Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)
Кафедра радіотехнічних систем
(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр
(назва освітнього ступеня)

на тему: Високошвидкісна система передавання відео для дистанційного моніторингу з використанням безпілотних літальних апаратів

Виконав: студент VI курсу, групи РАм-61

спеціальності 172 Електронні комунікації та радіотехніка
(шифр і назва спеціальності)

_____ Гульовський Н.А
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник _____ Дунець В.Л.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль _____ Хвостівська Л.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри _____ Дунець В.Л.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Рецензент _____ _____
(підпис) (прізвище та ініціали)

Тернопіль
2025

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)

Кафедра радіотехнічних систем
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____ Дунець В.Л.
(підпис) (прізвище та ініціали)
26» листопада 2025 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня Магістр
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 172 Електронні комунікації та радіотехніка
(шифр і назва спеціальності)

Студенту Гульовському Нізарію Андрійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи високошвидкісна система передавання відео для дистанційного моніторингу з використанням безпілотних літальних апаратів

Керівник роботи Дунець Василь Любомирович, к.т.н., завідувач кафедри РТ
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «26» листопада 2025 року № 4/7-1038

2. Термін подання студентом завершеної роботи

3. Вихідні дані до роботи

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)
Вступ.
Розділ 1. Аналітична частина
Розділ 2. Основна частина
Розділ 3. Науково-дослідна частина
Розділ 4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях
Висновки
Перелік використаних джерел
Додатки

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	к.т.н., завідувач кафедри інжинірингу машинобудівних технологій Окіпний І.Б		
Безпека в надзвичайних ситуаціях	ст. викл. кафедри ОХ, Стручок В.С.		

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Ознайомлення з завданням до кваліфікаційної роботи		*Виконано*
2.	Підбір джерел по темі кваліфікаційної роботи		*Виконано*
3.	Переклад та опрацювання джерел по темі кваліфікаційної роботи		*Виконано*
4.	Виконання дослідження по темі кваліфікаційної роботи		*Виконано*
5.	Оформлення розділу «Аналітична частина»		*Виконано*
6.	Оформлення розділу «Основна частина»		*Виконано*
7.	Оформлення розділу «Науково-дослідна частина»		*Виконано*
8.	Оформлення розділу «Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях»		*Виконано*
9.	Підготовка графічного матеріалу		*Виконано*
10.	Оформлення кваліфікаційної роботи		*Виконано*
11.	Нормоконтроль		*Виконано*
12.	Перевірка на плагіат		*Виконано*
13.	Попередній захист кваліфікаційної роботи		*Виконано*
14.	Захист кваліфікаційної роботи		

Студент _____ Гульовський Н.А.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Дунець В.Л.
(підпис) (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Високошвидкісна система передавання відео для дистанційного моніторингу з використанням безпілотних літальних апаратів» // Кваліфікаційна робота // Гульовський Нізарій Андрійович // Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії, група РАм-61 // Тернопіль, 2025 // с. – 80, рис. – 23 , додат. – 1, бібліогр. – 22.

Ключові слова: БЕЗПІЛОТНИЙ ЛІТАЛЬНИЙ АПАРАТ, РАДІОРЕЛЕЙНА ЛІНІЯ, БЕЗДРОТОВИЙ ЗВ’ЯЗОК, ПЕРЕДАВАННЯ ВІДЕО, ВИСОКОЯКІСНЕ ВІДЕО, РАДІОКАНАЛ, ПРОПУСКНА ЗДАТНІСТЬ, ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНІ СИСТЕМИ.

У роботі розроблено та експериментально досліджено систему передавання високоякісного відео з використанням безпілотного літального апарата на основі радіорелейного з’єднання стандартів IEEE 802.11. Побудовано та протестовано радіорелейну лінію типу «точка–точка» довжиною 11,82 км із використанням обладнання Mikrotik LHG XL 52 ac. Отримані практичні результати узгоджуються з теоретичними розрахунками, що підтверджує достовірність моделі та коректність реалізації системи. Експериментально доведено можливість ефективного застосування стандартів IEEE 802.11 не лише для мереж «точка–багатоточка», а й для з’єднань «точка–точка» на значних відстанях.

ABSTRACT

Thesis topic: «High-speed video transmission system for remote monitoring using unmanned aerial vehicles» // Qualification work // Gulovsky Nazariy Andriyovich // Ivan Pul'uj Ternopil National Technical University, Faculty of Applied Information Technologies and Electrical Engineering, Group RAm-61 // Ternopil, 2025 // p. – 80, fig. – 23, app. – 1, bibliogr. – 22.

Keywords: UNMANNED AERIAL VEHICLE, RADIO RELAY LINE, WIRELESS COMMUNICATION, VIDEO TRANSMISSION, HIGH-QUALITY VIDEO, RADIO CHANNEL, BANDWIDTH, TELECOMMUNICATIONS SYSTEMS.

The paper develops and experimentally investigates a system for transmitting high-quality video using an unmanned aerial vehicle based on an IEEE 802.11 radio relay connection. A 11.82 km point-to-point radio relay line was constructed and tested using Mikrotik LHG XL 52 ac equipment. The practical results obtained are consistent with theoretical calculations, confirming the reliability of the model and the correctness of the system implementation. The possibility of effective application of IEEE 802.11 standards not only for point-to-multipoint networks but also for point-to-point connections over long distances has been experimentally proven.

ЗМІСТ

ВСТУП 8
РОЗДІЛ 1. АНАТАЛІТИЧНА ЧАСТИНА 10
1.1 Еволюція безпілотних літальних апаратів та чинники їх виникнення 10
1.2 Сфери та особливості використання безпілотних літальних апаратів на сучасному етапі 14
1.3 Постановка задачі для забезпечення надійної відеотрансляції з БПЛА 22
1.4 Висновок до розділу 1 24
РОЗДІЛ 2. ОСНОВНА ЧАСТИНА 26
2.1 Дослідження каналів зв’язку та методів передавання даних 26
2.2 Дослідження та оцінювання протоколів передавання даних у системах високоякісної відеотрансляції 28
2.3 Архітектурні підходи до побудови мереж зв’язку 33
2.4 Розробка експериментального комплексу та оцінювання якості передавання відеоданих 38
2.5 Висновок до розділу 2 41
РОЗДІЛ 3. НАУКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКА ЧАСТИНА 43
3.1 Розроблення архітектури та створення експериментальної системи передавання високоякісного відео з використанням БПЛА 43
3.3 Оцінка характеристик якості передавання даних 49
3.4 Порівняльний аналіз відмінностей між експериментальною та реальною системами високоякісного відеопередавання 63
3.5 Висновок до розділу 3 67
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ 68
4.1 Питання щодо охорони праці 68
4.2 Питання щодо безпеки в надзвичайних ситуаціях 72
4.3 Висновок до розділу 4 75
ВИСНОВКИ 76
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 79

ДОДАТКИ 81

ВСТУП

Актуальність теми. Інтенсивне зростання кількості смартфонів та інших мережевих пристроїв зумовило необхідність забезпечення надійного доступу до передавання даних на великих територіях земної поверхні. Водночас використання дротових систем зв’язку для організації доступу до мережі Інтернет є обмеженим через специфіку окремих умов експлуатації та географічних локацій. Потреба в оптимізації та прискоренні виконання повсякденних процесів сприяє активному розвитку й упровадженню сучасних високошвидкісних систем передавання інформації.

Передавання відеоданих високої роздільної здатності в режимі реального часу забезпечує можливість дистанційного спостереження та оперативного контролю визначених територій на значних відстанях. Поєднання безпілотних літальних апаратів із високошвидкісними системами передавання інформації істотно підвищує ефективність моніторингу лісових масивів, сільськогосподарських угідь і зон підвищеної небезпеки. Використання зазначених технологічних рішень сприяє оптимізації бізнес-процесів у різних сферах діяльності, а також забезпечує скорочення часу реагування на надзвичайні та аварійні ситуації.

Мета. Метою даної роботи є розроблення, налаштування та експериментальне дослідження системи передавання високоякісного відео з використанням безпілотного літального апарата на основі радіорелейної лінії зв’язку стандартів IEEE 802.11.

Для реалізації зазначеної мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати можливості застосування стандартів IEEE 802.11 для організації бездротового зв’язку з використанням безпілотних літальних апаратів.
2. Розробити та теоретично оцінити радіорелейну лінію зв’язку типу «точка–точка» з урахуванням параметрів обладнання та умов розповсюдження радіохвиль.

3. Побудувати й налаштувати експериментальну систему передавання високоякісного відео та виконати польові випробування.
4. Провести аналіз і порівняння теоретичних розрахунків з практичними результатами для оцінки ефективності та надійності системи.

Об’єкт дослідження: система бездротового передавання даних і відео з використанням безпілотного літального апарата на основі радіорелейної лінії зв’язку стандартів IEEE 802.11.

Предмет дослідження: характеристики та параметри радіоканалу радіорелейної лінії зв’язку типу «точка–точка», побудованої за стандартами IEEE 802.11, що визначають ефективність і якість передавання високоякісного відео з використанням безпілотного літального апарата.

Методи дослідження: використано методи аналізу науково-технічних джерел, математичного моделювання, експериментальних польових випробувань і порівняльного аналізу теоретичних та практичних результатів.

Наукова новизна одержаних результатів. полягає в експериментальному підтвердженні можливості ефективного використання бездротових технологій стандартів IEEE 802.11 для організації радіорелейного з’єднання типу «точка–точка» на значних відстанях (понад 10 км) у системах передавання високоякісного відео з використанням безпілотного літального апарата, а також у встановленні відповідності між теоретично розрахованими та практично виміряними характеристиками радіоканалу в реальних умовах експлуатації.

Практичне значення одержаних результатів. Полягає в можливості їх безпосереднього використання під час проєктування, налаштування та оптимізації бездротових каналів зв’язку (зокрема на базі стандартів IEEE 802.11) у системах передачі даних і відео, у тому числі для мереж БПЛА, а також для підвищення надійності та якості зв’язку шляхом вибору раціональних параметрів антен і режимів роботи обладнання.

РОЗДІЛ 1
АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Еволюція безпілотних літальних апаратів та чинники їх виникнення

Зародження концепції безпілотних літальних апаратів доцільно відносити до середини XIX століття. Одним із перших відомих прикладів їх практичного застосування вважається подія 1849 року, що мала місце під час військового протистояння між Австрією та Венецією. У ході облоги міста австрійські війська здійснили спробу повітряного нападу із використанням безпілотних аеростатів, споряджених вибуховими речовинами. За різними оцінками, над територією Венеції було запущено близько двох сотень таких повітряних куль, що можна розглядати як один із перших кроків у розвитку безпілотних засобів авіаційного призначення.

Кожен аеростат виконував функцію носія вибухового заряду масою від 24 до 30 фунтів, що еквівалентно приблизно 11–14 кг. Після досягнення заздалегідь розрахованої позиції передбачалося скидання вибухових пристроїв з метою спричинення максимальних руйнувань та дестабілізації ситуації в межах міста. Однак унаслідок раптової зміни метеорологічних умов, зокрема напрямку вітру, більшість повітряних куль відхилилися від запланованої траєкторії руху. Як результат, лише один вибуховий заряд досяг цільової області, що зумовило вкрай незначний загальний ефект від проведеної атаки.

Описана подія була вкрай новаторською з огляду на рівень розвитку військово-технічних засобів середини XIX століття. Водночас із позицій сучасної науки та інженерної практики використання повітряних куль не може розглядатися як повноцінна реалізація концепції безпілотних літальних апаратів, зокрема у військово-технічному розумінні цього терміна, оскільки такі засоби не забезпечували керованості, автономності та повторюваності застосування.

Доцільно зазначити, що концепція застосування безпілотних технічних засобів у військовій сфері сформувалася понад 170 років тому. Усвідомлення

можливостей використання таких систем уже на ранніх етапах розвитку техніки стало важливою передумовою для зародження та подальшого формування напрямів розвитку безпілотних технологій. Саме ці ідеї в подальшому визначили вектори еволюції дронів і сприяли їх удосконаленню протягом наступних десятиліть і навіть століть.

Рис. 1.1. Початковий етап становлення безпілотних авіаційних систем.

Розвиток безпілотних літальних апаратів має тривалу та послідовну історію, що охоплює період від перших експериментів із квадрокоптерною схемою на початку XX століття до становлення сучасних військових і цивільних дронів. Початкові спроби створення безпілотних систем, зокрема експерименти братів Бреге, розробки радіокерованих літаків під час Першої та Другої світових воєн, а також поява таких зразків, як Kettering Bug, Queen Bee, V-1 і Radioplane OQ-2, заклали технічні та концептуальні основи безпілотної авіації. Подальший прогрес був зумовлений розвитком систем радіокерування, автопілотів, гіроскопічних приладів і силових установок, що дозволило розширити функціональні можливості БПЛА, зокрема в розвідці та ударних операціях під час війни у В’єтнамі. У другій половині XX століття вдосконалення електроніки, мініатюризація компонентів і зниження вартості

технологій сприяли поширенню безпілотних систем як у військовій, так і в цивільній сферах, тоді як успішне бойове застосування БПЛА у 1980-х роках, поява апаратів нового покоління, таких як MQ-1 Predator, і офіційний дозвіл на комерційне використання дронів у 2006 році остаточно закріпили їх статус як ефективного та перспективного інструмента сучасної авіації.

Рис. 1.2. Безпілотний літальний апарат періоду 1990–2010 років

З 2010 року, галузь безпілотних літальних апаратів зазнала різкого піднесення інноваційної активності та зростання комерційної зацікавленості. До цього часу дрони переважно використовувалися у військовій сфері або в межах аматорських розробок, тоді як з початку 2010-х років відбулося істотне розширення напрямів їх застосування. Безпілотні системи почали активно впроваджуватися для розв’язання різноманітних цивільних завдань, зокрема як ефективний засіб транспортування та доставки вантажів.

З 2015 року регуляторні установи зафіксували істотне зростання зацікавленості з боку комерційного сектору. Зокрема, Federal Aviation Administration повідомила про різке збільшення кількості поданих заяв на експлуатацію безпілотних авіаційних систем, унаслідок чого було видано близько тисячі дозволів на їх комерційне застосування. Зазначена динаміка засвідчила перехід безпілотних технологій від обмеженого,

вузькоспеціалізованого використання до повноцінної інтеграції в масовий цивільний ринок.

Упродовж наступного року кількість наданих дозволів зросла майже утричі та в подальшому зберігала стійку тенденцію до збільшення. Оснащення безпілотних літальних апаратів фото- та відеокамерами нині стало загальноприйнятим стандартом у галузі комерційної аерозйомки. Така еволюція зумовлена інтеграцією напрацювань у сфері радіокерованої авіації з технологічними рішеннями, що були розроблені та масово впроваджені в індустрії смартфонів.

Масове поширення мобільних пристроїв сприяло істотному зниженню вартості базових електронних компонентів, зокрема мікроконтролерів, акселерометрів і сенсорів зображення, що виявилися оптимальними для використання в аматорських і комерційних безпілотних літальних апаратах. Подальший розвиток електроніки та алгоритмів керування забезпечив можливість ефективного управління дронами з чотирма і більше роторами шляхом індивідуального регулювання частоти обертання кожного з них, що суттєво підвищило рівень стабільності, керованості та маневрових характеристик таких апаратів.

Рис. 1.3. Радіокеровані пристрої періоду 2015–2022 років, що ілюструють сучасний етап еволюції безпілотних та дистанційно керованих технологій

Зростання стійкості багатороторних літальних апаратів зумовило істотне розширення сфер їх практичного використання. Удосконалення алгоритмів стабілізації та керування забезпечило можливість ефективного застосування таких дронів у різноманітних галузях, виконання завдань у яких раніше було ускладненим або недоступним для безпілотних авіаційних систем.

Поряд із масовим упровадженням безпілотних систем спостерігається зростання їх використання у вузькоспеціалізованих сферах діяльності. Завдяки компактності та високій мобільності безпілотні літальні апарати ефективно застосовуються правоохоронними й пожежно-рятувальними підрозділами для виконання завдань спостереження, оцінювання оперативної обстановки та підтримки процесу ухвалення рішень. Водночас стрімке збільшення кількості недостатньо регульованих БПЛА актуалізувало низку проблем, пов’язаних із забезпеченням захисту приватності та дотриманням норм фізичної безпеки.

1.2 Сфери та особливості використання безпілотних літальних апаратів на сучасному етапі

На сьогодні, безпілотні літальні апарати використовуються у різноманітних сферах діяльності. Зокрема, вони широко впроваджуються в сільському та лісовому господарстві, застосовуються для виявлення кримінальних і адміністративних правопорушень, організації оперативного зв’язку, а також для здійснення відеофіксації протиправної діяльності. Окрім цього, БПЛА виконують важливі функції з координації та управління діями наземних підрозділів екстрених, оперативних і рятувальних служб.

Вагому роль безпілотні авіаційні системи відіграють у військовій галузі, де з їх використанням реалізується широкий спектр завдань — від розвідувально-спостережних операцій до забезпечення підтримки бойових дій. Окрім цього, безпілотні літальні апарати активно застосовуються для картографування територій, виконання аерофотозйомки, а також для збору та аналізу метеорологічних даних у визначених регіонах.

Сфери використання безпілотних літальних апаратів демонструють стійку тенденцію до розширення та охоплюють логістичні й транспортні процеси, енергетичну галузь, будівництво й видобуток корисних копалин, діяльність засобів масової інформації та індустрію розваг, страхову сферу, моніторинг об’єктів дикої природи, а також науково-дослідні роботи. Така різноманітність напрямів застосування підтверджує універсальний характер БПЛА та зростання їх потреби в різних сферах життєдіяльності людини.

З огляду на конструктивні характеристики платформ ринок безпілотних літальних апаратів зазвичай класифікують на цивільно-комерційний та оборонно-державний сегменти. Станом на 2022 рік саме військовий і урядовий напрями забезпечили найбільшу частку ринку, що пояснюється високою собівартістю бойових безпілотних систем і значними обсягами їх централізованих закупівель. У межах оборонно-державного сегмента безпілотні літальні апарати додатково поділяються на малі, тактичні та стратегічні залежно від їх призначення й експлуатаційних характеристик.

До стратегічного класу безпілотних літальних апаратів відносять системи категорій HALE (high-altitude long-endurance — висотні апарати з великою тривалістю польоту) та MALE (medium-altitude long-endurance — середньовисотні апарати з великою тривалістю польоту). Зазначені БПЛА зазвичай функціонують на значних висотах, характеризуються великою злітною масою та висувають підвищені вимоги до енергетичної витривалості й дальності польоту. До типових представників класу HALE належать RQ-4 Global Hawk, створений корпорацією Northrop Grumman, а також RQ-170 Sentinel, розроблений компанією Lockheed Martin.

Ринок БЛА має багатогалузеву структуру та охоплює такі сфери застосування, як логістика й транспорт, оборона та безпека, сільське господарство, будівництво й видобувна промисловість, медіасфера та індустрія розваг, енергетика, страхування, моніторинг об’єктів дикої природи й лісових ресурсів, а також науково-дослідні роботи. Згідно з аналітичними прогнозами, транспортно-логістичний сегмент характеризується найвищими темпами

розвитку в межах розглянутого періоду, що значною мірою зумовлено динамічним зростанням світового ринку електронної комерції.

Окрім цього, кур'єрські оператори впроваджують альтернативні підходи доставки, що зумовлює поступову трансформацію традиційних бізнес-моделей у цій сфері. У ряді держав спостерігається зростання інтересу до використання безпілотних літальних апаратів для пересилання поштових відправлень, що формує сприятливі передумови для подальшого розвитку відповідного сегмента ринку. У довгостроковій перспективі прогнозується залучення дедалі більшої кількості країн до інвестування в розбудову та впровадження таких технологічних рішень.

Зокрема, United States Postal Service розглядає перспективи інтеграції безпілотних літальних апаратів до власної транспортно-логістичної інфраструктури з метою підвищення операційної ефективності, оптимізації процесів поштової доставки, а також збору геопросторових зображень та інших інформаційних даних. Водночас низка комерційних компаній, зокрема DJI, активно займається розробленням технічних рішень для транспортування посилок із використанням дронів, тоді як корпорація Amazon вже реалізує відповідні сервіси в експериментальному та частково комерційному форматах.

У цілому зменшення вартості безпілотних авіаційних систем, висока щільність урбанізованих територій та зростаючі вимоги споживачів щодо мінімізації термінів доставки виступають визначальними чинниками, які забезпечують прискорений розвиток логістичного сегмента ринку безпілотних літальних апаратів.

Загалом зниження вартості безпілотних технологічних рішень, висока концентрація міської інфраструктури та неухильне зростання вимог до оперативності доставки є ключовими факторами, що зумовлюють прискорене зростання логістичного сегмента ринку БЛА.

