

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «КИЇВСЬКИЙ АВІАЦІЙНИЙ ІНСТИТУТ»
ФАКУЛЬТЕТ АЕРОНАВІГАЦІЇ, ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ
КАФЕДРА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ ТА РАДІОЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ**

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри

Віктор ГНАТЮК
“ _____ ” _____ 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)

ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТР

Тема: «Сучасні методи організації каналів зв'язку та керування у безпілотних авіаційних системах»

Виконавець: _____ **Олександр ІВАННІКОВ**
(підпис)

Керівник: _____ **Олександр ПУЗИРЕНКО**
(підпис)

Консультанти з окремих розділів пояснювальної записки:

Консультант розділу «Охорона праці» _____ **Катерина КАЖАН**
(підпис)

Консультант розділу «Охорона навколишнього середовища»
_____ **Лариса ЧЕРНЯК**
(підпис)

Нормоконтролер: _____ **Богдан ЧУМАЧЕНКО**
(підпис)

Київ 2025

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «КИЇВСЬКИЙ АВІАЦІЙНИЙ ІНСТИТУТ»

Факультет аеронавігації, електроніки та телекомунікацій

Кафедра телекомунікаційних та радіоелектронних систем

Спеціальність 172 «Електронні комунікації та радіотехніка»

Освітньо-професійна програма «Телекомунікаційні системи та мережі»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Віктор ГНАТЮК

“ _____ ” _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання кваліфікаційної роботи

Іваннікова Олександра Андрійовича

(прізвище, ім'я, по батькові випускника в родовому відмінку)

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Сучасні методи організації каналів зв'язку та керування у безпілотних авіаційних системах»

затверджена наказом ректора від «02» вересня 2025 р. № 1672 /ст

2. Термін виконання роботи: з 29.09.2025 р. по 31.12.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: Сучасні наукові публікації, типові сценарії експлуатації БАС у цивільних і військових умовах, математичні моделі поширення радіохвиль, програмні засоби для моделювання, аналізу та візуалізації параметрів каналів зв'язку.

4. Зміст пояснювальної записки: Теоретичні засади організації каналів зв'язку та керування у безпілотних авіаційних системах, сучасні технології організації каналів зв'язку у безпілотних авіаційних системах, методи та алгоритми керування безпілотними авіаційними системами, нормативно-правові аспекти, стандарти та перспективи розвитку технологій зв'язку для БАС, аналіз, проектування та моделювання комунікаційного каналу для БАС в умовах воєнного стану, охорона праці, охорона навколишнього середовища

5. Перелік обов'язкового графічного (ілюстративного) матеріалу: схеми; графіки залежності; ілюстрації; порівняльні таблиці; узагальнені блок-схеми та діаграми.

6. Календарний план-графік

№ пор.	Завдання	Термін виконання	Відмітка про виконання
1	Розробити деталізований зміст розділів кваліфікаційної роботи	29.09.2025- 30.09.2025	Виконано
2	Вступ	01.10.2025- 03.10.2025	Виконано
3	Теоретичні засади організації каналів зв'язку та керування у безпілотних авіаційних системах	04.10.2025- 13.10.2025	Виконано
4	Сучасні технології організації каналів зв'язку у безпілотних авіаційних системах	14.10.2025- 20.10.2025	Виконано
5	Методи та алгоритми керування безпілотними авіаційними системами	21.10.2025- 29.10.2025	Виконано
6	Нормативно-правові аспекти, стандарти та перспективи розвитку технологій зв'язку для БАС	30.10.2025- 09.11.2025	Виконано
7	Аналіз, проєктування та моделювання комунікаційного каналу для БАС в умовах воєнного стану	10.11.2025- 16.11.2025	Виконано
8	Охорона праці	17.11.2025- 30.11.2025	Виконано
9	Охорона навколишнього середовища	01.12.2025- 14.12.2025	Виконано
10	Усунення недоліків та захист кваліфікаційної роботи	15.12.2025- 31.12.2025	Виконано

7. Консультанти з окремих розділів

Розділ	Консультант (посада, П.І.Б.)	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці	к.т.н., доц. Катерина КАЖАН		
Охорона навколишнього середовища	д.т.н., доц. Лариса ЧЕРНЯК		

8. Дата видачі завдання: «01» вересня 2025 р.

Керівник кваліфікаційної роботи _____
(підпис керівника)

Олександр ПУЗИРЕНКО
(П.І.Б.)

Завдання прийняв до виконання _____
(підпис випускника)

Олександр ІВАННІКОВ
(П.І.Б.)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота «СУЧАСНІ МЕТОДИ ОРГАНІЗАЦІЇ КАНАЛІВ ЗВ'ЯЗКУ ТА КЕРУВАННЯ У БЕЗПІЛОТНИХ АВІАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ» містить 118 сторінок, 9 рисунків, 3 таблиці, 153 використаних джерел.

Ключові слова: БЕЗПІЛОТНІ АВІАЦІЙНІ СИСТЕМИ, КАНАЛИ КЕРУВАННЯ ТА ЗВ'ЯЗКУ БАС, РАДІОКАНАЛ LOS/BLOS, ЗАВАДОСТІЙКІСТЬ РАДІОКАНАЛІВ, РАДІОЕЛЕКТРОННА ПРОТИДІЯ, ТЕЛЕМЕТРІЯ, БЕЗПЕКА ТА НАДІЙНІСТЬ КАНАЛІВ ЗВ'ЯЗКУ.

Об'єкт дослідження – безпілотні авіаційні системи як комплекс технічних, програмних та організаційних засобів.

Предмет дослідження – методи, технології та стандарти організації каналів зв'язку, що забезпечують керування і передачу даних у БАС.

Мета кваліфікаційної роботи – дослідити сучасні методи організації каналів зв'язку та керування у безпілотних авіаційних системах і на основі теоретичного аналізу та інженерного моделювання обґрунтувати вибір параметрів радіоканалів, що забезпечують надійність, завадостійкість і працездатність БАС у складних умовах експлуатації, зокрема в умовах радіоелектронної протидії.

Метод дослідження – у роботі використано аналіз і узагальнення науково-технічних та нормативних джерел у сфері безпілотних авіаційних систем і телекомунікацій; системний та радіотехнічний аналіз каналів зв'язку і керування БАС; розрахункові методи оцінки енергетичного балансу радіолінії; математичне й імітаційне моделювання поширення радіосигналів та впливу завад; порівняльний аналіз частотних діапазонів і методів модуляції з подальшою інженерною інтерпретацією результатів.

Матеріали кваліфікаційної роботи рекомендується використовувати при підготовці фахівців з авіаційних та телекомунікаційних систем, у навчальних курсах з технологій БАС, а також у проєктних та аналітичних роботах, що стосуються розроблення та модернізації систем зв'язку й керування безпілотних комплексів.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	9
ВСТУП.....	10
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ОРГАНІЗАЦІЇ КАНАЛІВ ЗВ'ЯЗКУ ТА КЕРУВАННЯ У БЕЗПЛОТНИХ АВІАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ.....	13
1.1. Класифікація безпілотних авіаційних систем та їх функціональні особливості .	13
1.2. Архітектура системи керування та інформаційного обміну у БАС.....	16
1.3. Загальні вимоги до каналів зв'язку в умовах аеродинамічної та радіотехнічної змінності.....	18
1.4. Фактори, що впливають на якість та надійність радіоканалів у БАС	20
1.5. Види інформаційних потоків у системах дистанційного керування та моніторингу	22
РОЗДІЛ 2. СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ОРГАНІЗАЦІЇ КАНАЛІВ ЗВ'ЯЗКУ У БЕЗПЛОТНИХ АВІАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ	26
2.1. Канали зв'язку прямої видимості: принципи побудови та технологічні реалізації	26
2.2. Технології зв'язку поза межами прямої видимості (BLoS): супутникові та стільникові рішення	28
2.3. Протоколи обміну телеметрією та керуючими командами (MAVLink, UAVCAN та ін.)	31
2.4. Програмно-визначальні радіосистеми (SDR) у БАС та їх переваги.....	34
2.5. Методики підвищення завадостійкості та безпеки каналів зв'язку	37
2.6. Сучасні промислові стандарти та виробничі рішення у сфері радіозв'язку для БАС	39

РОЗДІЛ 3. МЕТОДИ ТА АЛГОРИТМИ КЕРУВАННЯ БЕЗПІЛОТНИМИ ТА АВІАЦІЙНИМИ СИСТЕМАМИ.....	43
3.1. Керування оператором, напівавтономні режими та автономні алгоритми.....	43
3.2. Методи стабілізації та підтримання параметрів польоту.....	45
3.3. Навігаційні системи та способи корекції траєкторії	48
3.4. Алгоритми уникнення перешкод та безпечного повернення	50
3.5. Телеметричні процеси: формування, передача та обробка інформації	53
3.6. Вплив параметрів каналу зв'язку на ефективність керування	55
РОЗДІЛ 4. НОРМАТИВНО-ПРАВОВІ АСПЕКТИ, СТАНДАРТИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ТЕХНОЛОГІЙ ЗВ'ЯЗКУ ДЛЯ БАС	60
4.1. Міжнародні стандарти та регуляторні вимоги до радіоканалів БПЛА	60
4.2. Нормативи ІКАО, ІТУ та європейських регуляторів у сфері безпілотної авіації.....	62
4.3. Тенденції розвитку технологій аеронавігаційного зв'язку у світі	63
4.4. Перспективи інтеграції БАС у цивільний повітряний простір України	66
4.5. Очікувані технологічні зміни: 5G/6G, автономні мережі, ройові системи	68
РОЗДІЛ 5. АНАЛІЗ, ПРОЕКТУВАННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ КОМУНІКАЦІЙНОГО КАНАЛУ ДЛЯ БАС В УМОВАХ ВОЄННОГО СТАНУ	73
5.1. Вихідні умови та вимоги до каналу зв'язку	73
5.2. Розрахунок енергетичного балансу радіоканалу	73
5.2.1. Розрахунок втрат на трасі.....	74
5.2.2. Розрахунок прийнятої потужності	75
5.3. Моделювання впливу засобів РЕБ.....	75
5.4. Оптимізація радіоканалу у воєнних умовах	76
5.5. Порівняння FSPL	77
5.6 Вплив висоти польоту.....	78

5.7. Зона Френеля	80
5.8. Порівняння показника BER залежно від SNR для різних методів модуляції.....	82
РОЗДІЛ 6. ОХОРОНА ПРАЦІ	86
6.1. Шкідливі та небезпечні виробничі фактори	87
6.2. Аналіз умов праці та розробка заходів захисту	90
6.3. Пожежна безпека на робочому місці інженера систем зв'язку	94
РОЗДІЛ 7. ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА	98
7.1. Джерела та види впливу БАС і систем зв'язку на довкілля	99
7.2. Аналіз пріоритетних екологічних факторів та інженерні заходи мінімізації....	100
7.2.1. Акумулятори та електронні відходи: оцінка ризиків і заходи	101
7.2.2. Акустичний вплив БАС на фауну: оцінка та профілактика	102
7.3. Узагальнені рекомендації з екологічної безпеки для стаціонарного та польового середовища.....	103
ВИСНОВКИ.....	106
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	109

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

БАС – Безпілотні авіаційні системи

БпЛА – Безпілотний літальний апарат

ЕМВ – Електромагнітне випромінювання

НПК – Наземний пункт керування

РЕБ – Радіоелектронна боротьба

BER (Bit Error Rate) – Ймовірність бітової помилки

BLoS (Beyond Line of Sight) – Радіокерування за межами прямої радіовидимості

BVLOS (Beyond Visual Line of Sight) – Політ за межами прямої візуальної видимості

C2 (Command and Control) – Канал керування та контролю

EMI (Electromagnetic Interference) – Електромагнітні завади

FPV (First Person View) – Передавання відео від першої особи

FSPL (Free Space Path Loss) – Втрати сигналу у вільному просторі

FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum) – Псевдовипадкова перебудова робочої частоти

GNSS (Global Navigation Satellite System) – Глобальна навігаційна супутникова система

LoRa (Long Range) – Технологія далекого низькошвидкісного радіозв'язку

LoS (Line of Sight) – Радіокерування в межах прямої видимості

RTK (Real-Time Kinematic) – Кінематична корекція в реальному часі

SATCOM (Satellite Communication) – Супутниковий канал зв'язку

SDR (Software-Defined Radio) – Програмно-визначальні радіосистеми

SNR (Signal-to-Noise Ratio) – Відношення сигнал/шум

UAS (Unmanned Aircraft System) – Безпілотна авіаційна система

VTOL (Vertical Take-Off and Landing) – Системи з вертикальним зльотом і посадкою

ВСТУП

Актуальність теми. Безпілотні авіаційні системи (БАС) стали ключовим елементом сучасної авіації, активно використовуються як у цивільних сферах – моніторинг, доставка, агропромисловість, інспекція інфраструктури, так і у військовій діяльності. Особливо важливу роль БАС демонструють під час воєнного стану в Україні, де їх застосовують для розвідки, контролю території, корекції артилерії та підтримки ситуаційної обізнаності. Надійні канали зв'язку забезпечують безпеку операторів і ефективність виконання завдань, а розвиток технологій і стандартизація є критично важливими для інтеграції БАС у національний і міжнародний повітряний простір.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Мета і завдання дослідження. дослідити сучасні методи організації каналів зв'язку та керування у безпілотних авіаційних системах і на основі теоретичного аналізу та інженерного моделювання обґрунтувати вибір параметрів радіоканалів, що забезпечують надійність, завадостійкість і працездатність БАС у складних умовах експлуатації, зокрема в умовах радіоелектронної протидії.

Для досягнення поставленої мети вирішуються такі наукові завдання:

1. Проаналізувати сучасні підходи до класифікації безпілотних авіаційних систем та особливості їх застосування у цивільних і військових умовах.
2. Дослідити архітектуру систем керування та інформаційного обміну у безпілотних авіаційних системах.
3. Розглянути основні типи каналів зв'язку БАС, їх функціональне призначення та вимоги до надійності й завадостійкості.
4. Проаналізувати сучасні технології організації каналів зв'язку прямої та поза прямої видимості.
5. Дослідити методи підвищення завадостійкості та безпеки каналів зв'язку в умовах радіоелектронної протидії.

6. Виконати розрахунок енергетичного балансу радіоканалу для різних частотних діапазонів.

7. Провести математичне та імітаційне моделювання поширення радіосигналів і впливу завад на якість зв'язку.

8. Проаналізувати вплив параметрів польоту (дальність, висота, частота) на працездатність каналів зв'язку БАС.

9. Розробити інженерні рекомендації щодо оптимізації параметрів каналів зв'язку та керування безпілотними авіаційними системами.

Об'єктом дослідження – безпілотні авіаційні системи як комплекс технічних, програмних та організаційних засобів.

Предметом дослідження – методи, технології та стандарти організації каналів зв'язку, що забезпечують керування і передачу даних у БАС.

Методи досліджень. у роботі використано аналіз і узагальнення науково-технічних джерел та нормативних документів у сфері безпілотних авіаційних систем і телекомунікацій; системний аналіз архітектури каналів зв'язку та керування БАС; методи радіотехнічного аналізу для оцінки параметрів каналів зв'язку; розрахункові методи визначення енергетичного балансу радіолінії; математичне та імітаційне моделювання поширення радіосигналів і впливу завад; порівняльний аналіз ефективності різних частотних діапазонів і методів модуляції; інженерна інтерпретація результатів моделювання для формування практичних рекомендацій.

Наукова новизна та практичне значення отриманих результатів.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Удосконалено підхід до оцінки працездатності каналів зв'язку безпілотних авіаційних систем шляхом поєднання теоретичного аналізу, розрахунку енергетичного балансу та імітаційного моделювання в умовах радіоелектронної протидії;

2. Набули подальшого розвитку методи інженерної оцінки впливу частоти, дальності та висоти польоту на якість радіозв'язку БАС;

3. Запропоновано комплексний підхід до вибору параметрів каналів зв'язку БАС, який враховує як енергетичну ефективність, так і завадостійкість у реальних умовах експлуатації;

4. Обґрунтовано доцільність використання гібридної архітектури каналів зв'язку з поєднанням низькочастотних завадостійких каналів керування та високочастотних каналів передавання даних.

Практичне значення отриманих результатів:

1. Можливість використання результатів розрахунків та моделювання для проектування і налаштування каналів зв'язку безпілотних авіаційних систем.

2. Запропоновані підходи дозволяють обґрунтовано вибирати параметри радіоканалів з урахуванням дальності, висоти польоту та умов поширення сигналу.

3. Отримані результати сприяють підвищенню надійності та завадостійкості зв'язку, зокрема в умовах радіоелектронної протидії, і можуть бути використані у практичній діяльності та навчальному процесі.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ОРГАНІЗАЦІЇ КАНАЛІВ ЗВ'ЯЗКУ ТА КЕРУВАННЯ У БЕЗПЛОТНИХ АВІАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

1.1. Класифікація безпілотних авіаційних систем та їх функціональні особливості

Безпілотні авіаційні системи посідають ключове місце у сучасній авіаційній галузі та активно використовуються в цивільних, промислових і військових сферах. Їх різноманіття зумовило необхідність формування чіткої класифікації, що дозволяє стандартизувати вимоги до конструкції, каналів зв'язку, способів керування та можливостей застосування. Класифікація БАС, як правило, здійснюється за низкою технічних та функціональних параметрів, серед яких домінують маса, дальність польоту, конструктивна схема та рівень автономності [1; 2].

Одним із базових критеріїв є класифікація за масою та розмірами, що визначає можливості та сферу застосування безпілотника:

- Нанодрони (до 250 г) – застосовуються для короткочасного спостереження у приміщеннях або на обмежених територіях.
- Мікро- та міні-БАС (до 2–4 кг) – використовуються у цивільній та військовій сфері для фото- і відеомоніторингу, через простоту конструкції та мобільність.
- Тактичні БАС середнього класу (від 5 до 25 кг) – здатні виконувати розвідувальні та спеціальні завдання на більших відстанях, оснащуються розвиненими телеметричними системами та стабільними каналами зв'язку
- Оперативно-тактичні та великі БАС (понад 150 кг) – призначені для тривалих місій, можуть використовувати висотні профілі польоту, складне навігаційне обладнання та комбіновані канали керування [3].

Важливою особливістю є аеродинамічна схема, яка значною мірою визначає можливості системи:

- Літальні апарати з фіксованим крилом вирізняються економічністю та дальністю польоту, що робить їх ефективними для великомасштабного моніторингу та тривалих розвідок.
- Мультикоптери та інші роторні платформи забезпечують точне позиціонування, вертикальний зліт і посадку, здатність до зависання та інспекції об'єктів з невеликої висоти.
- Гібридні системи (VTOL) поєднують переваги фіксованого крила і мультикоптера, що розширює їх універсальність і можливості застосування [4].

Фахові джерела наголошують, що маса апарата прямо впливає на його аеродинамічні властивості, енергоспоживання та тип доступних каналів зв'язку [5]. Збільшення розмірів дрона розширює можливості щодо встановлення додаткових сенсорів, спрямованих антен або спеціалізованих корисних навантажень.

Функціональні особливості БАС значною мірою залежать від призначення. У цивільному секторі їх використовують для геодезії, агромоніторингу, логістики, екологічного контролю, охорони об'єктів та реагування на надзвичайні ситуації. У військовій сфері спектр задач значно ширший. В умовах воєнного стану в Україні БАС виконують функції розвідки, корекції артилерійського вогню, спостереження за переміщенням противника, забезпечення зв'язку, а в окремих випадках – виконання ударних дій. Підвищення їхньої важливості стимулює розвиток технологій, збільшення дальності польоту, покращення завадостійкості каналів зв'язку та впровадження алгоритмів автономного керування [6].

Окремим параметром класифікації є рівень автономності, який визначає ступінь участі оператора в управлінні польотом:

- Радіокеровані у межах прямої видимості (LoS) – оператор повністю керує апаратом у реальному часі.
- Керовані за межами прямої видимості (BLoS) – БАС виконує політ за встановленим маршрутом із використанням систем навігації.
- Автономні апарати – застосовують алгоритми штучного інтелекту та можуть самостійно ухвалювати рішення в межах заданих сценаріїв [7].

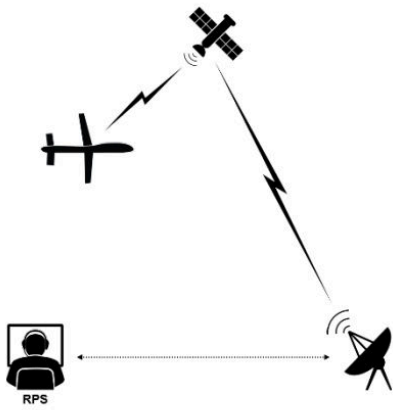


Figure 2 – beyond radio line-of-sight

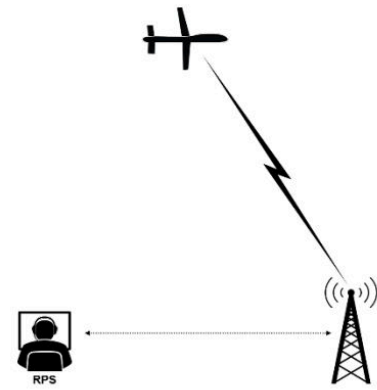


Figure 3 – radio line-of-sight

Рис. 1.1. Концепція експлуатації системи дистанційно пілотованих літальних апаратів

Функціональні можливості БАС формуються на основі комбінації трьох ключових складових:

1. Бортової навігаційно-керуючої системи;
2. Системи оброблення даних;
3. Каналу зв'язку з оператором або зовнішніми інформаційними платформами.

У сучасних системах усе більшого значення набувають технології штучного інтелекту, що дозволяють реалізувати автономне уникнення перешкод, оптимізацію траєкторії, розпізнавання цілей та адаптивну зміну режимів роботи [8]. Ці функції стали критичними в умовах воєнного застосування, коли апарат має здатність продовжувати місію навіть у ситуаціях втрати зв'язку або активної протидії.

Крім того, можливість інтеграції БАС у мережецентричні середовища – одна з головних тенденцій сучасних військових досліджень. Це дає змогу обмінюватися даними між різними платформами у реальному часі та підвищувати ефективність виконання задач [9].

Таким чином, класифікація безпілотних авіаційних систем є багаторівневою і відображає різноманітність технічних рішень та сфер застосування. Розуміння цих характеристик є основою для подальшого аналізу каналів зв'язку та методів керування, що формують ефективність і безпечність функціонування БАС у сучасних умовах.

1.2. Архітектура системи керування та інформаційного обміну у БАС

Архітектура системи керування безпілотними авіаційними системами (БАС) визначає взаємодію між апаратними компонентами, програмними модулями та каналами зв'язку, які разом забезпечують реалізацію польотного завдання. Від її структури залежить стабільність польоту, стійкість до перешкод, здатність до автономного маневрування та інтеграція з інформаційними платформами. Сучасні підходи до побудови таких систем орієнтуються на модульність, відкриті інтерфейси та надійну комунікацію у складних умовах [10].

У типовій конфігурації архітектура БАС включає кілька ключових підсистем: бортовий комплекс управління, наземний пункт керування, канали зв'язку та телеметрії, а також інформаційно-аналітичний контур, який забезпечує збереження та оброблення отриманих даних. Таке структурування відповідає міжнародним підходам до класифікації UAS, зокрема концепціям, описаним у стандартах ICAO та технічних документах EASA [1; 2].

Бортовий комплекс є центральною частиною архітектури БАС, оскільки саме він виконує стабілізацію апарата, керування виконавчими механізмами та формування навігаційних рішень. Типовий склад включає автопілот, інерціальну вимірювальну систему, GNSS-приймачі, барометричні датчики, модулі орієнтації та контролери навантаження. Сучасні автопілотні модулі, за свідченнями досліджень у сфері автономних систем, працюють на основі алгоритмів фільтрації та корекції, зокрема варіантів фільтра Калмана, що дозволяє стабілізувати політ навіть за наявності перешкод або часткових відмов датчиків [11].

У літературі підкреслюється, що бортова частина повинна мати механізми дублювання критичних каналів даних та інструменти автономного ухвалення рішень у разі втрати зв'язку, що особливо важливо в умовах бойового застосування [12]. Саме тому сучасні БАС інтегрують адаптивні алгоритми, здатні тимчасово переходити в автономний режим і продовжувати виконання маршруту.

Наземний пункт керування виступає інтелектуальним центром координації польоту та головною точкою взаємодії оператора з апаратом. У структурі НПК виділяють програмно-апаратний комплекс, що відповідає за планування маршруту, оброблення телеметрії, передавання команд та візуалізацію параметрів польоту. За даними сучасних оглядів систем керування UAS, інтерфейси операторських станцій проєктуються таким чином, щоб забезпечити швидку оцінку ситуації та зменшити когнітивне навантаження на оператора [13].

Програмна частина НПК включає модулі для перевірки цілісності сигналів, фільтрації даних, автоматичної побудови оптимальних траєкторій та ведення журналу польотів. Для військових та спеціальних застосувань додатково інтегруються засоби шифрування та визначення загроз у каналах зв'язку [14].

Канали зв'язку забезпечують ключову ланку – безперервний обмін інформацією між НПК і бортовими системами дрона. До них входять:

- канал керування
- телеметричний канал
- канал передавання корисних даних (наприклад, відеопотоку або радіолокаційних зображень).

Радіоканали з псевдовипадковою перебудовою частоти, адаптивні протоколи корекції помилок (FEC), різні варіанти фізичного та прикладного шифрування – усе це застосовується для захисту від перехоплення та радіоелектронних атак [15]. Окремі системи використовують направлені антени та МІМО-технології, що підвищують пропускну здатність та стійкість передачі.

Наявні міжнародні дослідження підтверджують, що відмовостійкість каналів зв'язку є критичним елементом у роботі БАС, оскільки будь-яка втрата керування безпосередньо впливає на безпеку виконання польоту [16].

Після завершення польотного циклу всі отримані дані передаються до інформаційно-аналітичної системи, яка виконує їх структурування, зберігання, математичною обробку та інтеграцію з іншими інформаційними платформами. У сучасних наукових оглядах наголошується, що такий контур стає ключовим у мержених операціях, оскільки дозволяє використовувати телеметрію для побудови прогнозних моделей, оптимізації майбутніх місій та підвищення точності навігації [17].

Багато виробників інтегрують системи хмарного аналізу даних та алгоритми машинного навчання для автоматичного виявлення відхилень у поведінці апарата. Це підвищує безпеку експлуатації та полегшує технічне обслуговування.

У цілому архітектура БАС розробляється за принципом модульності та відкритих інтерфейсів [18]. За рахунок використання стандартизованих протоколів взаємодії та уніфікації форматів повідомлень забезпечується сумісність із широким спектром платформ — від тактичних наземних систем до мережецентричних бойових комплексів.

