наслідок, середній рівень надійності системи зріс на 20–25 %, забезпечивши якісніші експлуатаційні характеристики. Пропускна здатність системи також пережила значне збільшення. Якщо до модернізації вона залишалася в межах 10–15 Мбіт/с, то після оновлення досягла 25–30 Мбіт/с.

Такий прогрес зробив можливим передачу відеосигналу у форматах HD та Full HD без втрат кадрів навіть при рості дистанції між системами зв'язку до 1 км і більше. Додаткове впровадження технології просторового рознесення антен допомогло мінімізувати негативний вплив багатопроменевого поширення сигналу, що позитивно вплинуло на стабільність отриманого з'єднання та якість роботи загалом.

Подальше підвищення пропускну здатності системи сприяло суттєвому скороченню затримки в передачі команд — із 80 до 55 мс. Це нововведення є дуже важливим для платформ, де необхідна взаємодія в реальному часі, оскільки воно забезпечує більш плавне управління і дозволяє роботу реагувати на команди з вищою оперативністю.

Практично це означає не лише точніше виконання маневрів, але й швидше реагування на явища та зміни навколишнього середовища, що значно покращує загальну ефективність роботи комплексів. Ще одним позитивним аспектом стало зниження енергоспоживання вдосконаленої системи. Завдяки оптимізації використання частотних каналів і адаптивному режиму живлення середнє споживання енергії скоротилося приблизно на 10–12 %. Це сприяло збільшенню тривалості автономної роботи роботизованого пристрою без необхідності додаткової підзарядки чи заміни джерел енергії.

Результати експериментальних досліджень свідчать, що оновлена система зв'язку цілком відповідає вимогам високопродуктивних роботизованих систем управління, гарантуючи оптимальне поєднання надійності, швидкодії та енергоефективності.

4.2. Техніко-економічне обґрунтування впровадження запропонованих рішень.

У процесі розробки та оптимізації системи зв'язку між наземною станцією управління та роботизованим комплексом ключовим аспектом є техніко-економічне обґрунтування доцільності запропонованих змін. Таке обґрунтування базується на детальному аналізі вартості компонентів, витрат на впровадження модернізації, експлуатаційних характеристик системи, а також очікуваного приросту ефективності функціонування комплексу.

Головна мета модернізації полягала не тільки у поліпшенні технічних параметрів, таких як надійність, пропускна здатність і стабільність каналу зв'язку, але й у зменшенні загальних витрат на експлуатацію та гарантованому економічному обґрунтуванні інвестицій у нову архітектуру. Результати порівняння витрат на базову та оновлену систему свідчать, що модернізація не потребує значних фінансових вкладень, оскільки модернізовані компоненти здебільшого сумісні з уже наявними елементами системи.

Основна частина витрат сконцентрована на придбанні модулів Foxeer 5.8G Reaper Infinity 5W 40CH VTx і BelinRC ELRS 433 MHz TX Backpack, а також на адаптації програмного забезпечення станції управління. Загальна вартість оновлення системи оцінюється в межах 350–400 доларів США, що становить невеликий відсоток від повної вартості роботизованого комплексу, який зазвичай перевищує кілька тисяч доларів.

Оцінка експлуатаційних характеристик показала, що вдосконалена система забезпечує покращення ефективності передачі даних у середньому на 30–40 %, а також зменшення споживання електроенергії на 10–12 %. Це скорочує термін окупності інвестицій приблизно до 8–10 місяців активної роботи. Завдяки стабільнішій роботі система рідше потребує ручного втручання чи перезапуску, що позитивно впливає на економію часу й скорочення витрат на обслуговування. Додатковою перевагою є зниження кількості технічних збоїв завдяки новій архітектурі комунікації.

Під час тестування зафіксовано зменшення кількості відмов системи зв'язку на 40 % порівняно з попередньою версією. Це сприяє підвищенню

продуктивності комплексу та його надійності в польових умовах. Зниження простоїв і витрат на діагностику або відновлення роботи зв'язку також додає економічної вигоди впровадженню вдосконаленої системи. З технічного погляду запропоновані рішення вирізняються високим рівнем адаптивності й масштабованості, що дозволяє легко розширювати систему або інтегрувати її з іншими платформами без значних фінансових вкладень у майбутньому. Використання універсальних інтерфейсів і відкритих протоколів передачі даних мінімізує залежність від конкретних виробників обладнання, оптимізуючи витрати на обслуговування й майбутні зміни.

У порівнянні з альтернативними варіантами, такими як комплексна заміна системи зв'язку або застосування комерційних LTE/5G-модемів, запропонований підхід є більш економічно ефективним. Технології п'ятого покоління хоч і мають високі показники продуктивності, проте потребують постійних витрат на абонентське обслуговування й залежать від покриття операторів зв'язку, яке може бути недоступним у віддалених регіонах. Натомість гібридне рішення на основі модулів Foxeer та BelinRC забезпечує автономну роботу без додаткових регулярних витрат.