Тенденції до зростання рівня автоматизації в Індія, Австралія та Китай, а також процеси подальшої глобалізації істотно сприяють розширенню ринку безпілотних літальних апаратів у Азіатсько-Тихоокеанський регіон. У межах цього регіону БПЛА дедалі ширше застосовуються для контролю стану

навколишнього середовища, у сільськогосподарському виробництві, а також у сфері нерухомості та під час виконання інспекційних і наглядових робіт, зокрема на території Китаю та Японія.

У Китаї спостерігається стійке зростання попиту на безпілотні авіаційні системи як у військовому, так і в цивільно-комерційному сегментах. Національні виробники зосереджують увагу на розробленні високопродуктивних дронів, здатних забезпечувати надійну експлуатацію в широкому діапазоні температурних режимів. Водночас Китай посідає друге місце серед десяти держав із найбільшими оборонними бюджетами: у 2021 році обсяг фінансування оборонної сфери досяг 293,0 млрд доларів США, що додатково стимулює розвиток ринку безпілотних технологій.

З метою посилення та розширення власних позицій у сфері безпілотних літальних апаратів зазначені компанії використовують комплекс стратегічних інструментів, зокрема укладання довгострокових контрактів, формування спільних підприємств, реалізацію партнерських програм, здійснення злиттів і поглинань, а також виведення на ринок інноваційних продуктів. Застосування такого багатовекторного підходу забезпечує їм здатність ефективно реагувати на зростання конкурентного тиску та сприяє подальшому розширенню їх присутності на світовому ринку безпілотних авіаційних систем.

Автономність є однією з визначальних переваг безпілотних літальних апаратів, інтегрованих із системами штучного інтелекту, у контексті забезпечення фізичної безпеки. Залучення людини-оператора до безперервного моніторингу функціонування БПЛА пов’язане з впливом людського фактора, зокрема втоми та зниження рівня концентрації уваги, що підвищує імовірність помилок або несвоєчасного виявлення потенційних загроз. На відміну від цього, автономні системи безпеки на основі безпілотних платформ можуть бути налаштовані на тривалу, стабільну та безперервну експлуатацію на значних за площею територіях із заданим рівнем надійності.

Окрім цього, такі системи забезпечують можливість автономного реагування на ідентифіковані загрози. Зокрема, вони здатні здійснювати передавання відеопотоку в режимі реального часу до центрів безпеки,

автоматично спрямовувати безпілотний літальний апарат у зону спрацювання охоронної сигналізації, супроводжувати переміщення осіб, які намагаються залишити місце події, а також оперативно передавати правоохоронним органам дані про їх поточне місцезнаходження. Наявність функцій автоматичного виявлення перешкод, уникнення зіткнень і високоточного приземлення істотно розширює функціональні можливості БПЛА в системах безпеки та підвищує рівень їх ефективності й надійності [3].

Моніторинг протяжних і потенційно небезпечних територій є одним із пріоритетних напрямів використання безпілотних літальних апаратів. Дрони здатні з високим рівнем ефективності та в стислі терміни виконувати тривалі, повторювані й ресурсомісткі завдання з контролю значних площ, забезпечувати огляд важкодоступних зон, а також збирати інформацію, необхідну для своєчасного оцінювання рівня ризиків і виявлення можливих критичних ситуацій.

Безпілотні літальні апарати здатні безпечно виконувати польоти в зонах підвищеної небезпеки, зокрема поблизу об’єктів з високою напругою або на потенційно небезпечних промислових майданчиках, не створюючи ризику для персоналу. Завдяки можливості охоплення значних територій незалежно від складності рельєфу такі системи забезпечують своєчасне отримання об’єктивних даних, що підвищує обґрунтованість управлінських рішень під час виникнення надзвичайних і аварійних ситуацій.

Окрім цього, безпілотні літальні апарати здатні оперативно здійснювати обстеження територій, виявляти потенційні загрози та передавати аерофотознімки й відеодані в режимі реального часу. Це надає фахівцям служб безпеки можливість своєчасно оцінювати рівень небезпеки та обирати найбільш доцільні заходи реагування. У сфері правоохоронної діяльності БПЛА також застосовуються для комплексного огляду місця правопорушення, забезпечуючи отримання цілісної інформаційної картини та попередню оцінку ризиків ще до прибуття основних підрозділів на місце події.

Застосування безпілотних літальних апаратів дає змогу істотно зменшити часові та фінансові витрати, зокрема під час моніторингу масштабних

промислових об’єктів, таких як нафтогазовидобувні майданчики, сонячні електростанції, складські комплекси чи трубопровідні системи. Для зазначених об’єктів ефективне відеоспостереження є критично важливим у контексті мінімізації ризиків пошкоджень і витоків, а також запобігання несанкціонованому доступу та викраденню обладнання чи сировини. Водночас встановлення та подальше технічне обслуговування стаціонарних систем відеоспостереження в віддалених або важкодоступних локаціях потребує значних матеріальних і організаційних ресурсів, що підвищує доцільність використання мобільних безпілотних рішень.

Використання безпілотних літальних апаратів істотно підвищує економічну ефективність процесів інспектування та моніторингу. Патрульні дрони здатні здійснювати контроль значних за площею територій із передаванням високоякісних фото- та відеоматеріалів у режимі реального часу, що дає змогу оптимізувати чисельність персоналу служби безпеки, залученого до охорони об’єктів або матеріальних цінностей. Додатковою перевагою є висока оперативність реагування, оскільки безпілотні апарати суттєво перевищують за швидкісними характеристиками патрульні транспортні засоби та піші групи, забезпечуючи значно швидше прибуття до місця інциденту й своєчасне реагування на потенційні загрози [4].

Безпілотні літальні апарати, що інтегруються до систем безпеки та відеоспостереження, вирізняються розширеним набором технічних і програмних можливостей та здатні виконувати як операційні, так і заздалегідь запрограмовані функції. Такі БПЛА ефективно доповнюють діяльність охоронного персоналу, забезпечуючи автоматизоване патрулювання об’єктів, здійснення аерофотозйомки матеріальних активів, контроль периметрів і запобігання несанкціонованому проникненню.

Інтеграція БЛА із штучним інтелектом забезпечує безперервне передавання потокових даних у режимі реального часу протягом цілодобового циклу експлуатації. Використання алгоритмів штучного інтелекту надає дронам можливість автоматизованого виявлення потенційно небезпечних об’єктів і подій із подальшим оперативним інформуванням служб безпеки про можливі

загрози. Окрім цього, БПЛА можуть бути сконфігуровані для автоматичного запуску визначених сценаріїв реагування в реальному часі у випадках фіксації небезпечних предметів, зброї, порушення охоронюваного периметра або проявів аномальної поведінки.

Застосування БЛА забезпечує істотне підвищення рівня ситуаційної поінформованості персоналу служб безпеки та сприяє більш раціональному використанню людських ресурсів. Інтеграція відеоаналітичних інструментів на основі штучного інтелекту прискорює процес ухвалення рішень щодо реагування на інциденти та створює умови для здійснення віддалених операцій безпеки. Завдяки здатності охоплювати великі за площею території та збирати релевантну інформацію БПЛА виступають ефективним засобом виявлення загроз у різних умовах, забезпечення периметрального захисту, моніторингу масових заходів.

Під час забезпечення охорони автостоянок БПЛА можуть у автоматизованому режимі здійснювати зіставлення фактично зафіксованих номерних знаків транспортних засобів із наявними базами даних або переліками підозрюваних автомобілів, визначеними у відповідній документації. Реалізація таких функцій надає можливість співробітникам служб безпеки оперативно виявляти викрадені транспортні засоби або ідентифікувати несанкціоновану присутність автомобілів на контрольованій території, що сприяє підвищенню ефективності наглядових заходів і загального рівня безпеки.

БПЛА можуть виступати невід’ємною складовою сучасних систем безпеки, зокрема в контексті організації дистанційного патрулювання територій. Це є особливо актуальним для об’єктів із протяжною або відкритою інфраструктурою, таких як кар’єри, шахти, сільськогосподарські угіддя чи вітрові електростанції, для яких можливості стаціонарного віддаленого моніторингу є обмеженими. Завдяки функціям попереднього планування маршрутів патрулювання БПЛА забезпечують своєчасне виявлення та ідентифікацію потенційних загроз, підвищуючи загальну ефективність системи безпеки.

У випадку порушення встановленого режиму безпеки автономні безпілотні літальні апарати, оснащені алгоритмами штучного інтелекту, здатні самостійно ідентифікувати потенційно небезпечні ситуації та автоматично передавати сповіщення відповідним службам, що забезпечує можливість завчасної підготовки до реагування. Водночас підрозділи безпеки можуть здійснювати моніторинг польоту БПЛА в режимі реального часу та аналізувати зворотний відеопотік за допомогою віддалених інтерфейсів керування, що сприяє підвищенню обґрунтованості управлінських рішень і загального рівня захищеності об’єктів [5]

Застосування технологій штучного інтелекту забезпечує істотну автоматизацію та спрощення процесів збору й оброблення інформації. Безпілотні літальні апарати, інтегровані з алгоритмами штучного інтелекту, демонструють підвищену ефективність аналізу навколишнього середовища, здатні з високою точністю виконувати картографування територій та формувати детальний аналітичний зворотний зв’язок для підтримки прийняття рішень.

Показовим прикладом практичного застосування таких технологій є моніторинг безперервних людських потоків із автоматизованим підрахунком кількості осіб, які входять до визначеної зони та залишають її. Реалізація цього підходу забезпечує ефективний контроль рівня заповненості об’єктів і запобігає перевищенню допустимих показників пропускної здатності, що, своєю чергою, сприяє зниженню ймовірності виникнення небезпечних ситуацій.

COVID-19 став одним із чинників, що потенційно прискорили впровадження безпілотних літальних апаратів у сфері фізичної безпеки та громадського здоров’я. Зокрема, у рекомендаційних матеріалах ЮНІСЕФ акцентується увага на доцільності використання дронів для протидії пандемічним загрозам. До основних напрямів такого застосування віднесено відбір і транспортування лабораторних зразків, доставку медичних засобів інфікованим особам, аерозольне розпилення дезінфекційних речовин.

Крім того, безпілотні авіаційні системи можуть бути налаштовані для автоматизованого контролю дотримання карантинних і санітарно-

епідеміологічних вимог, зокрема шляхом ідентифікації осіб, які порушують встановлені обмеження, та оперативного інформування їх про необхідність дотримання заходів безпеки. Фахівці галузі зазначають, що трансформація моделей поведінки користувачів, зумовлена обмежувальними заходами періоду COVID-19, у довгостроковій перспективі створює передумови для подальшого зростання безпілотних технологій.

1.3 Постановка задачі для забезпечення надійної відеотрансляції з БПЛА

В умовах сучасного технологічного розвитку оперативність передавання інформації виступає визначальним чинником ефективного функціонування багатьох сфер діяльності. Протягом тривалого історичного періоду здійснювалося послідовне вдосконалення методів обміну даними з метою досягнення вищих показників швидкості та надійності передавання інформації. Унаслідок цього було сформовано як дротові, так і бездротові системи зв’язку, реалізація яких базується на різноманітних інженерно-технічних підходах і технологічних рішеннях.

Системи передавання інформації характеризуються здатністю забезпечувати транспортування значних обсягів даних із високою пропускною здатністю та стабільними швидкісними показниками. Водночас безпровідні технології зв’язку надають користувачам істотно вищий рівень мобільності порівняно з дротовими рішеннями, що зумовлює їх незамінність у ситуаціях, коли організація фізичного підключення є технічно складною або взагалі неможливою.

Будь-яка система передавання даних описується наявністю трьох фундаментальних складових. До них належать передавач, який виступає джерелом інформаційного сигналу, канал зв’язку, що забезпечує його транспортування, та приймальний пристрій, призначений для приймання, декодування й подальшої обробки отриманих даних.

У разі реалізації двостороннього обміну інформацією, тобто дуплексного режиму передавання, функції джерела та приймача можуть бути інтегровані в

межах єдиної системи. За такої конфігурації відповідне обладнання забезпечує одночасне передавання й приймання даних, що сприяє підвищенню ефективності інформаційного обміну та зменшенню часових затримок.

Однією з форм телекомунікаційних систем, що використовувалися в історичному минулому та залишаються актуальними й сьогодні, є оптичні засоби зв'язку. Під оптичними телекомунікаціями розуміють процес передавання інформації з використанням світлового випромінювання як носія сигналу. До класичних і найбільш наочних прикладів таких систем належать навігаційні вогні, сигнальні ракети, семафорні системи зв'язку.

Попри те, що зазначені недигітальні способи передавання інформації можуть сприйматися як застарілі, вони й надалі відіграють важливу роль у складі сучасної інфраструктури зв'язку. До класу оптичних телекомунікацій також відносять волоконно-оптичні системи та інфрачервоні сенсорні засоби, які набули широкого застосування в сучасних мережах передавання даних і системах спостереження та моніторингу [1].

Радіотелекомунікаційні системи є одними з найбільш поширених засобів передавання інформації завдяки здатності забезпечувати зв'язок на значних відстанях без фізичного з'єднання, що з початку XX століття зумовило їх стрімкий розвиток і перетворення на базовий елемент сучасної інформаційно-комунікаційної інфраструктури. Сьогодні радіозв'язок широко використовується як у професійній діяльності, так і в повсякденному житті, а системи зв'язку класифікуються за режимом обміну даними на напівдуплексні та повнодуплексні, що не визначає рівень їх технічної складності. Масове поширення інтернет-пристроїв спричинило зростання потреби у високошвидкісному безпровідному передаванні даних на великих територіях, зокрема в умовах, де провідні технології є малоефективними. Особливого значення набуло передавання відеоданих у режимі реального часу в поєднанні з безпілотними літальними апаратами, що істотно підвищує ефективність моніторингу та скорочує час реагування. Найбільш інтенсивно БПЛА застосовуються у військовій сфері для розвідки, контролю обстановки та ураження цілей, а сучасні збройні конфлікти, зокрема війна між Росією та

Україною, підтверджують критичну роль швидкої й надійної передачі інформації з безпілотних платформ. У цьому контексті показовим є досвід Туреччини, яка сформувала потужну промислову базу з виробництва БПЛА, зокрема таких систем, як Bayraktar TB2, що завдяки сучасним засобам спостереження та зв'язку забезпечують ефективне виконання бойових завдань, а розвиток безпілотних технологій і систем завадостійкого зв'язку розглядається як стратегічно важливий напрям подальшого науково-технічного прогресу [1–3]

1.4 Висновок до розділу 1

У розділі здійснено аналіз етапів становлення безпілотних літальних апаратів, розглянуто основні напрями їх практичного застосування, а також визначено ключові проблеми й задачі, пов'язані з особливостями їх використання. Впровадження БПЛА створило можливості для виконання складних і рутинних операцій, а також завдань, які в окремих випадках є небезпечними або недоступними для безпосереднього виконання людиною в процесі повсякденної діяльності.

На сучасному етапі різноманітні типи безпілотних літальних апаратів активно застосовуються в багатьох галузях, зокрема в сільському та лісовому господарстві, у сфері виявлення кримінальних і адміністративних правопорушень, забезпечення оперативного зв'язку, відеофіксації протиправних дій, а також для координації діяльності наземних підрозділів екстрених і оперативних служб. Окрім цього, БПЛА набули широкого поширення у військовій сфері, де використовуються для виконання розвідувальних, спостережних і ударних завдань. Водночас безпілотні системи застосовуються для картографування територій, здійснення аерозйомки та збору метеорологічних даних у визначених регіонах.

Сфери використання БПЛА не обмежуються наведеними напрямами та додатково охоплюють логістичні й транспортні процеси, енергетичну галузь, будівництво та видобувну промисловість, діяльність засобів масової інформації

й індустрії розваг, страхову сферу, моніторинг об’єктів дикої природи, а також науково-дослідні роботи. Упродовж свого розвитку БПЛА пройшли тривалий еволюційний шлях — від відносно простих технічних рішень до складних високотехнологічних систем із розширеним функціоналом, здатних ефективно функціонувати на значних відстанях.

У сучасних збройних протистояннях до пріоритетних функцій безпілотних літальних апаратів належать розвідувальне спостереження за переміщенням техніки противника, контроль ситуації на державних кордонах, а також ураження ворожих сил і засобів. Дедалі більша кількість країн усвідомлює критичну значущість швидкої та надійної передачі інформації з безпілотних платформ, що зумовлює стійку тенденцію до подальшого розвитку цієї сфери. Паралельно відбувається активне розширення використання автоматизованих БПЛА для виконання цивільних завдань, зокрема доставки вантажів, моніторингу сільськогосподарських угідь і лісових масивів. Водночас зростання кількості нерегульованих безпілотних систем загострює питання захисту приватності та забезпечення фізичної безпеки, що потребує подальшого вдосконалення нормативно-правових і технічних механізмів регулювання.

РОЗДІЛ 2
ОСНОВНА ЧАСТИНА

2.1 Дослідження каналів зв’язку та методів передавання даних

Для реалізації процесу керування безпілотним літальним апаратом необхідною умовою є створення стійкого каналу зв’язку між бортовим обладнанням БПЛА та наземною станцією управління, що досягається шляхом використання відповідних телекомунікаційних технологій. Такий канал забезпечує безперервний обмін керувальними командами та службовою інформацією, від якого безпосередньо залежить ефективність і безпека функціонування апарата.

Система зв’язку розглядається як організована сукупність технічних засобів, призначених для передавання інформаційних повідомлень від джерела до приймача. Узагальнена структурна модель одноканальної системи зв’язку, подана на рисунку 2.1, відображає основні етапи обробки та перетворення повідомлення в процесі його передавання. Зазначена модель має універсальний характер і може бути використана для аналізу різних систем зв’язку незалежно від природи інформації та обраного способу її передавання [6].

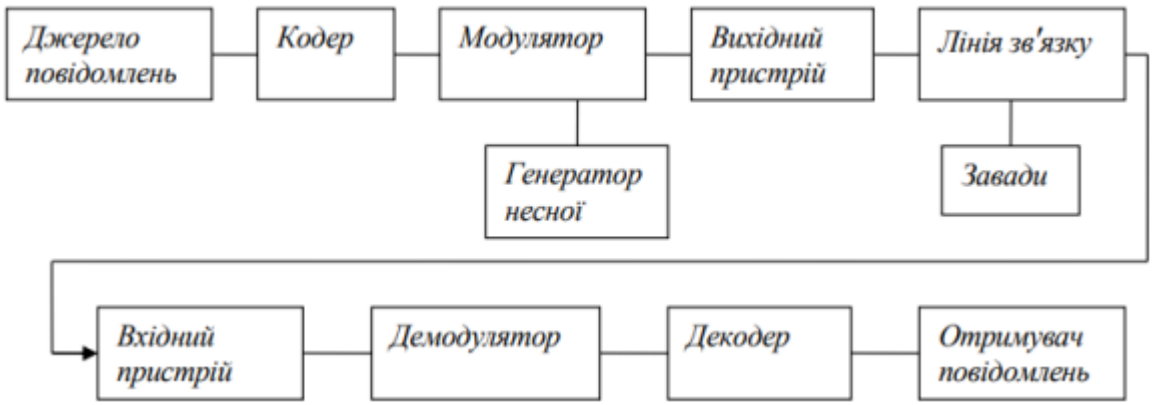

Рис. 2.1. Узагальнена структурна модель системи зв’язку, з функціональними елементи та послідовністю етапів передавання інформаційного повідомлення від джерела до приймального пристрою

Кодер виконує низку ключових функцій у системі передавання даних, забезпечуючи перетворення первинного, зазвичай неелектричного, повідомлення в електричний сигнал, перехід від аналогового (неперервного) сигналу до дискретної, тобто цифрової, форми, а також ефективне кодування з метою зменшення необхідної швидкості передавання інформації за умови збереження заданого рівня якості шляхом усунення надмірності та завадостійке кодування для підвищення надійності передавання і покращення якості приймання в умовах завад; генератор несучої формує коливання зі сталими параметрами амплітуди, частоти та фази, які слугують основою для передавання інформації, модулятор змінює параметри несучого сигналу відповідно до інформаційного сигналу від кодера, здійснюючи накладання корисної інформації на несучу, а вихідний пристрій підсилює модульований сигнал до необхідного рівня та обмежує його спектр відповідно до виділеної смуги частот, при цьому кодер, модулятор, генератор несучої та вихідний пристрій у сукупності утворюють передавач; лінія зв’язку, що може бути кабельною, дротовою, оптичною або радіоефіром, забезпечує передавання сигналу від передавача до приймача, під час якого можливі спотворення та накладання зовнішніх завад n(t), вхідний пристрій приймача виділяє корисний сигнал, фільтрує сигнали сусідніх джерел і завади та підсилює його, демодулятор перетворює високочастотний модульований сигнал у низькочастотний, близький за параметрами до сигналу на вході модулятора передавача, а декодер виконує завершальний етап обробки, приймаючи рішення щодо кожної посилки у вигляді «1» або «0», декодуючи кодові комбінації з можливістю виявлення та виправлення частини помилок і перетворюючи відновлену інформацію у форму, зрозумілу кінцевому користувачу.