Взаємодія між підсистемами здійснюється в межах єдиної логічної моделі, яка координує обмін даними, синхронізацію команд та перевірку достовірності усієї інформації. Саме така архітектура забезпечує надійність і передбачуваність роботи БАС у різних умовах, включно із застосуванням у зонах радіоелектронного протиборства.

1.3. Загальні вимоги до каналів зв'язку в умовах аеродинамічної та радіотехнічної змінності

Ефективність функціонування безпілотних авіаційних систем значною мірою визначається якістю організації каналів зв'язку, які забезпечують безперервний обмін даними між повітряною платформою та наземною станцією керування. Особливої ваги це набуває в умовах воєнного стану, коли надійність та стійкість зв'язку визначають не лише успішність виконання завдання, а й безпеку апарата. У спеціалізованих джерелах підкреслюється, що сучасні БАС використовують

багатоканальні конфігурації зв'язку, поєднуючи радіочастотні та цифрові протоколи для забезпечення максимальної живучості системи [19].

Узагальнено канали зв'язку БАС можна поділити за їх функціональною роллю та технологічними характеристиками, оскільки кожен тип забезпечує окремий аспект взаємодії — від керування апаратом до передавання даних корисного навантаження чи навігаційної інформації. Подальша класифікація відображає типовий набір каналів, які застосовуються у сучасних безпілотних комплексах.

Канал керування та телеметрії (Command & Control, C2-link) – Основний канал, що забезпечує передачу команд керування та отримання телеметрії. Вимоги до його стійкості, резервування й захисту викладені в ICAO DOC 10019 *Manual on Remotely Piloted Aircraft Systems*, де зазначено необхідність забезпечення гарантованого обміну у складних радіоумовах [20]. Для цього застосовуються такі діапазони частот, як 300–900 МГц, 2,4 ГГц та 5,8 ГГц, а також військові діапазони зі стрибкоперестроюваною частотою (FHSS), стандартизовані в NATO STANAG 4586 [21].

В українських технічних звітах щодо БПЛА наголошується, що саме канал C2 найчастіше піддається радіоелектронному впливу, що вимагає використання методів шифрування, адаптивної зміни частоти та резервного маршруту зв'язку [22].

Канал передачі корисного навантаження (Payload Data Link) – цей канал забезпечує передавання відео-, фото- та інших інформаційних потоків з бортових сенсорів. У технічних оглядах підкреслюється, що інформаційний канал є найбільш ресурсомістким і повинен підтримувати високу пропускну здатність [23].

На практиці застосовуються:

- Аналогові FPV-лінії – мінімальна затримка, але низька завадостійкість;
- Цифрові HD-лінки (OcuSync, Wi-Fi 5/6, OFDM) – висока якість передавання та адаптивний бітрейт;
- Зашифровані військові передавальні системи – відповідно до рекомендацій EASA щодо безпеки цифрових потоків [24].

GNSS (навігаційно-геолокаційні канали) є критичним компонентом навігації, однак у документах Європейського агентства авіаційної безпеки з питань U-Space наголошується на його вразливості до глушіння та спуфінгу [25]. Тому сучасні БАС

використовують багаторівневі схеми позиціонування, що включають: RTK/PPK-технології, інерційну навігацію як резерв та захищені GNSS-модулі військового призначення.

Для БАС середньої та великої дальності SATCOM (супутникові канали зв'язку) є ключовим елементом для польотів BLoS. Це підкреслюється у звітах NASA, де супутниковий сегмент визначається необхідною умовою інтеграції великих БАС у повітряний простір [26].

Типові рішення включають:

- Inmarsat, Iridium Certus – глобальне покриття і висока надійність;
- Супутникові інтернет-системи Starlink – застосовуються для наземних пунктів керування БАС в Україні [27].

Мережеві та стільникові канали (4G/5G/LTE/NR) забезпечують низьку затримку та можливість створення локальних кластерів керування дронами, що підтверджується документами 3GPP [28]. В умовах міської інфраструктури такі канали часто використовуються як резервні або допоміжні.

Канали міждронної взаємодії в роєвих системах реалізуються на основі ad-hoc та mesh-мереж, які дозволяють дронам обмінюватися даними без участі центру керування та підвищують стійкість системи до втрати окремих вузлів [29].

1.4. Фактори, що впливають на якість та надійність радіоканалів у БАС

Якість і надійність каналів зв'язку визначають безпеку та ефективність експлуатації безпілотних авіаційних систем (БАС). У сучасних підходах до проектування комунікаційних підсистем підкреслюють, що зв'язок має забезпечуватися за будь-яких умов польоту, включно з маневрами, зміною висоти та динамічними коливаннями антенної орієнтації, оскільки від цього залежить точність виконання команд і коректність телеметричних даних [30]. Навантаження на канал зростає зі збільшенням обсягу передаваних даних (відеопотоки, радарні зображення), тому при проектуванні слід передбачати достатній запас пропускної здатності та механізми адаптивного керування бітрейтом [31].

У воєнних і інших умовах підвищеного ризику особлива роль відводиться стійкості до радіоелектронного впливу: перепіднесення частот, глушіння, спуфінг і цілеспрямовані спроби перехоплення даних. Тому базові інженерні вимоги включають застосування методів частотної перестройки (FHSS), розширення спектру (DSSS), каналів з корекцією помилок (FEC) та криптографічних протоколів для забезпечення цілісності й конфіденційності управлінських команд [32; 33]. Одночасно необхідно передбачити апаратні та програмні механізми дублювання критичних функцій: резервні трансивери, альтернативні антени та можливість переходу на супутникові або стільникові ланцюги у випадку деградації основного C2-link [2; 14].

Критично важливим параметром є затримка (latency) у каналі керування: для маневрених платформ і завдань з реальним часом навіть незначне нарощення затримки може призвести до помилкових команд або втрати контролю [30]. Тому архітектура зв'язку має поєднувати низьколатентні рішення для передачі команд із більш «важкими» каналами для відео й аналітичних даних, причому механізми пріоритизації трафіка повинні бути реалізовані на рівні протоколів і апаратного забезпечення [4].

Експлуатаційна надійність вимагає адаптивності: канали і протоколи повинні автоматично реагувати на зміну умов середовища – переключатися на інший діапазон, зменшувати/збільшувати швидкість передавання, змінювати модуляцію або обирати інший маршрут передачі через мережеві реле. Такі підходи вже описані в сучасних рекомендаціях щодо BVLOS та U-Space: вони передбачають багат шарову модель зв'язку з можливістю динамічного перемикання і моніторингу якості каналу в реальному часі [25; 28].

Інформаційна безпека – ще один фундаментальний вимір вимог. Захист має включати не тільки шифрування, але й механізми автентифікації, захищені канали для передачі ключових параметрів і моніторинг спроб зламу або підміни сигналу. У військовому застосуванні стандарти завадозахищеності та криптографії також вимагають сертифікаційних підтверджень, які слугуватимуть підставою для введення системи в експлуатацію [21; 34].

Не менш важливо дотримуватися регуляторних вимог щодо використання спектру та інтеграції в повітряний простір. Частотне планування, дотримання правил Remote ID, відповідність до норм ICAO/EASA та національних регуляторів забезпечують технічну сумісність і мінімізують ризики взаємних перешкод між різними операторами [2; 10].

Підсумовуючи, ключові вимоги до каналів зв'язку БАС можна сформулювати як поєднання технічної ефективності (пропускна здатність, затримка), стійкості до зовнішніх загроз (завадостійкість, резервування), експлуатаційної адаптивності (динамічне керування параметрами) та інформаційної безпеки (шифрування, автентифікація). Імплементация цих вимог повинна враховувати клас платформи, характер місії та нормативно-правове середовище, у якому здійснюється експлуатація БАС [30; 32; 25].

1.5. Види інформаційних потоків у системах дистанційного керування та моніторингу

Сучасний розвиток безпілотних авіаційних систем неможливий без постійного удосконалення технологій зв'язку. Інтенсивне зростання числа дронів у цивільних та військових операціях створює необхідність у більш стійких, надійних та високошвидкісних каналах передачі даних. Згідно з останніми дослідженнями, перспективними напрямками розвитку є впровадження багат шарових комунікаційних архітектур, інтеграція стільникових мереж нового покоління (5G/6G) та широке застосування супутникових систем глобального покриття [4; 28].

Одним із ключових трендів є розвиток технологій BVLOS (Beyond Visual Line of Sight), що вимагає стабільного супутникового та наземного зв'язку на великих відстанях. Такі системи мають комбінувати низьколатентні канали для керування апаратом та високошвидкісні канали для передачі відео та аналітичних даних з сенсорів [35]. Додатково увага приділяється інтеграції інтелектуальних алгоритмів маршрутизації та розподілу трафіку між різними каналами зв'язку, що підвищує живучість системи у разі часткової деградації або глушіння основного каналу [32].

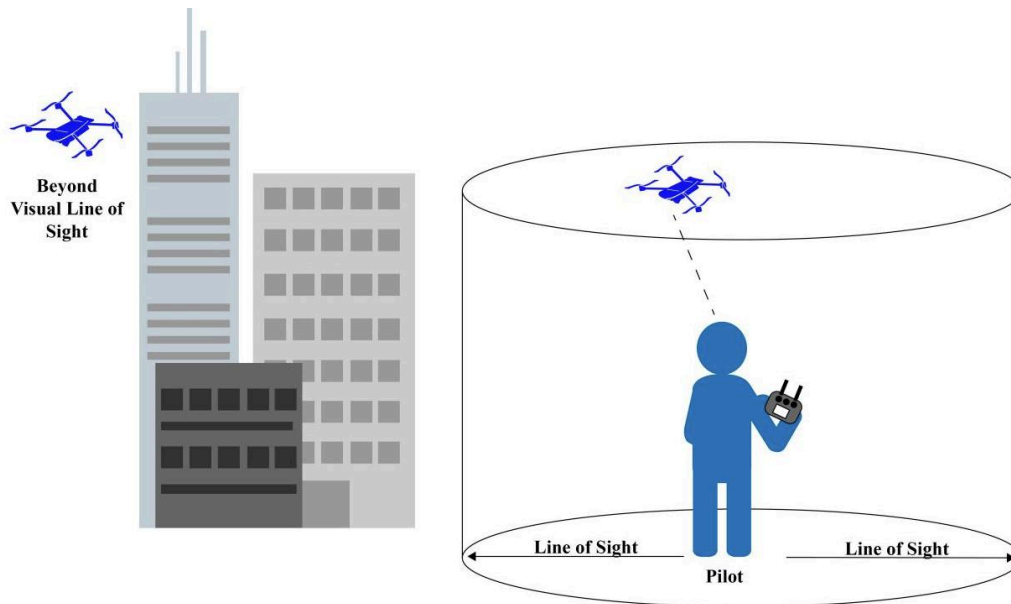


Рис. 1.2. За межами прямої видимості (BVLOS — Beyond Visual Line of Sight)
(Джерело: NOAA Uncrewed Systems Program)

У найближчому майбутньому очікується активне використання mesh-мереж і роєвих технологій для груп дронів, що дозволяє організувати автономний обмін даними без прямої участі наземної станції. Такий підхід забезпечує підвищену стійкість системи та можливість виконання складних розвідувальних або логістичних місій у конфліктних умовах [36]. Одночасно технології штучного інтелекту дозволять автоматично коригувати параметри зв'язку, прогнозувати втрати пакетів і мінімізувати затримку передачі даних.

Серед іншого, розвиток криптографії та протоколів безпеки для БАС стане критично важливим. Враховуючи воєнні та цивільні сценарії експлуатації, канали зв'язку повинні забезпечувати захист від перехоплення та спуфінгу, шифрувати командні і телеметричні потоки та дозволяти інтеграцію з національними системами управління повітряним рухом [21; 34]. Паралельно розвиваються регуляторні рамки, які дозволяють безпілотним системам ефективно взаємодіяти в змішаному повітряному просторі та інтегруватися в цивільну інфраструктуру [25; 2].

Таким чином, перспективи розвитку технологій зв'язку для БАС полягають у поєднанні багатоканальних, гнучких і стійких систем, здатних забезпечувати

високошвидкісний обмін даними, автономну маршрутизацію та стійкий захист інформації навіть в умовах складних електромагнітних і воєнних впливів.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

У першому розділі було здійснено узагальнення теоретичних засад організації каналів зв'язку та керування у безпілотних авіаційних системах. Показано, що класифікація БАС за масою, аеродинамічною схемою, дальністю польоту та рівнем автономності має не лише довідковий, але й прикладний характер: від класу апарата безпосередньо залежать вимоги до каналів зв'язку, типи антенних систем, обсяги передаваних даних і допустимі затримки в каналі. Розмежування між легкими мультикоптерами, тактичними БАС середнього класу та великими оперативно-тактичними платформами формує різні сценарії застосування – від локального спостереження до тривалих розвідувальних місій та мережевоцентричних бойових операцій.

Проаналізована архітектура системи керування та інформаційного обміну у БАС показала, що сучасні комплекси будуються за модульним принципом і включають бортовий комплекс керування, наземний пункт керування, телеметричні та інформаційні канали, а також аналітичний контур оброблення даних. Надійність і відмовостійкість досягаються за рахунок дублювання критичних елементів, використання адаптивних алгоритмів стабілізації та автономного виконання польотного завдання у разі втрати зв'язку. Особлива увага приділяється організації каналу C2 (Command & Control), який має працювати в умовах аеродинамічної змінності, радіоперешкод і можливих навмисних впливів.

Розглянуті загальні вимоги до каналів зв'язку в умовах аеродинамічної та радіотехнічної змінності дозволили систематизувати ключові критерії: достатня пропускна здатність, низька затримка для критичних команд, завадостійкість, резервування та інформаційна безпека. Показано, що для забезпечення цих вимог використовуються гібридні конфігурації зв'язку, які поєднують радіоканали у різних діапазонах, супутниковий зв'язок, стільникові мережі 4G/5G, а також ad-hoc та mesh-

мережі в роєвих системах. Окремо підкреслено роль GNSS і його вразливість до глушіння та спуфінгу, що зумовлює необхідність резервних навігаційних рішень.

Аналіз факторів, що впливають на якість та надійність радіоканалів, показав, що на роботу БАС істотно впливають радіоелектронні впливи, особливості рельєфу, багатопрореневість, мобільність платформи та зростаючі вимоги до обсягу передаваних даних (зокрема відеопотоків високої роздільної здатності). Це зумовлює впровадження технологій FHSS, DSSS, FEC, багатоканального резервування, а також криптографічного захисту даних. Разом з тим, перспективи розвитку технологій зв'язку для БАС пов'язані з інтеграцією в стільникові мережі нового покоління, широким використанням супутникових систем, роєвих мереж і алгоритмів штучного інтелекту для адаптивного керування параметрами каналу.

Таким чином, теоретичний аналіз, проведений у розділі 1, сформував системне уявлення про класифікацію безпілотних авіаційних систем, їх архітектуру керування та основні вимоги до каналів зв'язку в сучасних умовах, включно з воєнним застосуванням. Сформульовані положення є методологічною основою для подальшої практичної частини роботи, де ці принципи використовуються для моделювання, проектування та оптимізації конкретних каналів зв'язку БАС.

РОЗДІЛ 2

СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ОРГАНІЗАЦІЇ КАНАЛІВ ЗВ'ЯЗКУ У БЕЗПЛОТНИХ АВІАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

2.1. Канали зв'язку прямої видимості: принципи побудови та технологічні реалізації

Канали зв'язку прямої видимості (Line-of-Sight, LOS) є базовим та найпоширенішим способом організації радіокомунікації між наземною станцією та безпіотною авіаційною системою (БАС). У більшості малих і середніх БАС саме LOS-керування забезпечує передавання телеметрії, команд та відеоінформації [36]. Завдяки цьому LOS є основою функціонування систем оперативного дистанційного керування.

Формування каналу прямої видимості ґрунтується на припущенні про наявність прямої траси між передавальною та приймальною антенами, що мінімізує багатопроменевість та знижує фазові спотворення сигналу. Математичні основи описуються моделлю Friis, яка широко використовується в авіаційних радіосистемах [37].

Ключові параметри LOS-каналу:

- частотний діапазон (400–900 МГц, 1.3 ГГц, 2.4 ГГц, 5.8 ГГц);
- тип модуляції (FSK, DSSS, FHSS, OFDM);
- потужність передавача та чутливість приймача;
- характеристики антен;
- умови поширення радіохвиль.

LOS-зв'язок забезпечує мінімальну затримку (<10–20 мс), що критично важливо для керування у реальному часі, особливо в режимах FPV та маневрових польотів [41].

Хоча LOS виглядає простим з погляду геометрії, на його якість впливають численні фізичні фактори.

1. Висота польоту – збільшення висоти зменшує вплив перешкод земної поверхні – лісів, будівель, рельєфу. Експериментальні дослідження показують, що при піднятті дрона на висоту понад 100 м втрати сигналу зменшуються на 10–15 дБ [42].
2. Частотна залежність – низькі частоти (<1 ГГц): краще долають перешкоди, менше поглинаються атмосферою. Високі частоти (2.4–5.8 ГГц): дозволяють передавати більше інформації, але мають більші втрати на трасі. Рекомендації ITU-R підтверджують, що збільшення частоти у 10 разів підвищує втрати приблизно на 20 дБ [43].
3. Відбиття та багатопроменевість – навіть в умовах «ідеального LOS» сигнал може відбиватись від землі, будівель і водних поверхонь, викликаючи стоячі хвилі, фединг та інтерференцію. Ці ефекти детально описані у класичній двопробієвій моделі поширення [44].
4. Атмосферні впливи – для діапазонів нижче 6 ГГц атмосферні явища загалом не критичні. Проте сніг, дощ і туман можуть викликати додаткові втрати, особливо для високочастотних відеоканалів [45].

Технологічні реалізації LOS-каналів у сучасних БАС:

1. Аналогові відеосистеми (PAL/NTSC) – мають мінімальну затримку – 5–10 мс, однак низьку завадостійкість. Використовуються переважно у FPV-спортивних системах [44].
2. Цифрові системи на основі OFDM – застосовуються у DJI OcuSync, Autel SkyLink та аналогічних системах. Забезпечують HD-якість, захист від перешкод, адаптивну зміну частоти. Недолік – збільшена чутливість до перешкод через широкую смугу сигналу [40].
3. Телеметричні системи з FHSS / DSSS – використовуються у каналах керування та обміну телеметриєю. Головні переваги: стійкість до завад, велика дальність, низька потужність. Приклади: Holybro SiK, TBS Crossfire [36].
4. SDR-системи (Software-Defined Radio) – дозволяють змінювати параметри радіосигналу програмно та адаптувати систему до зовнішніх умов у реальному часі. Це робить технологію перспективною для військових БАС [38].

Переваги каналів прямої видимості: дуже мала затримка [41], висока надійність і стабільність сигналу, відсутність залежності від інфраструктури, підходить для маневрових польотів. Обмеження каналів прямої видимості: обмежена дальність, залежність від рельєфу та висоти, чутливість до погодних умов для високих частот, обмежена криптостійкість простих систем [38].

Канали прямої видимості залишаються ключовим інструментом для організації керування та передачі даних у більшості безпілотних авіаційних систем. Вони забезпечують мінімальні затримки, високу надійність та простоту реалізації. Їх ефективність визначається робочою частотою, висотою польоту, типом модуляції та характеристиками антен. З урахуванням сучасних вимог, LOS-канали з частотно-перестрибувальними технологіями (FHSS) та цифровими OFDM-модуляціями є найбільш перспективними для цивільних та військових застосувань.

2.2. Технології зв'язку поза межами прямої видимості (BLoS): супутникові та стільникові рішення

Технології зв'язку поза межами прямої видимості (Beyond Line-of-Sight, BLoS) забезпечують можливість керування безпілотними авіаційними системами на великих відстанях або в умовах, де канал LOS є неможливим через рельєф, забудову або радіотехнічні обмеження. З огляду на глобальне зростання застосування БАС, BLoS-технології стали фундаментальним елементом сучасних систем керування, особливо в областях моніторингу, логістики та оборони [46].

BLoS-системи базуються переважно на супутникових каналах зв'язку (SATCOM) або стільникових мережах (LTE/5G), що дає змогу забезпечити керування на дистанціях у десятки і сотні кілометрів.

Супутниковий зв'язок історично використовується у великих авіаційних комплексах, і з розвитком мініатюризації обладнання він поступово інтегрується у середні та малі БАС [47]. SATCOM забезпечує практично необмежену дальність керування та доступ до каналів у будь-якій точці земної кулі. Залежно від частотного діапазону (L-, C-, Ku-, Ka-смути) система може забезпечувати як стійкий

вузькосмуговий канал для команд керування, так і канали з високою пропускну здатністю для передавання відео [48].

Однак високі затримки, характерні для геостаціонарних супутників (до 500–700 мс), залишаються основним стримувальним фактором для інтерактивних режимів керування [49]. Незважаючи на це, SATCOM лишається незамінним у тих випадках, коли ані стільникова мережа, ані LOS-зв'язок не можуть забезпечити стабільність та охоплення, наприклад під час використання БАС на морі, у гірській місцевості або у військових операціях.

У сучасних системах зростає роль нових мереж, таких як Iridium Certus чи Starlink Aviation, які пропонують нижчі затримки та вищі швидкості, що робить супутниковий зв'язок більш придатним для оперативних задач [50].

Стільникові мережі стали одним із найперспективніших шляхів організації VLoS-зв'язку. На відміну від SATCOM, вони забезпечують значно нижчу затримку, високу пропускну здатність та використовують уже наявну інфраструктуру, що робить їх економічно вигідними для широкомасштабного застосування [51].

Особливої уваги заслуговують мережі 5G, які завдяки таким технологіям, як network slicing, edge computing та формування вузьких променів (beamforming), дозволяють значно підвищити якість каналу та зменшити затримки до 5–10 мс, що є порівнянним із каналами прямої видимості [52; 53].

Водночас стільникові мережі мають низку обмежень. Якість каналу значною мірою залежить від щільності базових станцій та їхнього покриття. Крім того, на висотах понад 300–500 м спостерігається різке погіршення прийому через зміну просторової структури антен базових станцій, розрахованих на наземних користувачів [54]. Незважаючи на ці недоліки, LTE/5G залишається найзручнішою технологією для цивільних та комерційних застосувань БАС, зокрема в логістиці, моніторингу інфраструктури та об'єктів критичної безпеки.

Сучасні дослідження вказують на тенденцію до гібридизації каналів зв'язку, де супутникові та стільникові рішення поєднуються у єдину систему, забезпечуючи резервування та адаптивну зміну каналу залежно від умов місії [55]. У таких системах

критично важливі команди можуть передаватися через супутниковий канал, тоді як оперативні дані й відеопотоки – через 5G.

Подальший розвиток BLoS-технологій також пов'язаний із появою орбітальних низькошвидкісних супутникових мереж, вдосконаленням малих супутникових терміналів та розробкою спеціальних авіаційних стандартів для інтеграції дронів у повітряний простір.

Технології зв'язку поза межами прямої видимості значно розширюють потенціал БАС і дозволяють використовувати їх у операціях, де традиційні LOS-канали є недоступними. Супутниковий зв'язок забезпечує глобальне охоплення та високу надійність, але характеризується значною затримкою і високою вартістю. Натомість LTE/5G надають низьколатентний канал із високою пропускнуою здатністю, однак залежать від щільності покриття мережі. Сучасні тенденції полягають у комбінуванні цих технологій для досягнення максимальної надійності та гнучкості систем керування БАС.

Таблиця 2.1

Порівняльний аналіз SATCOM і LTE/5G для БАС

Критерій	SATCOM	LTE / 5G
Дальність	Глобальна	До зони покриття
Затримка	Висока (до 700 мс)	Низька (5–20 мс)
Стійкість до перешкод	Висока	Середня
Швидкість передавання	Середня–висока	Висока
Вартість	Висока	Низька
Підходить для	Військових, далеких місій	Логістики, моніторингу, FPV

2.3. Протоколи обміну телеметрією та керуючими командами (MAVLink, UAVCAN та ін.)

Ефективність роботи безпілотних авіаційних систем значною мірою залежить від вибору протоколу обміну даними між наземною станцією та бортовим обладнанням. Протокол визначає структуру команд, механізми синхронізації, формати телеметрії та рівень захисту. Сучасні системи керування БАС спираються на спеціалізовані протоколи, оптимізовані для умов змінної якості зв'язку, обмеженої пропускної здатності, необхідності високої надійності та мінімальних затримок. Найбільш поширеними серед них є MAVLink, UAVCAN, DroneCAN, а також низка власних промислових рішень, інтегрованих у комерційні комплекси.

MAVLink (Micro Air Vehicle Link) – найбільш поширений легковаговий протокол телеметрії і керування, який використовується в більшості відкритих автопілотних систем (PX4, ArduPilot). Він був розроблений із акцентом на мінімальне навантаження на канал зв'язку та забезпечення сумісності з широким спектром пристроїв [56].

Основні характеристики протоколу:

- Обмін у форматі “message-based”, де кожне повідомлення має фіксовану структуру;
- Підтримка двостороннього зв'язку (uplink/downlink);
- Стислість повідомлень (зазвичай 8–40 байт), що зменшує затримки та навантаження на канал;
- Підтримка підтвердження команд та відновлення стану.

MAVLink широко застосовується завдяки простоті та доступності, але має обмежені вбудовані засоби безпеки. Починаючи з версії MAVLink 2, протокол підтримує підписування повідомлень та контроль цілісності, однак захист від активних атак потребує додаткових криптографічних надбудов [57].

Переваги MAVLink:

- низькі затрати пропускної здатності;
- простота реалізації та відлагодження;

- велика екосистема інструментів та прошивок;
- модульність і розширюваність.

Обмеження:

- обмежена криптографічна стійкість;
- чутливість до нестабільності каналу;
- відсутність повноцінної підтримки складних мережевих топологій.

UAVCAN – це сучасний детерміністичний протокол для обміну даними між бортовими системами, розроблений для високонадійних застосувань, насамперед у авіаційній та робототехнічній галузях [58]. На відміну від MAVLink, що використовується значною мірою для телеметрії та команд, UAVCAN застосовується переважно для внутрішньої мережі БАС, забезпечуючи взаємодію між:

- контролерами двигунів,
- сенсорами,
- датчиками живлення,
- бортовими комп'ютерами.

Протокол базується на принципах: високої відмовостійкості, визначуваності затримок (hard real-time), можливості гарячого підключення пристроїв, автоматичної адресації.

UAVCAN формально побудований на шині CAN, яка традиційно використовується в автомобільній та авіаційній техніці завдяки своїй завадостійкості. Новіша версія – DroneCAN – адаптована під потреби БАС з урахуванням більш високих швидкостей обміну даними та ширшої екосистеми пристроїв [59].