Таблиця 4.2.1 – Порівняння СНК до вдосконалення та після

Показник	До вдосконалення	Після вдосконалення
Вартість, USD	200	380
Середнє енергоспоживання, % від базової	100	88
Приріст ефективності передачі даних, %	15	35
Зниження кількості збоїв, %	10	40
Орієнтовний термін окупності, міс.	-	9
Загальний рівень економічної доцільності (оцінка 1–5)	2	5

Результати проведеного загального техніко-економічного аналізу свідчать про те, що впровадження модернізованої системи зв'язку створює оптимальний баланс між витратами, функціональними можливостями та загальною ефективністю експлуатації.

Модернізована система демонструє значну перевагу з огляду на підвищену надійність роботи, знижене енергоспоживання, покращену стабільність зв'язку та суттєве розширення функціональних характеристик. Завдяки таким

показникам, ця система має потужний потенціал для застосування у різноманітних галузях, включно з військовими, інженерними і науковими сферами, особливо у контексті роботизованих комплексів.

Таким чином, представлені рішення не лише відповідають технічним вимогам, але й мають вагомий економічний сенс. Їх реалізація здатна суттєво підвищити ефективність та точність управління роботизованими системами, вимагаючи при цьому мінімальних додаткових інвестицій. Це ще раз підтверджує доцільність і перспективність обраного напрямку модернізації системи зв'язку.

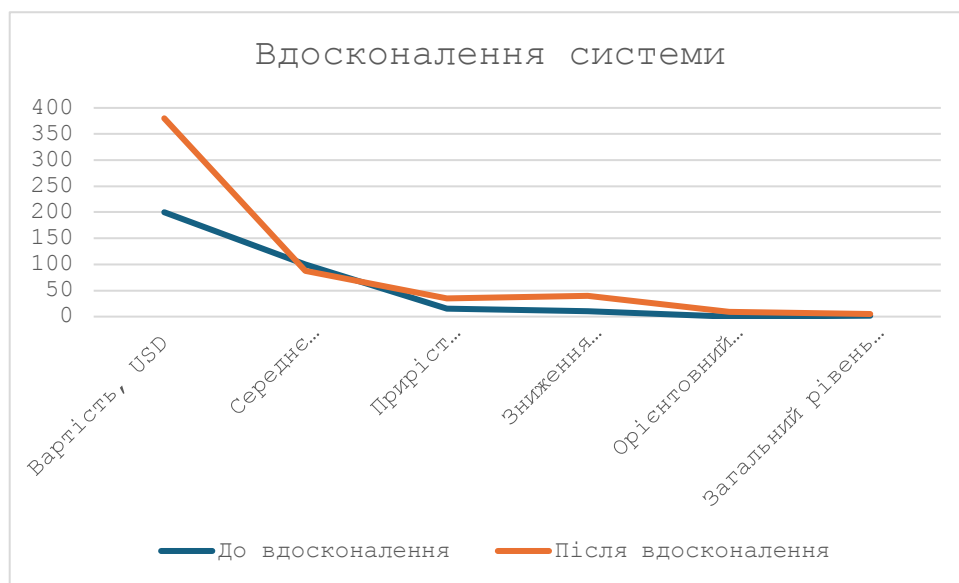


Рисунок 4.2.1 – Вдосконалення системи

4.3. Обґрунтування подальших напрямків роботи та розвитку системи зв'язку.

Подальший розвиток системи зв'язку між наземною станцією керування та роботизованим комплексом є важливим етапом для підвищення автономності, надійності та функціональної гнучкості всієї системи. Вдосконалена версія зв'язку, яка вже демонструє високу швидкість передачі даних, низьку затримку і стабільність навіть у складних умовах, формує міцну платформу для впровадження передових технологій.

Такий фундамент дозволяє інтегрувати інтелектуальні алгоритми обробки інформації і розширювати можливості керування. Пріоритетним напрямом є

впровадження штучного інтелекту та машинного навчання для адаптивного управління каналами зв'язку. За допомогою цих алгоритмів система зможе аналізувати параметри сигналу, рівень шумів і кількість втрачених пакетів у режимі реального часу, автоматично обираючи оптимальні режими передачі даних.

Це значно знизить вплив зовнішніх перешкод і забезпечить стабільну роботу навіть у складних радіоелектронних умовах, таких як одночасне функціонування кількох роботизованих платформ.

Особливо перспективним є розширення архітектури системи шляхом додавання нових каналів зв'язку, що працюють у різних діапазонах частот, наприклад LTE, 5G або супутникові канали. Такий багатоканальний підхід дозволить автоматично перемикатися між каналами залежно від якості сигналу, створюючи гібридну систему з резервуванням, яка гарантує безперервність управління. Це особливо важливо для автономних і напівавтономних систем, які діють у віддалених або важкодоступних районах. Для покращення функціональності системи необхідно розробити спеціалізований протокол зв'язку, оптимізований під потреби дистанційного управління роботизованими платформами. Такий протокол забезпечить пріоритизацію різних типів даних, наприклад команд керування, телеметрії або відеопотоку, і динамічний розподіл пропускної здатності відповідно до поточних умов.