Одержувач повідомлення в системі зв’язку може бути представлений людиною, комп’ютером або іншими технічними засобами, здатними сприймати, обробляти та інтерпретувати передану інформацію [5].

Приймально-передавальний пристрій MikroTik LHG XL 52 ac орієнтований на створення двосмугових радіорелейних каналів зв’язку,

призначених для передавання даних на відстані до кількох десятків кілометрів. Функціонування такого рішення забезпечується підтримкою двох частотних діапазонів: основний канал у смузі 5 ГГц забезпечує пропускну здатність до 600 Мбіт/с, тоді як діапазон 2,4 ГГц використовується як резервний з автоматичним перемиканням та максимальною швидкістю передавання до 260 Мбіт/с.

Вбудований антенний модуль із коефіцієнтом підсилення 27 дБі в смузі 5 ГГц та 18 дБі в смузі 2,4 ГГц забезпечує формування вузькоспрямованого радіоканалу, що дозволяє здійснювати надійне передавання даних на відстанях до 40 км. Сітчаста конструкція антени зменшує аеродинамічний опір, підвищуючи стійкість пристрою до вітрових навантажень і загальну механічну надійність. Обладнання придатне до експлуатації в розширеному температурному діапазоні від −40 °C до +70 °C, що гарантує його працездатність за несприятливих кліматичних умов. Антенний елемент інтегровано безпосередньо в безпроводовий модуль, що унеможливлює втрати сигналу в з’єднувальних кабелях і підвищує енергетичну ефективність системи. Приймально-передавальний обчислювальний блок оснащений чотириядерним процесором та оперативною пам’яттю обсягом 256 МБ, що забезпечує стабільне функціонування пристрою за умов підвищеного навантаження. Підтримувані робочі частотні діапазони та максимальна вихідна потужність становлять: 2400–2483,5 МГц — 20 дБм, 5150–5250 МГц — 23 дБм, 5250–5350 МГц — 20 дБм, 5470–5725 МГц — 27 дБм [11].

2.2 Дослідження та оцінювання протоколів передавання даних у системах високоякісної відеотрансляції

Протокол визначається як формалізований набір правил і процедур, що регламентують процес встановлення, підтримання та керування з’єднаннями на фізичному й логічному рівнях передавання даних. Для забезпечення повноцінного функціонування окремі протоколи, як правило, працюють у взаємодії з іншими, використовуючи їхні механізми, що зумовлює ієрархічну, багаторівневу організацію процесу обміну інформацією.

Стек мережевих протоколів TCP/IP сформувався в процесі поетапного розвитку технологій передавання даних у глобальній обчислювальній мережі ARPANET. У результаті ці протоколи заклали концептуальні та технологічні основи сучасних систем мережевого зв’язку, забезпечивши уніфіковані механізми організації надійного, гнучкого та масштабованого обміну інформацією між розподіленими обчислювальними системами.

Розроблення мережі ARPANET було започатковано у 1968 році за участю провідних університетів Сполучених Штатів Америки та компанії Bolt Beranek and Newman (BBN). Уже у 1971 році мережа була введена в постійну експлуатацію, після чого забезпечила підключеним вузлам доступ до базового комплексу мережевих сервісів і функцій обміну даними.

До ключових функціональних можливостей мережі ARPANET належали забезпечення інтерактивного доступу користувачів до віддалених обчислювальних ресурсів, обмін файлами між мережевими вузлами, а також реалізація електронної пошти як ефективного механізму передавання повідомлень. Зазначені сервіси стали фундаментом для подальшого формування та еволюції глобальних комп’ютерних мереж.

Функціонування всіх перелічених сервісів забезпечувалося транспортними механізмами, що реалізовувалися програмою керування мережею NCP (Network Control Program), яка використовувала власний внутрішній комплекс протоколів для організації обміну даними між вузлами мережі.

Практичний досвід експлуатації мережі ARPANET, накопичений до 1974 року, засвідчив наявність істотних обмежень і функціональних недоліків протоколів NCP. Це стало підґрунтям для формування базових вимог до нового універсального протокольного стеку, який у подальшому отримав назву TCP/IP. До ключових вимог, покладених в основу цього набору протоколів, було віднесено незалежність від типу середовища передавання даних, можливість інтеграції в мережу обчислювальних систем різних архітектур, наявність уніфікованого механізму встановлення та підтримання з’єднань між мережевими вузлами, а також стандартизацію прикладних протоколів з метою

забезпечення сумісності, інтероперабельності та масштабованості мережевих сервісів.

Реалізація зазначених принципів стала вирішальним етапом у становленні сучасних комп'ютерних мереж і заклала концептуальні та технологічні передумови для подальшого розвитку й формування мережі Інтернет.

Четверта версія протокольного стеку TCP/IP, що на сьогодні є найбільш поширеною, була стандартизована у 1981 році у вигляді серії нормативних документів RFC (Request for Comments). Завершення повного переходу мережі ARPANET на новий набір протоколів відбулося у 1982 році. Саме ARPANET стала початковою основою для формування глобальної мережі Internet, архітектура та функціонування якої базуються на використанні протоколів TCP/IP.

Міжнародна організація ISO зі стандартизації у 1984 році розробила та запропонувала еталонну модель взаємодії відкритих систем OSI (Open Systems Interconnection), яка отримала широке визнання як універсальний засіб формалізованого опису, структурування та аналізу мережевих протоколів і протокольних стеків.

У теорії та практиці комп'ютерних мереж ключовими концептуальними підходами є дві моделі — OSI та TCP/IP, які часто розглядають відповідно як теоретичну і прикладну. Обидві моделі базуються на багаторівневій архітектурі, що забезпечує чіткий розподіл функціональних завдань між окремими рівнями без їх взаємного дублювання в межах однієї моделі. При цьому еталонна модель OSI містить сім рівнів, тоді як модель TCP/IP складається з чотирьох рівнів, кожен з яких реалізує визначені функції у процесі організації та підтримання мережевої взаємодії [7].

Таке графічне представлення моделей має логічне та методично обґрунтоване пояснення. По-перше, рівні еталонної моделі OSI зазвичай ідентифікуються за порядковими номерами, оскільки їх нумерація здійснюється знизу вгору, тоді як у моделі TCP/IP рівні, як правило, визначаються за їх функціональними назвами. По-друге, для коректного аналізу архітектури

TCP/IP доцільно здійснювати її інтерпретацію з використанням термінології та рівневої структури моделі OSI.

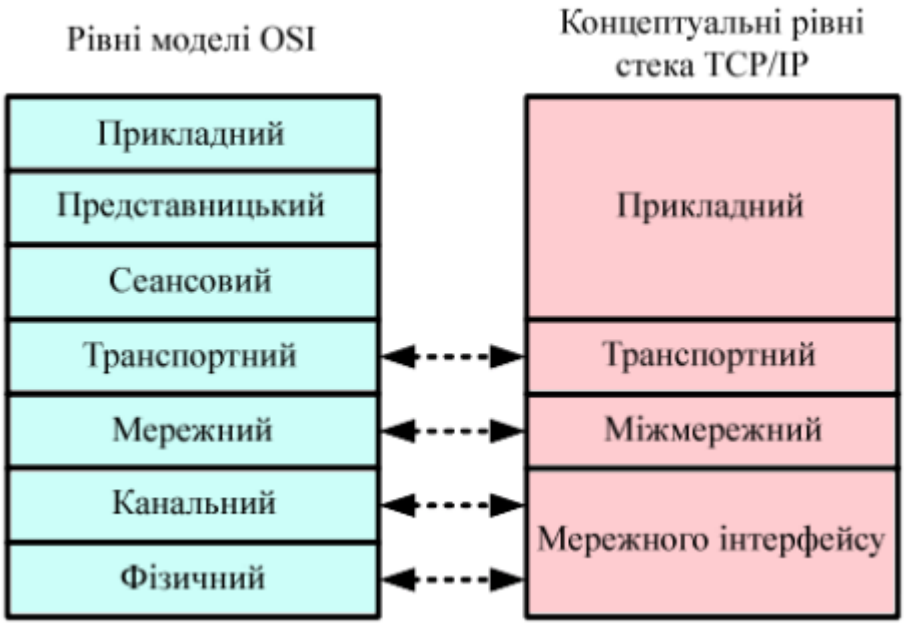

Рис. 2.2. Зіставлення рівнів архітектури протокольного стеку TCP/IP із семирівневою архітектурою моделі OSI, яке наочно відображає функціональну відповідність та взаємозв’язки між рівнями обох моделей

Порівняльний аналіз свідчить, що обидві моделі містять функціонально відповідні рівні Transport та Internet (Network), на які покладено близькі за змістом завдання. Водночас у моделі TCP/IP відсутнє чітке розмежування між рівнем фізичного подання сигналів, що відповідає за передавання бітів у каналі зв’язку, та механізмами керування доступом до середовища передавання. Унаслідок цього фізичний і канальний рівні еталонної моделі OSI в архітектурі TCP/IP об’єднані в єдиний рівень мережевого доступу. Таке архітектурне рішення зумовлене вимогою незалежності протокольного стеку від типу середовища передавання даних, оскільки на практиці функції фізичного та канального рівнів, як правило, реалізуються мережевими контролерами.

Еталонна модель OSI забезпечує детальний опис механізмів взаємодії між прикладними програмами, а також визначає характер взаємозв’язків між суміжними рівнями архітектури. З метою глибшого розуміння принципів її функціонування доцільно здійснювати поетапний розгляд кожного рівня

окремо. Аналіз може виконуватися як з позиції передавання даних, так і з позиції їх приймання, тобто відповідно у напрямках зверху вниз або знизу вгору. Архітектурна побудова моделі передбачає, що в процесі передавання повідомлення від прикладного рівня інформація послідовно проходить усі рівні до фізичного, тоді як під час приймання даних обробка здійснюється у зворотній послідовності — від нижніх до верхніх рівнів [7].

Модель OSI (Open Systems Interconnection) концептуально описує семирівневу абстрактну архітектуру мережевих комунікацій, яка визначає принципи організації взаємодії між мережевими пристроями. Упродовж 1980-х років дана модель була затверджена та набула статусу загальноприйнятого стандарту для проєктування й аналізу мережевих систем зв'язку.

Розглянута модель формалізує набір правил і принципів, спрямованих на забезпечення інтероперабельності між різнорідними програмними компонентами та апаратними платформами. Її було розроблено й запропоновано Міжнародною організацією зі стандартизації ISO у 1984 році на етапі становлення комп'ютерних мереж як самостійної та інтенсивно зростаючої технологічної сфери.

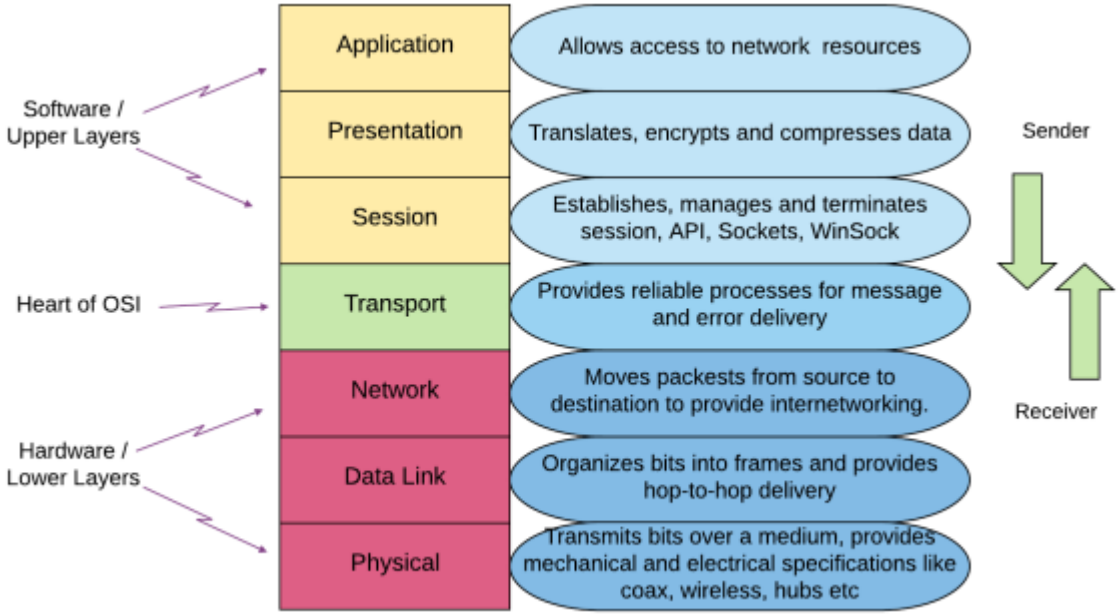

Рис. 2.3. Модель OSI яка формалізує процеси мережевої взаємодії та забезпечує уніфікований методологічний підхід до проєктування, аналізу й діагностування комп'ютерних мереж..

Попри те, що функціонування сучасної мережі Інтернет переважно ґрунтується на спрощеній моделі TCP/IP, семирівнева модель OSI (Open Systems Interconnection) і надалі залишається актуальним інструментом для структурованого подання мережевої архітектури, аналізу механізмів передавання даних та виявлення й локалізації мережевих несправностей. Архітектурна концепція OSI передбачає логічний поділ мережевої системи на сім взаємопов’язаних рівнів, кожен з яких реалізує чітко визначені функціональні завдання та взаємодіє із суміжними рівнями з метою забезпечення коректного й ефективного обміну інформацією в мережі [6].

Еталонна модель OSI складається з семи взаємопов’язаних рівнів, кожен із яких виконує визначені функції для забезпечення мережевої взаємодії: фізичний рівень відповідає за передавання необроблених бітів у фізичному середовищі та роботу апаратних засобів; канальний рівень забезпечує надійну передачу кадрів між безпосередньо з’єднаними пристроями, керуючи доступом до середовища та контролем помилок; мережевий рівень реалізує логічну адресацію і маршрутизацію пакетів між різними сегментами мережі; транспортний рівень гарантує наскрізний зв’язок, керування потоком даних і контроль помилок; сеансовий рівень відповідає за встановлення, підтримання та завершення сеансів зв’язку й синхронізацію передавання; рівень представлення забезпечує перетворення, кодування, шифрування та стиснення даних; прикладний рівень надає користувачам і програмам стандартизований доступ до мережевих сервісів і протоколів, таких як HTTP, FTP чи SMTP.

2.3 Архітектурні підходи до побудови мереж зв’язку

Архітектура мережі визначає принципи побудови та взаємної організації мережевих пристроїв і сервісів з метою забезпечення ефективного підключення клієнтських вузлів і реалізації їхніх комунікаційних вимог [8]. До складу мережевої інфраструктури, як правило, входять комутатори та маршрутизатори, які виконують функції передавання, комутації та маршрутизації даних. Важливу роль відіграють мережеві сервіси, зокрема DHCP і DNS, що

забезпечують автоматизовану конфігурацію параметрів вузлів та механізми їх логічного іменування. Клієнтські пристрої можуть бути представлені кінцевими користувацькими терміналами, серверами, а також інтелектуальними пристроями й сенсорними системами. Загалом проєктування комп'ютерних мереж орієнтоване на максимальне узгодження їхньої структури та функціональних можливостей з потребами користувачів.

У корпоративних інформаційних середовищах зазвичай виокремлюють три базові типи мережевих архітектур. До першої категорії належать мережі доступу кампусного та філіального рівнів, призначені для підключення користувачів і різноманітних пристроїв, зокрема для організації мережевого доступу співробітників у межах офісних будівель. Другу категорію становлять мережі центрів обробки даних, які забезпечують об'єднання серверних ресурсів із розміщеними на них даними та прикладними сервісами, а також надання до них централізованого доступу користувачам. Третій тип представлений глобальними мережами передачі даних (WAN), функціональне призначення яких полягає в забезпеченні з'єднання користувачів з програмними та інформаційними ресурсами на значних відстанях, наприклад для віддаленого доступу медичного персоналу до інформаційних систем сфери охорони здоров'я.

Усі зазначені, а також інші різновиди мереж постійно піддаються впливу широкого спектра загроз інформаційній безпеці, що зумовлює необхідність забезпечення їх надійного захисту. З огляду на різноманітність функціональних завдань і вимог до безпеки, кожен тип мережі проєктується з урахуванням специфічних умов експлуатації та характеризується власною, унікальною архітектурою [8].

В умовах стрімкого технологічного розвитку та активної реалізації ініціатив цифрової трансформації на мережеву інфраструктуру покладається зростаючий обсяг функціональних завдань. Зокрема, мережі доступу повинні забезпечувати механізми ідентифікації, автентифікації та авторизації як користувацьких, так і інтелектуальних пристроїв перед наданням їм доступу до мережевих ресурсів. Водночас мережі центрів обробки даних мають

підтримувати надійні та масштабовані з’єднання між прикладними сервісами, розміщеними в кількох центрах обробки даних і хмарних середовищах.

Глобальні мережі передачі даних (WAN) орієнтовані на зниження витрат на передавання інформації при одночасному підвищенні якості користувацького досвіду шляхом забезпечення ефективного функціонування розподілених прикладних сервісів для географічно віддалених користувачів. Досягнення зазначених цілей потребує застосування комплексного підходу до проєктування мережевої архітектури з урахуванням вимог інформаційної безпеки, масштабованості та продуктивності [8].

Сучасні комп’ютерні мережі мають характеризуватися високим рівнем динамічності, гнучкості та здатності оперативно адаптуватися до змінюваних бізнес-вимог. Традиційні методи керування мережевою інфраструктурою, що ґрунтуються на великій кількості ручних операцій, поступово втрачають свою ефективність і стають малопридатними в умовах зростання складності мережевих середовищ. У зв’язку з цим актуалізується необхідність впровадження нових підходів, які передбачають суттєві трансформаційні зміни в архітектурі комп’ютерних мереж.

На сучасному етапі розвитку галузі активно впроваджуються інноваційні мережеві архітектури, орієнтовані на оптимізацію процесів проєктування, розгортання та супроводу комп’ютерних мереж в умовах цифрової трансформації. Зокрема, компанія Cisco розробляє комплексні архітектурні рішення для мереж доступу, глобальних мереж передачі даних (WAN), центрів обробки даних і хмарних платформ, що сприяє зниженню операційних витрат та підвищенню ефективності керування мережевою інфраструктурою [8].

ntent-based networking (IBN) та пов’язані з ним сучасні архітектурні підходи спрямовані на досягнення визначених бізнес-цілей шляхом формулювання вимог на високому, абстрактному рівні, які використовуються мережею як вхідні параметри для автоматичного налаштування та реалізації заданих намірів. Реалізація IBN ґрунтується на глибокій автоматизації мережевих операцій, безперервному аналізі продуктивності, своєчасному виявленні потенційних проблем, забезпеченні комплексної безпеки та тісній

інтеграції мережевої інфраструктури з бізнес-процесами. Ключову роль у таких мережах відіграє controller-led архітектура, в межах якої мережеві контролери забезпечують масштабованість, централізоване керування та підвищений рівень захисту, автоматизуючи мережеві функції, перетворюючи бізнес-наміри у конкретні конфігурації мережевих пристроїв і здійснюючи постійний моніторинг стану мережі. Подальшим розвитком цього підходу є multidomain-архітектура, за якої кілька мережевих доменів підприємства взаємодіють між собою через власні контролери, обмінюючись ключовими робочими параметрами для узгодженого функціонування та досягнення комплексних бізнес-результатів у межах кількох мереж одночасно [7], [8].

Безпілотні літальні апарати широко застосовуються у військовій і цивільній сферах, а їх кооперація в межах єдиної мережі дає змогу підвищити ефективність, надійність і зону покриття системи, що зумовлює розвиток спеціалізованих літальних мереж FANET. Ключовими викликами при цьому є забезпечення стабільної ієрархічної мережевої структури, вибір і керування мережевими шлюзами та підтримка стійкого зв’язку між дронами. Завдяки розвитку вбудованих систем і мікроелектроніки малі й середні БПЛА стали економічно доступними, однак їх обмежені льотні та енергетичні характеристики знижують ефективність ізольованого використання. Формування мережі з кількох БПЛА дозволяє об’єднати їх обчислювальні та комунікаційні ресурси, зменшити затримки й втрати даних, підвищити живучість системи та усунути залежність від одного каналу зв’язку. На відміну від MANET і VANET, висока мобільність БПЛА потребує спеціальних мережевих підходів, зокрема двошарової повітряно-наземної архітектури, у якій дрони виконують роль динамічних ретрансляторів і автономно формують оптимальну топологію мережі для забезпечення стабільного функціонування та максимального покриття.

На рисунку 2.4 представлено багатокомпонентну систему з кількох безпілотних літальних апаратів, до складу якої входять наземні станції керування, наземні та бортові ретрансляційні вузли, а також віддалені станції

моніторингу мережі, призначені для забезпечення зворотного зв’язку та контролю функціонування всієї системи.