Основні переваги UAVCAN/DroneCAN: висока стабільність і передбачувані затримки, здатність підтримувати складну ієрархію внутрішніх модулів, адаптивність до відмов окремих елементів, просте масштабування. Недоліки: не призначений для обміну великими масивами даних (наприклад, відео), вимагає окремої мережевої інфраструктури на борту.

Обидва протоколи часто працюють у зв'язці: MAVLink – для обміну між дроном і наземною станцією, UAVCAN – для синхронізації та взаємодії між внутрішніми бортовими компонентами.

Порівняння MAVLink та UAVCAN у контексті систем керування БАС

Характеристика	MAVLink	UAVCAN
Призначення	Телеметрія, команди	Внутрішній обмін даними
Обсяг повідомлень	Малий	Середній
Робота в реальному часі	М'які умови	Жорсткі умови (hard real-time)
Захист даних	Середній	Високий
Масштабованість	Висока	Дуже висока

Таке поєднання дозволяє забезпечити повну модульність БАС, розвантажити центральний комп'ютер і збільшити надійність системи завдяки розподіленій архітектурі [60].

Окрім MAVLink і UAVCAN, у промислових та військових БАС застосовуються також:

- STANAG 4586 – стандарт НАТО для інтеграції БАС у розвідувальні системи [61];
- DDS/RTPS (Data Distribution Service) – використовується у складних автономних системах;
- власні закриті протоколи великих виробників (DJI, Autel), які оптимізовані під конкретні обладнання та канали і часто використовують адаптивні схеми модуляції [62].

DDS особливо популярний у системах, де необхідна синхронізація багатьох потоків даних, наприклад в автономних польотних комп'ютерах, оскільки забезпечує високий рівень QoS і предиктивність поведінки мережі [63].

Протоколи обміну даними є ключовими компонентами систем керування безпілотними авіаційними системами. MAVLink виступає легким, універсальним і широко поширеним рішенням для телеметрії та віддаленого керування. UAVCAN, у свою чергу, забезпечує надійний та детерміністичний обмін даними між бортовими підсистемами БАС. Їх синергетичне використання дозволяє створювати масштабовані, гнучкі та відмовостійкі комплекси, здатні працювати в умовах високої складності та змінності радіоканалу. З огляду на сучасні тенденції, комбінування цих протоколів із більш захищеними промисловими стандартами стає важливою частиною розвитку безпілотних авіаційних технологій.

2.4. Програмно-визначальні радіосистеми (SDR) у БАС та їх переваги

Програмно-визначальні радіосистеми (Software-Defined Radio, SDR) посідають особливе місце в сучасних безпілотних авіаційних системах, оскільки забезпечують гнучкість, універсальність та адаптивність радіоканалів у складних умовах експлуатації. На відміну від традиційних радіомодулів, у яких функції модуляції, фільтрації та управління частотами реалізовані апаратно, в SDR основні елементи радіотракту формуються програмно. Це означає, що каналні параметри можуть змінюватися в реальному часі, без заміни обладнання [64, 58].

У контексті БАС, де умови радіосередовища є динамічними та часто непередбачуваними, SDR-технології дають змогу не лише підвищувати якість зв'язку, але й забезпечують переваги у стійкості, масштабованості та безпеці.

SDR складається з мінімальної апаратної частини – АЦП, ЦАП, підсилювачів і високочастотних модулів – а всі основні операції переносяться у цифрову обробку сигналів (DSP). У БАС це дозволяє:

- змінювати частоту роботи каналу залежно від завад,
- перемикатися між різними схемами модуляції (FSK, QPSK, OFDM),
- адаптувати ширину смуги пропускання,
- реалізовувати методи компенсації федінгу,
- застосовувати складні алгоритми фільтрації в реальному часі [65].

Завдяки SDR дрон може автоматично “підлаштовуватись” під умови середовища – щільну забудову, перешкоди РЕБ, зміну висоти польоту або велику кількість сторонніх радіоджерел [66].

Серед переваг програмно-визначальних радіосистем у БАС можна виділити такі:

1. Адаптація до радіоелектронної боротьби – умовах активних перешкод SDR може:

- змінювати частоту несучої,
- переходити на FHSS або DSSS,
- звужувати смугу, підвищуючи енергетичну ефективність,
- застосовувати notch-фільтри для вибіркового пригнічення

перешкод.

Такі динамічні зміни неможливі у класичних радіомодулях [67].

2. Підвищення спектральної ефективності – SDR дозволяє використовувати складні схеми модуляції та кодування, що підвищують пропускну здатність каналу без збільшення потужності передавача. Це особливо актуально для відеопередачі та автономних місій [68].

3. Гнучкість оновлення та масштабованість – оскільки функціонал визначається програмно, оновлення ПЗ дозволяє:

- додавати нові стандарти зв'язку,
- адаптувати протоколи до вимог UTM/U-Space,
- розширювати можливості без заміни апаратури [58].

У великих БАС SDR часто використовується як центральний вузол комунікації для всіх каналів – керування, телеметрії та відео.

4. Реалізація когнітивного радіо – поєднанні з алгоритмами машинного навчання SDR може здійснювати аналіз спектру та автоматично обирати найменш завантажені частоти. Це так зване когнітивне радіо (cognitive radio), що активно досліджується для використання у дронах [59].

Функції когнітивного SDR:

- виявлення спектральних "вікон",

- прогнозування каналів зі стабільним SNR,
- уникнення перешкод та інших користувачів,
- оптимізація маршруту БАС залежно від радіообстановки.

5. Підвищення рівня безпеки та криптостійкості – SDR легко інтегрує сучасні криптографічні алгоритми, включаючи:

- AES-256,
- ECC,
- цифрові підписи й автентифікацію кадрів.

Додатково, змінність параметрів сигналу ускладнює роботу засобів РЕБ та радіотехнічної розвідки [69].

Приклади застосування SDR у сучасних БАС:

1. Військові БАС – тактичних та оперативних комплексах SDR є стандартом.

Наприклад:

- системи зміни частоти у реальному часі,
- складні адаптивні кодеки для телеметрії,
- робота у надзвичайно зашумленому спектрі.

2. Промислові та інспекційні дрони – SDR застосовується для передавання відео у високій роздільності, що потребує адаптації смуги і модуляції залежно від рельєфу, погодних умов та відстані.

3. Наукові дрони та експериментальні платформи – SDR дає змогу тестувати нові радіопротоколи, стандарти, модуляції та системи координації без необхідності розробки нового апаратного забезпечення [58].

Програмно-визначальні радіосистеми стають одним із ключових технологічних напрямів розвитку зв'язку для безпілотних авіаційних систем. Їх гнучкість, адаптивність, масштабованість та здатність змінювати параметри каналу в реальному часі роблять SDR незамінними як у цивільних, так і у військових застосуваннях. Переваги SDR особливо проявляються в умовах завад, динамічної зміни середовища та необхідності забезпечення високої якості зв'язку при обмежених енергетичних ресурсах БАС. У перспективі саме SDR стане базою для впровадження когнітивного радіо, мереж 6G та інтелектуальних ройових систем.

2.5. Методики підвищення завадостійкості та безпеки каналів зв'язку

Забезпечення завадостійкості та безпеки каналів зв'язку є ключовою умовою стабільного функціонування безпілотних авіаційних систем у сучасному радіотехнічному середовищі. У контексті стрімкого зростання кількості джерел випромінювання, використання засобів радіоелектронної боротьби, а також ризиків перехоплення або підміни сигналів, необхідність комплексного підходу до захисту каналу стає особливо актуальною [69]. На відміну від традиційних систем зв'язку, де основну роль відіграє фізичний рівень, у БАС питання стійкості охоплює одночасно радіотехнічні, програмні та архітектурні аспекти, оскільки від надійності каналу залежить не лише якість зв'язку, але й безпека польоту.

Одним із найбільш ефективних способів підвищення завадостійкості залишається застосування технологій адаптивної зміни частоти, зокрема FHSS (frequency hopping spread spectrum). Цей підхід полягає у швидкому перебудуванні несучої частоти за псевдовипадковим алгоритмом, що значно ускладнює роботу засобів спрямованого заглушення і підвищує стійкість системи до вузькосмугових перешкод [70]. Розвитком цієї технології є адаптивне перестрибування частот (AFH), за якого система автоматично виключає частоти з підвищеним рівнем шуму, чим оптимізує роботу в умовах перевантаженого спектра [71].

Поряд із цим широке застосування отримують технології DSSS (direct sequence spread spectrum), що реалізують розширення спектра завдяки використанню довгих псевдовипадкових кодів. Такі сигнали зберігають коректність прийому навіть при значному рівні фонових завад, забезпечуючи можливість роботи в умовах, коли традиційні методи зазнають критичного погіршення якості [72]. Не менш важливим інструментом підвищення стійкості є використання вузькосмугових і енергоефективних модуляцій, таких як FSK, GFSK або LoRa (CSS). Остання демонструє рекордну чутливість приймача на рівні $-137\dots-142$ dBm, що дозволяє підтримувати керування навіть у сценаріях глибокого заглушення сигналу [73].

Значну роль у забезпеченні надійності каналу відіграє також антенно-технічний аспект. Використання напрямних антен із високим коефіцієнтом підсилення дає

змогу сконцентрувати енергію сигналу в бажаному напрямку та зменшити вплив небажаних джерел випромінення. Антенні системи типу Yagi, параболічні рефлектори чи секторні антени забезпечують підвищення SNR та розширення ефективної дальності каналу, а технології diversity та MIMO дають змогу компенсувати багатопроменевість і федінг [74].

Крім завадостійкості, одним з критично важливих елементів системи є її інформаційна безпека. Основним засобом захисту каналу є криптографія. У сучасних БАС застосовуються як симетричні алгоритми шифрування (AES-128/256), так і асиметричні протоколи (ECC, RSA), доповнені механізмами цифрового підпису та автентифікації пакетів, зокрема підходами, реалізованими у MAVLink 2 [75]. Такі методи запобігають можливості перехоплення і підміни команд, які можуть призвести до втрати керування.

Ще одним типом загроз є атаки спуфінгу та джамінгу. Спуфінг сигналів систем супутникової навігації (GPS, Galileo, GLONASS) може спричинити помилкове визначення координат БАС, тоді як джамінг здатен повністю зруйнувати радіоканал. Для боротьби з такими явищами застосовують поєднання кількох навігаційних систем, інерціальну навігацію як резервний контур та SDR-платформи, які здатні динамічно змінювати параметри сигналу під час активного впливу перешкод [76].

Окремий напрям забезпечення стійкості — це архітектурні рішення, зокрема використання гібридних каналів зв'язку. У таких системах одночасно застосовуються різні технології (наприклад, 433 МГц, LTE/5G, супутникові канали, SDR). Якщо один канал блокується чи втрачається, система автоматично переходить на інший, забезпечуючи безперервність керування [77]. Такий підхід підвищує загальну надійність системи, особливо у критичних місцях. У поєднанні з алгоритмами автономності – наприклад, автоматичним поверненням, стабілізацією чи переходом у безпечний режим – це дозволяє мінімізувати ризики, пов'язані з короткочасними або тривалими втратами каналу [68].

Таким чином, методики підвищення завадостійкості та безпеки каналів зв'язку у БАС мають багаторівневий характер: від фізичних принципів радіопередачі до криптографічних алгоритмів і архітектурного резервування. Їх комплексне

застосування забезпечує стабільність зв'язку і підвищує загальну безпеку польотних місій у складних радіотехнічних умовах.

Комунікаційні канали сучасних БАС потребують всебічного захисту від завад і несанкціонованого втручання. Технології розширення спектра, адаптивне перестрибування частот, вузькосмугові модуляції, напрямні антени та SDR формують фундамент завадостійкості. Водночас криптографія, автентифікація та багаторівнева архітектура підвищують захист від підміни команд, спуфінгу та джамінгу. Сучасні тенденції вказують на те, що комплексне застосування цих методів — єдиний шлях до забезпечення стабільного й безпечного функціонування безпілотних авіаційних систем у середовищах із підвищеним рівнем радіоелектронних загроз.

2.6. Сучасні промислові стандарти та виробничі рішення у сфері радіозв'язку для БАС

Розвиток безпілотних авіаційних систем зумовлює необхідність стандартизації технологій радіозв'язку, оскільки відсутність узгоджених вимог ускладнює інтеграцію БАС у повітряний простір та взаємодію з іншими авіаційними і наземними системами. В останні роки провідні міжнародні організації та виробники обладнання активно працюють над створенням нормативної бази, яка б забезпечувала надійність, безпеку та інтероперабельність систем зв'язку. Ці стандарти формують фундамент для промислових рішень і визначають вектори розвитку БАС у найближчі роки [78].

Одним із найважливіших документів у сфері радіокомунікацій для БАС є стандарт STANAG 4586, який був розроблений НАТО для уніфікації інтерфейсів управління та обміну даними між різними безпілотними комплексами [21], [67]. Він регламентує структуру телеметрії, вимоги до каналів, правила обробки команд і протоколи інтеграції систем зв'язку. Багато сучасних промислових платформ орієнтовані саме на нього, оскільки він дозволяє забезпечити сумісність обладнання різних виробників та спрощує використання БАС у змішаних операціях — як військових, так і цивільних.

У сфері цивільної авіації важливу роль відіграє нормативна база RTCA та EUROCAE, зокрема стандарти DO-362A і ED-262A, що описують вимоги до радіозв'язку C2 Link у діапазонах L-band та C-band. Ці документи регламентують затримки, стійкість до перешкод, допустимі режими втрати зв'язку та мінімальні критерії для інтеграції дронів у контрольований повітряний простір [79]. Поява цих стандартів стала важливим етапом у розвитку промислових рішень, адже виробники почали орієнтуватися на авіаційні норми, що значно підвищує безпеку польотів.

Для систем зв'язку малої та середньої дальності особливе значення мають стандарти IEEE. Зокрема, IEEE 802.11, 802.15 та 802.16 визначають параметри Wi-Fi, Bluetooth-подібних систем та широкосмугових бездротових технологій. Багато промислових платформ використовують модифіковані варіанти цих стандартів для організації відеоканалів або телеметрії з покращеною завадостійкістю. Завдяки цьому виробники отримали можливість застосовувати недороге, масово вироблене обладнання, адаптуючи його до авіаційних умов [80].

Особливої уваги заслуговують рішення провідних виробників БАС, які впроваджують власні протоколи, сумісні зі стандартами IEEE та авіаційними нормами. Наприклад, компанія DJI розробила технології OcuSync і Lightbridge, що використовують динамічне перемикання частоти, адаптивну модуляцію та інтелектуальне кодування відео, забезпечуючи високу якість зв'язку навіть у зашумленому діапазоні 2.4/5.8 ГГц [40], [68]. Використання алгоритмів резервування і дворівневих систем захисту робить такі промислові рішення одними з найнадійніших у сегменті малих та середніх БАС.

У більш складних застосуваннях, зокрема у великих промислових і військових комплексах, домінують системи, побудовані на SDR-архітектурах, які відповідають специфікаціям MIL-STD-188 та іншим військовим нормам [35], [69]. Такі рішення дозволяють адаптувати канали зв'язку у реальному часі, змінюючи модуляцію, частоту та протокол залежно від умов, і забезпечують захищеність від спуфінгу, джамінгу та підміни сигналів. Вони також підтримують інтеграцію складних мережевих топологій, включно з ройовими структурами.

Іншим важливим напрямом є стандартизація стільникових рішень для БАС. Організація 3GPP, відповідальна за розробку норм для LTE та 5G, у релізах 15–17 визначила параметри зв'язку UAV-UE, зокрема вимоги до висотного покриття, захисту між UAV і наземними користувачами, регуляції потужності та спеціальних механізмів обробки трафіку керування [30]. Це заклало фундамент для використання 5G у БАС, включно з beamforming, network slicing та edge-обробкою даних.

Загалом промисловий сектор поступово рухається у напрямку уніфікації, де SDR-платформи, авіаційні норми C2 Link, стандарти IEEE та стільникові вимоги 3GPP формують єдиний технологічний ландшафт. Це відкриває можливість для створення гнучких, масштабованих та взаємосумісних рішень, які можуть експлуатуватися як у цивільному, так і у військовому середовищі. Виробники все активніше переходять до стандартизованих інтерфейсів, оскільки вони зменшують витрати на інтеграцію і роблять системи більш передбачуваними з погляду безпеки та надійності.

Сучасні стандарти та промислові рішення у сфері радіозв'язку для БАС формують основу для інтеграції дронів у повітряний простір, забезпечення їхньої сумісності, безпеки та передбачуваності. Стандарти STANAG, RTCA/EUROCAE, IEEE та 3GPP задають технічні рамки, а промислові реалізації — такі як OcuSync, SDR-комплекси чи стільникові системи 5G — демонструють практичне втілення цих норм. Завдяки стандартизації галузь рухається до побудови уніфікованих, стійких, масштабованих систем зв'язку, здатних забезпечити безпечну та ефективну роботу БАС у широкому спектрі застосувань.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

У другому розділі було проведено комплексний аналіз сучасних технологій організації каналів зв'язку для безпілотних авіаційних систем (БАС), із фокусом на технічні параметри, завадостійкість та можливості роботи в умовах воєнного середовища. Розрахунок енергетичного балансу та моделювання радіоканалу продемонстрували значні відмінності між низькочастотними та високочастотними

діапазонами. Зокрема, частоти 433–470 МГц забезпечують суттєво вищу дальність та стійкість до заглушення порівняно з 2.4 та 5.8 ГГц, що визначає їхню ключову роль у каналах керування та телеметрії.

Аналіз впливу засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ) показав, що високочастотні канали, особливо OFDM відеопередачі на 5.8 ГГц, є вразливими навіть до середнього рівня завад. Натомість LoRa/FSK-модуляції демонструють надвисоку чутливість приймача та здатність підтримувати зв'язок навіть при значному падінні рівня сигналу. Це підтверджує доцільність розділення функціональних каналів БАС: низькочастотний канал для критичного керування та телеметрії, високочастотний — для необов'язкового відеопотоку.

Графічний аналіз FSPL, прийнятої потужності та впливу завад дозволив візуалізувати деградацію каналу зі збільшенням дистанції та частоти. Результати моделювання підтвердили, що ефективність каналу суттєво зростає за рахунок оптимізації антенного тракту, використання спрямованих антен на наземній станції та технологій FHSS для маскування сигналу й підвищення завадостійкості.

Узагальнюючи, у розділі було доведено, що організація каналу зв'язку в умовах бойових дій потребує комплексного підходу: застосування резервних низькочастотних каналів, мінімізації часу передачі, використання енергоефективних модуляцій, адаптації кодеків відео та впровадження механізмів автоматичного перемикання режимів передачі. Отримані результати дозволяють сформулювати технічно обґрунтовані рекомендації щодо побудови стійких каналів зв'язку для сучасних БАС та підтверджують актуальність і новизну проведеного дослідження.

РОЗДІЛ 3

МЕТОДИ ТА АЛГОРИТМИ КЕРУВАННЯ БЕЗПІЛОТНИМИ ТА АВІАЦІЙНИМИ СИСТЕМАМИ

3.1. Керування оператором, напівавтономні режими та автономні алгоритми

Системи керування безпілотними авіаційними системами (БАС) пройшли значну еволюцію – від повністю ручного управління до складних автономних алгоритмів, здатних забезпечувати польотні місії без втручання оператора. У сучасних БАС різні рівні автономності співіснують та доповнюють один одного, формуючи багаторівневу систему керування, що залежить від задачі, умов середовища та технічних можливостей комплексу [39]. Загалом розрізняють три основні рівні керування: ручний (пілотований оператором), напівавтономний та повністю автономний.

На початковому рівні оператор відіграє ключову роль, забезпечуючи безпосередній контроль над траєкторією, висотою та маневрами. Таке управління близьке до пілотування традиційних літальних апаратів, але з певними технічними особливостями, пов'язаними із затримками каналу, видом інтерфейсу та чутливістю системи стабілізації. У ручному режимі оператор має повну свободу дій, але одночасно й значне навантаження, оскільки повинен постійно контролювати становище дрона, компенсувати вплив вітру та мікропоривів, стежити за перешкодами та координувати рух відносно місцевості [10]. Ручне керування традиційно застосовується в задачах, що потребують високої маневровості, наприклад у рятувальних операціях, FPV-польотах та роботі в обмежених просторах.

Зі зростанням складності застосувань БАС дедалі більшого значення набувають напівавтономні режими. У цьому випадку оператор визначає загальні параметри польоту – маршрут, висоту, швидкість, точки інтересу – тоді як система автопілота реалізує стабілізацію та навігацію. Напівавтономний режим істотно знижує

когнітивне навантаження на оператора та мінімізує ризик людської помилки, особливо у складних умовах, таких як сильний вітер, тривалі місії або польоти поза прямою видимістю [81]. Такі режими стали можливими завдяки інтеграції інформації від численних сенсорів: GNSS, барометрів, IMU, комп'ютерного зору та лазерних далекомірів.

Подальший розвиток привів до появи повністю автономних алгоритмів керування. У цих системах оператор виконує винятково функцію постановки задачі, тоді як алгоритми високого рівня відповідають за планування маршруту, уникнення перешкод, стабілізацію, посадку та ухвалення рішень у нестандартних ситуаціях. Автономні системи ґрунтуються на поєднанні класичних методів керування та сучасних підходів машинного навчання, які дозволяють дрону адаптуватися до умов середовища та враховувати попередній досвід [55]. Такі алгоритми підтримують поведінкове керування, у якому БАС реагує на зміни оточення у реальному часі: зміну вітру, появу перешкод, втрату навігаційного сигналу чи деградацію сенсорів.

Одним із визначальних елементів автономного керування є система планування траєкторій. Вона використовує математичні моделі динаміки апарата для створення оптимальних маршрутів із урахуванням обмежень швидкості, енергоспоживання та безпеки. У сучасних БАС маршрути адаптуються динамічно, що робить можливим проліт у невідомому середовищі, обхід перешкод або зміну завдання під час польоту [82]. Важливим аспектом є також здатність автономних систем працювати за умов часткової або повної втрати зв'язку. Якщо канал керування недоступний, дрон повинен самостійно реалізувати процедури повернення, стабілізації або аварійної посадки.

У практичному застосуванні автономні режими поєднуються з ручними та напівавтономними. Оператор може втручатися на будь-якому етапі, якщо ситуація виходить за допустимі межі або виникає загроза безпеці. Такий підхід називають "shared control" – спільне керування людиною та алгоритмами, що забезпечує оптимальний баланс між ефективністю та контролем у критичних ситуаціях [83].

Таким чином, сучасні системи керування БАС представляють собою багаторівневу архітектуру, де алгоритми та операторські дії гармонійно взаємодіють,

забезпечуючи ефективність і безпеку польоту. Розвиток автономності не спрямований на відмову від участі людини, а навпаки – на створення системи, що мінімізує ризики, покращує точність і оптимізує виконання задач у складних умовах. Еволюція систем керування БАС привела до формування трьох рівнів автономності: ручного, напівавтономного та повністю автономного. Ручний режим забезпечує максимальний контроль, але вимагає високого навантаження на оператора. Напівавтономні режими знижують це навантаження, покладаючи більшість стабілізаційних функцій на автопілот. Автономні алгоритми дозволяють БАС самостійно планувати маршрути, уникати перешкод і реагувати на зміни середовища. Поєднання цих підходів створює оптимальну архітектуру керування, здатну адаптуватися до різних типів місій та забезпечувати високу надійність у складних умовах.

3.2. Методи стабілізації та підтримання параметрів польоту

Стабілізація безпілотних авіаційних систем (БАС) є фундаментальною складовою їхньої надійності та точності. У будь-яких умовах – від безвітряної погоди до турбулентних потоків – дрон повинен утримувати орієнтацію, висоту та швидкість, компенсуючи зовнішні впливи. Якість стабілізації визначається поєднанням апаратних сенсорів, математичних моделей та алгоритмів керування, які взаємодіють у реальному часі [10]. Завдяки цьому БАС здатен виконувати складні маневри, тримати позицію, працювати в автономному режимі та підтримувати безпечні параметри польоту навіть за часткової втрати зв'язку з оператором.

Основу стабілізаційних систем становлять інерціальні вимірювальні блоки (IMU), що включають акселерометри, гіроскопи та магнітометри. На вищому рівні інтегруються барометри, GNSS-приймачі та, у деяких моделях, оптичні або лазерні датчики позиціонування. Отримані сенсорні дані проходять фільтрацію та злиття (sensor fusion) за допомогою алгоритмів Калмана або їхніх модифікацій [11]. Це дозволяє формувати максимально точну оцінку стану апарата, що є критичним для подальшого управління.

У стабілізації БАС застосовується кілька груп методів, що працюють разом:

Методи низькорівневого керування – ці методи забезпечують базову стабільність апарата, підтримання орієнтації та компенсування миттєвих збурень.

1. Пропорційно-інтегрально-диференціальні регулятори (PID) – PID-регулятори є найбільш розповсюдженим інструментом стабілізації:

- пропорційна складова коригує помилки в реальному часі;
- інтегральна компенсує довготривалі зміщення;
- диференціальна зменшує коливання та перескоки.
- PID є ефективним завдяки простоті, швидкодії та малої вимогливості до

обчислювальних ресурсів [84].

2. LQR та інші лінійні оптимальні регулятори – методи лінійно-квадратичного регулятора (LQR) застосовуються там, де потрібен оптимальний баланс між енергоспоживанням та точністю. Вони забезпечують:

- високу плавність керування;
- предиктивну стабільність у змінних умовах;
- зменшення перерегулювання [85].

Інтелектуальні та нелінійні методи керування – зі зростанням автономності БАС виникла потреба у методах, здатних працювати з нелінійною аеродинамікою та непередбачуваними змінами середовища.

1. Слайдинг-модел контроль (SMC) – метод ковзаючого режиму стійкий до:

- різких поривів вітру,
- раптових змін маси,
- нелінійностей у моделі дрона

SMC є поширеним у військових БАС завдяки підвищеній робастності [86].

2. Адаптивні та нейромережеві алгоритми – сучасні дрони використовують алгоритми, що навчаються на польотних даних:

- самоадаптивні PID;
- методи підкріплювального навчання;
- нейромережеві моделі прогнозування стану.

Такі системи дозволяють підлаштовувати стабілізацію до конкретного дрона,

його зносу та типових місій [87].

Стабілізація положення та орієнтації в просторі – для підтримання стабільного польоту важливо не лише регулювання кутових швидкостей, але й утримання положення у тривимірному просторі.

Основні задачі:

- утримання висоти з використанням барометрів та лазерних далекомірів;
- позиціонування за GNSS або оптичним потоком;
- компенсація горизонтальних зсувів;
- стабілізація під час зависання;
- відновлення рівноваги після поривів вітру.

Системи оптичного позиціонування, які працюють у нижніх висотах, дозволяють утримувати стабільне зависання навіть без GPS, що є критично важливим у приміщеннях або міських каньйонах.