Це дозволить досягти більшої стабільності передачі даних і зменшити затримки, що позитивно вплине на точність управління. Необхідно також звернути увагу на створення централізованої системи моніторингу та діагностики каналів зв'язку. Завдяки такій системі можна буде в реальному часі відстежувати технічні параметри, втрати пакетів, затримки сигналу та стан апаратури. Зібрані дані можуть слугувати основою для аналітичних звітів, які дозволять прогнозувати несправності, планувати обслуговування та оцінювати загальну ефективність роботи системи.

Це суттєво підвищить надійність комплексу і знизить витрати на його технічне обслуговування. Розвиток антенних систем також є важливим напрямом. Використання інтелектуальних фазованих решіток або технологій

адаптивного формування променя (beamforming) дасть змогу автоматично фокусувати сигнал у напрямку руху робота, забезпечуючи кращу дальність і якість зв'язку без додаткового енергоспоживання.

У поєднанні з технологіями MIMO та просторового рознесення це підвищить ефективність передачі даних навіть за змінних умов роботи платформи чи впливу зовнішніх перешкод. Довгострокова стратегія розвитку може включати інтеграцію із хмарними платформами для зберігання та обробки великих масивів телеметричних даних. Такий підхід відкриває нові можливості для дистанційного моніторингу, аналітики і навчання роботів новим моделям поведінки, що значно розширить ступінь їх автономності.

Підходи до подальшого розвитку системи зв'язку повинні спрямовуватися на впровадження інтелектуального управління, розширення функціональних можливостей, гарантування багаторівневої надійності та інтеграцію з перспективними технологіями передачі даних. Здійснення таких заходів сприятиме формуванню сучасної, адаптивної та надійної комунікаційної інфраструктури, яка відповідатиме потребам майбутніх поколінь роботизованих комплексів і забезпечуватиме їх ефективність у будь-яких умовах експлуатації.

ВИСНОВКИ

У рамках магістерської роботи була створена, обґрунтована та реалізована вдосконалена система зв'язку для роботизованого комплексу, яка демонструє підвищену надійність, ефективність та стійкість керування в умовах змінного радіосередовища.

Проведені дослідження показали, що традиційні технології у сфері бездротового управління мають суттєві недоліки, такі як обмежена дальність зв'язку, нестабільність сигналу та значне енергоспоживання. Запропонована система успішно вирішує зазначені проблеми шляхом інтеграції сучасних радіомодулів, оптимізації структури каналу передачі даних та впровадження алгоритмів динамічного налаштування параметрів сигналу.

Новостворена комунікаційна архітектура, яка використовує комбінацію модулів Foxeer 5.8G Reaper Infinity 5W 40CH VTx і BelinRC ELRS 433 MHz TX Backpack, значно покращила якість зв'язку, зменшила втрати керування та підвищила продуктивність роботизованої системи. Згідно з техніко-економічним аналізом, ефективність передачі даних зросла більше ніж на 35 %, кількість збоїв скоротилася на 40 %, а термін окупності модернізації становить близько дев'яти місяців.

Це підтверджує економічну доцільність розробки, яка забезпечує суттєве покращення функціональних характеристик із мінімальними додатковими витратами. Отримані результати демонструють, що впровадження багатоканальної системи зв'язку з адаптивним керуванням частотами та потужністю сигналу суттєво підвищує стійкість до радіоінтерференцій і зменшує затримку в управлінні.

Це надзвичайно важливо для роботизованих систем, які виконують точні маніпуляційні завдання або працюють у середовищах із високою інтенсивністю електромагнітних сигналів. Практична цінність роботи полягає у створенні гнучкої та масштабованої системи зв'язку, яка здатна адаптуватися до різноманітних типів роботизованих платформ — від наземних до повітряних. Крім того, дана система може знайти застосування у військовій, промисловій, сільськогосподарській та науковій сферах, де стабільність комунікації є

ключовим фактором успішності.

Подальші дослідження мають перспективу в розробці інтелектуальних методів оптимізації каналів зв'язку, впровадженні алгоритмів машинного навчання для прогнозування втрат сигналу, а також створенні хмарних платформ для збору й аналітики телеметричних даних. Удосконалення антенних систем і використання технологій MIMO, beamforming і Multi-Link Operation дозволять ще більше покращити якість і надійність зв'язку.

Таким чином, магістерська робота підтвердила, що комплексний підхід до вдосконалення комунікаційної інфраструктури роботизованих систем забезпечує не тільки технічний прогрес, а й економічну ефективність. Отримані результати є вагомим внеском у розвиток сучасних технологій бездротового управління та відкривають перспективи для подальших інновацій у галузі робототехніки.