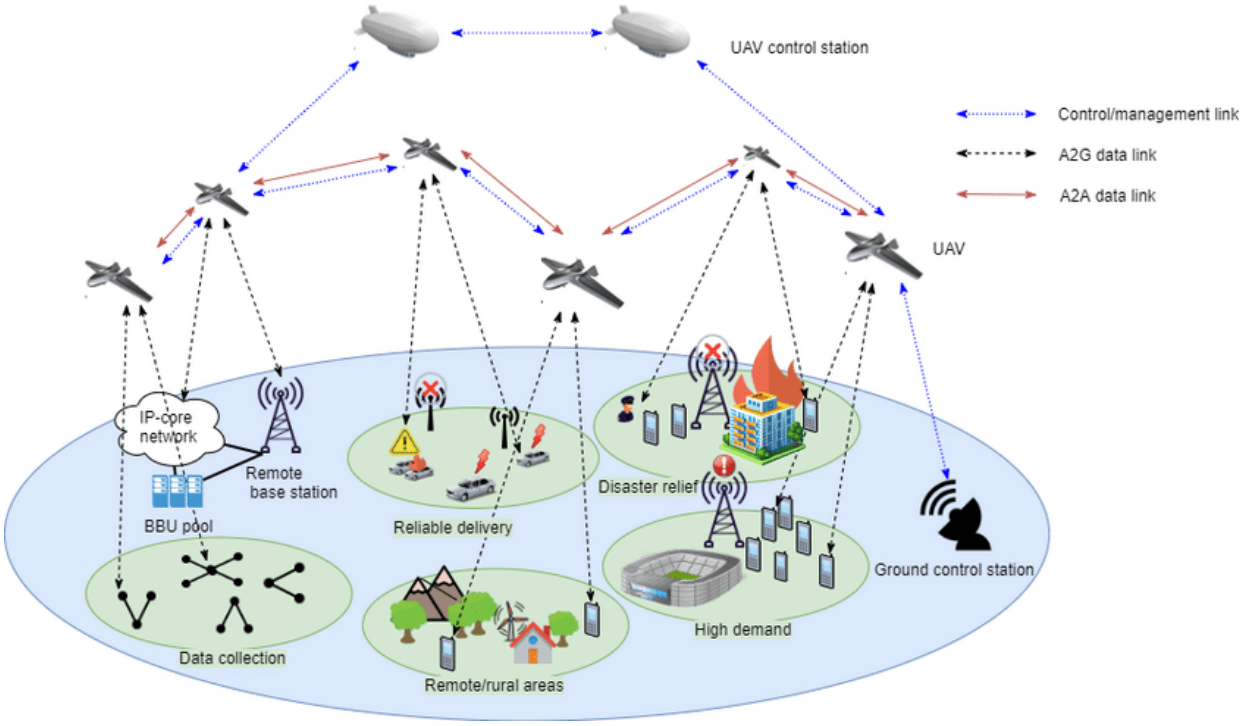

Рис. 2.4. Архітектура мережі з кількома безпілотними літальними апаратами (БПЛА), а також основні внутрішні функціональні блоки БПЛА, які забезпечують їх взаємодію між собою, автономне функціонування та передавання даних у межах повітряно-наземної мережі.

Ключові переваги мережі, побудованої на основі кількох безпілотних літальних апаратів, у порівнянні з рішенням, що використовує один БПЛА, полягають у зростанні загальної ефективності функціонування системи зв’язку. Така архітектура забезпечує збільшення сукупної пропускної здатності передавання даних, підвищення швидкості оброблення інформації та покращену здатність системи до оперативної адаптації у відповідь на зміни якості каналу зв’язку.

Використання мережі з кількох БПЛА дає змогу значно розширити зону спостереження й покриття, підвищити надійність, живучість та

енергоефективність системи завдяки маршрутизації даних через альтернативні вузли, самоорганізації, адаптації до змін топології та спеціалізації окремих дронів. Такі мережі здатні автоматично перебудовувати структуру у разі відмов окремих апаратів, масштабуватися відповідно до вимог місії, зменшувати енергоспоживання за рахунок узгодженого керування й режимів енергозбереження, а також використовувати різнорідні датчики й стратегії передавання даних. Водночас ключовою проблемою залишається висока динамічність топології через постійний рух БПЛА, що ускладнює розроблення стабільних алгоритмів маршрутизації та потребує адаптивних мережевих рішень. У межах FANET такі мережі зазвичай моделюються як чотирирівневі та можуть будуватися на основі модифікованого стеку TCP/IP або архітектури DTN, яка ефективно працює в умовах великих затримок і переривчастих з’єднань, забезпечуючи надійне передавання даних

2.4 Розробка експериментального комплексу та оцінювання якості передавання відеоданих

Передавання даних у телекомунікаційних системах із використанням радіорелейного зв’язку здійснюється шляхом передавання та приймання мікрохвильових сигналів по радіорелейних лініях зв’язку. Такі лінії формуються сукупністю радіорелейних антен, які забезпечують послідовну передачу інформації між вузлами мережі. З метою гарантування стабільного зв’язку антени, як правило, розміщуються на щоглах або висотних спорудах у найвищих точках місцевості, що дозволяє забезпечити умови прямої видимості між пунктами зв’язку та мінімізувати втрати сигналу.

Радіорелейна лінія зв’язку є технічною системою, призначеною для передавання інформації радіосигналами між двома або кількома стаціонарними вузлами. Сукупність взаємопов’язаних радіорелейних ліній формує радіорелейну мережу, яка забезпечує реалізацію багатоканального зв’язку та передавання даних на значні відстані.

Радіорелейні канали зв’язку здебільшого використовуються для побудови з’єднань типу «точка–точка». Мала довжина хвилі мікрохвильового діапазону дає змогу застосовувати антени з вузькоспрямованими діаграмами спрямованості, що забезпечує високоточне фокусування енергії сигналу безпосередньо на приймальний вузол і зменшення рівня взаємних завад.

Зазначена властивість уможливлює повторне використання однакових робочих частот у суміжних радіорелейних системах без виникнення взаємних завад, що є суттєвою перевагою порівняно з радіохвилями нижчих частотних діапазонів. Крім того, використання сигналів мікрохвильового спектра з підвищеною робочою частотою забезпечує досягнення високої пропускної здатності каналів зв’язку та передавання значних обсягів інформації.

Мікрохвильове передавання належить до технологій прямої видимості, оскільки для стабільного функціонування каналу зв’язку необхідна відсутність фізичних перешкод у повітряному просторі між передавальною та приймальною антенами, а наявність гір, будівель чи інших об’єктів на трасі поширення сигналу може спричиняти його екранування або істотне ослаблення. Зазначена бездротова технологія ґрунтується на використанні радіохвиль високого частотного діапазону, що дає змогу формувати високошвидкісні канали для передавання голосових повідомлень, відеопотоків і цифрових даних, однак ефективність застосування радіорелейних систем на значних відстанях обмежується вимогою забезпечення прямої видимості між вузлами та негативним впливом атмосферних явищ, зокрема поглинанням і згасанням сигналу внаслідок опадів. У зв’язку з цим мікрохвильові канали переважно використовуються в регіонах із недостатньо розвиненою локальною інфраструктурою або за відсутності альтернативних транспортних систем передавання інформації. Радіорелейні канали набули широкого поширення в сучасних цифрових IP-мережах, оскільки за пропускної здатності, що може перевищувати 6 Гбіт/с, вони забезпечують надійний, економічно доцільний і гнучкий спосіб передавання даних, дозволяючи уникнути затримок і перебоїв, пов’язаних із проведенням земляних робіт, а також зменшити витрати порівняно з орендованими каналами або волоконно-оптичними лініями зв’язку.

Мікрохвильова радіопередача застосовується переважно в наземних системах зв’язку типу «точка–точка», супутникових каналах і системах зв’язку з об’єктами далекого космосу, тоді як інші ділянки мікрохвильового спектра використовуються в радіолокаційних комплексах, радіонавігаційних і сенсорних системах, а також у радіоастрономічних дослідженнях. Частину електромагнітного спектра з частотами приблизно від 30 до 100 ГГц відносять до діапазону міліметрових хвиль, що зумовлено відповідними довжинами хвиль у межах близько 10–3 мм, однак радіосигнали цього діапазону зазнають значного ослаблення під час поширення в атмосфері, особливо за підвищеної вологості та наявності зважених частинок, а в околі частот близько 60 ГГц додатково спостерігається інтенсивне поглинання радіохвиль молекулярним киснем, що істотно обмежує дальність зв’язку.

Апаратні засоби міліметрового діапазону є складнішими у виробництві та дорожчими за мікрохвильове обладнання, тоді як сучасні мікрохвильові канали здатні забезпечувати швидкість передавання даних до 400 Мбіт/с завдяки ефективним схемам модуляції та оптимізації протоколів. Дальність і стабільність таких ліній визначаються параметрами антен, частотним діапазоном, пропускною здатністю та умовами прямої радіовидимості, з урахуванням кривизни Землі. Для підвищення надійності широко застосовуються методи рознесення й резервування, які зменшують вплив завмирань і завад шляхом використання кількох каналів, частот, антен або поляризацій. Залежно від рівня захисту розрізняють незахищені конфігурації типу 1+0, схеми з гарячим резервуванням 1+1 (HSB), а також конфігурації N+1 із додатковим захисним каналом. Просторове, частотне та поляризаційне рознесення, а також застосування надлишкових кодів корекції помилок забезпечують підвищення стійкості мікрохвильових радіоліній і загальної надійності систем зв’язку.

Основною метою створення тестової системи передавання відео високої якості з використанням безпілотного літального апарата є налаштування та розгортання каналу зв’язку типу «точка–точка», а також експериментальне дослідження його характеристик на значних відстанях, що перевищують 10 км.

Реалізація такого каналу ґрунтується на використанні цифрової радіорелейної лінії, сформованої на основі стандартів IEEE 802.11, які традиційно застосовуються для побудови бездротових мереж типу «точка–багатоточка» з локальним всеспрямованим покриттям радіусом до кількох сотень метрів.

Метою проведеного дослідження є експериментальне визначення характеристик каналу зв’язку в польових умовах із застосуванням приймально-передавального обладнання, що відповідає стандартам IEEE 802.11, зокрема пристроїв MikroTik LHG XL 52 ac, у конфігурації з’єднання типу «точка–точка». Довжина траси цифрової радіорелейної лінії при цьому становить 12 км. У межах роботи також передбачено порівняльний аналіз теоретично розрахованих параметрів траси радіорелейного зв’язку з результатами, отриманими в процесі практичних експериментальних вимірювань.

На рисунку 2.5 подано схему підключення приймально-передавальних пристроїв радіорелейної лінії MikroTik та кінцевих терміналів із призначеними IP-адресами..

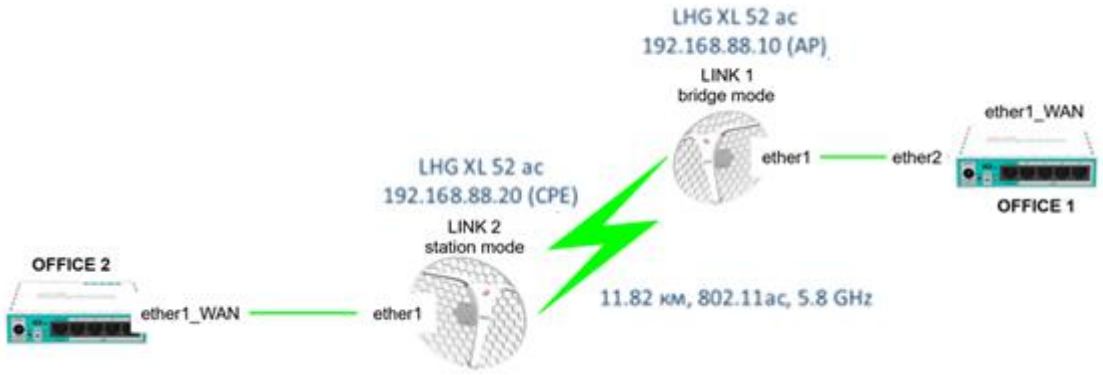

Рис 2.5. Схема з’єднання вузлів радіорелейної лінії зв’язку, побудованої в конфігурації «точка–точка»

2.5 Висновок до розділу 2

У цьому розділі досліджено телекомунікаційну складову проєкту, подано характеристику протоколів взаємодії та виконано аналіз архітектурних підходів до побудови мереж із використанням безпілотних літальних апаратів. Для реалізації ефективного керування БПЛА необхідно забезпечити надійний канал

зв’язку між бортовими системами апарата та наземною станцією управління, що досягається шляхом застосування відповідних телекомунікаційних технологій і засобів.

Телекомунікаційні технічні засоби призначені для виконання функцій комутації, маршрутизації, приймання та передавання сигналів, а також даних, відеоінформації, зображень, звукових і текстових повідомлень різної природи з використанням дротових, бездротових, оптичних та інших електромагнітних систем між кінцевими пристроями. Надійне та високошвидкісне передавання інформації є визначальним чинником, що забезпечує ефективне функціонування всієї телекомунікаційної системи.

Організація мережевої взаємодії здійснюється відповідно до двох базових архітектурних моделей — OSI та TCP/IP, у межах яких кожному рівню відповідає спеціалізований набір протоколів, призначених для реалізації визначених функціональних завдань мережевої взаємодії.

В межах даного дослідження для організації радіорелейного прольоту застосовується приймально-передавальне обладнання MikroTik LHG XL 52 ac, яке призначене для побудови двосмугових цифрових радіорелейних ліній зв’язку на відстанях до кількох десятків кілометрів. Наявність підтримки двох частотних діапазонів забезпечує можливість використання каналу 5 ГГц як основного з максимальною пропускною здатністю до 600 Мбіт/с, тоді як діапазон 2,4 ГГц реалізується як автоматичний резервний канал зі швидкістю передавання даних до 260 Мбіт/с.

Розроблена тестова система передавання відео високої якості з використанням безпілотного літального апарата орієнтована на розгортання та налаштування каналу зв’язку конфігурації «точка–точка», а також на експериментальне дослідження його параметрів на значних відстанях, що перевищують 10 км. Функціонування такої системи ґрунтується на застосуванні цифрової радіорелейної лінії, реалізованої відповідно до стандартів IEEE 802.11, які традиційно використовуються для побудови бездротових мереж типу «точка–багатоточка» з локальним всеспрямованим радіопокриттям у межах кількох сотень метрів.

РОЗДІЛ 3
НАУКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКА ЧАСТИНА

3.1 Розроблення архітектури та створення експериментальної системи передавання високоякісного відео з використанням БПЛА.

Приймально-передавальний пристрій Mikrotik LHG XL 52 ac призначений для побудови двосмугових цифрових радіорелейних ліній зв’язку на дистанціях, що сягають кількох десятків кілометрів. Функціонування таких ліній забезпечується підтримкою двох частотних діапазонів: робочий канал у смузі 5 ГГц може використовуватися як основний та забезпечує швидкість передавання даних до 600 Мбіт/с, тоді як діапазон 2,4 ГГц застосовується як автоматичний резервний канал із пропускною здатністю до 260 Мбіт/с.

Вбудований антенно-фідерний модуль із коефіцієнтом підсилення 27 дБі в діапазоні 5 ГГц та 18 дБі в діапазоні 2,4 ГГц забезпечує формування вузькоспрямованого радіоканалу з граничною дальністю передавання до 40 км. Сітчасте виконання антени зменшує аеродинамічне навантаження, що підвищує стійкість і надійність роботи обладнання за несприятливих метеорологічних умов. Конструкція пристрою передбачає його функціонування в розширеному температурному інтервалі від −40 °C до +70 °C.

Антенний модуль конструктивно інтегрований у бездротовий пристрій, що дає змогу мінімізувати втрати сигналу в з’єднувальних лініях. Обчислювальна підсистема приймально-передавального блока вирізняється підвищеною продуктивністю завдяки застосуванню чотириядерного процесора та 256 МБ оперативної пам’яті, що забезпечує надійне й стабільне функціонування обладнання за умов інтенсивного навантаження.

Робочі частотні діапазони пристрою та відповідні граничні значення вихідної потужності становлять: 2400–2483,5 МГц із потужністю до 20 дБм, 5150–5250 МГц — до 23 дБм, 5250–5350 МГц — до 20 дБм та 5470–5725 МГц — до 27 дБм [11]. На рисунку 3.1 представлено конструктивну схему безпілотного літального апарата та його загальний зовнішній вигляд, тоді як на

рисунку 3.2 наведено зображення вбудованого відеомодуля, призначеного для передавання відеосигналу високої якості.

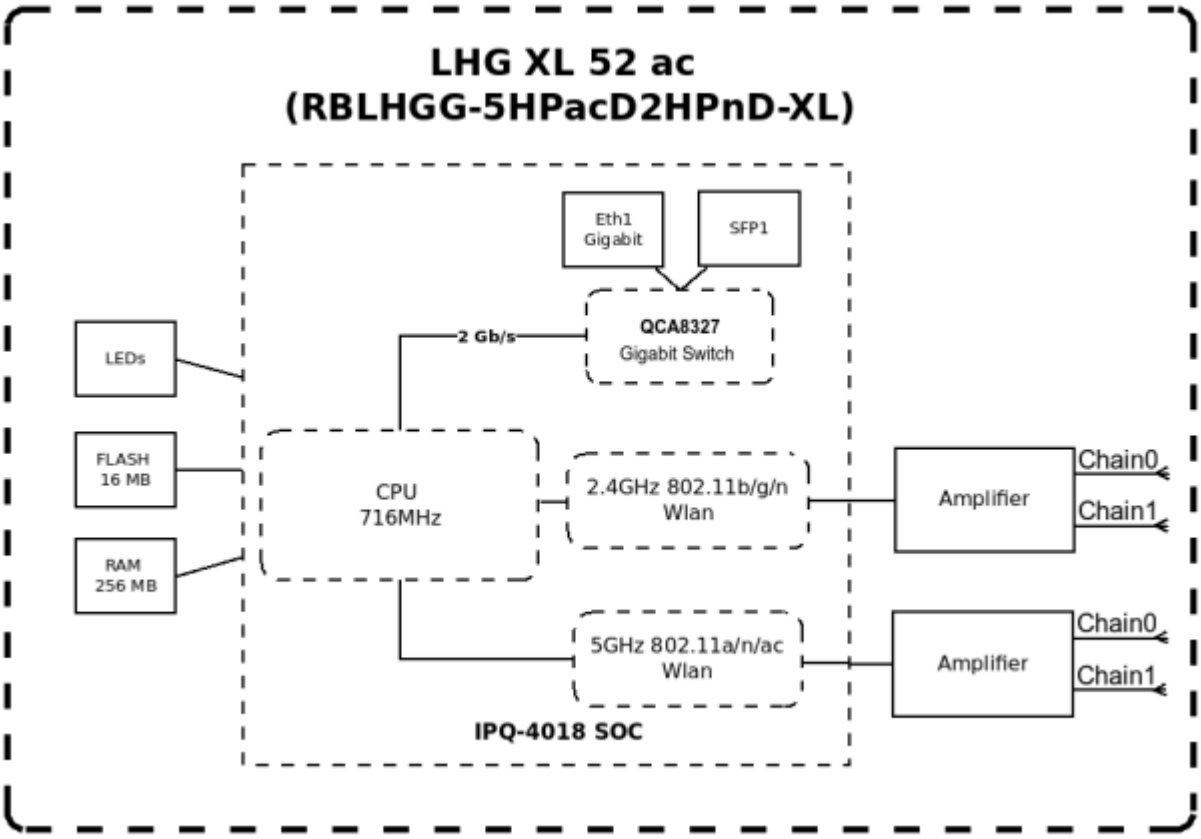

Рис. 3.1. Структурна організація приймально-передавального модуля Mikrotik LHG XL 52 ac

Сукупність технічних і експлуатаційних переваг безпілотних літальних апаратів зумовила їх активне впровадження в різні сфери діяльності, зокрема як повітряні платформи для підвищення пропускної здатності та надійності систем стільникового зв’язку в умовах надзвичайних ситуацій і під час забезпечення громадської безпеки. Крім того, БПЛА здатні функціонувати як мобільні повітряні термінали, виконуючи завдання відеоспостереження в реальному часі, ретрансляції сигналів зв’язку та оперативного збору тактичної інформації. Водночас процес передавання відеоданих у безпілотних системах характеризується низкою специфічних особливостей, а забезпечення стабільного та надійного відеозв’язку на значних відстанях є визначальним чинником безпеки польоту та ефективності виконання поставлених завдань.

Під час проєктування систем відеопередавання із застосуванням БПЛА слід ураховувати значну обчислювальну складність алгоритмів відеостиснення та суттєві обмеження на енергоспоживання бортового обладнання, що зумовлює підвищену технічну складність процесу обробки отриманої відеоінформації.