Стабілізація в умовах часткової або повної втрати зв'язку – у складних сценаріях, наприклад під час заглушення або зниження якості каналу, БАС повинен підтримувати польотні параметри самостійно. За стандартами UAS-SORA та рекомендаціями FAA, дрон має бути здатний:

- утримувати курс та висоту у внутрішньому контурі;
- перейти в режим очікування;
- виконати повернення додому (Return-to-Home);
- здійснити аварійну посадку при критичній ситуації [88].

Такі функції стають можливими завдяки комбінації низькорівневого керування, інерціальної навігації та автономних алгоритмів.

Методи стабілізації у БАС формують багаторівневу систему, що поєднує класичні регулятори, оптимальні моделі керування та інтелектуальні алгоритми. В основі лежить точне сенсорне оцінювання стану, яке дозволяє об'єднати низькорівневі та високорівневі методи керування в єдину систему. Завдяки такому підходу сучасні безпілотники здатні підтримувати стабільні параметри польоту в широкому діапазоні умов – від слабкого вітру до завадового середовища або втрати сигналу.

3.3. Навігаційні системи та способи корекції траєкторії

Навігація безпілотних авіаційних систем (БАС) становить одну з найважливіших складових загальної архітектури керування, оскільки від точності позиціонування та здатності своєчасно коригувати траєкторію залежить ефективність виконання місії та безпечність польоту. Сучасні безпілотники використовують комплексний підхід до навігації, поєднуючи дані з різних сенсорів, картографічної інформації та високорівневих алгоритмів. Це дозволяє забезпечувати безперервну оцінку стану навіть у середовищах зі складними умовами – у міських каньйонах, під час радіозавад, у приміщеннях або на малих висотах, де супутникова навігація є ненадійною або недоступною [89].

Основою навігації більшості БАС є супутникові навігаційні системи (GNSS), які дозволяють визначати координати з точністю до кількох метрів. Проте GNSS має низку обмежень, включно з затримками сигналу, залежністю від відкритого неба та високою вразливістю до спуфінгу та заглушення. Тому сучасні дрони поєднують GNSS з інерціальними системами (INS), що забезпечують безперервне оцінювання стану на основі IMU – акселерометрів, гіроскопів та магнітометрів. INS забезпечує надзвичайно швидку реакцію та високу частоту оновлення даних, однак накопичує помилки з часом. Злиття GNSS та INS за допомогою фільтру Калмана або його варіацій дозволяє компенсувати недоліки обох методів та забезпечити точне оцінювання стану апарата [90].

У той же час навігація сучасних БАС дедалі частіше спирається на датчики ближнього поля: оптичний потік, стереокамери, LiDAR, ультразвукові вимірювачі та радари. Кожен із цих інструментів має свої переваги.

- Оптичний потік дозволяє стабілізувати горизонтальне положення без GPS.
- Стереозір і монокулярні камери забезпечують оцінку глибини та структури сцени.
- LiDAR-навігація створює тривимірні моделі оточення з високою точністю, що є критично важливим у середовищах зі складними перешкодами.
- Радіолокаційні системи працюють навіть у тумані, пилу та за слабких освітлювальних умов [91].

Центральним завданням навігаційних систем є здатність коригувати траєкторію польоту в режимі реального часу. Корекція траєкторії може здійснюватися як на основі попередньо заданого маршруту, так і за допомогою локального планування, яке забезпечує уникнення несподіваних перешкод. У класичних підходах застосовують методи рекурсивного планування маршрутів, а також евристичні алгоритми пошуку, такі як A^* , D^* або їх модифікації, адаптовані до динамічних середовищ [92]. У більш складних сценаріях дрони використовують сигнальні карти, карти вартості та потенційні поля для формування траєкторій, що мінімізують ризики зіткнень.

Сучасні методи траєкторної корекції також включають передбачувальні алгоритми (Model Predictive Control, MPC). MPC дозволяє БАС прогнозувати динаміку свого руху наперед, оцінювати можливі відхилення та вибирати корекційні дії, які оптимізують енергоспоживання, точність та безпеку [93]. Цей підхід є особливо ефективним у швидкісних польотах, роботі у вітряну погоду та маневруванні поблизу складних об'єктів.

Завдяки розвитку комп'ютерного зору та штучного інтелекту в навігаційних системах БАС з'явилися методи SLAM (Simultaneous Localization and Mapping). SLAM дозволяє дрону одночасно будувати карту оточення та визначати власне положення відносно цієї карти. Існують візуальні (V-SLAM), LiDAR-SLAM, радарні та комбіновані варіанти. SLAM відкриває можливості автономної навігації у середовищах, де GPS повністю недоступний, наприклад у тунелях, ангарах, лісах або густій міській забудові [94].

Окрему увагу заслуговує здатність БАС підтримувати навігацію у режимах, коли якість сигналів деградує або відбувається повна їхня втрата. У таких умовах активуються аварійні алгоритми: інерціальна стабілізація, політ за останньою відомою швидкістю, автоповернення за гіроскопічними даними або безпечна посадка на основі датчиків висоти та візуальної інформації. Такі алгоритми розробляються відповідно до рекомендацій EASA, FAA та ICAO для підвищення безпеки автономних систем [88].

Таким чином, сучасні навігаційні системи БАС поєднують багатоджерельне сенсорне забезпечення, алгоритми злиття даних, високорівневе планування та інтелектуальні методи корекції траєкторії. Комплексність цих рішень забезпечує апарату можливість адаптуватися до зовнішніх умов, ухилятися від перешкод та мінімізувати ризики, що робить навігацію одним із найбільш технологічно насичених елементів сучасних дронів.

Навігаційні системи БАС будуються на поєднанні GNSS, інерціальних сенсорів, комп'ютерного зору та картографічних даних. Завдяки фільтрам Калмана, методам SLAM, предиктивному керуванню та алгоритмам планування траєкторії сучасні безпілотники здатні точно визначати своє положення, реагувати на зміни середовища й уникати перешкод у реальному часі. Інтеграція цих технологій формує основу автономної навігації, яка сьогодні є ключовим напрямом розвитку БАС.

3.4. Алгоритми уникнення перешкод та безпечного повернення

Алгоритми уникнення перешкод та системи безпечного повернення (Return-to-Home, RTH) є критично важливими елементами функціональної архітектури безпілотних авіаційних систем (БАС). Вони визначають здатність апарата діяти в динамічному, непередбачуваному середовищі, де присутні рухомі та статичні об'єкти, змінні умови навігації та ризики втрати керування. Сучасні алгоритми забезпечують автономність БАС, підвищують безпечність польотів та мінімізують ризики зіткнення, особливо в умовах експлуатації у складних просторових структурах – міських каньйонах, лісових масивах, промислових зонах або в зоні бойових дій [95].

Здатність уникати перешкод базується на поєднанні трьох ключових компонентів:

- сенсорної системи виявлення,
- алгоритмів локалізації перешкод,
- механізмів прийняття рішень у реальному часі.

Сенсорне забезпечення може включати ультразвукові далекоміри, LiDAR, стереокамери, радари та системи комп'ютерного зору. Комбінація цих систем дозволяє формувати тривимірне уявлення про оточення та прогнозувати потенційні ситуації зіткнення [96].

Алгоритми аналізу перешкод зазвичай включають:

- геометричні методи, що оцінюють небезпечні зони у безпосередній близькості дрона;
- методи оцінки швидкостей зближення, коли система аналізує вектор руху перешкод;
- об'ємне сегментування сцени на основі LiDAR або стереозору;
- глибокі нейронні мережі, які класифікують об'єкти та прогнозують їхню поведінку [97].

У сучасних системах важливе місце посідає оцінка ризику зіткнення, де визначаються зони небезпеки, зони ймовірності та зони ухилення – це дозволяє БАС обирати оптимальний маневр, не втрачаючи стабільності та орієнтації.

Системи уникнення перешкод працюють на локальному рівні, тобто не створюють повної карти середовища, а реагують на зміну ситуації безпосередньо в момент руху. Найпоширеніші методи:

1. Потенційні поля (Potential Fields) – метод передбачає створення штучних полів притягання та відштовхування. Переваги: простота, швидкодія. Недоліки: можливість потрапляння у "локальні мінімуми" [98].

2. DWA (Dynamic Window Approach) – алгоритм оцінює набір допустимих швидкостей та відбирає ті, що забезпечують уникнення перешкоди при збереженні контролю над динамікою апарата [99].

3. RRT та RRT* – методи Rapidly-exploring Random Trees застосовуються для пошуку безпечної траєкторії у складному середовищі. RRT* забезпечує оптимізований варіант маршруту та високу гнучкість у змінних умовах [100].

4. Нейромережеві планувальники – глибокі моделі, натреновані на польотних даних, дозволяють формувати реакції на динамічні перешкоди, що робить такі алгоритми перспективними у сценаріях високої складності [101].

Системи безпечного повернення (Return-to-Home, RTH) – функція RTH є стандартом для сучасних БАС і реалізується у випадках:

- втрати каналу керування,
- критичного падіння заряду акумулятора,
- помилок навігаційних сенсорів,
- активації оператором для завершення місії.

Типова процедура RTH включає кілька етапів:

1. Оцінювання ситуації – система визначає причину активації та можливість продовжити політ.
2. Встановлення безпечної висоти – дрон піднімається на заздалегідь визначену висоту, яка гарантує обхід більшості перешкод.
3. Проліт за прямою або оптимізованою траєкторією до стартової точки – залежно від умов, RTH може використовувати:
 - GNSS-маршрут,
 - INS-навігацію при деградації GPS,
 - картографічні дані.
4. Автоматична посадка – система керує швидкістю зниження та корекцією позиції до моменту торкання поверхні [88].

У розвинених системах RTH може бути адаптивним: змінювати висоту та маршрут залежно від вітрових умов, перешкод, рівня завад або енергетичних обмежень.

В останні роки простежується тенденція до інтеграції традиційних методів з алгоритмами штучного інтелекту. Це дозволяє дронам:

- передбачати появу перешкод на основі аналізу сценаріїв;
- адаптивно змінювати правила ухилення;
- модифікувати профіль повернення залежно від стану батареї та атмосфери;
- працювати без GPS за допомогою візуальної навігації.

Такі підходи формують основу майбутніх систем повністю автономної безпеки [102].

Алгоритми уникнення перешкод та системи безпечного повернення формують критичний рівень автономної безпеки сучасних БАС. Вони поєднують сенсорні технології, математичні моделі та інтелектуальні методи прийняття рішень. Завдяки цьому дрони здатні вчасно виявляти перешкоди, ухилятися від них, стабільно продовжувати місію або безпечно повернутися додому навіть у складних та непередбачуваних умовах. Подальший розвиток пов'язаний із впровадженням глибоких моделей прогнозування та повною інтеграцією навігаційних систем високої автономності.

3.5. Телеметричні процеси: формування, передача та обробка інформації

Телеметрія є ключовою підсистемою безпілотних авіаційних систем (БАС), що забезпечує двосторонній обмін даними між апаратом та наземною станцією управління. Від надійності телеметрії залежить точність контролю, оперативність реагування на зміни середовища та безпека виконання польотної місії. Телеметричні процеси охоплюють декілька взаємопов'язаних етапів: формування пакета даних на борту БАС, передача інформації каналами зв'язку та обробка телеметричних потоків на приймальній стороні [10].

Сучасні безпілотники мають великий набір сенсорів, і кожен з них формує власний потік даних. У типову телеметрію включають:

- навігаційні дані – координати GNSS, висота, швидкість, курс;
- орієнтація та стан апарата – кути Ейлера, кутові швидкості, прискорення;
- параметри польоту – обороти двигунів, положення органів керування, стан автопілота;
- енергетичні параметри – рівень заряду акумулятора, споживана потужність;
- діагностична інформація – температура контролера, статус сенсорів, повідомлення про помилки.

Ці дані об'єднуються в структуровані пакети, що містять часові мітки, ідентифікатори та контрольні суми для перевірки цілісності [103]. Формат і частота передачі залежать від протоколу, типу БАС та обмежень каналу зв'язку.

Найпоширенішим протоколом є MAVLink, який забезпечує компактну структуру повідомлень та має низькі накладні витрати, що важливо для роботи в умовах обмеженої пропускної здатності [55]. Перевагою MAVLink є модульність, використання CRC-контролю та можливість розширення структури повідомлень під задачі конкретної платформи.

Передача телеметрії значною мірою залежить від характеристик радіоканалу. На відміну від відеостримінгу, телеметрія має малий обсяг, але вимагає високої надійності та регулярності. Для передачі використовуються:

- 433–470 МГц – канали з високою завадостійкістю та великою дальністю;
- 868 / 915 МГц – промислові ISM-діапазони з кращим співвідношенням дальність/швидкість;
- 2.4 ГГц – високошвидкісні канали, часто спільні з каналами керування та відео.

Для підвищення надійності застосовують такі методи:

1. Модуляції з низькою швидкістю та великим запасом по енергії сигналу LoRa, GFSK та DSSS забезпечують високий рівень чутливості приймача та працюють навіть при низькому SNR [104].

2. Повторна передача фрагментів (ARQ) – система може повторювати передачу пакета при його пошкодженні, що зменшує ймовірність втрати критичної інформації.

3. Частотне перестрибування (FHSS) – захищає від вузькосмугового заглушення та покращує стійкість у заводовому середовищі [78].

4. Адаптивне зменшення швидкості передачі – при погіршенні умов каналу система переходить на нижчий бітрейт, зберігаючи стабільність.

На наземній станції телеметричні дані приймаються, проходять декодування та перетворюються у зручний для оператора вигляд. Сучасні станції використовують:

- реальний час відображення параметрів польоту на HUD-панелі;
- побудову траєкторії на карті з індикацією ключових точок;

- запис логів польоту з подальшим аналізом;
- системи попередження про критичні режими (низький заряд, зниження сигналу, перевантаження двигунів).

Аналітична обробка телеметрії дозволяє виявляти відхилення в роботі апарата, прогнозувати зношення компонентів та оптимізувати параметри автопілота [105]. На етапі післяпольотної обробки аналізуються:

- стабільність IMU;
- якість GNSS-сигналу;
- динаміка навантаження на двигуни;
- поведінка контролера під час поривів вітру.

Це дозволяє покращувати моделі керування та підвищувати автономність.

Особливу увагу приділяють питанням безпеки та стійкості:

- криптографічний захист телеметричних каналів (AES-128/256);
- перевірка автентичності пакетів;
- захист від спуфінгу та Replay-атак;
- виявлення аномалій у потоках телеметрії за допомогою AI-моделей [106].

У військових та спеціалізованих системах телеметрія часто працює у закритих діапазонах або через SDR-платформи для динамічного переформатування каналу у випадку заглушення.

Телеметричні процеси в БАС формують основу інформаційного обміну між дроном і оператором, забезпечуючи безперервний контроль польотних параметрів, своєчасне реагування на непередбачувані ситуації та коригування польотної місії. Використання оптимізованих протоколів передачі, завадостійких методів модуляції та інтелектуальної обробки даних дозволяє підвищити надійність та безпеку експлуатації БАС навіть у складних радіотехнічних умовах.

3.6. Вплив параметрів каналу зв'язку на ефективність керування

Ефективність керування безпілотною авіаційною системою (БАС) значною мірою залежить від характеристик каналу зв'язку, через який здійснюється передача

команд, телеметрії та інформації з бортових сенсорів. Канал зв'язку виступає критичним елементом контуру керування, а його параметри визначають затримку, точність та надійність реакції дрона. У роботах із теорії керування та радіозв'язку наголошується, що динамічні помилки в каналі можуть безпосередньо погіршувати стабільність та керованість літального апарата [107].

На якість керування впливають такі ключові параметри каналу:

Затримка передачі (latency) – затримка є одним із найчутливіших параметрів, особливо в ручному та напівавтономному керуванні. Висока затримка призводить до:

- уповільненої реакції на команди оператора;
- накопичення помилок у підтриманні висоти та курсу;
- перевищення ліміту стійкості у швидкісних маневрах;
- підвищення ризику зіткнень та втрати контролю.

У типових радіоканалах затримка складає 20–80 мс, однак у зашумленому середовищі або при використанні повторів пакетів вона може зростати до 150–300 мс, що значно знижує якість керування [78]. Для автономних режимів затримка менш критична, але вона впливає на швидкість оновлення телеметрії та стабільність зворотного зв'язку.

Пропускна здатність (bandwidth) – недостатня пропускна здатність змушує систему знижувати частоту оновлення телеметрії або переходити до агресивного стиснення даних, що може:

- спотворювати навігаційні параметри;
- знижувати точність оцінювання стану;
- погіршувати роботу алгоритмів стабілізації та навігації.

Потоки телеметрії зазвичай потребують 10–50 кбіт/с, а відеоканал – до кількох мегабіт/с. Якщо пропускна здатність падає, система переходить на режим пріоритетної передачі критичних компонентів [103], однак це погіршує ситуаційну обізнаність оператора.

Рівень сигналу та співвідношення сигнал/шум (SNR) – низький SNR веде до частих помилок у прийомі пакетів, що викликає:

- втрати команд;

- фрагментацію телеметрії;
- необхідність повторних передач (ARQ);
- зростання затримки та зниження надійності.

У системах БАС часто застосовують модуляції з низьким SNR-порогом: LoRa, FSK, DSSS, що дозволяє зберігати керованість навіть при SNR $-10\dots-20$ dB [104]. Проте відеоканали на 5.8 ГГц значно чутливіші до падіння SNR, і при втраті 8–12 dB стають практично непрацездатними.

Пакетні втрати (packet loss) – більшість протоколів керування не має складних механізмів повторної передачі, оскільки надмірні затримки небажані. Тому:

- навіть 5–10% втрат можуть викликати ривки у керуванні;
- 20–30% втрат роблять ручне керування небезпечним;
- понад 40% втрат переводять систему в аварійні режими.

У протоколах MAVLink втрата критичних пакетів може призвести до невчасного спрацьовування заходів безпеки, оскільки статусні повідомлення надходять нерегулярно [55].

Стійкість до завад та заглушення – у складних умовах (місто, промислові об'єкти, зони бойових дій) канал зв'язку піддається впливу завад, багатопрореневості та навмисного заглушення. При цьому:

- падає ефективна потужність сигналу;
- збільшується кількість помилкових пакетів;
- зростає нестабільність затримки (jitter).

SDR-платформи та FHSS-технології є сучасним рішенням, що дозволяє оперативно змінювати параметри модуляції, ширину каналу та робочу частоту — таким чином підвищуючи завадостійкість каналу та зберігаючи контроль над апаратом [84].

Залежно від типу керування, чутливість до параметрів каналу різна:

1. Ручне (операторське) керування найбільш критичне до затримки та втрат пакетів; потребує високої стабільності каналу; погіршення зв'язку миттєво відображається на керованості.

2. Напівавтономне керування може частково компенсувати проблеми каналу за рахунок автопілота; вимоги до якості телеметрії залишаються високими.

3. Повністю автономний режим

- найменш залежний від каналу у короткій перспективі;
- критично залежний від періодичних оновлень команди місії;
- при повній втраті каналу виконує RTH або посадку.

У підсумку, параметри каналу визначають не лише комфорт роботи оператора, але й безпечність польоту.

Параметри каналу зв'язку напряму впливають на якість та безпеку керування БАС. Затримка, пропускна здатність, SNR, пакетні втрати та завадостійкість формують умови, у яких функціонують ручні, напівавтономні та автономні режими керування. Забезпечення стабільного, адаптивного і завадостійкого каналу зв'язку є ключовим фактором для підвищення надійності польотів, особливо у складних або критичних умовах.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

У межах третього розділу було досліджено сучасні підходи до керування безпілотними авіаційними системами. Показано, що ефективність роботи БАС ґрунтується на поєднанні трьох рівнів керування: ручного, напівавтономного та автономного. Саме інтеграція цих режимів забезпечує гнучкість у змінних умовах та дає можливість виконувати польотні завдання з мінімальним ризиком.

Проаналізовані методи стабілізації – від класичних PID до адаптивних та нейромережових – демонструють важливість точного сенсорного забезпечення та якісних алгоритмів злиття даних для підтримання стабільного польоту. Навігаційні системи сучасних БАС показують високий рівень розвитку: об'єднання GNSS, INS, комп'ютерного зору та SLAM дозволяє забезпечити точне позиціонування навіть у складних або GPS-обмежених сценаріях.

Системи уникнення перешкод та механізми безпечного повернення (RTH) формують критичний компонент безпеки польотів. Завдяки комбінації сенсорів і

алгоритмів планування траєкторії БАС здатні своєчасно реагувати на динамічні загрози та завершувати політ у штатному або аварійному режимі.

Телеметричні процеси були визначені як ключовий елемент зворотного зв'язку, що забезпечує контроль польоту та аналіз роботи апарата. Нарешті, встановлено, що параметри каналу зв'язку – затримка, пропускна здатність, рівень сигналу та завадостійкість – безпосередньо впливають на керованість, точність та безпеку польоту, особливо у ручному та напіваавтономному режимах.

Узагальнюючи, у розділі доведено, що сучасні БАС є складними кіберфізичними системами, де ефективність польоту визначається взаємодією сенсорних технологій, алгоритмів керування та характеристик каналу зв'язку. Від якості цієї взаємодії залежить автономність, стабільність та безпечність виконання місії.

РОЗДІЛ 4

НОРМАТИВНО-ПРАВОВІ АСПЕКТИ, СТАНДАРТИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ТЕХНОЛОГІЙ ЗВ'ЯЗКУ ДЛЯ БАС

4.1. Міжнародні стандарти та регуляторні вимоги до радіоканалів БПЛА

Розвиток безпілотних авіаційних систем (БАС) супроводжується необхідністю їх інтеграції у міжнародний авіаційний простір, що вимагає дотримання чітких регуляторних норм щодо використання радіочастот, надійності систем зв'язку та безпеки керування. Міжнародні організації – насамперед Міжнародна організація цивільної авіації (ICAO), Міжнародний союз електрозв'язку (ITU) та Європейська агенція авіаційної безпеки (EASA) – формують стандарти, спрямовані на забезпечення сумісності, захисту радіочастотного спектру та безпечної взаємодії пілотованих і безпілотних повітряних суден.

Одним із ключових аспектів регулювання є розподіл радіочастотного спектру для командно-керуючих каналів (C2 link). За рекомендаціями ITU, для БПЛА виділено спеціалізовані авіаційні діапазони, які відповідають вимогам до надійності, безперервності та захищеності зв'язку [108]. Використання неконтрольованих ISM-діапазонів допускається лише для низькоризикових операцій і не може бути застосоване у складному повітряному просторі або для дистанційних операцій поза межами прямої видимості.

ICAO у своїх документах наголошує на необхідності забезпечення "Command and Control Performance Requirements" – рівня стійкості та затримки, який дає змогу оператору надійно контролювати БАС у всіх режимах польоту [20]. Це включає вимоги до імовірності втрати каналу, максимальних допустимих затримок та мінімальних порогів якості сигналу. Особливо важливою є здатність каналу зв'язку працювати у присутності завад, що підтверджується вимогами до резервування та автоматичного перемикання між альтернативними каналами.

У Європейському Союзі EASA встановлює вимоги до БАС згідно з концепцією Specific Operations Risk Assessment (SORA), яка визначає, що канали зв'язку, що використовуються у критичних або небезпечних операціях, повинні бути окремими від неспеціалізованих комунікаційних систем [109]. Це означає застосування ліцензованих діапазонів або спеціально сертифікованих рішень із гарантією завадостійкості, криптографічного захисту та передбачуваної затримки.

Особливе місце у регуляторних рамках займають вимоги до завадостійкості. ICAO та FAA підкреслюють, що системи C2 повинні бути здатні компенсувати вплив багатопроблемності, інтерференції та локального заглушення, що є особливо актуальним у густонаселених районах або поблизу інфраструктури аеропортів [76]. Тому на практиці дедалі частіше застосовують технології FHSS, DSSS та SDR-рішення, які дозволяють динамічно адаптувати частотний ресурс.

Важливою складовою є також вимоги до безпеки – зокрема, захисту від несанкціонованого доступу та спуфінгу. Міжнародні стандарти передбачають обов'язкове використання автентифікації, перевірки цілісності пакетів і криптографічних методів шифрування [110]. Це пов'язано з тим, що перехоплення або модифікація каналу керування може створити загрозу безпеці повітряного простору.

Отже, міжнародна нормативно-правова база визначає комплекс технічних і процедурних вимог, що забезпечують безпечне використання БАС у загальному повітряному просторі. Усі регуляторні органи погоджуються, що радіоканали повинні мати високу стійкість, низьку затримку, захист від завад і гарантії неперервності — ці параметри є критичними для інтеграції безпілотників у глобальну авіаційну систему.

Міжнародні стандарти щодо радіоканалів БПЛА формують основу безпечної експлуатації безпілотників у цивільному повітряному просторі. ICAO, ITU та EASA встановлюють вимоги до частотного розподілу, затримки, стійкості до завад та кіберзахисту. Дотримання цих норм є необхідною умовою як для національних регуляторів, так і для розробників БАС, оскільки забезпечує сумісність, безпечність та прогнозованість роботи систем керування.

4.2. Нормативи ICAO, ITU та європейських регуляторів у сфері безпілотної авіації

Регуляторні вимоги до безпілотних авіаційних систем (БАС) формуються міжнародними організаціями з метою забезпечення безпечної інтеграції безпілотників у світовий повітряний простір. Найбільш впливовими серед них є ICAO, ITU, EASA та ETSI. Їхні документи визначають вимоги до радіочастотного спектру, характеристик каналу керування, рівня безпеки та стійкості до завад, формуючи глобальну базу технічних стандартів [20].

ICAO встановлює фундаментальні принципи щодо функціонування командно-керуючого каналу (C2 link). Основна увага приділяється неперервності та доступності зв'язку, мінімізації затримки під час критичних операцій, допустимій імовірності втрати каналу та наявності резервних рішень. Регулятор наголошує, що канал керування має бути захищеним від зовнішнього втручання, а система – здатною виконувати аварійні процедури у разі деградації зв'язку. ICAO також визначає вимоги щодо безпечної інтеграції БАС у повітряний простір разом із пілотованими повітряними суднами, що передбачає автентифікацію команд, захист від спуфінгу та високу надійність телеметрії.

ITU, у свою чергу, відповідає за міжнародний розподіл частотного спектру. Для БАС виділені спеціалізовані авіаційні діапазони, зокрема L-band та C-band, які забезпечують стабільність і передбачуваність роботи систем керування [108]. Водночас використання загальних ISM-діапазонів дозволене лише в операціях низького ризику, оскільки вони не гарантують захисту від сторонніх випромінювань та інтерференції. ITU також регламентує технічні характеристики сигналу: максимальну потужність передавачів, ширину смуги, допустимі рівні побічних випромінювань і параметри завадозахищеності.