Крім того, в окремих сценаріях, зокрема проілюстрованих на рисунку 3.2, відеодані передаються одночасно до кількох пунктів призначення, кожен із яких висуває специфічні вимоги до просторової роздільної здатності та якості відеосигналу. Необхідність паралельного задоволення різнорідних технічних параметрів і користувацьких вимог істотно ускладнює реалізацію процесів отримання, стиснення і передавання відеоінформації.

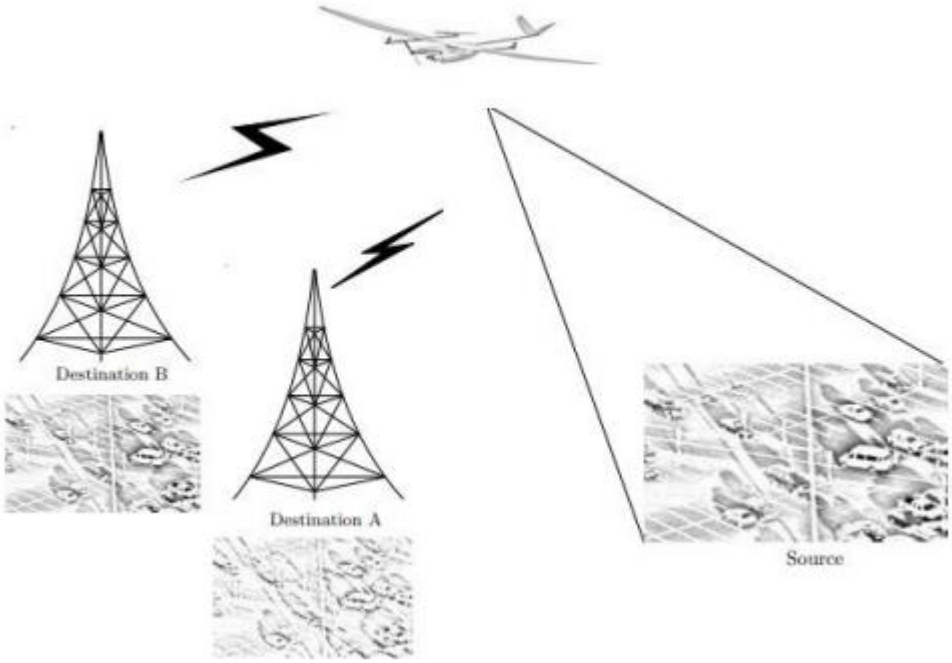

Рис. 3.2. Передавання відеоінформації в системах спостереження з використанням безпілотних літальних апаратів.

Упродовж останніх десятиліть технології відеостиснення еволюціонували від раннього стандарту H.261 до сучасних кодеків H.265 (High Efficiency Video Coding, HEVC) та H.266 (Versatile Video Coding, VVC). Водночас значний науково-практичний інтерес як перспективний напрям підвищення

ефективності та якості відеопередавання привернуло масштабоване кодування відео Scalable Video Coding (SVC).

Разом із тим упровадження масштабованих схем тривалий час залишалося складним науково-технічним завданням, що було зумовлено відносно низькою ефективністю стиснення та значною обчислювальною складністю відповідних алгоритмів. Ситтєві зміни відбулися з появою стандарту H.264, який забезпечив істотне підвищення ступеня стиснення відеоданих без помітного ускладнення процесу кодування. Подальший розвиток цього підходу було реалізовано в стандарті HEVC шляхом упровадження механізмів масштабованості, відомих як Scalable HEVC (SHVC).

У системах відеопередавання з використанням БПЛА канал зв’язку з мінімальною затримкою виконує комплексну функцію, забезпечуючи одночасну передачу відеоданих і приймання відеосигналу високої просторової роздільної здатності. Зазначений канал є ключовою складовою, що забезпечує узгоджену взаємодію наземних і бортових комунікаційних підсистем. Відповідно, вибір інтерфейсу передавання даних повинен ґрунтуватися не лише на показниках надійності та точності, а й на здатності підтримувати високоякісного відеопередавання в реальному часі.

Високоякісне відеопередавання із застосуванням БПЛА для зниження впливу частотно- та часово-селективних завмирань на характеристики системи доцільним є поєднання ортогонального частотного мультиплексування (OFDM) з методами виправлення помилок, адаптивного вирівнювання каналу та частотно-часового чергування. Реалізація таких підходів підвищує ефективність OFDM-систем, покращує дифракційні властивості сигналу й його проникну здатність у середовищах з перешкодами, а також забезпечує передавання відео за умов непрямої видимості, зокрема в щільній міській забудові з великою кількістю відбивних об’єктів. Водночас упровадження зазначених технологічних рішень призводить до істотного ускладнення процесів проєктування та практичної реалізації систем відеопередавання.

Суттєвий вплив на працездатність OFDM-систем мають частотний зсув і фазовий шум. Оскільки ортогональне частотне мультиплексування передбачає

строге дотримання ортогональності піднесучих у часовій області, поява частотного зсуву під час передавання сигналу призводить до її порушення, що зумовлює виникнення міжпіднесучої інтерференції та зниження відношення сигнал/шум. Тому на приймальній стороні до етапу демодуляції необхідно виконувати точну оцінку величини частотного зсуву та здійснювати його ефективну компенсацію.

У наукових працях також аналізуються моделі авіаційних каналів зв’язку, в межах яких режими експлуатації літального апарата класифікуються як стоянка, наземне руління, зліт або посадка та політ за маршрутом. Кожен із зазначених режимів характеризується специфічними умовами поширення радіосигналу, зокрема співвідношенням енергії прямої та розсіяної складових, а також параметрами доплерівського спектра потужності. Зокрема, у режимі стоянки пряма складова сигналу може бути екранована, що відповідає типовій моделі міського радіоканалу, тоді як під час руління, зльоту, посадки та маршрутного польоту канал зазвичай описується моделлю райсівських завмирань із домінуванням компоненти прямої видимості.

Інтенсивний розвиток електронних технологій і комп’ютерних мереж зумовив суттєве вдосконалення систем передавання зображень, надавши можливість виконувати оцифрування, стиснення та передавання сигналів із використанням компактних вбудованих рішень, що має вирішальне значення для мобільних і бортових застосувань. Конструктивна платформа безпілотного літального апарата виконує функцію механічної основи для розміщення корисного навантаження та потребує комплексного врахування аеродинамічних, енергетичних і масо-габаритних характеристик на етапі проєктування. Забезпечення стійкого зв’язку реалізується за допомогою малогабаритних антен із високим коефіцієнтом підсилення та розширеним температурним діапазоном експлуатації, тоді як виготовлення конструктивних елементів БПЛА доцільно здійснювати із застосуванням технологій ЧПУ-обробки та тривимірного друку, що забезпечує зниження вартості, високу гнучкість і можливість оперативної оптимізації конструкції.

У розробленій системі як канал зв’язку використовується приймально-передавальний комплекс Mikrotik LHG XL 52 ac, призначений для організації двосмугових цифрових радіорелейних ліній на відстанях, що сягають кількох десятків кілометрів. Підтримка двох частотних діапазонів дає змогу використовувати смугу 5 ГГц як основний канал із максимальною швидкістю передавання даних до 600 Мбіт/с, тоді як діапазон 2,4 ГГц реалізує функцію автоматичного резервного з’єднання з пропускною здатністю до 260 Мбіт/с. При цьому граничні значення максимальної пропускної здатності забезпечуються на відстанях до 23 км у діапазоні 5 ГГц та до 16 км у діапазоні 2,4 ГГц.

Рис. 3.3. Антеннийо модулья Mikrotik LHG XL 52 ac

Схему з’єднання вузлів радіорелейної лінії Mikrotik і кінцевих терміналів із призначеними IP-адресами подано на рисунку 3.4.

Оцінювання параметрів траси радіорелейної лінії зв’язку здійснювалося з використанням програмного засобу математичного моделювання, доступного за вказаним вебресурсом, із урахуванням технічних характеристик застосованого обладнання та географічного розташування вузлів радіорелейної лінії зв’язку [10].

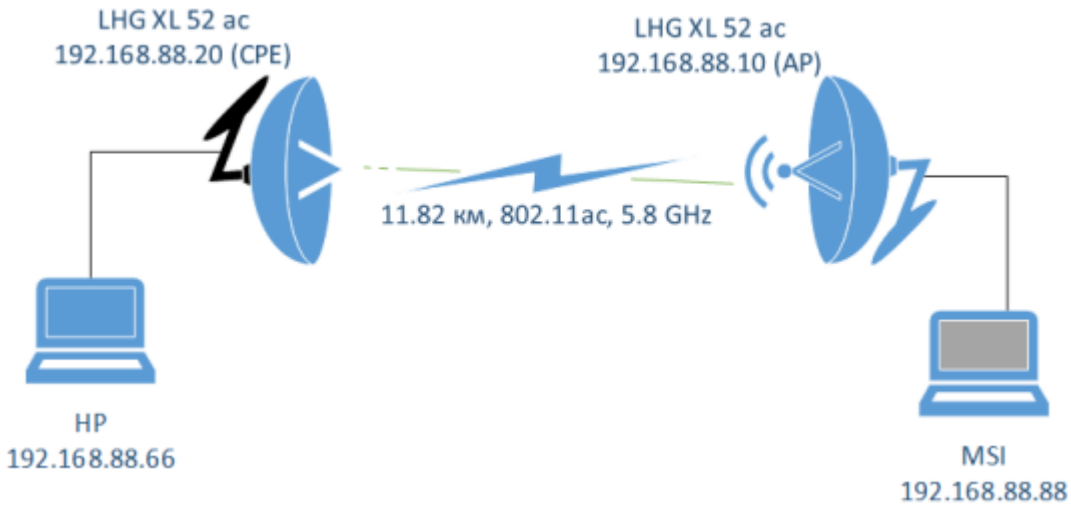

Рис. 3.4. Схема з’єднання вузлів радіорелейної лінії зв’язку

3.3. Оцінка характеристик якості передавання даних

На сучасному етапі розвитку телекомунікацій користувацький досвід відіграє визначальну роль і розглядається як один із ключових показників ефективності діяльності постачальників послуг і операторів зв’язку, які забезпечують узгоджене функціонування клієнтських пристроїв, терміналів, мережевої інфраструктури, сервісних платформ і засобів кодування мультимедійного контенту. Для розширення абонентської бази оператори та провайдери мають реалізовувати комплекс технічних і організаційних заходів, спрямованих на підтримання надійної та високоякісної роботи відповідних систем, що неможливо без забезпечення необхідного рівня якості обслуговування.

У цьому контексті важливого значення набувають процеси моніторингу та оцінювання якості сприйняття сервісу користувачем, що визначається показником Quality of Experience (QoE). QoE має виражений суб’єктивний характер, а його оцінювання є складним і ресурсомістким, оскільки залежить від індивідуального сприйняття користувача та конкретних умов використання послуги. Для ефективного керування ресурсами пакетних мереж застосовується концепція Quality of Service (QoS), яка забезпечує контроль і оптимізацію мережевих параметрів з метою підтримання заданого рівня якості передавання

даних. QoS є невід'ємною складовою корпоративних і промислових мереж, особливо у випадку сервісів, чутливих до затримок, зокрема VoIP, систем відеоспостереження та відеозв'язку, оскільки дає змогу здійснювати пріоритезацію критично важливого трафіку, зменшувати затримки, забезпечувати стабільну роботу і ефективність використання мережевих ресурсів.

Узагальнено, механізми QoS орієнтовані на керування мережевими потоками шляхом пріоритетної обробки пакетів, що мають вищий рівень важливості, порівняно з трафіком нижчого пріоритету. Такий підхід забезпечує раціональніший розподіл і спільне використання пропускної здатності каналу, що, своєю чергою, сприяє підвищенню загальної ефективності та продуктивності мережі.

Реалізація механізмів якості обслуговування може здійснюватися за двома основними підходами: по-перше, шляхом модернізації або заміни мережевого обладнання на пристрої, що підтримують функції QoS, та, по-друге, за допомогою програмної конфігурації, яка передбачає визначення правил обробки мережевого трафіку з наданням підвищеного пріоритету окремим типам пакетів порівняно з іншими.

Крім підвищення продуктивності та стабільності функціонування мережі, упровадження механізмів QoS забезпечує скорочення затримок передавання даних, тобто часу доставки пакетів до пункту призначення, а також сприяє більш раціональному використанню пропускної здатності каналу за рахунок збільшення обсягу інформації, що передається за одиницю часу. У зв'язку з цим QoS є невід'ємним елементом сучасних мережевих інфраструктур.

Quality of Service (QoS, якість обслуговування) визначається як сукупність методів і механізмів керування мережевим трафіком, що дають змогу адміністраторам встановлювати пріоритети відповідно до вимог різних застосунків. Такий підхід передбачає диференціацію рівнів обслуговування для окремих типів трафіку та забезпечує гарантоване виділення необхідної пропускної здатності для критично важливих сервісів, зокрема відеоконференцій і VoIP-з'єднань, з метою підтримання їх безперервної та

якісної роботи, водночас не порушуючи функціонування менш пріоритетних сервісів, таких як електронна пошта, обмін повідомленнями чи активність у соціальних мережах.

Використання механізмів QoS забезпечує підприємствам низку суттєвих переваг, серед яких провідне місце посідає підвищення ефективності використання мережевих ресурсів. Реалізація QoS дає змогу здійснювати пріоритезацію критично важливих застосунків, оптимізувати розподіл пропускної здатності та мінімізувати затримки під час обробки даних. Унаслідок цього зменшується конкуренція за мережеві ресурси, зростає загальна продуктивність системи та забезпечується стабільне функціонування застосунків навіть за умов пікових навантажень.

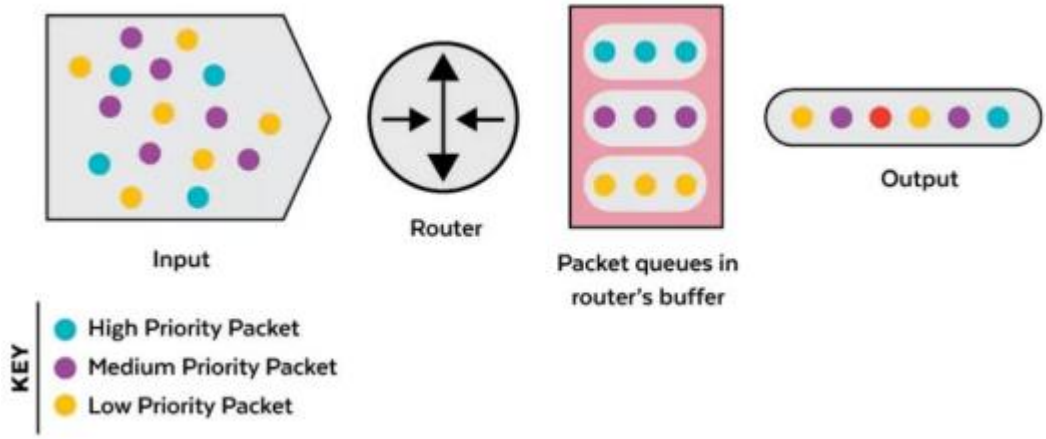

Рисунок 3.5. Обробка мережевого трафіку із застосуванням механізмів Quality of Service

Упровадження механізмів Quality of Service має істотний вплив на підвищення якості користувацького досвіду та ефективність керування мережевим трафіком, оскільки забезпечує впорядковану обробку пакетів і гарантоване виділення необхідної пропускної здатності для їх своєчасного та коректного доставлення. Це сприяє прискоренню виконання робочих процесів користувачами, зростанню загальної продуктивності та зниженню рівня операційного навантаження. У результаті застосування QoS покращується взаємодія з мережею, оскільки трафік із вищим пріоритетом передається з

мінімальними затримками та зазнає меншого впливу з боку другорядних потоків даних. Окрім цього, механізми QoS забезпечують стабільне функціонування програмних сервісів за умов мережевих коливань, зокрема шляхом зменшення джитера — нерівномірності часових інтервалів між послідовними пакетами, що істотно підвищує якість і продуктивність застосунків.

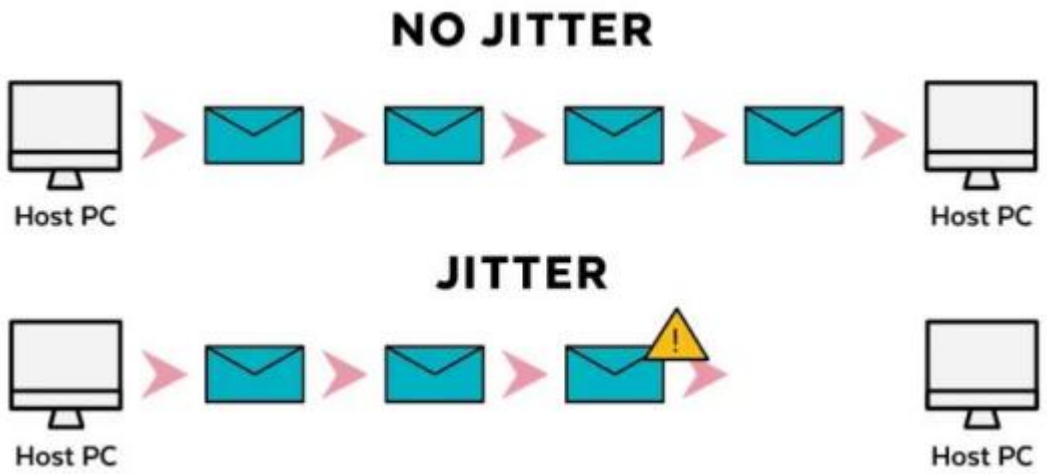

Рис. 3.6. Нерівномірність часових інтервалів між послідовними пакетами даних під час їх передавання мережею

Запобігання втрати даних належить до визначальних переваг упровадження механізмів Quality of Service, оскільки коректна конфігурація якості обслуговування забезпечує мінімізацію часу доставлення інформації, зниження ймовірності втрати пакетів і стабільну, прогнозовану роботу мережевих застосунків, зокрема сервісів, критично важливих для бізнесу. Використання QoS сприяє підвищенню продуктивності корпоративних мереж, покращенню якості VoIP-з’єднань, відеоконференцій і потокового відео, а також може позитивно впливати на рівень мережевої безпеки завдяки механізмам класифікації та пріоритезації трафіку. Водночас у бездротових мережах ключовим чинником є радіоканал, параметри якого істотно визначають якість передавання даних. Радіорелейні системи зв’язку, завдяки економічній доцільності, швидкому розгортанню, ефективності в складних умовах експлуатації та високим показникам якості передавання, широко

застосовуються в локальних, регіональних і глобальних мережах, виступаючи конкурентоспроможною альтернативою дротовим і волоконно-оптичним лініям зв’язку.

Ефективність функціонування радіорелейного прольоту визначається сукупністю ключових параметрів, зокрема вихідною потужністю передавача, типом застосовуваної модуляції, рівнем прийнятого сигналу, швидкістю передавання даних і протяжністю радіорелейної лінії. Подальший аналіз принципів побудови радіорелейних систем виконуватиметься на прикладі обладнання компанії Ericsson.

Радіоканал є повнодуплексною системою радіопередавання фізичного рівня, призначеною для реалізації з’єднання типу «точка–точка» між двома радіостанціями в телекомунікаційній мережі. Окрему ділянку такої радіорелейної лінії зазвичай позначають терміном *hop*. На рисунку 3.9 подано узагальнену структурну схему радіоканалу, яка демонструє принцип організації зв’язку між вузлами радіорелейної лінії зв’язку.

Дві граничні точки радіорелейного з’єднання визначаються як термінали радіолінії (Radio Link Terminals, RLT). Кожен термінал RLT забезпечує взаємодію як з інфраструктурою оператора зв’язку, так і з WAN-інтерфейсом комутатора за допомогою відповідних інтерфейсів підключення.

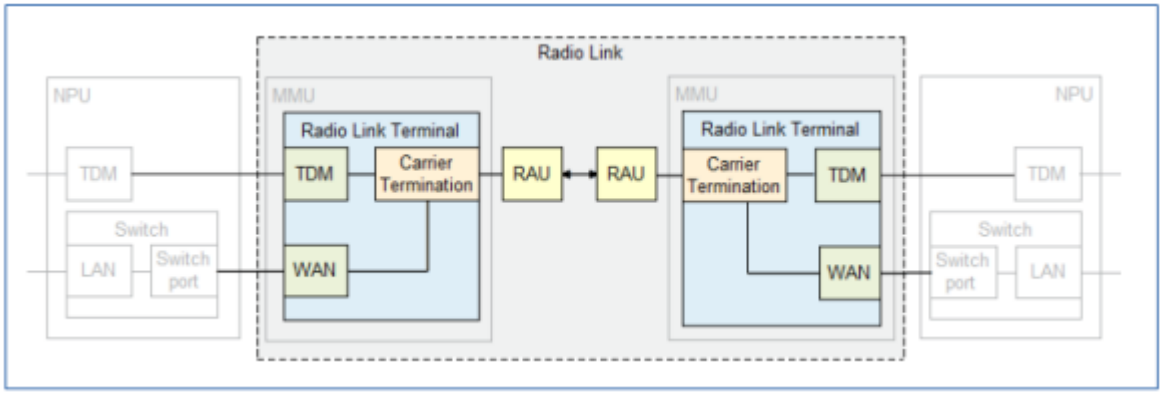

Рис. 3.7. Схема радіорелейної лінії зв’язку

• Термінація несучої (Carrier Termination, CT) являє собою інтерфейс, призначений для організації підключення до мережі оператора зв’язку. У

процесі конфігурування цей інтерфейс має бути інтегрований до складу відповідного термінала радіолінії (RLT) як його невід'ємний функціональний елемент.