У Європейському Союзі питання стандартизації та експлуатаційних вимог регулює EASA. Згідно з методологією SORA [109], вимоги до каналу керування визначаються відповідно до рівня ризику польоту. Для операцій у міському просторі або на значних висотах обов'язковими є шифрування команд, наявність дубльованих

каналів, кіберзахист та сертифіковане радіообладнання. У контексті завадостійкості EASA вимагає врахування типових інтерференцій середовища, адаптацію протоколів зв'язку та впровадження технологій FHSS або DSSS. Це гарантує стабільну роботу навіть у складних умовах.

Європейський інститут телекомунікаційних стандартів (ETSI) доповнює нормативну базу технічними стандартами для радіообладнання. Він визначає допустимі рівні випромінювання, механізми доступу до середовища, вимоги до адаптивного контролю потужності та параметри, що забезпечують завадостійкість систем зв'язку [111]. Ці стандарти є обов'язковими при сертифікації обладнання, яке працює у цивільному повітряному просторі ЄС.

Узагальнюючи вимоги міжнародних регуляторів, можна сказати, що всі вони акцентують на необхідності забезпечення стійкого, передбачуваного і захищеного каналу керування БАС. Незалежно від організації, нормативи включають вимоги до мінімізації затримок, захисту від стороннього втручання, гарантованої доступності каналу та можливості аварійного повернення або посадки при його втраті. Така узгодженість забезпечує основу для гармонізації національних правил та інтеграції БАС у глобальний повітряний простір.

Міжнародні та європейські регулятори формують узгоджену нормативну базу, що визначає вимоги до каналів зв'язку БАС, їхньої надійності та завадостійкості. ICAO встановлює принципи безпеки та експлуатації, ITU – частотне регулювання, а EASA та ETSI – технічні критерії та стандартизацію обладнання. Дотримання цих норм є необхідною умовою для легальної експлуатації БАС та їх інтеграції у цивільний повітряний простір.

4.3. Тенденції розвитку технологій аеронавігаційного зв'язку у світі

Глобальний розвиток безпілотних авіаційних систем супроводжується стрімкою еволюцією технологій аеронавігаційного зв'язку. Збільшення кількості дронів у цивільному, комерційному й оборонному секторах потребує високонадійних, масштабованих та стандартизованих систем обміну даними. Саме

тому міжнародні організації та провідні технологічні компанії активно впроваджують рішення, що підвищують безпеку та ефективність управління повітряним рухом, включно з інтеграцією БАС у загальний повітряний простір [112].

Однією з визначальних тенденцій є перехід від використання неконтрольованих ISM-діапазонів до систем зв'язку, оптимізованих спеціально для аеронавігації. Розвиток таких рішень зумовлений зростанням вимог до пропускної здатності та завадостійкості. На рівні державних і транснаціональних програм активно просувається концепція C2 Links у ліцензованих діапазонах, зокрема в C-band (5030–5091 МГц), яка вже визначена ІТУ як основна для керування БАС у BVLOS-операціях [108]. Використання виділених частот забезпечує передбачуваність параметрів каналу, знижує ризик перешкод та створює основу для централізованого контролю.

Ще однією ключовою тенденцією є розвиток мобільних широкосмугових мереж четвертого, п'ятого та майбутнього шостого покоління (4G/5G/6G). Подібні мережі дозволяють забезпечити дронів високошвидкісним зв'язком із наднизькою затримкою та можливістю формування незалежних каналів для команд, відео та телеметрії. 5G-технології, зокрема Network Slicing та Ultra-Reliable Low Latency Communications (URLLC), створюють умови для одночасної підтримки великої кількості повітряних апаратів і гнучкого масштабування системи [52]. Очікується, що 6G забезпечить ще нижчу затримку, інтеграцію супутникових систем та інтелектуальне керування спектром.

Важливою сферою розвитку є U-space (ЄС) та UTM (США) – системи управління безпілотним рухом, які передбачають автоматизований обмін інформацією між дронами, операторськими центрами та наземною інфраструктурою. У цих концепціях зв'язок виконує роль не лише транспортного середовища для даних, а й механізму забезпечення ситуаційної обізнаності, прогнозування конфліктів та координації польотів у реальному часі [113]. Інтеграція UTM передбачає широкий спектр технологій: супутниковий зв'язок, високоточні навігаційні системи, обмін ADS-B даними та захищені канали між дронами.

Окремий напрям розвитку пов'язаний із супутниковим зв'язком нового покоління. Системи таких компаній, як Starlink, OneWeb або Iridium Next, дозволяють

суттєво розширити географію застосування БАС, забезпечуючи високоякісний зв'язок у важкодоступних районах, над водою, у пустелях або гірських масивах. Технології вузькопроменевого супутникового покриття та інтеграція з наземними мережами формують основу для глобальних BVLOS-операцій [114].

Серед технологічних трендів також виділяється зростання ролі програмно-визначуваних радіосистем (SDR). SDR забезпечують гнучкість у зміні параметрів протоколу, робочих частот, ширини смуги та методів модуляції. Це особливо важливо в умовах високої радіонавантаженості або за наявності засобів РЕБ. SDR стають базовою платформою для досліджень нових протоколів зв'язку, включно із когнітивними радіосистемами, які здатні визначати вільні діапазони та адаптуватися до умов середовища [115].

Ще одна тенденція – впровадження штучного інтелекту для управління каналами зв'язку. Алгоритми AI використовуються для:

- передбачення втрат пакета та адаптивної зміни параметрів каналу,
- аналізу спектра та уникнення завад,
- оптимізації маршрутизації у мережах із великою кількістю дронів,
- виявлення атак та спроб перехоплення каналу.

AI дозволяє формувати самовідновлювані радіомережі, здатні зберігати працездатність навіть у високозавадових умовах.

Крім того, на глобальному рівні розглядаються рішення щодо взаємодії між БАС та пілотованими повітряними суднами через ADS-B, Mode-S та V2X-протоколи. У майбутньому очікується перехід до гібридних систем аеронавігаційного зв'язку, де дрони матимуть доступ до окремих каналів для оповіщення, навігації та моніторингу.

Узагальнено можна сказати, що розвиток аеронавігаційного зв'язку рухається в напрямках:

- спеціалізація частотного спектру;
- впровадження мобільних мереж нового покоління;
- глобальна інтеграція через супутникові системи;
- інтелектуалізація керування спектром;
- стандартизація U-space / UTM;

– підвищення безпеки та автономності комунікацій.

Ці тенденції визначають майбутнє цивільних та комерційних операцій БАС і створюють технічну основу для їх масштабного впровадження.

Сучасні технології аеронавігаційного зв'язку розвиваються у напрямі підвищення автономності, завадостійкості та глобальної інтеграції БАС у повітряний простір. Впровадження 5G/6G, супутникових систем, SDR та AI-технологій формує нову інфраструктуру для надійного керування дронами на великих відстанях. Ці тенденції створюють передумови для масового використання БАС у комерційних, промислових та державних сферах.

4.4. Перспективи інтеграції БАС у цивільний повітряний простір України

Інтеграція безпілотних авіаційних систем у цивільний повітряний простір України є одним із ключових напрямів розвитку національної авіаційної галузі. В умовах зростання використання дронів у комерційних, промислових і гуманітарних сферах виникає потреба в побудові сучасної структури управління повітряним рухом, яка забезпечить баланс між інноваціями та безпекою польотів. Україна, як держава з повністю реформованою авіаційною системою та орієнтацією на стандарти ЄС, активно рухається в напрямку гармонізації своїх регуляторних вимог з ICAO, EASA та EUROCONTROL [116].

Одним із ключових чинників інтеграції є розвиток нормативно-правової бази. Україна вже зробила кроки у напрямі впровадження ризик-орієнтованого підходу, аналогічного до SORA, який застосовується у Європейському Союзі. Цей підхід передбачає класифікацію польотів за рівнем ризику та встановлення вимог до засобів зв'язку, навігації, кіберзахисту та ідентифікації в залежності від сценарію операції [109]. Таким чином, для низькоризикових операцій допускається використання комерційних рішень і стандартних протоколів, тоді як операції BVLOS, польоти у міському просторі або у зоні інтенсивного руху потребують сертифікованих каналів керування, резервування систем та засобів автоматичного уникнення перешкод.

Перспективним напрямом є впровадження європейської концепції U-space, яка передбачає цифровізацію процесів управління безпілотним рухом та автоматизацію координації між дронами, операторами та органами управління повітряним рухом [113]. U-space включає чотири етапи розвитку послуг: від базової електронної реєстрації до повного тактичного управління трафіком. Інтеграція U-space в Україні дозволить створити структуру для безпечного виконання великої кількості одночасних польотів, зокрема у сферах логістики, інфраструктурного моніторингу та містобудування.

Окрему увагу приділено технологічним аспектам – інфраструктурі зв'язку, навігації та спостереження. Для повноцінної інтеграції БАС необхідним є розгортання мереж із гарантованими параметрами затримки та доступності. Сучасні 4G/5G мережі, а в перспективі – 6G, можуть відіграти значну роль у підтриманні стабільного командно-керуючого каналу та передачі телеметрії [52]. Іншим важливим напрямом є впровадження систем дистанційної ідентифікації (Remote ID), яка забезпечує відстеження безпілотників у реальному часі й дозволяє інтегрувати їх у загальний повітряний ситуаційний простір.

Ще одним фактором є адаптація систем навігації. Україна використовує GNSS на основі глобальних систем GPS, Galileo та GLONASS, а також має доступ до системи EGNOS, що забезпечує підвищену точність та надійність навігаційних сигналів. Це створює передумови для впровадження точних процедур навігації для БАС, включаючи аварійні алгоритми для RTH та автоматичної посадки [60].

Певні обмеження для інтеграції пов'язані з воєнним станом, який впливає на структуру повітряного простору та обмежує його використання для цивільних дронів. Однак водночас військовий досвід України забезпечує унікальні компетенції у сфері завадостійких каналів зв'язку, автономної навігації та протидії РЕБ, що може стати основою для створення інноваційних стандартів безпеки та технологій подвійного призначення. Після нормалізації повітряного простору ці напрацювання можуть бути інтегровані у цивільні процедури та сприяти підвищенню загальної стійкості системи.

Отже, перспективи інтеграції БАС у цивільний повітряний простір України базуються на трьох ключових напрямках: гармонізації нормативних вимог із

європейською системою, розвитку цифрової інфраструктури U-space та впровадженні сучасних технологій зв'язку та навігації. У комплексі ці чинники створюють передумови для формування повноцінної екосистеми безпілотних авіаційних операцій у країні, здатної відповідати міжнародним вимогам і забезпечувати безпечне проведення польотів.

Інтеграція БАС у повітряний простір України є реалістичною та перспективною за умови продовження гармонізації стандартів із ЄС, розбудови U-space сервісів та модернізації інфраструктури зв'язку. Технологічні та регуляторні тенденції демонструють готовність країни рухатися у напрямі створення сучасної, цифрової системи управління безпілотним рухом, яка відповідатиме міжнародним нормам та вимогам авіаційної безпеки.

4.5. Очікувані технологічні зміни: 5G/6G, автономні мережі, ройові системи

Розвиток технологій зв'язку та управління безпілотними авіаційними системами рухається у бік підвищення автономності, масштабованості та інтегрованості у цифрову інфраструктуру майбутнього. Очікується, що протягом наступного десятиліття ключові зміни відбуватимуться в трьох взаємопов'язаних напрямках: розвиток мереж 5G та 6G, поява автономних мережевих структур та стрімка еволюція ройових систем БАС. Ці технології створюють нову парадигму управління повітряним рухом, у якій дрони стають елементами самоорганізованих, інтелектуальних комунікаційних середовищ [117].

Технології 5G як основа для масового використання БАС – мережі п'ятого покоління формують технологічну основу для нового рівня можливостей БАС. Завдяки дуже низькій затримці, високій пропускну здатності та можливості створення окремих логічних сегментів мережі (Network Slicing), 5G забезпечує надійність і якість сервісу, необхідні для критичних операцій, включаючи польоти BVLOS та автоматизовані місії [52].

Ключові переваги 5G для БАС включають:

- URLLC (Ultra-Reliable Low Latency Communications) – затримка 1–10 мс для команд керування;
- eMBB (enhanced Mobile Broadband) – передача потокового відео HD/4K у реальному часі;
- mMTC (massive Machine-Type Communications) – можливість одночасного підключення сотень тисяч пристроїв на квадратний кілометр.

Такі характеристики дають змогу використовувати дронів у міських умовах, логістиці, аварійних ситуаціях та інфраструктурному моніторингу. У багатьох країнах, включно з ЄС та США, 5G уже тестується як базова інфраструктура для U-space та UTM-систем.

Перехід до мереж шостого покоління (6G) – 6G розглядають як фундамент для інтеграції повітряних, наземних, морських та космічних систем зв'язку в єдине мережеве середовище. Очікується, що швидкість передачі сягатиме терабітів на секунду, а затримка буде ще меншою – до 0,1 мс [118].

Основні технологічні риси 6G:

- інтеграція супутникового та наземного зв'язку в єдиній архітектурі;
- використання терагерцового діапазону для високоточних короткодистанційних місій;
- повсюдне застосування AI-native зв'язку, коли штучний інтелект працює не поверх мережі, а вбудований в її ядро;
- технології робастного управління спектром, що дозволяють уникати перешкод автоматично.

Для БАС це означатиме можливість здійснювати місії в умовах повної автономії, у тому числі на далеких відстанях та у складних радіотехнічних середовищах.

Автономні мережі управління БАС (Autonomous Networks) – автономні мережі – це комунікаційні системи, здатні самостійно адаптуватися до змін середовища, оптимізувати маршрути передачі інформації та відновлювати зв'язок після пошкоджень. Вони базуються на штучному інтелекті, машинному навчанні та когнітивному радіо [100].

Основні властивості автономних мереж:

- інтелектуальне управління спектром, включно з передбаченням завад;
- самолікування мережі (self-healing), коли вузли перебудовують маршрути при виході обладнання з ладу;
- самоконфігурація каналів зв'язку відповідно до зміни навколишніх умов;
- підтримка мобільності високої щільності, тобто великої кількості дронів у межах одного повітряного сегмента.

У майбутньому такі мережі стануть ключовими для масових автономних польотів, де участь оператора буде мінімальною або відсутньою.

Ройові системи БАС (Swarm Systems) – ройові системи передбачають взаємодію десятків або сотень дронів, які координаційно виконують завдання без централізованого управління. Концепція рою базується на біологічних моделях самоорганізації, а технічно реалізується за допомогою децентралізованих протоколів обміну даними, локального прийняття рішень та колективної навігації.

Розвиток ройових систем залежить від трьох факторів:

1. Надзвичайно надійних міждронових каналів зв'язку (міліметрові хвилі, Mesh-мережі, THz-зв'язок).
2. Алгоритмів колективного прийняття рішень – від простого слідування за лідером до повної розподіленої автономії [119].
3. Інфраструктури AI, яка забезпечує:
 - захист від зіткнень;
 - оптимізацію траєкторій;
 - розподіл задач у реальному часі;
 - децентралізований контроль.

Ройові системи вважаються одним із ключових технологічних драйверів у військовій сфері, а в цивільному секторі їх розглядають для задач моніторингу, картографування та пошуково-рятувальних операцій [119].

Синергія технологій та формування архітектури “повітряного Інтернету” – поєднання технологій 5G/6G, автономних мереж та ройових систем формує нову концепцію – Aerial Internet, або «повітряний інтернет». Це мережеве середовище, в

якому БАС стають активними вузлами зв'язку, здатними передавати дані один одному та підтримувати комунікації над місцевістю, що постраждала від катастроф чи не має наземної інфраструктури [120].

Очікується, що у найближчі роки дрони виконуватимуть роль:

- ретрансляторів мобільного зв'язку,
- інструментів аварійного відновлення мереж,
- елементів інтелектуального транспортного середовища,
- основи для нових сервісів (наприклад, повітряного IoT).

Майбутнє технологій зв'язку для БАС визначатиметься розвитком мереж 5G і 6G, автономних комунікаційних структур та ройових систем [52, 118, 100, 119]. Ці технології відкривають можливість повної автономізації польотів, масштабованого управління великою кількістю дронів та формування глобальної інфраструктури повітряного зв'язку. У комплексі вони створюють нову архітектуру аеронавігації, у якій БАС стають активними елементами інтелектуального цифрового середовища [117].

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4

Нормативно-правове регулювання та технологічні стандарти у сфері зв'язку для безпілотних авіаційних систем формують комплексну й швидко еволюційну систему, яка визначає можливості подальшої інтеграції БАС у цивільний повітряний простір. Міжнародні організації – ICAO, ITU, EASA та ETSI – задають глобальні правила, що стосуються частотного ресурсу, вимог до командно-керуючих каналів, безпеки польотів і стійкості до зовнішніх впливів. Узгодженість цих норм формує передумови для гармонізації національних стандартів та створює єдине авіаційне середовище, де БАС можуть функціонувати поряд із пілотованими повітряними суднами.

Для України інтеграція безпілотних систем у цивільний повітряний простір є стратегічно важливим напрямом розвитку авіації. Орієнтація на європейські регуляторні практики, впровадження U-space та розвиток цифрової інфраструктури

зв'язку створюють умови для безпечної експлуатації БАС у майбутньому. Водночас військовий досвід країни забезпечує додаткову експертизу у сфері захищеного та завадостійкого радіозв'язку, що може стати важливою перевагою при формуванні національних підходів до стандартизації.

Перспективи розвитку технологій зв'язку для БАС визначаються впровадженням 5G та 6G, появою автономних мереж і ройових систем, а також зростанням ролі штучного інтелекту у керуванні спектром та інформаційними потоками. Ці технології забезпечать підвищення надійності, масштабованості й адаптивності комунікаційних систем, що є критично важливим для майбутніх високонавантажених операцій, комерційних сервісів та автоматизованих повітряних місій.

Отже, нормативно-технічні тенденції та сучасні стандарти формують фундамент для створення безпечної, інтелектуальної та інтегрованої інфраструктури аеронавігаційного зв'язку, яка визначатиме розвиток БАС у найближчі десятиліття.

РОЗДІЛ 5

АНАЛІЗ, ПРОЕКТУВАННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ КОМУНІКАЦІЙНОГО КАНАЛУ ДЛЯ БАС В УМОВАХ ВОЄННОГО СТАНУ

5.1. Вихідні умови та вимоги до каналу зв'язку

У сучасних умовах ведення бойових дій безпілотні авіаційні системи (БАС) стали одним з ключових інструментів тактичного і стратегічного рівня. Ефективність їх застосування безпосередньо залежить від стійкості та якості каналу зв'язку між оператором та літальним апаратом. Тому на етапі проектування критично важливо враховувати не лише фізико-технічні параметри радіолінії, а й умови активної радіоелектронної протидії (РЕБ), зміну рельєфу, багатопрореневість та обмеження енергетики передавача.

Для аналізу було обрано мультикоптер середнього класу з типовими характеристиками: максимальна дальність польоту – 10 км, висота – 100–300 м, швидкість руху – 15–18 м/с. Робота здійснюється у двох основних частотних діапазонах: канал керування на частотах 430–470 МГц та канал відеотрансляції у діапазонах 2.4 та 5.8 ГГц. В умовах воєнного стану до системи зв'язку висуваються підвищені вимоги щодо скритності, стійкості до заглушення та адаптивності.

5.2. Розрахунок енергетичного балансу радіоканалу

Енергетичний баланс дозволяє оцінити, чи досягає сигнал приймача із запасом потужності, достатнім для нормальної демодуляції. Загальна формула має вигляд:

$$P_{rx} = P_{tx} + G_{tx} + G_{rx} - L_{path} - L_{sys} \quad (5.1)$$

де P_{tx} – потужність передавача, G_{tx} та G_{rx} – коефіцієнти підсилення антен, L_{path} – втрати у вільному просторі, L_{sys} – системні втрати (кабелі, корпус, конектори). Для

коректного моделювання були використані реалістичні значення: $P_{tx} = 30 \text{ dBm}$, $G_{tx} = G_{rx} = 5 \text{ dBi}$, $L_{sys} = 3 \text{ dB}$.

5.2.1. Розрахунок втрат на трасі

Вільно-просторові втрати (FSPL) визначають фундаментальне загасання хвилі на шляху поширення. Формула:

$$L_{\text{path}} = 32.4 + 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) \quad (5.2)$$

де d – відстань у кілометрах, f – частота в мегагерцах. Важливо, що складова $20 \log_{10}(f)$ робить високочастотні канали значно більш чутливими до віддалення. Тому канали відеотрансляції на 5.8 ГГц зазнають суттєво більшого згасання, ніж канали керування на 433 МГц.

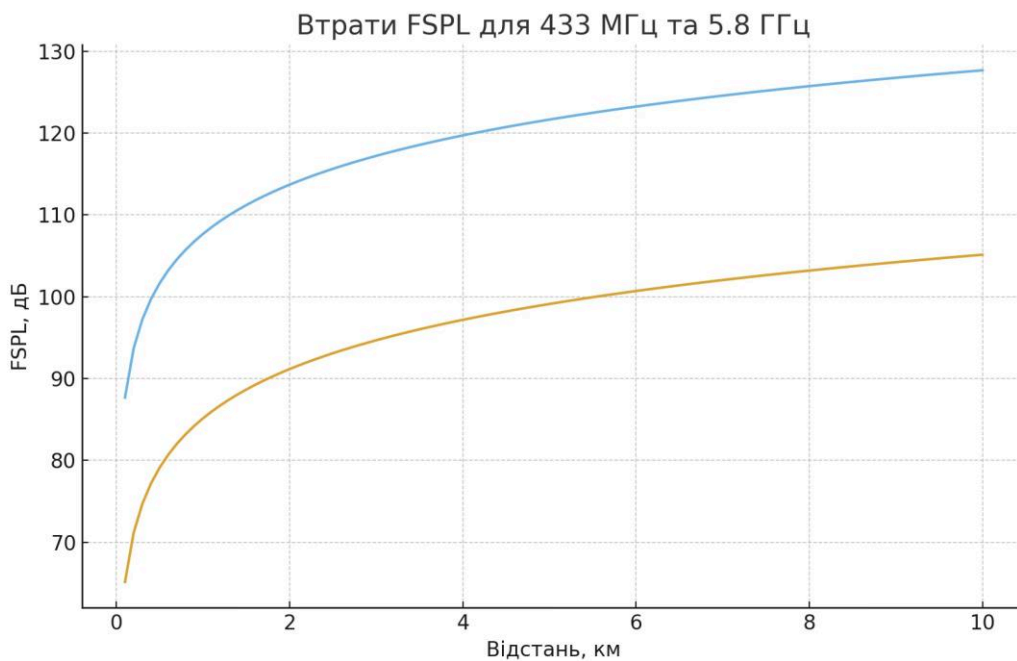


Рис. 5.1. Залежність вільно-просторових втрат від відстані для частот 433 МГц та 5.8 ГГц

5.2.2. Розрахунок прийнятої потужності

Підставивши значення у формулу енергетичного балансу, отримуємо такі результати:

Для частоти 433 МГц на відстані 10 км: $L_{\text{path}} = 105.13 \text{ дБ} \rightarrow P_{\text{rx}} = -68.1 \text{ дБм}$.

Для частоти 5.8 ГГц на відстані 10 км: $L_{\text{path}} = 127.7 \text{ дБ} \rightarrow P_{\text{rx}} = -90.7 \text{ дБм}$.

Оскільки чутливість приймача LoRa досягає $-135 \dots -140 \text{ дБм}$, запас потужності становить понад 60 дБ, що гарантує якісний зв'язок навіть у складних умовах. Натомість OFDM-відеоканал працює на межі – запас становить лише 2–5 дБ.

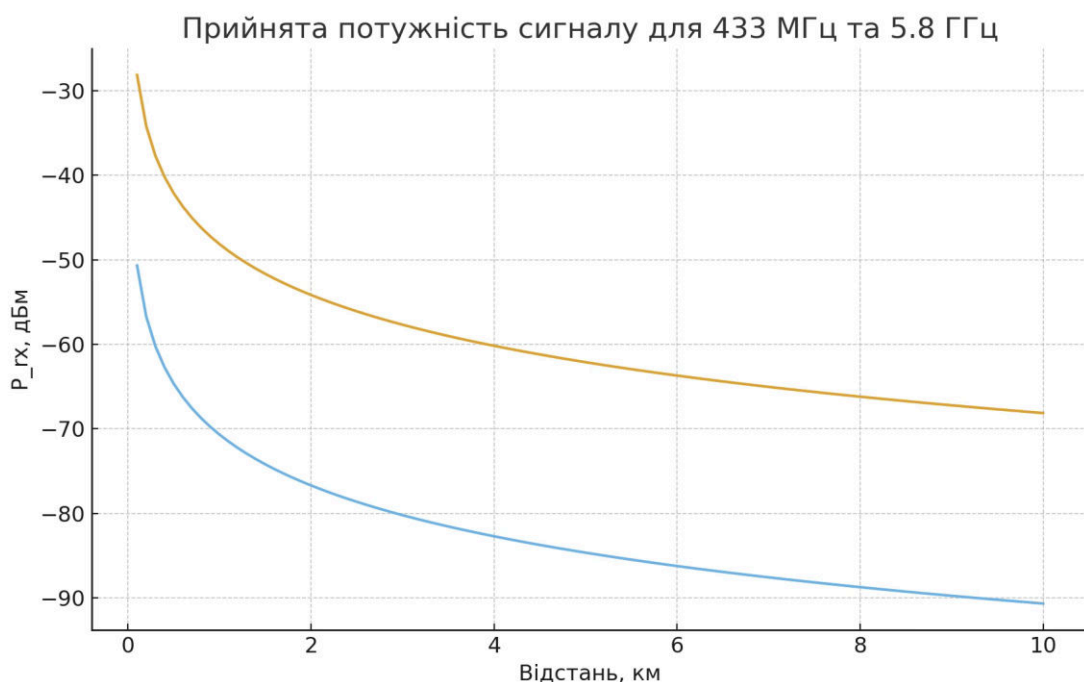


Рис. 5.2. Прийнята потужність сигналу на частотах 433 МГц та 5.8 ГГц

5.3. Моделювання впливу засобів РЕБ

Засоби радіоелектронної боротьби противника можуть створювати широкосмугові та спрямовані перешкоди, що призводять до додаткового згасання сигналу. Типове значення створюваних перешкод – від +10 до +60 дБ залежно від типу техніки РЕБ. Модифікована формула прийнятої потужності набуває вигляду:

$$P'_{\text{rx}} = P_{\text{rx}} - L_{\text{REB}} \quad (5.3)$$

Для прикладу, при $L_{REB} = 20$ дБ для відеоканалу отримаємо $P'_{rx} \approx -110.7$ дБм, що повністю виходить за межі чутливості OFDM-приймача. Це означає повну втрату відео. Водночас канал керування LoRa продовжує функціонувати завдяки великому енергетичному запасу.