• WAN-інтерфейс радіолінії (RL WAN) є мережевим інтерфейсом, призначеним для з'єднання з портом комутатора, при цьому він автоматично пов'язується з відповідним терміналом радіолінії, забезпечуючи коректну мережеву взаємодію.

Кожному терміналу радіолінії (RLT) може надаватися унікальний ідентифікаційний параметр, що застосовується для перевірки правильності встановлення з'єднання між відповідними RLT, розташованими на протилежних кінцях радіорелейної лінії. У випадку виявлення невідповідності ідентифікаторів система автоматично переводить термінал у неактивний стан та ініціює формування аварійного повідомлення.

З метою реалізації повнодуплексного режиму функціонування радіоканал забезпечує одночасне передавання та приймання сигналів із використанням різних несучих частот. Несуча визначається як модульована електромагнітна хвиля, характеристики якої задаються робочою частотою, міжканальним інтервалом і типом поляризації. Кожна несуча має дві крайові точки, що ідентифікуються як термінали несучої (Carrier Termination, CT). Термінація несучої є складовою частиною термінала радіолінії (RLT) та може застосовуватися у складних архітектурах побудови радіорелейних з'єднань, зокрема в схемах резервування та механізмах захисту каналу зв'язку.

Система застосовує ідентифікатор кінцевої точки оператора з метою верифікації коректності підключення до відповідної термінації несучої (CT) на віддаленому кінці радіорелейної лінії. Для забезпечення належного функціонування з'єднання ідентифікаційні параметри на обох кінцях несучої повинні бути ідентичними.

Окрім цього, параметри ідентифікації кадру, а також налаштований діапазон адаптивного кодування і модуляції (Adaptive Coding and Modulation, ACM) мають бути узгоджені та встановлені однаковими для обох термінацій несучої (CT), що входять до складу однієї несучої. Для пари термінацій несучої

в межах одного радіоканалу застосовується визначений набір конфігураційних правил, спрямованих на забезпечення коректної та стабільної роботи радіорелейного з’єднання.

1. Значення параметра ідентифікації кадру повинно збігатися на обох кінцях радіорелейного каналу.

2. Параметр ідентифікації кадру задає версію структури кадру, ширину міжканального інтервалу та допустимі межі використання адаптивного кодування і модуляції (Adaptive Coding and Modulation, ACM).

3. Нижня межа рівня модуляції має бути однаковою для кожної з термінацій несучої.

4. Верхня межа рівня модуляції також повинна бути встановлена ідентично на обох термінаціях несучої.

5. Мінімально допустимий рівень модуляції не може перевищувати максимального встановленого рівня.

6. За умови, що мінімальний рівень модуляції є меншим за максимальний, робота радіоканалу здійснюється з використанням механізму адаптивного кодування та модуляції (АСМ).

7. За умови, що мінімальний рівень модуляції є меншим за максимальний, робота радіоканалу здійснюється з використанням механізму адаптивного кодування та модуляції (АСМ).

Вихідний рівень потужності передавача встановлюється шляхом задання мінімальних і максимальних значень потужності для обох термінацій несучої, що функціонують у межах одного радіоканалу.

Встановлення вихідної потужності передавача здійснюється шляхом задання мінімально допустимого та максимально можливого рівнів потужності для двох термінацій несучої, що належать до одного радіоканалу.

Дотримується правило, згідно з яким мінімально встановлений рівень вихідної потужності передавача не може бути більшим за максимально допустиме значення.

У випадку конфігурування радіоканалу в режим автоматичного керування потужністю передавання (Automatic Transmit Power Control, ATPC)

фактичне значення вихідної потужності динамічно коригується в межах встановлених мінімальних і максимальних обмежень залежно від виміряного рівня прийнятого сигналу на радіотерміналі протилежного кінця з'єднання. Регулювання реалізується шляхом задання цільового рівня вхідної потужності на приймальній стороні, що дозволяє забезпечити стабільне функціонування радіорелейної лінії за умов змінних характеристик каналу.

Радіоканал експлуатується у дуплексному режимі з частотним поділом (Frequency Division Duplex, FDD), за якого передавання та приймання інформаційних сигналів здійснюються з використанням різних несучих частот. При цьому всі задані робочі частоти повинні знаходитися в межах частотного спектра, який підтримується відповідним апаратним забезпеченням.

Підтримуваний частотний діапазон встановлює нижню та верхню граничні частоти, в межах яких допускається функціонування обладнання. Відповідно, вибір несучої частоти повинен здійснюватися з урахуванням міжканального інтервалу (Channel Spacing, CS), визначеного обраним форматом кадру, та передбачати її зміщення не менше ніж на половину значення CS від мінімальної і максимальної меж частотного діапазону.

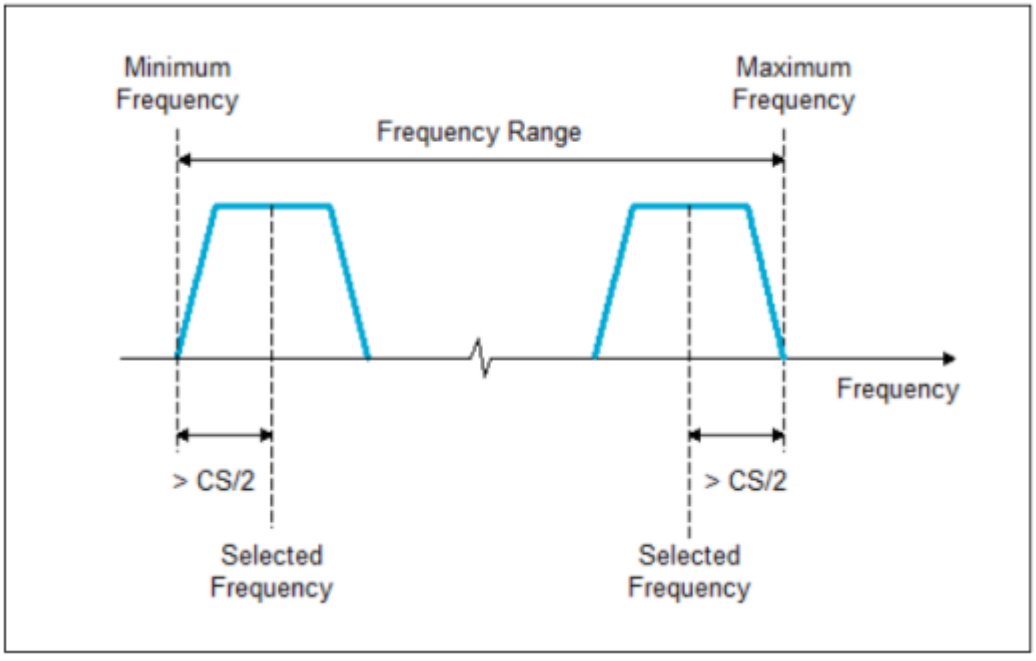

Рис. 3.8. Діапазон частотних значень.

Режим радіозв’язку 2+0 Radio Link Bonding (RLB) реалізується шляхом використання двох термінацій несучої (CT), підключених до одного термінала радіолінії (RLT). За такої конфігурації інформаційний трафік агрегується та передається через два паралельні радіоканали, які функціонують на різних несучих частотах за умови застосування єдиного формату кадру.

Модемний модуль, оснащений підтримкою подвійної несучої (Modem Multiplexing Unit, MMU), забезпечує експлуатацію одного термінала радіолінії (RLT) у конфігурації 2+0, що дозволяє збільшити сумарну пропускну здатність радіорелейного інтервалу без застосування схем резервування.

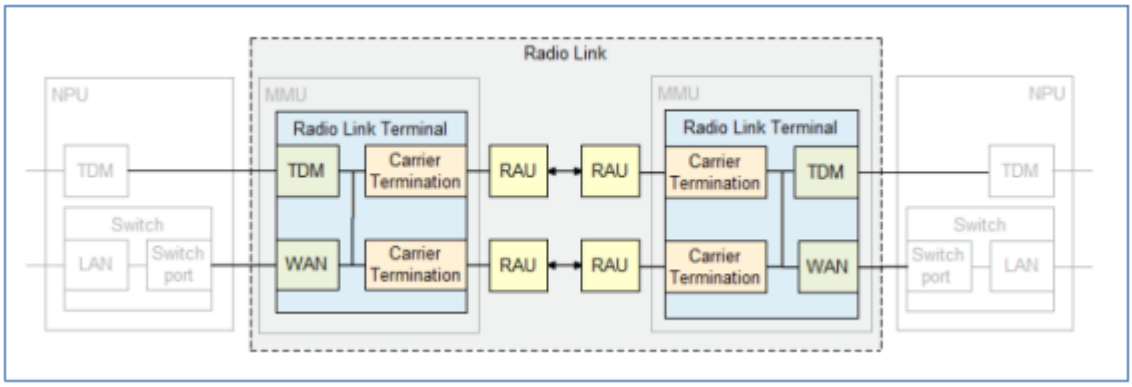

Рис. 3.9. Конфігурація радіоканалу типу 2+0 Radio Link Bonding (RLB)

Технологія спільного каналу з подвійною поляризацією (Co-Channel Dual Polarization, CCDP) забезпечує організацію двох паралельних каналів передавання даних у межах одного радіорелейного з’єднання, що приводить до фактичного подвоєння пропускної здатності порівняно з традиційним радіоканалом. За цієї реалізації два радіосигнали передаються на одній робочій частоті із застосуванням взаємно ортогональних видів поляризації з використанням антени з подвійною поляризацією.

Водночас явище перехресної поляризації може спричиняти взаємні завади між каналами та зниження якості передавання трафіку. З метою компенсації цього впливу застосовується пристрій усунення перехресної поляризаційної інтерференції — XPIC (Cross Polarization Interference Canceller), який здійснює цифрову обробку та комбінування сигналів із двох каналів для відновлення

вихідних інформаційних потоків. При цьому слід підкреслити, що XPIC не є механізмом резервування або захисту радіорелейного з'єднання.

Побудова радіорелейної лінії з використанням технології XPIC передбачає задіяння двох модемних блоків, оснащених двома несучими та підтримкою функції XPIC, чотирьох радіомодулів, а також двох інтегрованих антен з подвійною поляризацією, встановлених на обох кінцях радіорелейного з'єднання. У межах такої архітектури допускається застосування механізму адаптивного кодування та модуляції (Adaptive Coding and Modulation, ACM) з метою підвищення ефективності передавання інформації.

Wi-Fi є бездротовою технологією доступу до мережі Інтернет, що забезпечує підключення широкого кола електронних пристроїв без застосування фізичних кабельних з'єднань. Зазначена технологія ототожнюється з бездротовими локальними мережами (Wireless Local Area Networks, WLAN) і базується на сімействі стандартів IEEE 802.11, які регламентують принципи їх функціонування в установлених частотних діапазонах.

Технологія Wi-Fi надає можливість одночасного підключення декількох користувачів до мережі, у зв'язку з чим бездротові точки доступу набули широкого поширення в громадських просторах, зокрема в закладах громадського харчування, готелях, аеропортах та на залізничних вокзалах, переважно з безоплатним доступом. Назва Wi-Fi є зареєстрованим торговельним брендом, який у повсякденному вжитку часто інтерпретують як скорочення від Wireless Fidelity, хоча початково вона використовувалася для позначення технології IEEE 802.11b Direct Sequence.

Передавання інформації між пристроями в мережах Wi-Fi реалізується за рахунок випромінювання та приймання радіохвиль, які є різновидом електромагнітних хвиль поряд із видимим світлом, інфрачервоним, ультрафіолетовим і рентгенівським випромінюванням.

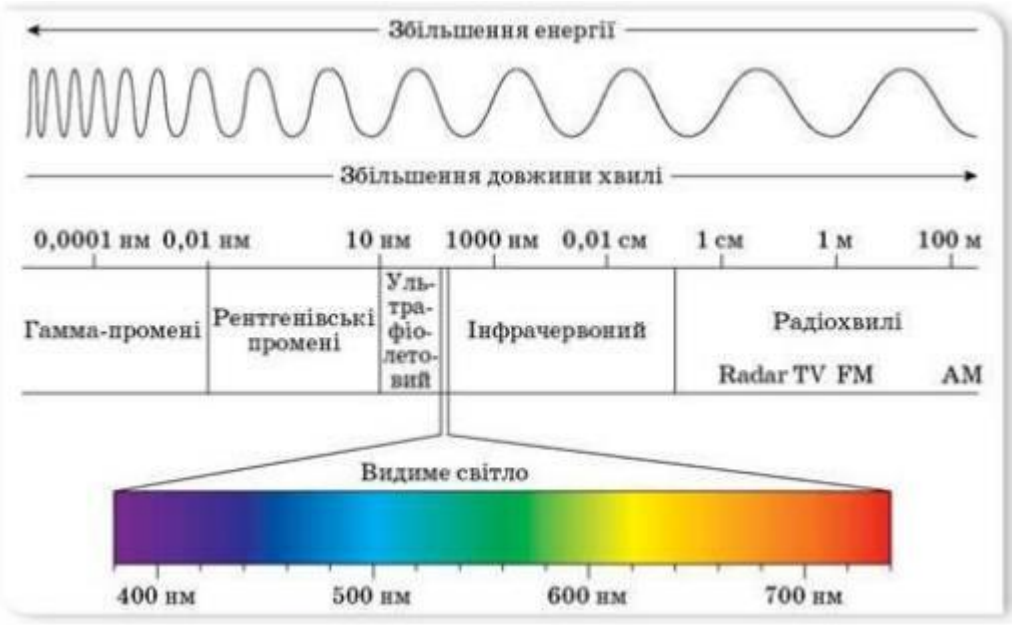

Рис. 3.10. Сукупність усіх різновидів електромагнітного випромінювання, систематизованих за значенням частоти або довжини хвилі

Маршрутизатор Wi-Fi здійснює приймання інформації з телефонної або кабельної лінії зв’язку, до якої він під’єднаний, після чого виконує її оброблення та перетворення у радіочастотні сигнали. Надалі ці сигнали передаються в установленому частотному діапазоні для забезпечення бездротового обміну даними.

Радіочастотні сигнали, що передаються маршрутизатором, сприймаються розташованими поблизу кінцевими пристроями, зокрема ноутбуками та смартфонами, обладнаними бездротовими мережевими адаптерами. Зазначені адаптери за допомогою вбудованих антен здійснюють перетворення інформації, сформованої користувачем, у радіосигнали, призначені для подальшого передавання каналами бездротового зв’язку.

Маршрутизатор здійснює приймання радіочастотних сигналів, переданих кінцевим пристроєм, після чого виконує їх декодування з подальшим перетворенням у цифрову форму та передаванням у мережу Інтернет за допомогою дротового Ethernet-з’єднання. Аналогічна послідовність операцій реалізується і в зворотному напрямку під час надходження даних із глобальної мережі.

Незважаючи на те, що наведений процес може сприйматися як тривалий, у реальних умовах усі відповідні операції здійснюються протягом надзвичайно короткого проміжку часу. Це пояснюється високою швидкістю поширення радіохвиль, які, подібно до інших видів електромагнітного випромінювання, розповсюджуються зі швидкістю світла.

Стандарт 802.11 входить до сукупності специфікацій, створених організацією Institute of Electrical and Electronics Engineers і призначених для реалізації технологій бездротових локальних мереж. У межах цього стандарту встановлюються засади функціонування бездротового інтерфейсу як між клієнтським пристроєм і базовою станцією, так і між двома бездротовими клієнтами при прямій взаємодії. Специфікацію IEEE 802.11 було офіційно затверджено у 1997 році, після чого вона зазнала подальшого розвитку шляхом впровадження численних доповнень і змін, що в сукупності сформували сімейство стандартів 802.11.

Сімейство стандартів IEEE 802.11, створене організацією Institute of Electrical and Electronics Engineers, об’єднує низку нормативних специфікацій, що регламентують функціонування бездротових локальних мереж. До основних із них належать такі:

-IEEE 802.11 — первинна версія стандарту, яка забезпечує передавання даних зі швидкістю до 2 Мбіт/с у частотному діапазоні 2,4 ГГц та була затверджена у 1997 році;

-IEEE 802.11b — специфікація бездротового зв’язку в діапазоні 2,4 ГГц, що підтримує швидкість передавання даних до 11 Мбіт/с і була прийнята у 1999 році;

-EEE 802.11g — удосконалений стандарт для діапазону 2,4 ГГц, який забезпечує швидкість передавання інформації до 54 Мбіт/с; затверджений у 2003 році;

-IEEE 802.11f — специфікація протоколу IAPP (Inter-Access Point Protocol), що визначає правила взаємодії між точками доступу в межах бездротової мережі; прийнята у 2003 році;

-IEEE 802.11h — доповнення, яке встановлює вимоги до використання частотного спектра 5 ГГц у європейських країнах; затверджене у 2003 році;

-IEEE 802.11i — стандарт, спрямований на підвищення рівня інформаційної безпеки шляхом упровадження розширених механізмів шифрування та захисту даних; прийнятий у 2004 році [9].

У цілому стандарти IEEE 802.11 регламентують роботу двох нижніх рівнів мережевої моделі, а саме рівня керування доступом до середовища передавання даних (MAC) та фізичного рівня (PHY).

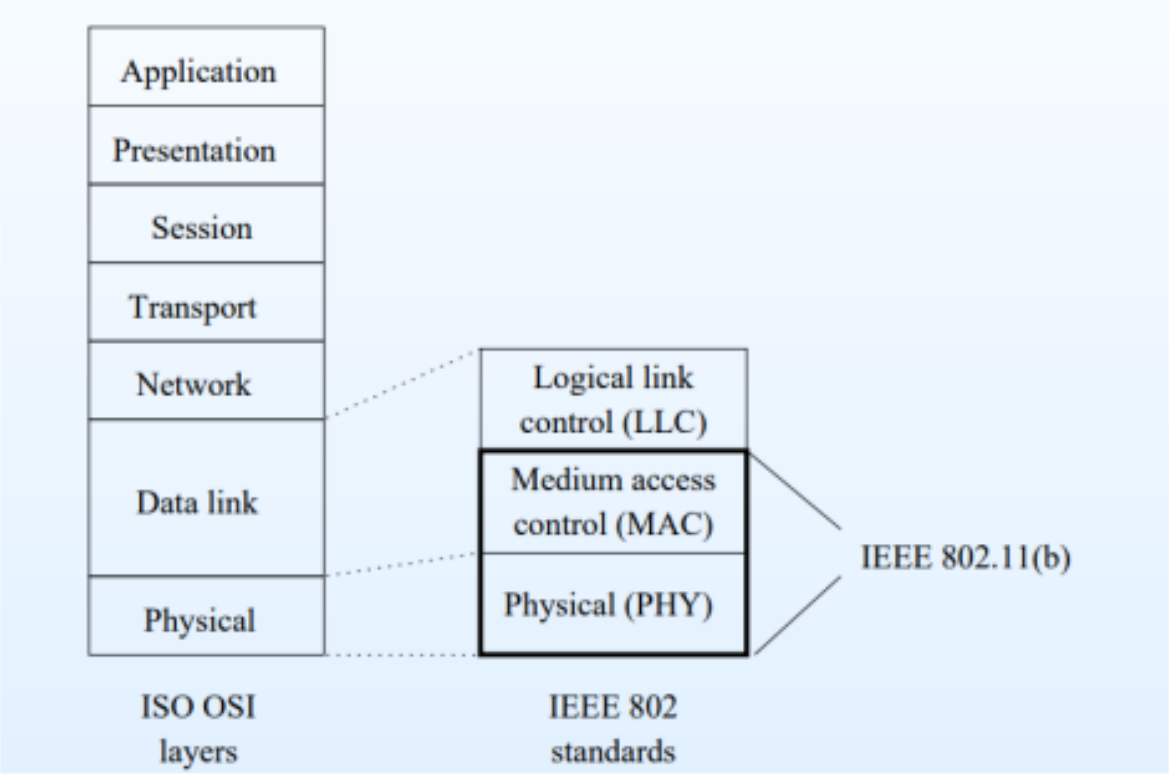

Рис. 3.11. Взаємозв’язок стандартів IEEE 802.11 із фізичним (PHY) та канальним (MAC) рівнями еталонної моделі OSI

Як показано в таблиці 3.1, згідно з результатами виконаних теоретичних розрахунків, за умови коректного налаштування зазначеної радіорелейної лінії прогнозується досягнення рівня прийнятого сигналу на приймальному боці приблизно −55,76 дБм [1].