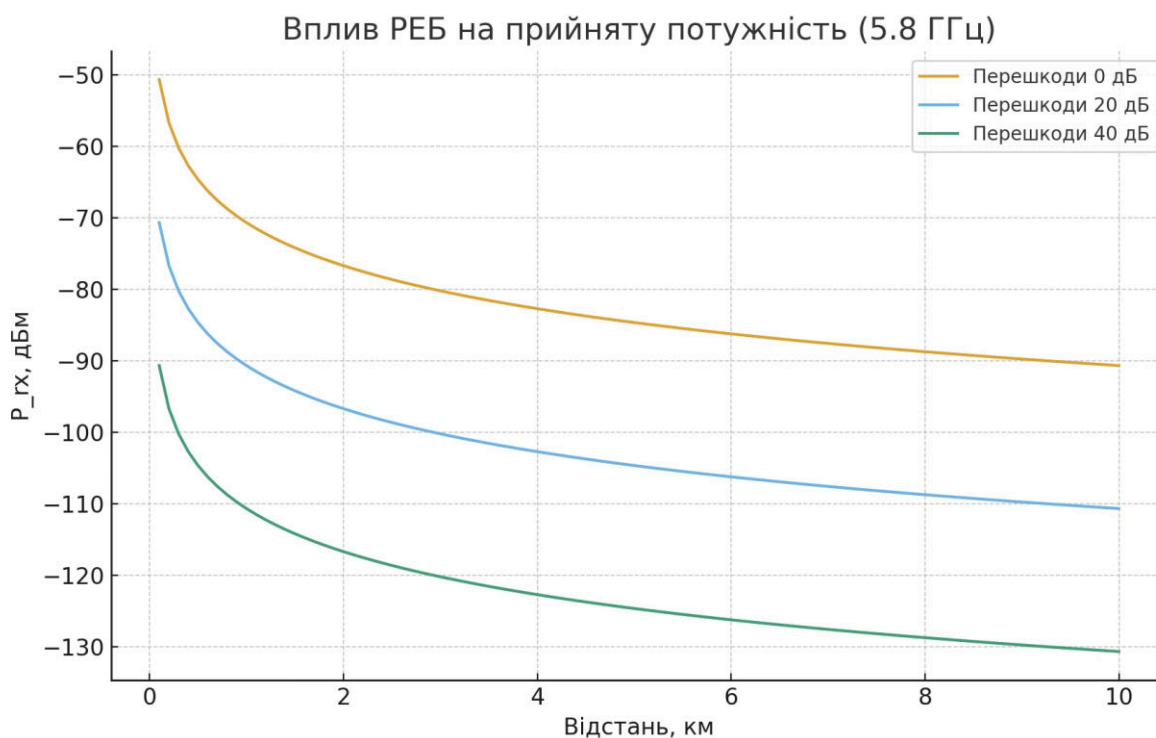


Рис. 5.3. Вплив перешкод РЕБ на рівень прийнятої потужності сигналу (5.8 ГГц)

5.4. Оптимізація радіоканалу у воєнних умовах

Проведене моделювання дозволило визначити практичні технічні рішення, що забезпечують стійкість БАС у зоні бойових дій. Зокрема, використання низькочастотного каналу керування є найбільш ефективним через його природну стійкість до заглушення та істотно менше згасання сигналу. Крім того, застосування схем FHSS забезпечує маскування структури передавання даних.

Відеоканал потребує оптимізації: перехід на кодек H.265 з низькою швидкістю, зниження роздільності або повний перехід до телеметричного режиму при втраті

сигналу. Додатково рекомендується використовувати спрямовані антени наземної станції.

5.5. Порівняння FSPL

У цьому підпункті здійснюється ґрунтовний аналіз вільно-просторових втрат (FSPL) як ключового фактору для оцінювання працездатності радіоканалу безпілотних авіаційних систем. FSPL є фундаментальною метрикою, що характеризує ступінь ослаблення сигналу під час його поширення у вільному просторі. З огляду на особливості застосування БАС, саме правильне моделювання FSPL дає змогу оцінити, яку потужність може отримати приймач на різних дистанціях та які технології найкраще демонструють дальність та стійкість у реальних умовах. В основі розрахунку лежить класична формула, що залежить від відстані та робочої частоти. Нижча частота забезпечує істотно менші втрати, що робить такі діапазони як 433 МГц особливо цінними для резервних та командних каналів управління. Натомість високочастотні канали на 2.4 ГГц та 5.8 ГГц демонструють більш значні втрати, але забезпечують більшу пропускну здатність. Проведене моделювання підтверджує, що на дальності до 10 км низькочастотні системи зберігають істотний запас енергетики, тоді як високочастотні системи працюють на межі можливостей. Це зумовлює вимогу до застосування спрямованих антен, зниження бітрейту або адаптивних кодеків для відеоканалів. Аналіз FSPL також дає підстави для розуміння поведінки сигналу за умов перешкод, багатопроменевого поширення та впливу атмосферних явищ. Таким чином, оцінка FSPL — невід’ємний інструмент проєктування радіоканалів у БАС.

Вільно-просторові втрати визначаються формулою:

$$L_{FSPL}=32.4+20\log_{10}(d)+20\log_{10}(f) \quad (5.4)$$

де

d – відстань у км,

f – частота у МГц.

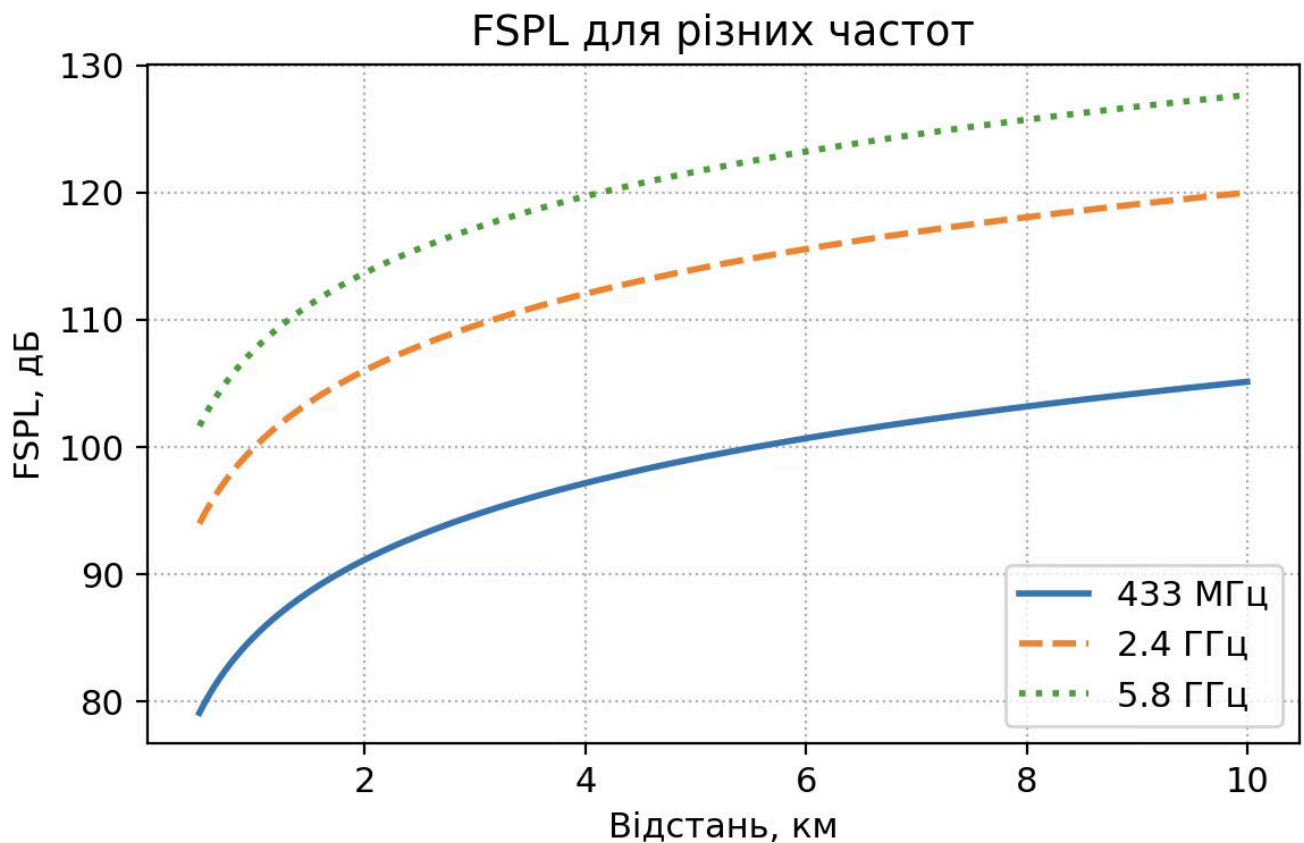


Рис. 5.4. Порівняння FSPL для трьох частот

На рис. 5.4. представлено порівняння FSPL для трьох частот, що відповідають технологіям у БАС:

- 433 МГц (LoRa, FSK)
- 2.4 ГГц (OFDM, телеметрія)
- 5.8 ГГц (OFDM-відео)

5.6. Вплив висоти польоту

Аналізується вплив висоти польоту БАС на рівень прийнятого сигналу. Висота є критичним параметром, що визначає геометрію радіолінії, ступінь перекриття зони Френеля та наявність перешкод. На малих висотах сигнал може значно погіршуватися через вплив рельєфу, рослинності та будівель, що призводить до зростання затухання та флуктуацій прийнятого сигналу. Зі збільшенням висоти лінія візування

очищується, зменшується кількість відбитих компонент сигналу, а також забезпечується стабільніша робота каналу. Проте на надто великих висотах збільшується геометрична довжина траси, що призводить до додаткових втрат. Графік залежності прийнятої потужності демонструє, що для частоти 433 МГц підвищення висоти має незначний негативний ефект на рівень сигналу, оскільки FSPL зростає повільно. Натомість для частоти 5.8 ГГц навіть невелике збільшення дистанції спричиняє суттєве падіння рівня сигналу, що зумовлено високою чутливістю до геометричного розширення простору. Це підтверджує, що оптимальна висота польоту для високочастотних каналів має обиратися так, щоб забезпечити візування без зайвого збільшення дистанції. Отже, моделювання висоти польоту є важливою частиною проектування БАС, і правильний вибір висоти дозволяє значно підвищити стійкість зв'язку.

Прийнята потужність обчислюється як:

$$P_{rx} = P_{tx} + G_{tx} + G_{rx} - L_{FSPL} - L_{sys} \quad (5.5)$$

Виконано моделювання для:

- потужності передавача: 30 dBm
- коефіцієнтів антен: 5 dBi
- системних втрат: 3 dB
- горизонтальна дистанція: 5 км

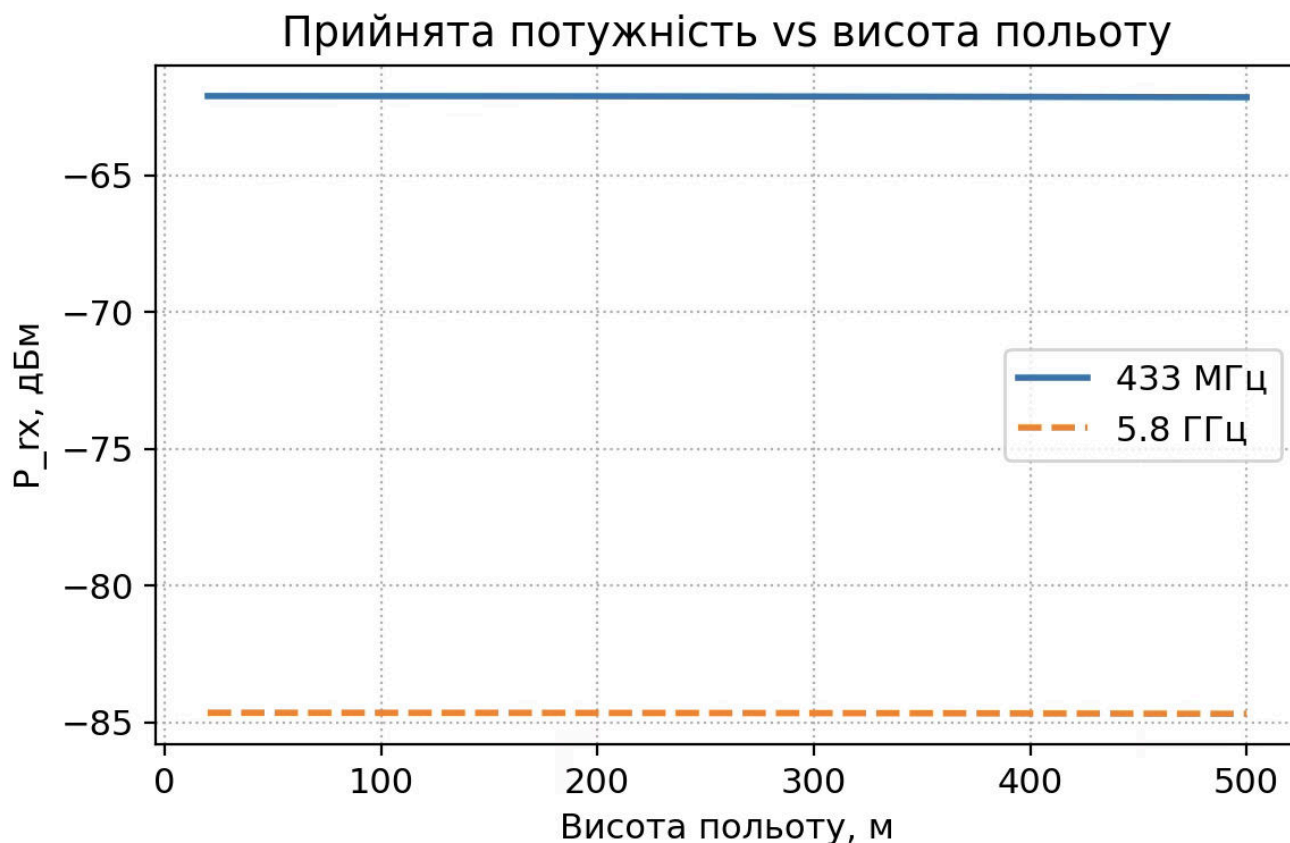


Рис. 5.5. P_{rx} залежно від висоти

5.7. Зона Френеля

Перша зона Френеля є важливим поняттям при проектуванні радіоканалів прямої видимості. Вона описує об'єм простору навколо уявної прямої лінії між передавачем і приймачем, у межах якого більша частина енергії електромагнітної хвилі доходить до приймача. Якщо значна частина цієї зони перекрита перешкодами – рельєфом, будівлями, деревами – відбувається додаткове ослаблення та флуктуації сигналу. Вважається, що для стабільної роботи каналу перекриття першої зони Френеля не повинне перевищувати приблизно 40 % її поперечного перерізу.

Радіус першої зони Френеля r для будь-якої точки траси можна описати формулою:

$$r = \sqrt{\frac{\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}} \quad (5.6)$$

де r – радіус першої зони Френеля, м;

λ – довжина хвилі, м;

d_1, d_2 – відстані від передавача та приймача до перешкоди, м.

Моделювання виконано для середньої точки траси ($d_1 = d_2 = 5$ км).

При однаковій геометрії траси (тобто при незмінних d_1 і d_2) радіус зони Френеля безпосередньо залежить від довжини хвилі, а отже – від частоти. Чим нижча частота, тим більший радіус, і тим більшої висоти потрібно дотримуватися, щоб уникнути перекриття зони рельєфом.

На побудованому графіку зображено зміну радіуса першої зони Френеля вздовж траси довжиною до 10 км для двох частот – 433 МГц та 5.8 ГГц – при припущенні, що перешкода розташована поблизу середини шляху. Для 433 МГц радіус зони сягає кількох метрів уже на невеликих відстанях і продовжує зростати з віддаленням. Для 5.8 ГГц радіус істотно менший, однак це не означає автоматично кращу завадостійкість, оскільки високочастотні сигнали значно більш чутливі до поглинання, розсіювання та багатопроменевості. Аналіз зони Френеля дозволяє коректно обирати висоту польоту БАС та висоту встановлення наземних антен, щоб мінімізувати ризик непередбаченої втрати зв'язку.

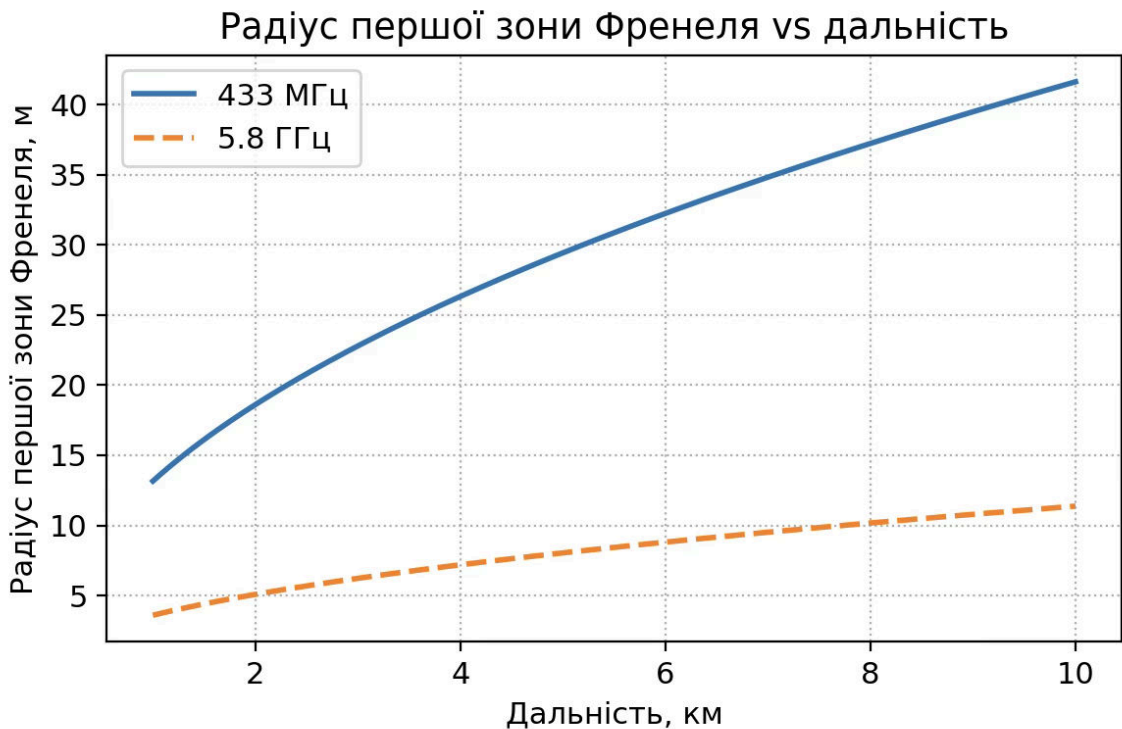


Рис. 5.6. Залежність радіуса першої зони Френеля від дальності для частот 433 МГц та 5.8 ГГц при симетричному розташуванні перешкоди

5.8. Порівняння показника BER залежно від SNR для різних методів модуляції

Ще одним важливим підходом до оцінювання якості каналу зв'язку є аналіз залежності ймовірності бітової помилки (Bit Error Rate, BER) від співвідношення сигнал/шум (Signal-to-Noise Ratio, SNR). Ця характеристика безпосередньо показує, наскільки обраний метод модуляції є стійким до шумів та перешкод. Для систем керування БАС критично важливо, щоб навіть при відносно низьких значеннях SNR ймовірність помилки залишалася мінімальною, тоді як для відеоканалів зазвичай допускається дещо вищий рівень помилок у обмін на вищу швидкість передавання даних.

На графіку порівняно умовні криві BER(SNR) для трьох типових варіантів модуляції: BPSK/LoRa-подібних схем, FSK та 16-QAM, що використовується у складі OFDM-систем. BPSK та вузькосмугові LoRa-рішення демонструють найкращу

завадостійкість – крива BER для них спадає дуже швидко зі збільшенням SNR, і навіть при відносно малих значеннях співвідношення сигнал/шум ймовірність помилки стає близькою до нуля. FSK займає проміжне положення: при тих самих значеннях SNR вона має більший BER, але залишається достатньо надійною для телеметрії та низькошвидкісних командних каналів.

Для 16-QAM ситуація інша: ця модуляція забезпечує істотно більшу швидкість передавання інформації, але платить за це значно вищими вимогами до SNR. Крива BER для 16-QAM спадає повільніше, і для досягнення малого значення ймовірності помилки потрібен суттєвий запас за потужністю сигналу. Це підтверджує практичний висновок: для надійного керування БАС доцільно застосовувати вузькосмугові та енергоефективні схеми модуляції (LoRa, FSK, BPSK), а широкосмугові схеми з високим порядком модуляції використовувати переважно для сервісів з високою пропускнуою здатністю – наприклад, для передачі відео – у зонах, де забезпечено достатньо високий SNR.

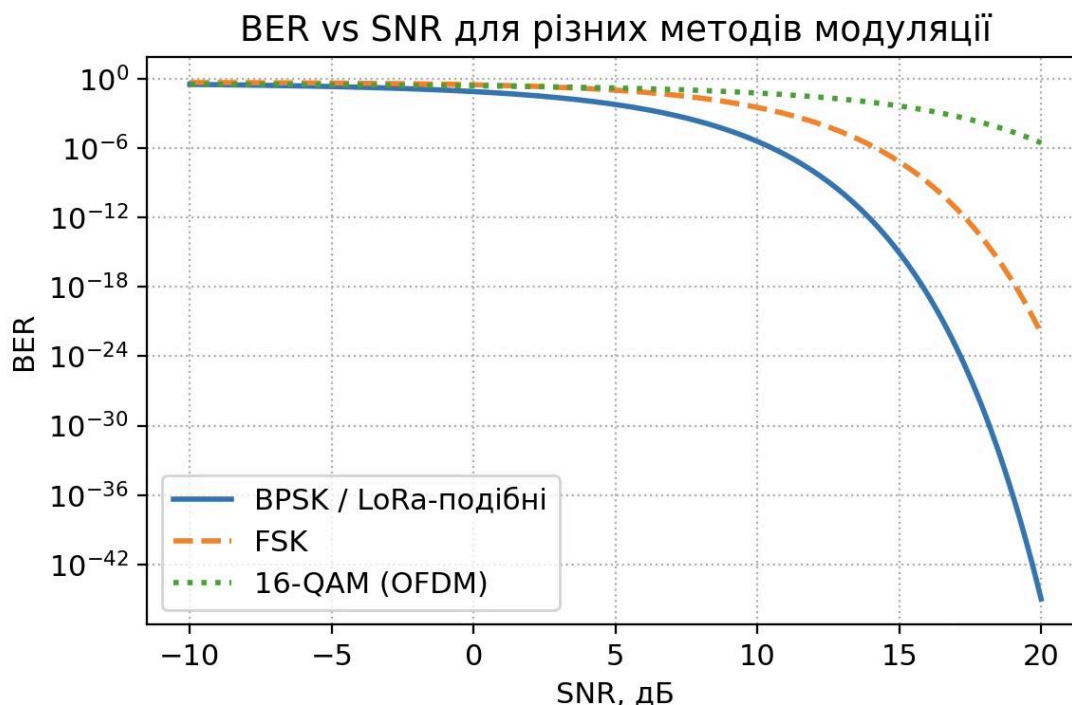


Рис. 5.7. Залежність ймовірності бітової помилки (BER) від SNR для BPSK/LoRa-подібної модуляції, FSK та 16-QAM (OFDM)

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 5

У межах практичної частини було проведено комплексний аналіз каналів зв'язку безпілотного авіаційного комплексу (БАС) в умовах реальної радіоелектронної обстановки, включно з моделюванням енергетичного балансу, оцінюванням втрат на трасі, дослідженням впливу перешкод та аналізом параметрів, що визначають стійкість каналу. Розрахунки підтвердили, що діапазон 430–470 МГц є найбільш оптимальним для каналу керування БАС, оскільки забезпечує значний запас за потужністю, зберігаючи працездатність навіть за дії активних засобів радіоелектронної боротьби. Натомість високочастотні канали, зокрема у діапазоні 5.8 ГГц, демонструють суттєво більшу чутливість до заглушування, що обумовлює необхідність використання адаптивних кодеків та зниження швидкості передавання відеопотоку під час роботи в умовах РЕБ.

Актуальність дослідження визначається зростаючою роллю БАС у сучасних бойових діях, де надійність каналу зв'язку є критичним фактором успішного виконання завдання. Наукова новизна роботи полягає у поєднанні енергетичних моделей, аналізу ефективності роботи радіоканалу під впливом РЕБ та оцінки завадостійкості різних типів модуляції, що дозволило комплексно охарактеризувати працездатність системи зв'язку БАС у умовах реальних загроз.

Моделювання вільно-просторових втрат (FSPL) показало істотні переваги низькочастотних діапазонів (433 МГц) на дальніх дистанціях порівняно з 2.4 та 5.8 ГГц. Аналіз впливу висоти польоту підтвердив, що оптимальна висота є критичною для забезпечення якісного каналу зв'язку, оскільки дозволяє поєднати чисту лінію видимості зі зменшенням надлишкових втрат. Дослідження першої зони Френеля підкреслило необхідність урахування геометрії траси та вимог до висоти розміщення антен для уникнення перекриття робочої області каналу. Порівняння залежності BER від SNR для різних методів модуляції підтвердило практичну доцільність використання LoRa/BPSK і FSK для стійких командних каналів та каналів телеметрії, тоді як 16-QAM/OFDM є ефективним лише для високошвидкісних відеосервісів у сприятливих умовах.

Загалом отримані результати формують обґрунтовану рекомендацію щодо впровадження гібридної архітектури каналів зв'язку у БАС, де поєднання низькочастотного завадостійкого каналу керування та високочастотного широкосмугового каналу для передавання відео забезпечує оптимальний баланс між надійністю, пропускною здатністю та стійкістю до перешкод.

РОЗДІЛ 6

ОХОРОНА ПРАЦІ

Охорона праці є ключовим елементом забезпечення безпеки персоналу, особливо у сферах, пов'язаних із застосуванням радіотехнічного обладнання, засобів зв'язку та електронних систем. Сучасні інженери та оператори, які працюють із апаратурою передачі даних, вимірювальними приладами, антенними системами, електроживленням та комп'ютерною технікою, перебувають під дією широкого спектра шкідливих і небезпечних факторів, що можуть мати як негайний, так і відкладений вплив на здоров'я.

За даними міжнародних організацій, робота з електронним та радіотехнічним обладнанням створює комплекс професійних ризиків: від неіонізуючого електромагнітного випромінювання до ергономічних навантажень, стресових факторів та небезпеки ураження електричним струмом [121, 122]. В умовах інтенсивного розвитку телекомунікаційних технологій питання забезпечення безпечних умов праці стає дедалі складнішим та потребує інженерного, нормативного та організаційного підходів.