Таблиця 3.1

Розрахункові величини ключових параметрів, визначені в ході проведеного аналізу.

Sob-Dorogozh					
Sob30A (1)			(2) **Dorogozhychi_vyshka**		
Latitude	50.439848	°	Latitude	50.471444	°
Longitude	30.609428	°	Longitude	30.453398	°
Ground elevation	97.8	m	Ground elevation	199.2	m
Antenna height	45.0	m	Antenna height	200.0	m
Azimuth	287.70 TN | 279.79 MG	°	Azimuth	107.58 TN | 99.69 MG	°
Tilt	1.21	°	Tilt	-1.32	°

Radio system			Propagation		
TX power	30.00	dBm	Free space loss	128.80	dB
TX line loss	3.00	dB	Obstruction loss	0.86	dB
TX antenna gain	27.00	dBi	Forest loss	0.00	dB
RX antenna gain	27.00	dBi	Urban loss	0.00	dB
RX line loss	0.50	dB	Statistical loss	6.60	dB
RX sensitivity	-87.00	dBm	Total path loss	136.26	dB

Performance		
Distance	11.591	km
Precision	10.0	m
Frequency	5700.000	MHz
Equivalent Isotropically Radiated Power	251.189	W
System gain	167.50	dB
Required reliability	70.000	%
Received Signal	-55.76	dBm
Received Signal	364.66	µV
Fade Margin	31.24	dB

3.4. Порівняльний аналіз відмінностей між експериментальною та реальною системами високоякісного відеопередавання

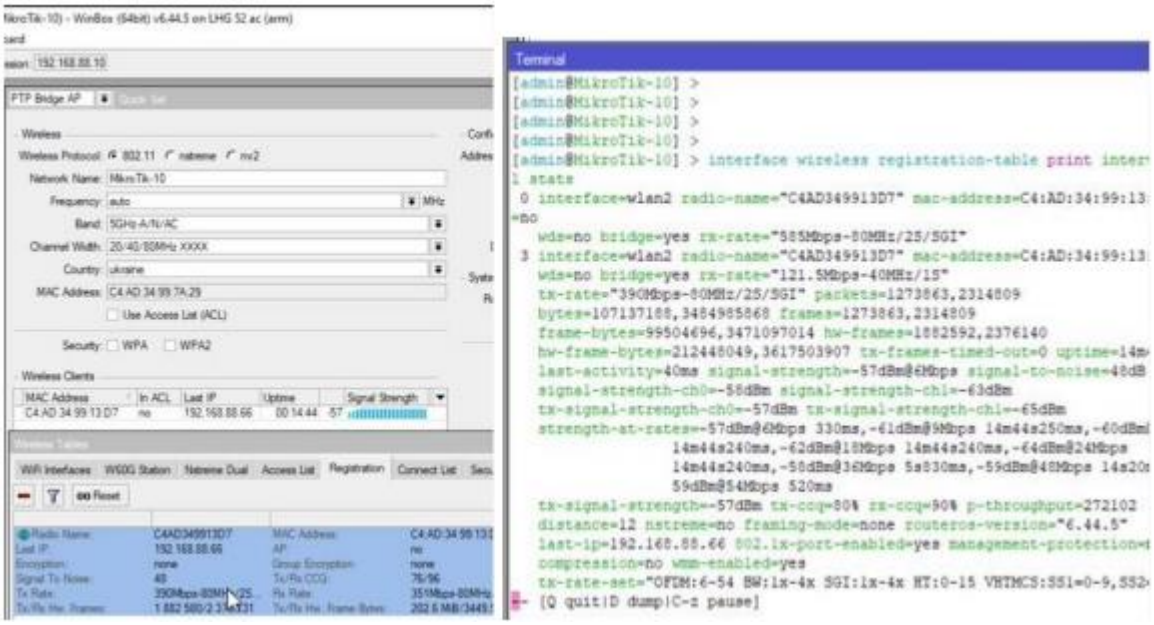

Рис. 3.12. Інтерфейс керування приймально-передавальним обладнанням Mikrotik

Як засвідчують дані, наведені на рисунку 3.12, максимальне експериментально зафіксоване значення рівня прийнятого сигналу становить −57 дБм, тоді як розрахункове теоретичне значення дорівнює −56 дБм. Отже, отримані результати теоретичного аналізу перебувають у добрій відповідності з експериментальними вимірюваннями, що підтверджує достовірність оцінювання основних характеристик радіоканалу зв’язку [1].

Результати випробувань швидкості передавання даних радіорелейною лінією за різними протоколами свідчать, що під час проведення вимірювань із використанням протоколу TCP було зафіксовано симетричний режим обміну інформацією в прямому та зворотному напрямках. При цьому швидкість передавання даних становила 55 Мбіт/с у кожному з напрямків.

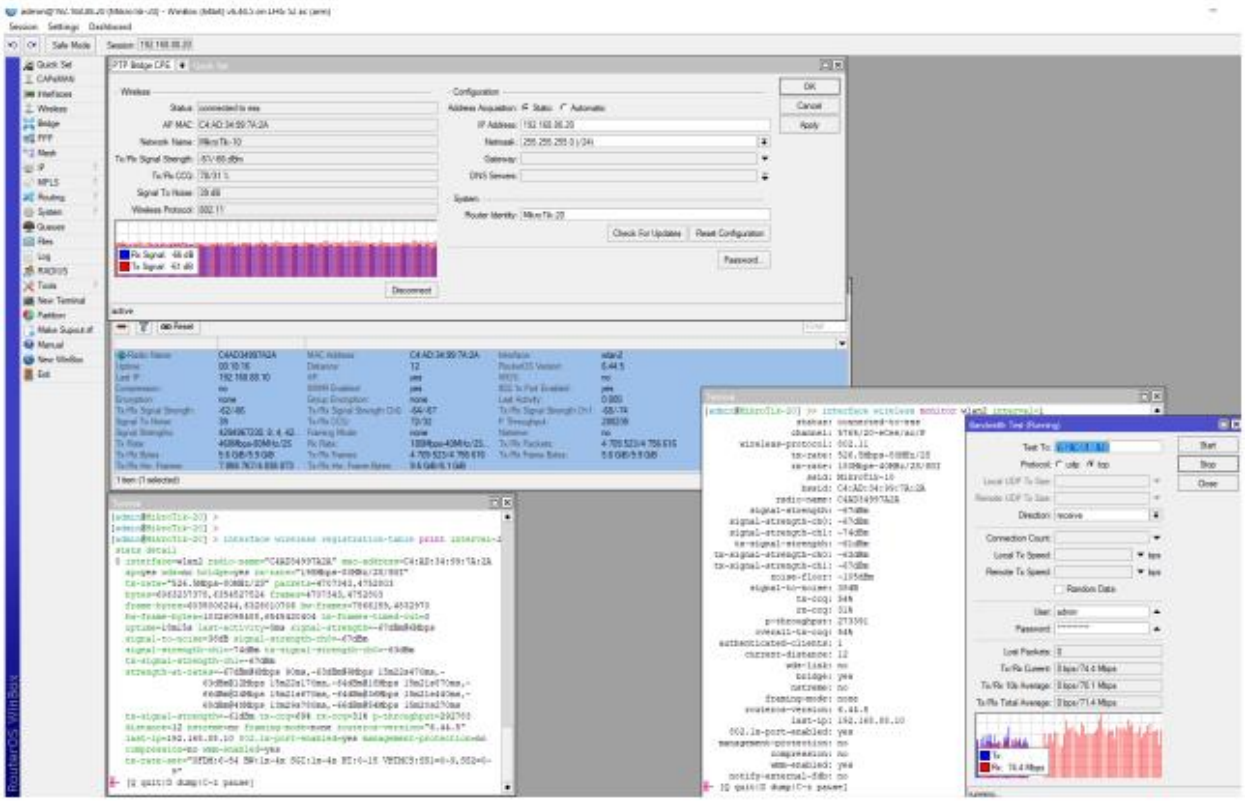

Рис. 3.13. Результати однобічного тестування пропускної здатності радіорелейної лінії, зокрема значення швидкості передавання даних при використанні протоколу TCP, а також основні параметри, що характеризують поточний стан радіоканалу зв’язку

За підсумками одностороннього випробування пропускної здатності радіорелейної лінії з використанням протоколу TCP у напрямку від сайту А до сайту Б було забезпечено швидкість передавання даних на рівні 150 Мбіт/с.

1. За підсумками виконаних випробувань було здійснено налаштування та успішну реалізацію з’єднання типу «точка–точка», а також проведено дослідження параметрів каналу зв’язку, побудованого на основі цифрової радіорелейної лінії стандартів IEEE 802.11 із застосуванням обладнання виробника Mikrotik. Варто зауважити, що бездротові системи стандартів IEEE 802.11 у типовому випадку призначені для побудови мереж типу «точка–багатоточка» з локальним всеспрямованим покриттям радіусом до кількох сотень метрів. Водночас у межах даного експерименту було практично підтверджено можливість використання обладнання стандартів IEEE 802.11 для організації радіорелейного з’єднання типу «точка–точка» на відстанях, що

перевищують 10 км, що свідчить про практичну доцільність та ефективність такого рішення [1]

2. У польових умовах було виконано експериментальне дослідження та вимірювання параметрів каналу зв’язку із застосуванням приймально-передавального обладнання стандартів IEEE 802.11, зокрема пристрою Mikrotik LHG XL 52 ac, у конфігурації з’єднання типу «точка–точка». Протяжність радіорелейної траси складала 12 км, що не перевищує максимальну дальність у 40 км, заявлену в технічній документації виробника. Випробування проводилися в діапазоні несучих частот 5 ГГц, а саме: 5150–5250 МГц з вихідною потужністю 23 дБм, 5250–5350 МГц — 20 дБм та 5470–5725 МГц — 27 дБм. За підсумками експерименту здійснено зіставлення результатів теоретичних розрахунків із даними практичних вимірювань характеристик радіорелейної траси, що дало змогу оцінити ступінь відповідності розрахункових моделей реальним умовам експлуатації.

3. Із використанням інструменту математичного моделювання було здійснено оцінювання траси радіорелейної лінії зв’язку та її ключових параметрів з урахуванням технічних характеристик задіяного обладнання і географічних координат вузлів РРЛ. Сумарна протяжність досліджуваної траси становила 11,82 км.

Дослідження профілю траси радіорелейної лінії з урахуванням зон Френеля засвідчило відсутність об’єктів, здатних спричиняти екранування або інші обмеження поширення електромагнітної хвилі між вузлами РРЛ. У межах аналізу також подано результати теоретичного визначення параметрів радіорелейної лінії, отримані на основі технічних характеристик використовуваного обладнання, параметрів антенних систем, географічного розташування вузлів, висоти встановлення приймально-передавальних антен, робочої несучої частоти та інших істотних чинників. Згідно з результатами виконаних розрахунків прогнозований рівень сигналу на приймальній стороні має становити −55,76 дБм.

4. Після проведення юстування антенних систем максимальне експериментально зафіксоване значення рівня сигналу на приймальній стороні

радіорелейної лінії склало −57 дБм. Отже, отримані експериментальні дані перебувають у відповідності з результатами теоретичних розрахунків параметрів радіоканалу, що підтверджує достовірність виконаної теоретичної оцінки та коректність застосованої математичної моделі.

5. У процесі експериментальних випробувань у двосторонньому режимі обміну даними за протоколом TCP було забезпечено симетричну швидкість передавання, яка становила 55 Мбіт/с у кожному з напрямків. Водночас результати однобічних вимірювань показали, що під час передавання даних від сайту А до сайту Б досягнута швидкість складала 75 Мбіт/с, тоді як у протилежному напрямку — від сайту Б до сайту А — за аналогічних умов фіксувалося зростання швидкості передавання до 150 Мбіт/с.

Зафіксована асиметрія пропускної здатності зумовлена встановленими параметрами максимальної вихідної потужності передавальних модулів, а також обраними сигнально-кодовими схемами та шириною використовуваного частотного каналу, які безпосередньо визначають гранично досяжну швидкість передавання даних.

Передавання інформації за протоколом UDP як у двосторонньому режимі, так і при односторонніх сеансах зв’язку за аналогічних умов, не забезпечило стабільної роботи каналу: фіксувалися переривання трафіку та нестійкість з’єднання. У зв’язку з цим застосування протоколу UDP в межах досліджуваної конфігурації радіорелейної лінії для передавання даних будь-якого типу слід вважати неефективним.

6. У ході проведення випробувань автоматичний перехід на резервну несучу частоту 2,4 ГГц не був зафіксований. Варто зазначити, що в обладнанні Mikrotik даної моделі відсутня можливість примусового керування переходом з основної робочої частоти 5 ГГц на резервну 2,4 ГГц. Передбачено лише автоматизований механізм перемикання, який здійснюється без участі оператора та визначається поточними умовами функціонування радіоканалу.

7. міна орієнтації спрямованої антени на 90° не мала суттєвого впливу на досягнуту швидкість передавання інформації.

8. Отже, результати виконаних експериментальних досліджень засвідчили, що використання стандартів IEEE 802.11 для організації бездротового зв’язку є доцільним не лише під час створення ефективних мереж типу «точка–багатоточка», а й для реалізації надійних радіорелейних каналів зв’язку типу «точка–точка».

3.5 Висновок до розділу 3

У третьому розділі роботи проаналізовано склад і принципи побудови розробленої системи передавання високоякісного відеосигналу, подано результати теоретичних розрахунків та експериментальних випробувань, а також виконано їх зіставлення. У межах дослідження застосовано обладнання Mikrotik LHG XL 52 ac, при цьому загальна вартість створеної системи становила близько 2500 доларів США. Обґрунтовано, що безпілотні літальні апарати можуть ефективно використовуватися як повітряні платформи для підвищення надійності та пропускної здатності систем зв’язку, відеоспостереження і ретрансляції даних. Оцінювання радіорелейної траси протяжністю 11,82 км засвідчило відсутність перешкод у зоні Френеля, а результати експериментальних вимірювань рівня прийнятого сигналу (−57 дБм) перебувають у відповідності з даними теоретичних розрахунків. Під час випробувань було забезпечено стабільну швидкість передавання даних за протоколом TCP до 55 Мбіт/с, тоді як застосування протоколу UDP виявилося нестійким і недоцільним для досліджуваної конфігурації системи.

РОЗДІЛ 4
ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1. Питання щодо охорони праці

Насамперед доцільно визначити зміст понять «нещасний випадок» та «травма», оскільки їх чітке розуміння є необхідним для подальшого аналізу психологічних причин нещасних випадків і виробничого травматизму. Основні визначення зазначених термінів наведено у навчальній літературі [10–11].

Поняття нещасного випадку ґрунтується на категоріях безпеки, ризику та випадковості. Нещасний випадок слід розглядати як раптову, непередбачувану подію, що спричиняє негативні наслідки для життя, здоров’я або майнового стану людини.

Нещасні випадки підлягають класифікації за різними ознаками залежно від умов та характеру їх виникнення. Зокрема, за походженням їх поділяють на природні, пов’язані з дією природних явищ і катастроф; транспортні, що включають дорожньо-транспортні та авіаційні аварії; промислові, які виникають унаслідок вибухів, пожеж або аварій на виробництві; а також побутові, до яких належать падіння з висоти, отруєння та інші подібні події.

Травма розглядається як фізичне або психологічне ушкодження організму, що виникає в результаті нещасного випадку чи насильницьких дій та може спричиняти негативні наслідки для фізичного і психічного стану людини.

Залежно від характеру ураження травми поділяються на фізичні та психологічні. До фізичних травм належать тілесні ушкодження, зокрема порізи, переломи, опіки та інші подібні пошкодження. Психологічні травми пов’язані з емоційними та психічними наслідками пережитих нещасних випадків і можуть проявлятися у вигляді посттравматичного стресового розладу, підвищеної тривожності, депресивних станів тощо.

Водночас нещасні випадки не завжди мають суто випадковий характер, оскільки психологічні чинники можуть суттєво впливати на ймовірність їх виникнення. У межах даного розділу розглядається вплив окремих

психологічних факторів на поведінку людини та особливості її реакцій у небезпечних ситуаціях.

Недбалість у діяльності людини може виникати внаслідок дії таких чинників, як відволікання, перевтома, невпевненість у власних діях або недостатній рівень зосередженості на питаннях безпеки. Психологічні особливості, зокрема нестійкість уваги, відсутність системності в діях та низький рівень усвідомлення небезпеки, здатні підвищувати ймовірність необережної поведінки та, як наслідок, сприяти виникненню нещасних випадків.

Дефіцит уваги ускладнює адекватне сприйняття навколишнього середовища та своєчасне виявлення потенційних загроз. У результаті недостатня зосередженість може призводити до помилкових дій, прийняття необґрунтованих рішень і підвищення ризику настання нещасних випадків.

Стресові стани здатні суттєво впливати на здатність людини до зосередженого сприйняття та обробки інформації. Підвищений рівень стресу призводить до зниження концентрації уваги та уповільнення або порушення швидкості реакцій, що, у свою чергу, підвищує вразливість людини до виникнення нещасних випадків.

Емоційний стан також визначає характер поведінкових реакцій у ситуаціях небезпеки. Такі емоції, як паніка, страх або агресія, можуть зумовлювати неадекватні дії чи схильність до необґрунтованого ризику, що значно підвищує ймовірність настання нещасних випадків.

Недостатній рівень досвіду та брак необхідних практичних навичок можуть зумовлювати помилкові дії й незнання ефективних заходів безпеки. Належна підготовка є особливо важливою в умовах, що потребують оперативного реагування, оскільки її відсутність підвищує вразливість людини до настання нещасних випадків.

Водночас систематичне навчання та професійна підготовка сприяють формуванню здатності своєчасно виявляти небезпеки, адекватно оцінювати ризики та уникати потенційно небезпечних ситуацій. Чим вищим є рівень знань

і навичок у сфері безпеки, тим нижчою є ймовірність виникнення нещасних випадків.

Травматичні ушкодження можуть зумовлюватися не лише фізичними, а й психологічними чинниками. У даному розділі розглядається вплив психологічних факторів на виникнення травматичних подій, а також аналізуються їх можливі наслідки для психічного та емоційного стану людини.

Стресогенні обставини, зокрема природні катастрофи, конфліктні ситуації, насильницькі дії або інші травматичні події життєвого характеру, здатні суттєво підвищувати ризик виникнення травм. Підвищений рівень стресу негативно впливає на здатність до раціонального мислення та прийняття виважених рішень, що, у свою чергу, збільшує ймовірність потрапляння людини в травмонебезпечні ситуації.

Інтенсивні стресові події можуть спричиняти довготривалі психологічні наслідки, зокрема розвиток посттравматичного стресового розладу, підвищену тривожність, депресивні стани, порушення сну та інші розлади психічної діяльності. Подібні наслідки нерідко мають виражений характер і істотно погіршують якість життя та повсякденне функціонування осіб, які зазнали травматичного впливу.

Небезпечні або насильницькі міжособистісні взаємини, зокрема випадки домашнього насильства чи злочинної діяльності, можуть призводити до тяжких травматичних наслідків. Водночас психологічні чинники, такі як занижена самооцінка, почуття безпорадності або емоційна залежність від кривдника, здатні утримувати постраждалих у деструктивних відносинах, що додатково підвищує ризик психологічного та фізичного травматизму.

Психічні розлади, зокрема афективні порушення, розлади особистості або зловживання психоактивними речовинами, здатні підвищувати ймовірність потрапляння людини в травмонебезпечні ситуації. Такі стани негативно впливають на когнітивні та емоційні процеси, а також на механізми прийняття рішень, знижуючи здатність до самоконтролю, самозбереження та своєчасного уникнення небезпек.

До поведінкових чинників психологічного характеру, пов’язаних із травматизмом, належать зловживання алкоголем і наркотичними речовинами, а також схильність до ризикованої поведінки, зокрема небезпечного керування транспортними засобами. Зазначені фактори призводять до погіршення уваги, координації рухів і швидкості реакцій, що суттєво підвищує ризик виникнення травматичних ситуацій.

Окремі особистісні характеристики, зокрема емоційна нестабільність, занижена самооцінка або схильність до пошуку нових і ризикованих вражень, можуть підвищувати ймовірність потрапляння людини в травмонебезпечні ситуації. Психологічна налаштованість впливає на сприйняття та оцінювання рівня ризику, а також визначає характер поведінкових реакцій у потенційно небезпечних умовах.

ідсумовуючи викладене, можна зазначити, що психологічні причини нещасних випадків і травматизму мають багатофакторний характер і формуються внаслідок взаємодії різних чинників. До основних з них належать:

- Поведінкові фактори;
- Емоційні стани;
- Недостатній рівень досвіду та професійної підготовки;
- Психосоціальні фактори.