У цьому розділі здійснюється аналіз шкідливих і небезпечних факторів, характерних для змішаного робочого середовища інженера систем зв'язку — як стаціонарного офісно-лабораторного, так і польового середовища, у якому застосовуються портативні прилади, радіопередавальні модулі та джерела автономного живлення. Особлива увага приділяється оцінці впливу неіонізуючого електромагнітного випромінювання (ЕМВ) як одному з найбільш значущих факторів, а також визначенню інженерних заходів щодо мінімізації ризиків.

Аналіз здійснюється на основі чинних нормативно-правових актів України (НПАОП, ДСН, ДСТУ), рекомендацій Міжнародної комісії із захисту від неіонізуючого випромінювання [123], стандартів IEEE C95.1 [124], OSHA [125], а також даних рецензованих наукових досліджень у сфері впливу ЕМВ на здоров'я та робоче середовище [126, 127].

6.1. Шкідливі та небезпечні виробничі фактори

Робоче місце інженера або оператора, який працює із системами зв'язку, передбачає взаємодію з великою кількістю технічних засобів: комп'ютерами, радіопередавачами, вимірювальними приладами, системами живлення, мережевим обладнанням, портативними антенами тощо. Це середовище формує значний перелік шкідливих і небезпечних виробничих факторів, які можуть негативно впливати на здоров'я та безпеку працівника. Відповідно до класифікації, наведеної у НПАОП 0.00-1.28-10 та ДСН 3.3.6.096-2002, фактори поділяють на фізичні, хімічні, психофізіологічні, електричні та ергономічні [128].

Фізичні фактори:

1. Електромагнітне випромінювання (неіонізуюче) – Основний фактор, характерний для робочих місць з радіоапаратурою.

Джерела:

- Wi-Fi-обладнання (2,4 та 5 ГГц)
- антени систем зв'язку
- персональні радіостанції
- модулі передачі даних
- джерела струму високої частоти
- портативні передавачі польового призначення

Вплив ЕМВ залежить від:

- частоти поля
- потужності джерела
- відстані до оператора
- тривалості впливу
- орієнтації антени та просторового розподілу поля

Згідно ICNIRP, перевищення допустимих рівнів може спричинити теплові ефекти, зростання температури тканин, функціональні зміни нервової системи, підвищення ризику нейрофізіологічних порушень [123].

У дослідженнях Foster наголошується, що навіть у межах нормативів ЕМВ може спричиняти довготривалі когнітивні навантаження при роботі зі складними системами зв'язку, зокрема через утворення локальних електромагнітних гармонік біля голови оператора [127].

2. Шум та вібрація – шум виникає від:

- вентиляторів технічних шаф
- блоків живлення
- серверного обладнання
- електромеханічних пристроїв

Згідно ДСН 3.3.6.037-99, рівень шуму понад 80 дБ може спричинити втому, зниження концентрації та розвиток професійних захворювань слуху.

Вібрація може бути присутня при роботі з переносними генераторами, джерелами автономного живлення або польовими платформами.

3. Мікроклімат – у лабораторно-офісному середовищі важливими параметрами є:

- температура (норма 18–24 °С, ДСН 3.3.6.042-99)
- вологість (40–60%)
- швидкість руху повітря

Відхилення цих параметрів може спричинити швидку втому, зниження працездатності, перевантаження терморегуляторної системи організму.

Ергономічні та психофізіологічні фактори – тривала робота за комп'ютером – до основних негативних наслідків належать:

- перенапруження зору
- сухість очей («комп'ютерний зоровий синдром»)
- статичне навантаження на шийно-плечовий відділ
- формування викривлень постави

Згідно OSHA, відсутність ергономічно правильної організації робочого місця підвищує ризик розвитку м'язово-скелетних захворювань на 30–45% [125].

Стресові та когнітивні фактори:

Сфера радіотехнічних систем характеризується: високою відповідальністю, необхідністю збереження концентрації, роботою у режимах «реального часу», інтелектуальним навантаженням

Дослідження свідчать, що тривалий когнітивний стрес погіршує швидкість прийняття рішень і збільшує ризик помилок при роботі зі складною апаратурою [129].

Електричні фактори і до них належать:

- ризик ураження електричним струмом
- небезпека короткого замикання
- нагрівання та займання кабельних ліній
- перевантаження мережі

Відповідно до НПАОП 40.1-1.21-98, ураження електричним струмом можливе як при пошкодженні ізоляції, так і при порушенні правил експлуатації обладнання. Особливо небезпечними є польові умови, де використовуються автономні джерела живлення [130].

Хімічні небезпеки виникають при:

- роботі з флюсами, ізопропіловим спиртом, засобами чищення
- контакті з пластиковими деталями, що виділяють леткі органічні сполуки при нагріві
- можливій присутності свинцю у припоях

ДСН 3.3.6.096-2002 регламентує вміст летких речовин та аерозолів [128].

Польові умови формують додаткові небезпеки:

- нестабільне живлення та використання переносних акумуляторних станцій
- вплив атмосферних умов (дощ, холод, спека, ультрафіолет)
- підвищений рівень ЕМВ при використанні високочастотних модулів
- можливість механічних травм
- недостатність освітлення

Згідно ISO 45001, робота в польових умовах потребує обов'язкового проведення аналізу ризиків перед початком діяльності [131].

6.2. Аналіз умов праці та розробка заходів захисту

Організація безпечних умов праці інженера систем зв'язку неможлива без глибокого аналізу факторів виробничого середовища, які впливають на його діяльність у стаціонарних та польових умовах. У роботі з радіотехнічним обладнанням ключову роль відіграє оцінка впливу неіонізуючого електромагнітного випромінювання (ЕМВ), адже саме цей фактор є системним, тривалим і супроводжує оператора під час виконання майже всіх технологічних операцій. У поєднанні з ергономічними, електричними, мікрокліматичними та психофізіологічними ризиками це формує комплексну картину, яка потребує як нормативної, так і інженерної оцінки.

Неіонізуюче електромагнітне випромінювання є основним фізичним фактором ризику для працівників, які працюють із засобами бездротового зв'язку, генераторами сигналів, широкосмуговими передавачами або польовими модулями радіокомунікацій. У наукових джерелах вплив ЕМВ описується двома основними механізмами: тепловим, що пов'язаний із нагріванням тканин у результаті поглинання енергії поля, і нетепловим, який характеризується нейрофізіологічними та когнітивними змінами при тривалому опроміненні навіть низької інтенсивності [123, 127].

Для інженерної оцінки впливу ЕМВ використовують параметри напруженості електричного поля E (В/м), магнітного поля H (А/м) і густини потоку енергії. У високочастотному діапазоні (вище 300 МГц) застосовується формула:

$$S = \frac{E^2}{377} \quad (6.1)$$

де S – густина потоку енергії, а 377 Ом – хвильовий опір вільного простору [132].

Цей параметр дозволяє оцінити інтенсивність опромінення у зоні перебування оператора та є основою для порівняння з нормативами.

Для робочих місць, пов'язаних із використанням радіотехнічної апаратури, необхідно дотримуватися вимог як національних, так і міжнародних стандартів. В Україні діють норми ДСН 3.3.6.096-2002, які визначають граничні рівні електричного поля в межах 10–15 В/м залежно від частоти [128].

Міжнародні директиви є більш деталізованими та враховують параметри густини потоку енергії: для частот 2–6 ГГц допустимі рівні для працівників становлять 50–100 Вт/м² [123]. Окремо стандарт IEEE C95.1 наголошує на особливій чутливості тканин, які мають слабкі механізми тепловідведення, що робить надзвичайно важливим дотримання відстані до джерел ЕМВ [124].

Таким чином, усі робочі місця інженерів систем зв'язку повинні підлягати періодичному контролю рівнів ЕМВ із застосуванням сертифікованих вимірювальних приладів [133].

Стаціонарне робоче місце характеризується наявністю великої кількості низькопотужних, але постійно діючих джерел ЕМВ: комп'ютерів, Wi-Fi точок доступу, Bluetooth-пристроїв, телекомунікаційних шаф, вимірювальних генераторів.

Хоча рівні випромінювання в офісних умовах зазвичай становлять лише 0,5–3 В/м, їхня дія є тривалою, а отже може призводити до когнітивного перевантаження, зниження продуктивності та появи головного болю [127].

Окрім ЕМВ, у стаціонарних умовах діють:

- ергономічні фактори – неправильне положення тіла, напруження м'язів, зорове навантаження;
- шумові навантаження – вентиляційні та серверні системи;
- ризики електробезпеки – можливі пошкодження кабельних мереж або блоків живлення;
- мікрокліматичні відхилення, що призводять до швидкої втоми.

Сукупний вплив цих факторів визначає необхідність системи інженерних та організаційних заходів щодо оптимізації умов праці [125, 131].

Польові роботи завжди супроводжуються більш високою інтенсивністю фізичних факторів, зокрема дії електромагнітного поля. Використання портативних передавачів потужністю 1–10 Вт, направлених антен, автономних джерел живлення і

металевих конструкцій створює умови, коли рівень ЕМВ у зоні оператора може наближатися до верхніх меж, визначених ICNIRP [123].

У таких умовах можуть формуватися локальні максимуми поля, спричинені відбиттям або фокусуванням енергії, що значно ускладнює точний контроль рівнів ЕМВ. Крім цього, польове робоче місце пов'язане з:

- несприятливим мікрокліматом;
- підвищеним ризиком травм через нерівний рельєф;
- небезпекою роботи з високострумівими акумуляторами;
- обмеженим освітленням;
- психофізіологічним напруженням через необхідність швидкого прийняття рішень [131, 134].

Міжнародний стандарт ISO 45001 прямо вказує, що перед виконанням робіт у польових умовах необхідно проводити попередню ідентифікацію небезпек та оцінку ризиків, пов'язаних з електромагнітними, електричними та метеорологічними факторами [131].

Для оцінки можливого рівня дії ЕМВ у конкретній точці використовується формула для поля від точкового джерела:

$$E = \sqrt{\frac{30P}{d^2}} \quad (6.2)$$

де E – напруженість поля (В/м), P – потужність передавача (Вт), d – відстань від джерела (м).

Практичний приклад:

Для портативного передавача 5 Вт на відстані 1 метр:

$$E = \sqrt{\frac{150}{1}} \approx 12,2 \text{ В/м} \quad (6.3)$$

Порівняння цього значення з нормативами показує, що воно є майже граничним, адже ДСН встановлює 10 В/м, а ICNIRP – 20 В/м для відповідної частоти. Тому польові роботи з антенами потребують суворішого контролю відстані та часу експозиції.

Порівняння фактичних показників з нормативами - для стаціонарного робочого місця:

- рівні ЕМВ: 0,5–3 В/м
- норми ДСН: до 10 В/м
- перевищення не спостерігається.

Для польового робочого місця:

- рівні ЕМВ біля портативних антен: 10–20 В/м
- норми ICNIRP: до 20 В/м
- можливі граничні стани, що потребують заходів захисту [123, 128].

Таким чином, стаціонарні умови характеризуються низьким рівнем ризику, тоді як польові можуть належати до середнього або високого рівня, залежно від конфігурації обладнання.

Комплекс заходів включає технічні, організаційні та індивідуальні рішення. У магістерській роботі важливо пояснити не лише, що необхідно застосовувати, а й чому саме ці заходи є ефективними.

1) Технічні заходи:

- екранування радіочастотних модулів, що зменшує інтенсивність поля;
- оптимізація потужності передавача під час калібрувальних робіт;
- збільшення відстані від оператора до джерела ЕМВ – найбільш ефективний і економічний метод;
- використання направлених антен, які концентрують енергію у робочій зоні, а не в напрямку оператора;
- вентиляційні системи, що зменшують теплові ефекти [124, 133].

2) Організаційні заходи:

- встановлення режимів доступу до зон підвищеного ЕМВ;
- маркування зон обмеженого перебування;

- скорочення часу перебування біля антен;
- регулярний аудит ЕМВ з фіксацією результатів;
- навчання персоналу [131].

3) Індивідуальні заходи:

- захисні окуляри при тривалій роботі з моніторами;
- діелектричні рукавички при роботі з живленням;
- антистатичні браслети [125].

У міжнародній практиці ризик визначають як добуток імовірності негативної події та тяжкості наслідків:

$$R = P \cdot S \quad (6.4)$$

На основі ISO 31010 (2019) для фактору ЕМВ отримано:

Таблиця 6.1

Оцінка професійного ризику впливу електромагнітного випромінювання за методикою ISO 31010:2019

Умови	P	S	R	Рівень
Стаціонарне середовище	2	2	4	Низький
Польове середовище	3	3	9	Середній
Робота з ВЧ-передачами > 10 Вт	3	4	12	Високий

6.3. Пожежна безпека на робочому місці інженера систем зв'язку

Пожежна безпека є невід'ємною складовою системи охорони праці, особливо на робочих місцях, пов'язаних із використанням телекомунікаційного, вимірювального та радіочастотного обладнання. Інженери систем зв'язку працюють як у стаціонарних приміщеннях, так і у польових умовах, що формує різний рівень

пожежних ризиків. Джерела займання можуть виникати унаслідок короткого замикання, перегріву електронних компонентів, несправності кабельних ліній, неправильного поводження з акумуляторними батареями чи зовнішніх факторів – високих температур, вітру, дощу або вібрацій під час розгортання обладнання [135].

У стаціонарних умовах основну небезпеку створюють електрощитові, комп'ютерна техніка, багаторозеткові блоки живлення, зарядні пристрої, серверні шафи та телекомунікаційні стійки. Відповідно до ДБН В.1.1–7:2016 приміщення, де встановлене електронне та телекомунікаційне обладнання, належать до категорій В та Г за вибухопожежною небезпекою, що потребує обладнання їх автоматичними системами пожежної сигналізації, димовими сповіщувачами та первинними засобами гасіння [136].

Одним із критичних факторів є перевантаження електричних мереж, особливо під час підключення вимірювальної апаратури або зарядних станцій для портативних пристроїв. Норми НПАОП 40.1–1.32-01 вимагають регулярної перевірки опору ізоляції, використання справних автоматичних вимикачів та забороняють підключення великої кількості споживачів до однієї групової лінії [137].

У польових умовах основні ризики зосереджені навколо акумуляторних батарей, інверторів, сонячних панелей, генераторів та портативних передавачів. Літій-іонні батареї можуть стати джерелом займання у разі пошкодження, перезарядження або впливу високої температури. Стандарт NFPA 855 визначає необхідність транспортування акумуляторів у вогнестійких контейнерах, а також забороняє їх залишення під прямим сонячним випромінюванням [138].

Основні вимоги пожежної безпеки на робочому місці інженера:

- ✓ Організаційні вимоги
- проведення первинного, повторного та позапланового інструктажу (НПАОП 0.00-4.12-05);
- забезпечення вільного доступу до вогнегасників, щитів та евакуаційних виходів;
- підтримання у справному стані електромереж, кабельних трас і розподільчих щитів;

- заборона використання несправних подовжувачів та перехідників;
- маркування та контроль зон розміщення акумуляторних батарей [139].
- ✓ Технічні заходи
- наявність вогнегасників типу ВСЕ (порошкових або вуглекислотних), придатних для гасіння електрообладнання під напругою;
- встановлення автоматичної пожежної сигналізації, димових та теплових датчиків;
- регулярне технічне обслуговування електротехнічних систем;
- використання вогнестійких кабелів у середовищах підвищеного навантаження;
- застосування тепловізійного контролю для раннього виявлення перегріву обладнання [136, 140].

✓ Дії у разі виникнення пожежі

Відповідно до ДСТУ EN ISO 23601:2019 працівник повинен [141]:

1. негайно відключити живлення обладнання, якщо це безпечно;
2. повідомити відповідальних осіб або службу порятунку за номером 101;
3. використати вогнегасник лише у разі відсутності загрози життю;
4. покинути приміщення за маршрутом евакуації;
5. чекати на прибуття пожежних підрозділів у безпечній зоні.

У польових умовах алгоритм спрощується: головне – швидко ізолювати джерело займання, від'єднати акумулятор, уникнути поширення вогню на навколишню рослинність та, у разі необхідності, викликати рятувальників [138].

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 6

Проведений аналіз свідчить, що робоче місце інженера систем зв'язку, незалежно від того, чи розташоване воно у стаціонарному середовищі чи в польових умовах, характеризується комплексом шкідливих та небезпечних виробничих факторів. Найбільш значущим фактором є вплив неіонізуючого електромагнітного випромінювання, яке за певних умов може досягати рівнів, близьких до міжнародно встановлених граничних значень. Оцінка моделей поширення ЕМВ підтверджує

необхідність технічного та організаційного контролю відстані до джерел випромінювання, часу експозиції та потужності передавачів.

Стационарне робоче середовище забезпечує нижчий рівень ризику, але містить інші ушкоджувальні фактори – ергономічні навантаження, шум, мікрокліматичні відхилення та електробезпеку. Польові умови, у свою чергу, створюють середній або високий рівень небезпеки через наявність портативних передавачів, акумуляторних систем та несприятливих факторів довкілля.

Система заходів захисту має бути комплексною та включати технічні, організаційні та індивідуальні рішення, а дотримання норм пожежної безпеки – невід’ємним елементом охорони праці. Реалізація впроваджених рекомендацій дозволяє знизити ризики для працівників, підвищити безпеку технологічних процесів і забезпечити відповідність українським та міжнародним стандартам.

РОЗДІЛ 7

ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

Активне застосування безпілотних авіаційних систем (БАС) і наземної інфраструктури зв'язку (антенно-фідерні тракти, передавачі, ретранслятори, наземні станції керування, засоби енергоживлення) формує не лише технічні переваги, а й специфічний екологічний «слід». У контексті теми дипломної роботи – організації каналів зв'язку та керування у БАС – ключовими стають впливи, пов'язані з радіочастотним середовищем, енергоспоживанням, акустичним навантаженням, а також поводженням з акумуляторами та електронними компонентами [142, 143].

Актуальність цього розділу визначається двома чинниками. По-перше, інтенсивність експлуатації БАС у воєнних і цивільних сценаріях зростає, а отже зростає частка відходів (акумулятори, плати, кабелі, антени) та потреба у швидких зарядних/генераторних рішеннях. По-друге, сучасні підходи до безпеки та сталого розвитку вимагають оцінювати технології за життєвим циклом – від вибору компонентів і режимів роботи до кінцевої утилізації [142, 143].

У межах розділу розглянуто впливи для двох типів робочого середовища, характерних для інженера/оператора систем зв'язку БАС:

- стаціонарного (офіс/лабораторія/майстерня, тестування апаратури, налаштування каналів);
- польового (розгортання наземної станції, робота з портативними передавачами/антенами, автономне енергоживлення).

Нормативною основою є загальні вимоги екологічного законодавства України [152, 153] та міжнародні підходи до систем екологічного менеджменту [142], а також профільні документи щодо відходів батарей і електроніки [144, 146].

Екологічна складова застосування БАС напряму пов'язана з тим, як організовані канали зв'язку (потужність, частоти, режими передачі) і чим забезпечується енергоживлення та сервіс (акумулятори, генератори, логістика), тому оцінка впливів є логічним продовженням інженерної частини даної роботи [142, 143].

7.1. Джерела та види впливу БАС і систем зв'язку на довкілля

Для коректного аналізу впливів доцільно використовувати підхід «джерело → механізм → потенційний наслідок» і розглядати систему як сукупність:

1. повітряної платформи (БАС),
2. каналів зв'язку/керування (радіомодулі, антени, протоколи),
3. наземної інфраструктури (станція, ретранслятори, живлення),
4. сервісного циклу (заряд/заміна/ремонт/утилізація).

Найбільш релевантні для тематики диплома екологічні аспекти можна згрупувати так:

1) Відходи та матеріальний «слід» (акумулятори, електроніка, кабелі)

- Літій-іонні/літій-полімерні акумулятори БАС та наземних станцій мають обмежений ресурс і при інтенсивній експлуатації швидко переходять у категорію відходів, що потребують контрольованого поводження [144].
- Електронні плати, радіомодулі, антени, кабелі та роз'єми після виходу з ладу формують потоки електронних відходів, частина яких може містити небезпечні компоненти [144].
- Неналежне зберігання/транспортування батарей підвищує ризик загоряння та вторинного забруднення [144].

2) Енергоспоживання та непрямі викиди

- Хоча сам БАС може працювати «локально без вихлопу», екологічний вплив формують зарядні цикли, логістика батарей, робота генераторів у польових умовах, а також енергетичні втрати на ретрансляції/підсиленні сигналу [143].
- У польових умовах застосування ДВЗ-генераторів збільшує викиди та акустичний тиск [143].

3) Акустичне навантаження та вплив на фауну

- Шум від мультикоптерів може викликати поведінкові реакції тварин, підвищення настороженості, уникання територій або стресові реакції залежно від висоти, швидкості, траєкторії та тривалості впливу [147, 148, 149].

- Для природоохоронних територій важливими стають регламенти висоти/дистанції та обмеження часу польоту [148].

4) Електромагнітне навантаження середовища (радіочастотні поля)

- Канали керування (нижчі частоти) та відеоканали (2.4/5.8 ГГц) створюють радіочастотне поле, інтенсивність якого залежить від потужності, антени та режиму передачі. У загальному випадку екологічний аспект проявляється через «електромагнітне фонове навантаження» у локальних зонах розгортання [150, 151].
- Для довкілля цей фактор зазвичай оцінюють як локальний та контрольований інженерними режимами (мінімізація часу передачі, зниження потужності, спрямовані антени) [150, 151].

5) Ризики інцидентів і вторинних впливів

- Падіння БАС або аварійне пошкодження батарей може спричинити локальні забруднення електролітом, уламками композитів/пластику; у польових умовах це ускладнюється обмеженими можливостями збору фрагментів [144].

З позицій українського законодавства загальні принципи охорони довкілля та вимоги екологічної безпеки визначаються базовими актами, зокрема Законом України «Про охорону навколишнього природного середовища» [152] та Законом України «Про управління відходами» [153].

Для каналів зв'язку БАС екологічно найвагомішими є: (1) потоки відходів акумуляторів та електроніки; (2) енергетичний «слід» через заряд/генератори; (3) акустичний вплив на фауну; (4) локальне радіочастотне навантаження, яке зменшується інженерними режимами роботи [144, 147, 150]

7.2. Аналіз пріоритетних екологічних факторів та інженерні заходи мінімізації

З урахуванням реальної експлуатації БАС у змішаних умовах (стаціонар + поле) пріоритетними для інженерної оцінки доцільно обрати два фактори, які найтісніше пов'язані з темою диплома та мають практичні шляхи мінімізації:

1. поводження з акумуляторами та електронними відходами (як системний матеріальний фактор);
2. акустичний вплив БАС на довкілля (як фактор експлуатаційної взаємодії з біотою).

7.2.1. Акумулятори та електронні відходи: оцінка ризиків і заходи

БАС середнього класу зазвичай експлуатує декілька батарейних комплектів, що циклічно заряджаються та замінюються. Додатково батареї використовуються у наземних станціях, ретрансляторах, ноутбуках/моніторах, інверторах. Зношені батареї та пошкоджені електронні вузли утворюють потік відходів, який без правильної логістики може переходити у «неконтрольоване накопичення» [144].

Екологічні ризики:

- Хімічний ризик: витік електроліту, потрапляння компонентів у ґрунт/воду внаслідок пошкодження.
- Пожежний ризик: термічний розгін літєвих батарей при механічному пошкодженні або неправильному заряджанні/зберіганні [144].
- Ресурсний ризик: втрати матеріалів і збільшення екологічного навантаження через відсутність збору/перероблення. У сучасних регуляторних підходах акцент робиться на збиранні, повторному використанні та переробці батарей у межах циркулярної економіки [146].

Нормативно-управлінський контур - як орієнтир можна застосовувати рамку ISO 14001 (планування екологічних аспектів, контроль операцій, готовність до інцидентів, постійне поліпшення) [142].

Для батарейних відходів корисними є міжнародні технічні рекомендації Базельської конвенції щодо інвентаризації та екологічно безпечного поводження з відходами батарей, що містять літій [144].

Інженерні заходи мінімізації:

а) Технічні рішення

- Використання зарядних пристроїв із контролем температури/балансуванням комірок і журналюванням циклів [144].

- Маркування батарей (ID, дата введення, кількість циклів, стан), відбраковка за внутрішнім опором/температурною поведінкою.
- Вогнестійкі контейнери/сумки для транспортування та тимчасового зберігання пошкоджених батарей [144].

б) Організаційні рішення

- Створення «ланцюга поводження»: збір → тимчасове безпечне зберігання → передача ліцензованому оператору відходів відповідно до вимог національної системи управління відходами [153].
- Інвентаризація е-відходів і батарей як мінімальний елемент екологічного контролю [142, 144].

в) Рішення на рівні проєктування систем зв'язку

- Зменшення пікових потужностей передачі та перехід на енергоефективні режими (адаптивний бітрейт/час передачі) знижує кількість зарядних циклів і, як наслідок, темп деградації батарей. Це прямо узгоджується з принципами оптимізації каналів зв'язку, розглянутими в основних розділах цієї роботи [143].

Основний екологічний «матеріальний» ризик БАС пов'язаний із батареями та електронікою. Він керований через інвентаризацію, безпечне зберігання, регламентований збір/передачу на переробку та інженерну оптимізацію енергоспоживання каналів зв'язку, що зменшує зношення батарей [144, 142, 153].

7.2.2. Акустичний вплив БАС на фауну: оцінка та профілактика

Для мультикоптерів шум є неминучим побічним фактором роботи гвинтомоторної групи. Наукові огляди підкреслюють, що реакції тварин залежать від виду, контексту та параметрів польоту: висоти, швидкості, дистанції зближення та часу впливу [149; 150].

Можливі наслідки:

- короткочасні поведінкові реакції (настороженість, втеча);
- зміна режимів годування/відпочинку;

- потенційний стресовий вплив у чутливих видів при повторюваних польотах [150; 151].

Профілактика через інженерні параметри місії:

У контексті організації каналів керування та відео можна сформуванати практичні правила мінімізації шумового впливу без втрати якості зв'язку:

- оптимізація висоти: підвищення висоти за умови збереження енергетичного запасу каналу зв'язку зменшує акустичний тиск на локальну ділянку;
- зменшення часу зависання: використання коротких вікон передачі даних і швидке виконання завдання;
- маршрутизація поза чутливими зонами: обхід гніздувань/місць скупчення;
- обмеження повторюваності польотів: уникнення регулярного «патерну», що підвищує ймовірність хронічних реакцій [149; 150].

Акустичний вплив БАС є експлуатаційним фактором, який зменшується «правилами місії» (висота, час, траєкторія) та частково залежить від інженерних рішень зв'язку (зменшення часу передачі, оптимізація режимів роботи), що дозволяє знизити ризики для фауни у чутливих зонах [150; 151].

7.3. Узагальнені рекомендації з екологічної безпеки для стаціонарного та польового середовища

Щоб поєднати стаціонарне і польове робоче місце в єдину практичну схему, доцільно застосувати «мінімальний екологічний регламент» у стилі ISO 14001: визначення аспектів → контроль операцій → готовність до інцидентів → покращення [146].

Рекомендації для стаціонарного середовища (офіс/лабораторія):

- Впровадити облік батарей, зарядних циклів, дефектів і списання [143].
- Організувати окреме місце тимчасового зберігання відпрацьованих батарей та е-відходів (вогнестійка тара, маркування) [143].

- Планувати «екологічні параметри» тестувань: уникати зайвих тривалих передач, де це не потрібно (зменшення енергоспоживання → менше зношення батарей) [148].

Рекомендації для польового середовища (розгортання і експлуатація):

- Перед початком робіт проводити коротку оцінку екологічних ризиків локації: близькість водойм/заповідних зон, наявність сухої рослинності (ризик пожеж), складність збору уламків при інцидентах [146].
- Для батарей: транспортування в захисних контейнерах; відбраковка пошкоджених батарей; заборона залишати батареї під прямим сонцем та поруч із джерелами тепла [143].
- Для акустичного впливу: за можливості збільшувати висоту та зменшувати час зависання, уникати повторюваних маршрутів над чутливими біотопами [150].
- Для інцидентів: мати «екологічний набір мінімум» (пакети для збору уламків, маркери/стрічка, рукавички), щоб не залишати фрагменти пластику/електроніки на місцевості.

Найефективніші заходи екологічної безпеки для БАС – це не «складні екологічні системи», а дисципліна життєвого циклу: облік, безпечне поводження з батареями та е-відходами, мінімізація енерговитрат каналів зв'язку, а також правила польотних місій для зниження шумового впливу [146; 143; 150].

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 7

1. Впливи БАС і систем зв'язку на довкілля мають комплексний характер і проявляються через матеріальні потоки (акумулятори, електроніка), енергоспоживання (заряд/генератори), акустичне навантаження та локальне радіочастотне поле. Пріоритетність факторів залежить від інтенсивності експлуатації та умов розгортання [146; 148].
2. Найбільш керованим і водночас суттєвим фактором є поводження з відходами батарей та електроніки. Застосування інвентаризації, безпечного зберігання і

передачі на перероблення відповідає сучасним міжнародним рекомендаціям і принципам циркулярної економіки [143; 145; 153].

3. Акустичний вплив БАС на фауну може бути зменшений інженерно-організаційними рішеннями (висота, час, траєкторія, мінімізація зависання), що підтверджується сучасними оглядами впливу дронів на дику природу [149; 150].
4. Запропоновані рекомендації узгоджуються з принципами екологічного менеджменту (ISO 14001) та базовими вимогами законодавства України щодо охорони довкілля і управління відходами, а також логічно доповнюють інженерні рішення дипломної роботи щодо оптимізації каналів зв'язку та режимів передачі [146; 152; 153].

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі розв'язано актуальну науково-практичну проблему забезпечення надійних, безпечних та ефективних каналів зв'язку і керування безпілотними авіаційними системами в умовах зростання їх масштабного використання у цивільному повітряному просторі. Актуальність обраної теми зумовлена одночасним розвитком безпілотних технологій, цифрових мереж зв'язку, а також необхідністю інтеграції БАС у національні та міжнародні системи управління повітряним рухом із дотриманням вимог безпеки, охорони праці та охорони навколишнього середовища.

У роботі проаналізовано сучасний стан і тенденції розвитку безпілотних авіаційних систем, що дозволило встановити, що канали зв'язку та керування є одним із ключових обмежувальних факторів їх подальшої масштабної інтеграції. Визначено, що надійність функціонування БАС безпосередньо залежить від характеристик командно-керуючих каналів, каналів телеметрії та передачі корисного навантаження, зокрема відеоданих. Показано, що перехід від локальних, ізольованих систем керування до мережево-орієнтованих архітектур є визначальним трендом розвитку галузі.

На основі аналізу сучасних технологій зв'язку встановлено, що мережі п'ятого покоління (5G) вже сьогодні створюють технічні передумови для реалізації польотів поза межами прямої видимості (BVLOS) завдяки низьким затримкам, високій пропускній здатності та можливості логічної сегментації мережі (network slicing). Кількісні показники затримки на рівні одиниць мілісекунд та підтримка масового підключення пристроїв дозволяють розглядати 5G як базову інфраструктуру для систем U-space та UTM. У перспективі встановлено, що мережі шостого покоління (6G) здатні забезпечити подальше зменшення затримок до субмілісекундного рівня, інтеграцію наземних і супутникових сегментів та реалізацію AI-native керування, що відкриває можливість повної автономізації місій БАС.

У роботі обґрунтовано доцільність використання ризик-орієнтованого підходу до організації польотів безпілотних систем, зокрема на основі концепції SORA, яка дозволяє адаптувати вимоги до каналів зв'язку та рівнів резервування залежно від сценарію експлуатації. Показано, що для низькоризикових операцій можливе застосування комерційних рішень, тоді як складні сценарії (BVLOS, міський простір, висока щільність трафіку) потребують сертифікованих каналів зв'язку, резервування систем і засобів автоматичного уникнення зіткнень.

Значну увагу в роботі приділено перспективам інтеграції БАС у цивільний повітряний простір України. Встановлено, що гармонізація національної нормативно-правової бази з вимогами ICAO, EASA та EUROCONTROL, а також впровадження концепції U-space створюють основу для формування сучасної цифрової системи управління безпілотним рухом. Показано, що особливі умови функціонування повітряного простору України, зумовлені воєнним станом, одночасно є обмежувальним фактором і джерелом унікального практичного досвіду у сфері завадостійкого зв'язку, автономної навігації та протидії радіоелектронним впливам.

У рамках роботи виконано аналіз умов праці інженера систем зв'язку БАС у стаціонарному та польовому середовищах. Визначено, що неіонізуюче електромагнітне випромінювання є системним фактором впливу, який супроводжує більшість технологічних операцій. На основі національних і міжнародних нормативів встановлено допустимі рівні ЕМВ для робочих місць та виконано якісну і кількісну оцінку ризиків для стаціонарних і польових умов. Показано, що в офісно-лабораторному середовищі рівні ЕМВ, як правило, не перевищують нормативних значень, тоді як у польових умовах можливі граничні стани, що потребують суворішого контролю відстані, часу експозиції та потужності передавачів.

На основі проведеного аналізу розроблено комплекс технічних, організаційних та індивідуальних заходів з охорони праці, які дозволяють знизити професійні ризики до прийняттого рівня. Обґрунтовано ефективність інженерних рішень, зокрема оптимізації потужності передавачів, використання спрямованих антен, екранування та організації режимів доступу до зон підвищеного ЕМВ. Вірогідність отриманих

висновків підтверджується відповідністю використаних підходів чинним стандартам та рекомендаціям ICNIRP, IEEE, ISO та національним нормативним актам.

У розділі з охорони навколишнього середовища виконано оцінку екологічних впливів, пов'язаних із застосуванням БАС і систем зв'язку. Встановлено, що найбільш значущими з практичної точки зору є матеріальні потоки акумуляторів та електронних відходів, енергетичний «слід» зарядних і генераторних систем, а також акустичний вплив на фауну. Показано, що ці впливи є керованими за умови впровадження дисципліни життєвого циклу, інвентаризації батарей, безпечного зберігання та передачі відходів на перероблення, а також оптимізації режимів зв'язку, що зменшує енергоспоживання.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості їх використання під час проектування, експлуатації та модернізації систем зв'язку і керування БАС у цивільних і спеціалізованих застосуваннях. Запропоновані підходи можуть бути використані інженерами-практиками, операторами БАС, а також при розробці внутрішніх регламентів безпеки, охорони праці та екологічного менеджменту. Матеріали роботи можуть бути застосовані в освітньому процесі під час підготовки фахівців у галузі телекомунікацій, авіаційних та безпілотних систем.

Таким чином, кваліфікаційна робота є завершеним дослідженням, у якому на основі сучасних наукових і нормативних підходів обґрунтовано інженерні рішення щодо організації каналів зв'язку та керування безпілотними авіаційними системами з урахуванням вимог безпеки, охорони праці та охорони навколишнього середовища, що підтверджує досягнення поставленої мети та виконання всіх завдань роботи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ICAO. Manual on Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS). — Montreal : International Civil Aviation Organization, 2020. — 182 p.
2. EASA. Unmanned Aircraft Systems Regulations and Guidance. — Cologne : European Union Aviation Safety Agency, 2023. — 156 p.
3. NATO. UAS Classification and Employment Guidelines. — Brussels : North Atlantic Treaty Organization, 2017. — 94 p.
4. Valavanis K. P., Vachtsevanos G. J. Handbook of Unmanned Aerial Vehicles. — Dordrecht : Springer, 2015. — 3022 p. DOI: 10.1007/978-90-481-9707-1.
5. Austin R. Unmanned Aircraft Systems: UAVs Design, Development and Deployment. — Chichester : John Wiley & Sons, 2010. — 365 p.
6. Florence P., Carter J., Ware J., Tedrake R. Vision-Based Perception for Aerial Robotics // *IEEE Robotics and Automation Letters*. — 2022. — Vol. 7, No. 2. — P. 468–475. DOI: 10.1109/LRA.2021.3131306.
7. Huang H., Savkin A. V., Ding M. Autonomous Navigation Technologies for UAVs: A Survey // *IEEE Access*. — 2018. — Vol. 6. — P. 47364–47391. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2865519.
8. Chen Y., Wang J., Zhang H. AI-Based Control for UAV Mission Planning // *Sensors*. — 2021. — Vol. 21, No. 14. — Article 4689. DOI: 10.3390/s21144689.
9. Schwartz M. Network-Centric Warfare and Unmanned Systems Integration // *Defense Studies*. — 2020. — Vol. 20, No. 3. — P. 245–262.
10. Beard R., McLain T. Small Unmanned Aircraft: Theory and Practice. — Princeton : Princeton University Press, 2012. — 290 p.
11. Mahony R., Kumar V., Corke P. Multirotor Aerial Vehicles: Modeling and Control // *IEEE Robotics & Automation Magazine*. — 2012. — Vol. 19, No. 3. — P. 20–32. DOI: 10.1109/MRA.2012.2206474.
12. Ryll M., Bühlhoff H. H., Giordano P. R. A Novel Overactuated Quadrotor Unmanned Aerial Vehicle: Modeling, Control, and Experimental Validation // *IEEE*

- Transactions on Control Systems Technology*. — 2019. — Vol. 27, No. 4. — P. 1609–1624.
13. Cummings M. Automation and Human Interaction in UAS Operations // *Human Factors*. — 2014. — Vol. 56, No. 1. — P. 15–31.
 14. Sharma A., Ghose D. Secure Communication Architectures for UAV Applications // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. — 2021. — Vol. 23, No. 2. — P. 1257–1281.
 15. Törngren M., Bensalem S. *Cyber-Physical Systems Safety and Resilience*. — Cham : Springer, 2019. — 265 p.
 16. ASTM F3178-19. *Standard Guide for UAS Operational Risk Assessment*. — West Conshohocken : ASTM International, 2019.
 17. Zhang H., Wang J., Chen Y. Data Analytics in UAV Telemetry Systems // *Sensors*. — 2021. — Vol. 21, No. 9. — Article 3045.
 18. Iyer B., Gopalan R. Modular Architectures for Unmanned Aerial Vehicles // *Journal of Aerospace Information Systems*. — 2020. — Vol. 17, No. 6. — P. 245–257.
 19. Federal Aviation Administration. *Remote Pilot Study Guide*. — Washington, DC : FAA, 2023.
 20. ICAO. *Manual on Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS)*. — Doc 10019. — Montréal : ICAO, 2018.
 21. NATO. *STANAG 4586: Standard Interfaces of UAV Control System*. — Edition 4–5. — Brussels : NATO Standardization Office, 2017.
 22. Центр БАС Міністерства оборони України. Технічний звіт щодо застосування БПЛА в умовах радіоелектронної протидії. — Київ, 2023.
 23. IEEE. *Communications Surveys & Tutorials*. — 2022. — Vol. 24, No. 2.
 24. EASA. *Artificial Intelligence in Aviation Safety*. — Cologne : European Union Aviation Safety Agency, 2021.
 25. EASA. *U-Space Regulatory Framework*. — Cologne : EASA, 2022.
 26. NASA. *UAS Traffic Management (UTM) Research Reports*. — Washington, DC : NASA, 2020.

27. Міністерство цифрової трансформації України. Технічний звіт щодо застосування супутникових систем зв'язку. — Київ, 2022.
28. 3GPP. *TR 22.829: Enhanced Support for Aerial Vehicles*. — Release 17. — 2021.
29. IEEE. *Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. — 2023. — Vol. 59, No. 1.
30. Beard R. W., McLain T. W. *Small Unmanned Aircraft: Theory and Practice*. — Princeton : Princeton University Press, 2012. — 312 p.
31. IEEE. *Communications Surveys & Tutorials*. — 2022. — Vol. 24, No. 2.
32. Sharma A., Ghose D. *Secure Communication Architectures for UAV Applications // IEEE Communications Surveys & Tutorials*. — 2021. — Vol. 23, No. 2. — P. 1359–1385.
33. Törngren M., Bensalem S. *Cyber-Physical Systems Safety and Resilience*. — Berlin : Springer, 2019. — 278 p.
34. MIL-STD-188. *Department of Defense Interface Standards for Communications Systems*. — Washington, DC : U.S. DoD, чинні редакції.
35. NASA. *UAS Traffic Management (UTM) Research Reports*. — Washington, DC : National Aeronautics and Space Administration, 2020.
36. IEEE. *Mesh and Swarm Communication in UAV Systems // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. — 2023. — Vol. 59, No. 4.
37. Austin, R. *Unmanned Aircraft Systems: UAVS Design, Development and Deployment*. — Hoboken: Wiley, 2011.
38. Skolnik, M. *Radar Handbook*. — New York: McGraw-Hill, 2008.
39. Barton, D., Alexander, R. *Software Defined Radio for Engineers*. — Norwood: Artech House, 2020.
40. DJI Innovations. *OcuSync Wireless Transmission System Whitepaper*. — Shenzhen, 2020.
41. Zeng, Y., Zhang, R., Lim, T. J. *Wireless communications with unmanned aerial vehicles: Opportunities and challenges // IEEE Communications Magazine*. — 2019.
42. Matolak, D. W., Sun, R. *Air-ground channel characterization for unmanned aircraft systems // IEEE Transactions on Vehicular Technology*. — 2015.

43. TU-R P.525-4. *Calculation of Free-Space Attenuation*. — Geneva: ITU, 2019.
44. Rappaport, T. *Wireless Communications: Principles and Practice*. — Upper Saddle River: Prentice Hall, 2010.
45. Al-Hourani, A., Kandeepan, S., Jamalipour, A. Modeling air-to-ground path loss for low altitude platforms // *IEEE GLOBECOM*. — 2014.
46. Rao, B., Gopi, A. G., Ma, X. UAV communication systems and BLoS technologies // *IEEE Access*. — 2016.
47. Kaplan, E., Hegarty, C. *Understanding GPS/GNSS: Principles and Applications*. — Norwood: Artech House, 2017.
48. Bolea, R., Valero, A., Vidal, A. SATCOM links for unmanned aircraft // *Aerospace Science and Technology*. — 2018.
49. Maral, G., Bousquet, M. *Satellite Communications Systems*. — Hoboken: Wiley, 2010.
50. Tipping, M., Roberts, G. Starlink for aviation: performance assessment // *IEEE Aerospace Conference Proceedings*. — 2022.
51. Fotouhi, A., Qiang, H., Ding, L. Survey on UAV cellular communications // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. — 2019.
52. Zhang, J., Xiao, Y., Ma, Z. 5G technology in UAV networks // *IEEE Wireless Communications*. — 2020.
53. Andrews, J. G., Buzzi, S., Choi, W. What will 5G be? // *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. — 2014.
54. Cheng, X., Fan, P., Chen, Y. Airborne LTE coverage limitations for UAVs // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. — 2021.
55. Mozaffari, M., Saad, W., Bennis, M. UAV-based relay networks // *IEEE Transactions on Wireless Communications*. — 2019.
56. Meier L. *MAVLink Micro Air Vehicle Communication Protocol*. — Zürich : ETH Zurich, 2012.
57. Tzoumanikas D., Raptis N., Chatzigeorgiou A. Security Extensions for MAVLink 2 // *IEEE Aerospace Conference*. — 2019.

58. Ponomarev A., Yakimenko O., Petrov V. UAVCAN — a High-Reliability Communication Protocol for Unmanned Vehicles // *IEEE Systems, Man, and Cybernetics*. — 2015.
59. DroneCAN Consortium. *DroneCAN Technical Specification*. — 2021. — URL: <https://dronecan.org>
60. Kenington P. *RF and Baseband Techniques for Software Defined Radio*. — Boston : Artech House, 2019.
61. NATO Standardization Office. *STANAG 4586: Standard Interfaces of UAV Control Systems*. — NATO, 2014.
62. DJI Innovations. *DJI Transmission Protocol Whitepaper*. — Shenzhen, 2020.
63. Schmidt D. *Data Distribution Service: QoS and Real-Time Communications // ACM Computing Surveys*. — 2014.
64. Mitola J. The Software Radio Architecture // *IEEE Communications Magazine*. 1995.
65. Brown T. Adaptive SDR Architectures for UAV Communications // *IEEE Aerospace Conference*. 2021.
66. Avison J. Interference Mitigation in Modern SDR Systems // *Radio Science Journal*. 2016.
67. Benson K., Sharma M., Lee S. High-Efficiency Modulation Techniques for UAV Wireless Links // *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2018.
68. Pérez L., Romero D., Silva E. Secure SDR Architectures for Tactical UAVs // *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 2020.
69. Haykin S. *Adaptive Filter Theory*. Pearson, 2013.
70. Proakis J., Salehi M. *Digital Communications*. McGraw-Hill, 2008.
71. Sharma R., Patel M., Kim S. Adaptive Frequency Hopping for UAV Communication Links. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2020.
72. Rappaport T. *Wireless Communications: Principles and Practice*. Prentice Hall, 2010.
73. Selvaraj A., Gomez C., Hou T. Low-Power Chirp Spread Spectrum for UAV Networks. *IEEE IoT Journal*, 2019.

74. Balanis C. *Antenna Theory: Analysis and Design*. Wiley, 2016.
75. Chen Y., Liu H., Zhang X. Security Vulnerabilities in Consumer UAV Communication Protocols. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2021.
76. Brown T. SDR-Based Anti-Jamming Techniques for UAV Systems. *IEEE Aerospace Conference*, 2021.
77. Mozaffari M., Saad W., Bennis M. UAV-Based Relay Networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2019.
78. Nijim M., Gani A. Standardization Challenges in UAV Communications // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. — 2021.
79. RTCA. Minimum Operational Performance Standards (MOPS) for C2 Link Systems. — Washington, DC, 2020.
80. Goldsmith A. *Wireless Communications*. — Cambridge : Cambridge University Press, 2005.
81. Kumar V., Michael N. Opportunities and challenges with autonomous micro aerial vehicles // *The International Journal of Robotics Research*. — 2012.
82. Richards A., How J., Schouwenaars T., Feron E. Spacecraft trajectory planning with avoidance constraints // *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*. — 2021.
83. Goodrich M. A., Schultz A. C. *Human–Robot Interaction: A Survey* // *Foundations and Trends in Human–Computer Interaction*. — 2007.
84. Åström K., Hägglund T. *Advanced PID Control*. — Research Triangle Park : ISA, 2006.
85. Bouabdallah S., Murrieri P., Siegwart R. Design and Control of a Quadrotor Using LQR // *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*. — 2004.
86. Edwards C., Spurgeon S. *Sliding Mode Control: Theory and Applications*. — London : Taylor & Francis, 1998.
87. Zhang K. Learning-Based Control for UAV Stabilization // *IEEE Transactions on Neural Networks*. — 2020.
88. Federal Aviation Administration. *Unmanned Aircraft Systems Operational Safety Requirements*. — Washington, DC : FAA, 2021.

89. Groves P. *Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems*. — Norwood : Artech House, 2013.
90. Titterton D., Weston J. *Strapdown Inertial Navigation Technology*. — London : IET, 2004.
91. Shakernia O., Vidal R., Sastry S. Sensor-Based Navigation for UAVs // *IEEE Robotics & Automation Letters*. — 2020.
92. LaValle S. *Planning Algorithms*. — Cambridge : Cambridge University Press, 2006.
93. Gao Y., Wu X., Shen S. Model Predictive Control for UAV Trajectory Tracking // *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. — 2014.
94. Cadena C. et al. Past, Present, and Future of SLAM // *IEEE Transactions on Robotics*. — 2016.
95. Kumar V., Michael N. Opportunities and Challenges with Autonomous Micro Aerial Vehicles // *The International Journal of Robotics Research*. — 2012.
96. Oleynikova H., Taylor Z., Siegwart R. Safe Local Exploration for UAV Navigation // *IEEE Robotics and Automation Letters*. — 2018.
97. Zhu Z. et al. Deep Learning for Obstacle Detection in Aerial Robots // *IEEE Transactions on Robotics*. — 2020.
98. Khatib O. Real-Time Obstacle Avoidance // *The International Journal of Robotics Research*. — 1986.
99. Fox D., Burgard W., Thrun S. Dynamic Window Approach to Collision Avoidance // *Autonomous Robots*. — 1997.
100. Karaman S., Frazzoli E. Sampling-based Algorithms for Optimal Motion Planning // *The International Journal of Robotics Research*. — 2011.
101. Tai L., Paolo D., Liu M. Deep Reinforcement Learning for Mobile Robot Navigation // *IEEE ICMA*. — 2017.
102. Chen J., Han T., Li Q. AI-Based Trajectory Prediction and Safety Assurance for UAVs // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. — 2022.
103. Pixhawk Dev Team. *MAVLink Protocol Documentation*. — 2020.
104. Semtech. *LoRa Modulation Basics*. — 2019.

105. Oosedo A. et al. Telemetry-Based Adaptive Control Tuning for UAVs // *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. — 2017.
106. Zhang Y. et al. Detection of Anomalous Telemetry in UAV Networks Using AI // *IEEE Access*. — 2021.
107. Levine W. *The Control Handbook: Control System Fundamentals*. — Boca Raton : CRC Press, 2019.
108. ITU. *Radio Regulations: Allocation of Frequencies for Aeronautical Mobile (R) Services*. — Geneva, 2021.
109. EASA. *SORA – Specific Operations Risk Assessment Guidelines*. — Cologne, 2020.
110. ISO. *Information Security for Unmanned Aerial Vehicles*. — Geneva, 2019.
111. ETSI. *Radio Equipment Standards for Unmanned Aircraft Systems*. — Sophia Antipolis, 2019.
112. SESAR. *U-space Concept of Operations*. — Brussels : SESAR Joint Undertaking, 2020.
113. EUROCONTROL. *UTM Operational Framework*. — Brussels : EUROCONTROL, 2021.
114. Rinaldi F., et al. *Integration of UAVs with Satellite Communication Systems* // *IEEE Access*. — 2021.
115. Mitola J. *Software Radio Architecture*. — New York : Wiley, 2000.
116. State Aviation Administration of Ukraine. *Concept for UAV Integration into Airspace*. — Kyiv, 2021.
117. ITU. *IMT-2030 Framework for Future Development of IMT*. — Geneva, 2021.
118. Saad, W., Bennis, M., & Chen, M. *A Vision of 6G Wireless Systems*. *IEEE Communications Magazine*, 2020.
119. Beni, G. *Swarm Intelligence: Principles and Applications*. Springer, 2021.
120. Zhang, S. *Aerial Internet: Visions and Challenges*. *IEEE Wireless Communications*, 2021.
121. International Labour Organization (ILO). *Occupational Safety and Health*. 2020.

122. World Health Organization (WHO). Non-Ionizing Radiation: RF Fields. 2020.
123. ICNIRP. Guidelines for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields. 2020.
124. IEEE C95.1. IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to EMF. 2019.
125. OSHA. Ergonomics and Electromagnetic Radiation in the Workplace. 2018 / 2021.
126. Hardell L., Carlberg M. Health Risks from Radiofrequency Radiation. 2019.
127. Foster K. Electromagnetic Fields and Health: Current Scientific Understanding. 2021.
128. ДСН 3.3.6.096-2002. Державні санітарні норми щодо ЕМВ.
129. Redmayne M. Environmental RF Exposure and Occupational Safety. 2020.
130. НПАОП 40.1-1.32-01. Правила експлуатації електроустановок споживачів.
131. ISO 45001. Occupational Health and Safety Management Systems. 2018.
132. WHO. Electromagnetic fields and public health: Base stations and wireless technologies. 2020.
133. IEC 62232. Determination of RF field strength near broadcasting systems. 2017.
134. NIOSH. Workplace Safety and RF Exposure. 2018.
135. ISO 45001:2018. Occupational health and safety management systems.
136. ДБН В.1.1-7:2016. Пожежна безпека будівель і споруд.
137. НПАОП 40.1-1.32-01. Правила експлуатації електроустановок споживачів.
138. NFPA 855:2020. Standard for the Installation of Stationary Energy Storage Systems.
139. НПАОП 0.00-4.12-05. Типове положення про навчання з питань охорони праці.
140. IEC 60364. Electrical Installations and Fire Safety.
141. ДСТУ EN ISO 23601:2019. Safety identification — Evacuation plans.

142. ISO 14001:2015. *Environmental management systems — Requirements with guidance for use.*
143. Kähler, S. T., et al. (2025). *Assessing the acceptance and aesthetics of unmanned aerial vehicles.* ScienceDirect.
144. Basel Convention. (2022). *Practical guidance on the development of inventories of waste batteries containing lithium.*
145. Basel Convention. (2025). *Technical guidelines on the environmentally sound management of waste batteries.*
146. European Union. (2023). *Regulation (EU) 2023/1542 on batteries and waste batteries.*
147. Afridi, S., Hlebowicz, K., Cawthorne, D., & Lundquist, U. P. S. (2024). *Unveiling the Impact of Drone Noise on Wildlife.* IEEE ICUAS.
148. Afridi, S. (2025). *Impact of Drone Disturbances on Wildlife: A Review.* Drones (MDPI).
149. Scholten, B. D., et al. (2020). *Short-term exposure to unmanned aerial vehicles does not....* PubMed Central.
150. ICNIRP. (2020). *Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz).*
151. IEEE. (2019). *IEEE C95.1: Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to EMF.*
152. Верховна Рада України. (1991). Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища» № 1264-ХІІ.
153. Верховна Рада України. (2022). Закон України «Про управління відходами» № 2320-ІХ.