З урахуванням наведених чинників актуальним є формування свідомого ставлення до безпеки та підвищення рівня психологічної грамотності населення. Досягнення цієї мети можливе шляхом упровадження освітніх програм, тренінгів і навчальних заходів, спрямованих на засвоєння психологічних аспектів безпечної поведінки та усвідомлення потенційних ризиків.

Використання психологічних підходів у превентивних програмах і комплексах заходів з безпеки здатне сприяти зменшенню частоти нещасних випадків і рівня травматизму.

4.2. Питання щодо безпеки в надзвичайних ситуаціях

Загальні вимоги безпеки до виробничого обладнання та технологічних процесів є невід'ємною складовою процесу розроблення друкованих плат і спрямовані на забезпечення безпечних та ефективних умов виробництва, запобігання аварійним ситуаціям і нещасним випадкам, а також на дотримання встановлених стандартів якості та норм безпеки [11–12].

Виконання зазначених вимог забезпечує захист працівників, збереження виробничого обладнання та виготовлення продукції належної якості й надійності. У подальшому розглядаються основні загальні вимоги безпеки, яких необхідно дотримуватися під час розроблення друкованих плат.

Оцінювання ризиків є початковим етапом формування вимог безпеки під час розроблення друкованих плат. На цьому етапі здійснюється виявлення потенційних небезпек, які можуть виникати в процесі експлуатації виробничого обладнання та реалізації технологічних операцій.

У ході аналізу ризиків необхідно враховувати ймовірність виникнення аварійних ситуацій, травматизму та негативного впливу на стан здоров'я працівників. Важливим є також визначення можливих наслідків і ступеня їх впливу на рівень безпеки та охорони праці персоналу.

У процесі оцінювання ризиків доцільно також враховувати вимоги чинних нормативно-правових актів, що регламентують виробництво радіоелектронної апаратури [13]. До аналізу включаються вимоги щодо використання засобів індивідуального захисту, дотримання правил експлуатації обладнання та виконання встановлених процедур безпеки.

Таким чином, оцінювання ризиків є обов'язковим етапом, який дає змогу своєчасно виявити потенційні небезпеки, що виникають у процесі розроблення друкованих плат, і вжити відповідних профілактичних заходів з метою запобігання аваріям, травматизму та забезпечення безпечних умов праці.

Важливим етапом формування вимог безпеки під час розроблення друкованих плат є створення безпечного виробничого середовища. Зазначений етап спрямований на забезпечення таких умов праці, які зменшують ризики для

персоналу та гарантують його безпеку під час експлуатації виробничого обладнання й виконання технологічних операцій.

Під час проєктування безпечного середовища необхідно враховувати комплекс чинників і дотримуватися вимог державних санітарних норм щодо рівнів шуму [14], локальної та загальної вібрації [15], а також параметрів мікроклімату виробничих приміщень [16].

Проєктування безпечного виробничого середовища спрямоване на формування умов праці, що гарантують безпеку персоналу під час експлуатації виробничого обладнання та виконання технологічних процесів. Це передбачає раціональну організацію робочих місць, впровадження технічних і організаційних систем безпеки, використання сертифікованого та безпечного обладнання, а також забезпечення належного рівня підготовки і навчання працівників.

Особливу увагу при розробленні друкованих плат необхідно приділяти безпеці електротехнічного обладнання, оскільки саме цей аспект є одним із ключових у системі охорони праці. Дотримання вимог електробезпеки спрямоване на запобігання ризикам ураження електричним струмом, виникненню пожеж та інших потенційно небезпечних ситуацій.

Під час проєктування системи безпеки електротехнічного обладнання необхідно враховувати низку ключових аспектів.

- Відповідність вимогам стандартів безпеки. Електротехнічне обладнання повинно відповідати положенням національних і міжнародних стандартів безпеки [17]. Це передбачає використання безпечних матеріалів, наявність належного електричного заземлення, застосування надійних захисних пристроїв, а також забезпечення достатнього рівня електричної ізоляції та інших технічних засобів захисту.
- Належна експлуатація та технічне обслуговування. Електротехнічне обладнання має встановлюватися, підключатися та експлуатуватися відповідно до вимог експлуатаційної документації і рекомендацій виробника. Проведення регулярних оглядів, планового технічного обслуговування та своєчасного

поточного ремонту забезпечує підтримання необхідного рівня безпеки обладнання.

- Захист від ураження електричним струмом. Електротехнічні пристрої повинні бути оснащені засобами захисту від електричного ураження, зокрема автоматичними вимикачами, системами заземлення, належною ізоляцією струмопровідних елементів та іншими технічними рішеннями, спрямованими на забезпечення безпеки персоналу.

- Інформаційні покажчики та попереджувальні знаки. Електротехнічне обладнання повинно бути забезпечене належним маркуванням і інформаційними позначеннями, що містять відомості про правила експлуатації, можливі ризики та заходи безпеки. Попереджувальні знаки мають бути чітко видимими, зрозумілими та доступними для сприйняття працівниками.

Безпека під час роботи з хімічними речовинами є одним із ключових аспектів при розробленні друкованих плат, оскільки на етапах їх виготовлення та оброблення можуть застосовуватися різноманітні хімічні матеріали. Дотримання встановлених правил і вимог безпеки дає змогу мінімізувати потенційні загрози, пов’язані з впливом хімічних речовин на здоров’я працівників і навколишнє середовище.

Під час роботи з хімічними речовинами необхідно враховувати низку важливих аспектів.

- Дотримання вимог безпеки. Перед використанням хімічних речовин слід ознайомитися з їх фізико-хімічними властивостями та потенційними небезпеками, а також визначити комплекс заходів безпеки, необхідних для їх правильного і безпечного застосування.

- Засоби індивідуального захисту. Працівники, які виконують роботи з хімічними речовинами, повинні бути забезпечені відповідними засобами індивідуального захисту, зокрема захисними окулярами, рукавицями, респіраторами або масками. Використання таких засобів сприяє запобіганню потраплянню небезпечних речовин на шкіру, в очі та органи дихання.

- Умови зберігання та утилізації. Хімічні речовини необхідно зберігати у спеціально призначених і належним чином промаркованих ємностях, що

містять інформацію про склад, рівень небезпеки та правила безпечного поводження з ними.

- Належна організація виконання робіт. Операції з використанням хімічних речовин повинні здійснюватися у приміщеннях з ефективною загальнообмінною або місцевою витяжною вентиляцією, що забезпечує видалення шкідливих парів і запобігає їх накопиченню у робочій зоні.

Контроль і перевірка є обов’язковими складовими процесу розроблення друкованих плат. Зазначений етап спрямований на забезпечення безпечної експлуатації виробничого обладнання та технологічних процесів, а також на підтвердження відповідності виробництва встановленим вимогам нормативних документів і стандартам якості.

4.3 Висновок до розділу 4

У ході дослідження встановлено, що психологічні чинники, зокрема недбалість, знижений рівень уваги, вплив стресових ситуацій, недостатній досвід і брак необхідних навичок, мають істотний вплив на підвищення ризику виникнення нещасних випадків і травматизму. Доведено, що емоційний стан особи, особливості її поведінки та психосоціальні умови здатні суттєво збільшувати ймовірність потрапляння в травмонебезпечні ситуації.

Обґрунтовано доцільність підвищення рівня психологічної грамотності населення, а також упровадження навчальних програм, спрямованих на усвідомлення ризиків і формування навичок безпечної поведінки, що може сприяти зменшенню кількості нещасних випадків.

Також проаналізовано загальні вимоги безпеки до виробничого обладнання та технологічних процесів, реалізація яких спрямована на зниження рівня виробничих ризиків і створення безпечних умов праці.

ВИСНОВОКИ

Застосування безпілотних літальних апаратів демонструє стійку тенденцію до динамічного розвитку та постійного зростання популярності. Значна кількість компаній здійснює інвестиції в модернізацію конструкцій БПЛА, поліпшення їхніх технічних характеристик і розширення спектра функціональних можливостей. У сучасних умовах різні типи безпілотних літальних апаратів знаходять широке використання в багатьох сферах діяльності, зокрема в аграрному та лісовому господарстві, у завданнях виявлення й документування злочинів та адміністративних правопорушень, для організації оперативного зв’язку й відеофіксації подій, а також для координації роботи наземних підрозділів екстрених та оперативних служб.

Особливо важливу роль безпілотні літальні апарати відіграють у військовій галузі, де вони залучаються до виконання широкого кола завдань. БПЛА застосовуються для картографування територій, аерофотознімання, збору метеорологічної інформації, а також для здійснення спостереження й розвідувальної діяльності. У процесі розвитку безпілотні літальні апарати пройшли шлях від порівняно простих технічних рішень до високотехнологічних комплексів із розширеними функціональними можливостями, здатних ефективно функціонувати на значних відстанях.

У сучасних умовах ведення воєнних дій безпілотні літальні апарати набули особливої значущості, оскільки використовуються для спостереження за пересуванням озброєння противника, контролю оперативної ситуації на державному кордоні, а також для ураження техніки та живої сили. Зазначені функції визначають їхню вагому роль у забезпеченні оборонного потенціалу й безпеки держави.

Для реалізації ефективного керування безпілотним літальним апаратом необхідно забезпечити надійний канал зв’язку між БПЛА та наземною станцією керування, що зумовлює потребу у застосуванні сучасних телекомунікаційних технологій. Стабільна та високошвидкісна передача даних є одним із

визначальних чинників безперебійного функціонування всієї системи управління.

У межах даного дослідження як приймально-передавальний модуль було використано обладнання Mikrotik LHG XL 52 ac, призначене для реалізації двосмугових радіорелейних ліній зв’язку на відстанях до кількох десятків кілометрів. Функціональні можливості цього пристрою забезпечуються підтримкою двох частотних діапазонів: діапазон 5 ГГц застосовується як основний канал із максимальною швидкістю передавання даних до 600 Мбіт/с, тоді як діапазон 2,4 ГГц використовується як автоматичний резервний канал зі швидкістю передавання до 260 Мбіт/с.

Відповідно до результатів теоретичних розрахунків прогнозований рівень сигналу на приймальній стороні мав становити −55,76 дБм. У процесі експериментальних випробувань після виконання юстування антенних систем максимальне зафіксоване значення рівня прийнятого сигналу дорівнювало −57 дБм. Таким чином, отримані експериментальні дані перебувають у задовільній відповідності з теоретичними оцінками, що підтверджує достовірність виконаних розрахунків і коректність практичної реалізації проєкту.

У процесі проведення вимірювань було забезпечено швидкість передавання даних за протоколом TCP у двосторонньому режимі на рівні 55 Мбіт/с. Водночас застосування протоколу UDP як у симетричному режимі обміну, так і при односторонньому передаванні даних, характеризувалося нестабільною роботою та періодичними перериваннями трафіку, у зв’язку з чим використання цього протоколу за наведених умов є недоцільним.

У ході експериментальних досліджень перехід на резервну несучу частоту 2,4 ГГц зафіксований не був. Необхідно зауважити, що апаратне забезпечення Mikrotik даної моделі не підтримує функцію примусового перемикання з основної робочої частоти 5 ГГц на резервну 2,4 ГГц. Реалізований виключно автоматизований механізм переходу, який здійснюється без втручання оператора та визначається поточними умовами функціонування радіоканалу.

Крім того, встановлено, що зміна орієнтації спрямованої антенної системи на кут 90° не спричиняє змін показників швидкості передавання даних.

Отже, результати проведених експериментальних досліджень засвідчили, що використання стандартів IEEE 802.11 у системах бездротового зв’язку є обґрунтованим не тільки для організації мереж типу «точка–багатоточка», але й для створення надійних каналів зв’язку типу «точка–точка» на значних дистанціях.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ

1. IEEE Std 802.11™–2020. Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. — New York : IEEE, 2020. — 4378 p.

2. Akyildiz I. F., Xie J., Mohanty S. A survey of mobility management in next-generation all-IP-based wireless systems // IEEE Wireless Communications. — 2004. — Vol. 11, No. 4. — P. 16–28.

3. Bekmezci I., Sahingoz O. K., Temel Ş. Flying Ad-Hoc Networks (FANETs): A survey // Ad Hoc Networks. — 2013. — Vol. 11, No. 3. — P. 1254–1270.

4. Gupta L., Jain R., Vaszkun G. Survey of important issues in UAV communication networks // IEEE Communications Surveys & Tutorials. — 2016. — Vol. 18, No. 2. — P. 1123–1152.

5. Perkins C. Ad Hoc Networking. — Boston : Addison-Wesley, 2001. — 480 p.

6. tallings W. Wireless Communications and Networks. — 2nd ed. — Upper Saddle River : Prentice Hall, 2005. — 576 p.

7. Tanenbaum A. S., Wetherall D. J. Computer Networks. — 5th ed. — Boston : Pearson, 2011. — 960 p.

8. MikroTik. RouterOS Documentation [Electronic resource]. — Riga, Latvia : MikroTik, 2023. — Mode of access: https://mikrotik.com/documentation (дата звернення: 21.12.2025).

9. Аналіз імітаційної моделі мобільності мереж FANET-MANET у наземно-повітряних комунікаційних системах // Системи і технології зв’язку, інформатизації та ... — 2024. — С. 25-32.

10. Yurii Palianytsia, Vasyl Dunets, Liliia Khvostivska. Modeling of Phased Array Antenna for Data Transmission in Urban Environment. CEUR Workshop Proceedings. 3rd International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems, ITTAP 2023. Ternopil 22 November 2023 до 24 November 2023. Том 3628, с. 208-220.

11. Dual-Polarization Yagi Antenna for Meter Wavelength Range. Khymych H., Dunets V., Duda S., Palaniza Y., Kornieiev K. Radioelectronics and Communications Systems. Allerton Press Inc. United States. 2023. Volume 66. Issue 11, pp. 609–615.

12. Технологія Wi-Fi та оптимізація IEEE 802.11ac у безпроводових локальних мережах [Реферат бакалавра] / ДУІКТ, 2019. — 47 с.

13. Лазебний В.С., Омельянець О.О. Електромагнітна сумісність безпровідових мереж IEEE 802.11ac // Технології та інжиніринг. — 2024. — № 1(18). — С. 67-74. — (українською).

14. СВІТ ІНФОРМАЦІЇ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ : збірник наукових праць / за ред. І.С. Стеблянка. — Дніпро : ХНУ, 2019. — 480 с. — розділ «Безпроводі технології» (українською).

15. Техноекологія та цивільна безпека. Частина «Цивільна безпека». Навчальний посібник / В.С. Стручок, – Тернопіль: ТНТУ ім. І.Пулюя, 2022. – 150 с.

16. Стручок В.С. Безпека в надзвичайних ситуаціях. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної бо та заочної (дистанційної) форм навчання / В.С.Стручок. — Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. — 112 с.

17. НПАОП 32.0-1.02-14 “Правила охорони праці під час виробництва радіо- та електронної апаратури”

18. ДСН 3.3.6.037 – 99 „Державні санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку”.

19. ДСН 3.3.6.039 – 99 „Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації”.

20. ДСН 3.3.6.042 – 99 „Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень”.

21. Атаманчук П.С. Безпека життєдіяльності. Навчальний посібник. - К.: Основа, 2017, с.437.

22. Запорожець О.І. Основи охорони праці. – К.: ВД Центр навчальної літератури (ЦНЛ), 2019, с. 560.

ДОДАТКИ

УДК 621.3
В. Л. Дунець к.т.н., доцент; Н. А. Гульовський
(Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна)

ЦИФРОВА РАДІОРЕЛЕЙНА ЛІНІЯ ЗВ'ЯЗКУ ДЛЯ ВИСОКОШВИДКІСНОЇ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ З БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

V.L.Dunets Ph.D., Associate professor; N.A. Gulovsky

DIGITAL RADIO RELAY COMMUNICATION LINE FOR HIGH-SPEED DATA TRANSMISSION FROM UNMANNED AERIAL VEHICLES

Високошвидкісна та надійна передача даних з безпілотних літальних апаратів (БПЛА) є актуальною задачею. На сьогодні існує широкий спектр методів передавання даних — від провідних (оптоволоконних) до безпровідних (радіо телекомунікаційних) систем, кожна з яких має свої області застосування та переваги.

З розвитком смартфонів, інтернет-пристроїв виникла необхідність у високошвидкісній передачі інформації. Особливу увагу набули системи, здатні передавати відео високої роздільності в режимі реального часу. Такі технології дають змогу здійснювати моніторинг у реальному часі лісових масивів, полів, потенційно небезпечних територій а також у сучасних військових конфліктах, де швидкість передачі інформації є критично важливою.

Основна складність при вирішенні цієї проблеми полягає у передачі відео в реальному часі з БЛА, зокрема, в забезпеченні стабільного та швидкого зв'язку при обмеженій пропускній здатності, високій затримці, енергоспоживанні та потребі в безпечній передачі даних.

Для вирішення цієї проблеми запропоновано застосувати обладнання Mikrotik LHG XL 52 ac, що дає змогу створити двосмугову цифрову радіорелейну лінію РРЛ (Рис.1) на відстань у кілька десятків кілометрів: основний канал 5 ГГц зі швидкістю до 600 Мбіт/с та резервний канал 2,4 ГГц зі швидкістю до 260 Мбіт/с. Побудована тестова система високоякісної передачі відео передбачає налаштування зв'язку типу «точка-точка» та дослідження характеристик каналу на відстані (>10 км) на основі РРЛ, створеної за стандартами IEEE 802.11, які зазвичай застосовуються у системах безпровідного зв'язку типу «точка-багатоточка» з локальним покриттям у межах сотень метрів.

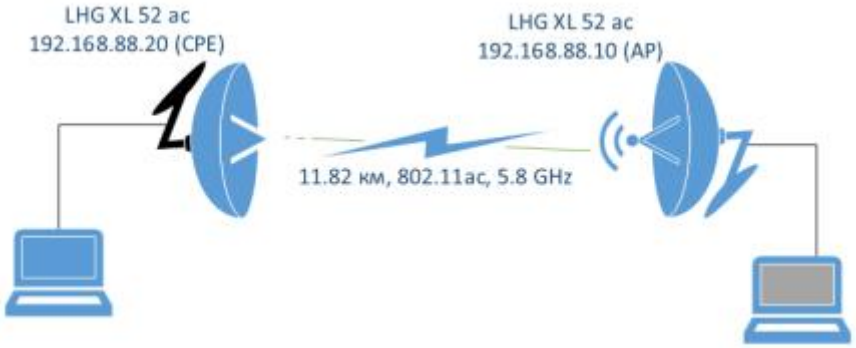

Рисунок 1. Схема підключення прийомопередавачів РРЛ Mikrotik та кінцевих терміналів з IP-адресами

За допомогою інструменту математичного моделювання проведено оцінку траси РРЛ та її характеристик на основі географічного розташування вузлів і параметрів обладнання. Згідно з теоретичними розрахунками, рівень сигналу на приймальній стороні має становити -55,76 дБм. Після налаштування антен найкращий зафіксований сигнал на приймачі склав -57 дБм, що підтверджує відповідність практичних результатів теоретичним розрахункам і достовірність моделі.

Результати дослідження підтверджують, що ефективність використання БПЛА значною мірою залежить від якості та стабільності каналу зв'язку, особливо під час передавання відеопотоку високої роздільності. Запропоновані технічні та архітектурні

рішення забезпечують можливість створення надійної системи передачі даних для широкого спектра застосувань у цивільній, промисловій та оборонній сферах.

Таким чином, ефективне використання БПЛА для моніторингу критичної інфраструктури, картографування та промислової безпеки — напряму залежить від якості телекомунікаційної системи. Забезпечення стабільного, високошвидкісного каналу передачі відео в реальному часі є ключовою науково-технічною задачею. Проаналізовані протоколи, технології та мережеві рішення демонструють, що сучасні апаратні засоби на кшталт Mikrotik LHG XL 52 ac та мережеві архітектури нового покоління можуть забезпечити необхідний рівень продуктивності, надійності та безпеки для реалізації таких систем.

Література

1. Химич Г.П., Дунець В.Л., Корнєєв К.Г., Пиць І.В. Телекомунікаційна мережа обміну даних телеметрії між надшвидкісним літаючим об’єктом (ракетою) та наземною станцією. XXV Міжнародна молодіжна науково-практична конференція «Людина і космос»: збірник тез. Дніпро: НЦАОМ, 2023. С.119. ISSN 2221-4550.
2. ДСТУ ETSI EN 300 328 :2008 (ETSI EN 300 328:2006, IDT) Електромагнітна сумісність і радіочастотний спектр. Системи з радіодоступом у діапазоні частот 2,4 ГГц. Загальні вимоги до радіоінтерфейсу
3. ДСТУ 7115:2009 (ETSI EN 301 893:2008, MOD) Обладнання радіодоступу діапазону частот 5 ГГц. Загальні технічні вимоги та методи випробування
4. ДСТУ 3937-1999 Системи передачі прямої видимості радіорелейні. Класифікація. Основні параметри. Методи вимірювань
5. Mikrotik LHG XL 52 ac https://mikrotik.com/product/lhg_xl_52_ac