

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНЕ НЕКОМЕРЦІЙНЕ ПІДПРИЄМСТВО
«ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «КИЇВСЬКИЙ АВІАЦІЙНИЙ ІНСТИТУТ»»
ФАКУЛЬТЕТ АЕРОНАВІГАЦІЇ, ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ
КАФЕДРА АЕРОНАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри
д-р техн. наук, проф.
_____ В.Ю. Ларін
«__» _____ 2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)
ЗДОБУВАЧА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ «МАГІСТР»

ЗА ОСВІТНЬО-ПРОФЕСІЙНОЮ ПРОГРАМОЮ
«СИСТЕМИ АЕРОНАВІГАЦІЙНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ»

**Тема: «Аеронавігаційна підтримка польотів БпЛА в режимі FPV при складній
ситуаційній обстановці»**

Виконавець:	Нежейко Дар'я Олександрівна
Керівник:	д-р техн. наук, проф. Харченко Володимир Петрович
Нормоконтролер: д.т.н., проф.	Остроумов Іван Вікторович
Консультант з охорони праці і навколишнього середовища:	д.т.н., доц. проф. Павлюх Леся Іванівна

Київ 2025

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «КИЇВСЬКИЙ АВІАЦІЙНИЙ ІНСТИТУТ»

Факультет аеронавігації, електроніки та телекомунікацій

Кафедра аеронавігаційних систем

Спеціальність: 272 «Авіаційний транспорт»

Освітньо-професійна програма: «Системи аеронавігаційного обслуговування»

Освітній ступінь: Магістр

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АНС

_____ В.Ю. Ларін

«___» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання кваліфікаційної роботи

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Аеронавігаційна підтримка польотів БПЛА в режимі FPV при складній ситуаційній обстановці.» затверджена наказом ректора від «31» жовтня 2024 р. № 2368/ст.
2. Термін виконання роботи: з 19.10.2024 по 12.12.2024.
3. Вихідні дані до роботи: Модель FPV-БПЛА, що застосовується в умовах бойових дій. Район виконання польоту – умовна ділянка місцевості площею 25 км² зі складним рельєфом та перешкодами. Ситуаційні фактори – вплив засобів РЕБ, можливість втрати відеосигналу, обмеження по висоті, наявність інженерних споруд. Маршрут – 10–12 контрольних точок для аналізу аеронавігаційної підтримки в різних сценаріях.
4. Зміст пояснювальної записки: Огляд FPV-БПЛА та особливостей їх застосування в бойових умовах. Аналіз аеронавігаційного забезпечення FPV-

польотів, включаючи проблеми втрати зв'язку та вплив РЕБ. Дослідження побудови маршрутів обльоту FPV-БПЛА з урахуванням рельєфу та перешкод. Моделювання умовного маршруту польоту та порівняння варіантів. Питання охорони праці та охорони навколишнього середовища.

5. Перелік обов'язкового графічного (ілюстративного) матеріалу: рисунків, таблиць.

6. Календарний план-графік

№ пор.	Завдання	Термін виконання	Відмітка про виконання
1	Підготовка та написання розділу 1. «Теоретичні основи застосування FPV-БПЛА та особливості аеронавігаційної підтримки в бойових умовах»	19.10.2024 - 23.10.2024	Виконано
2	Підготовка та написання розділу 2. «Методи побудови маршрутів польоту FPV-БПЛА в умовах складної ситуаційної обстановки»	24.10.2024 - 30.10.2024	Виконано
3	Підготовка та написання розділу 3. «Аналіз ефективності варіантів маршрутів FPV-БПЛА та оцінка ризиків»	31.10.2024 - 09.11.2024	Виконано
4	Підготовка та написання розділу 4. «Охорона праці»	10.11.2024 - 16.11.2024	Виконано
5	Підготовка та написання розділу 5. «Охорона навколишнього середовища»	17.11.2024 - 23.11.2024	Виконано

6	Підготовка презентації та доповіді	24.11.2024- 29.11.2024	Виконано
---	------------------------------------	---------------------------	----------

7. Дата видачі завдання: «16» вересня 2025 р.

Керівник кваліфікаційної роботи: Харченко Володимир Петрович

Завдання прийняв до виконання: Нежейко Дар'я Олександрівна

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до магістерської кваліфікаційної роботи

«Аеронавігаційна підтримка польотів БПЛА в режимі FPV при складній ситуаційній обстановці»

містить 91 сторінок, 16 рисунків, 5 таблиць, 20 використаних джерел за переліком посилань.

У роботі розглянуто актуальні питання навігаційного забезпечення польотів безпілотних літальних апаратів FPV-класу в умовах складної ситуаційної та радіоелектронної обстановки. Основна увага приділена аналізу впливу рельєфу місцевості, обмеженої радіовидимості, метеорологічних факторів та засобів радіоелектронної боротьби на ефективність і безпеку виконання FPV-польотів.

Об'єктом дослідження є БПЛА FPV-класу, що застосовуються у бойових умовах та виконують польоти на малих і надмалих висотах у складному середовищі.

Предмет дослідження — методи аеронавігаційної підтримки та особливості побудови маршрутів FPV-БПЛА в умовах складної ситуаційної та радіоелектронної обстановки, включаючи вплив рельєфу, перешкод, метеорологічних чинників і засобів радіоелектронного подавлення.

Мета роботи полягає в аналізі особливостей навігаційного забезпечення FPV-польотів, дослідженні методів формування маршрутів обльоту та оцінці ефективності їх застосування в умовах бойових дій з урахуванням впливу рельєфу місцевості, природних і штучних перешкод, а також засобів радіоелектронної боротьби з метою підвищення надійності, безпеки та успішності виконання польотних завдань.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішено комплекс теоретичних і практичних завдань, спрямованих на аналіз існуючих підходів до аеронавігаційної підтримки FPV-БПЛА, обґрунтування доцільності використання повітряних ретрансляторів та визначення умовно оптимальних маршрутів польоту в складній ситуаційній обстановці.

Методи дослідження включають теоретичний аналіз науково-технічної літератури та нормативних джерел, моделювання умовних маршрутів польоту FPV-БпЛА, порівняльну оцінку альтернативних навігаційних рішень, аналіз ризиків втрати керування та відеозв'язку, а також елементи картографічного та просторового моделювання з урахуванням рельєфу місцевості та радіовидимості.

Отримані в роботі результати можуть бути використані при плануванні та виконанні реальних польотів FPV-БпЛА, підготовці операторів, а також при подальшому розвитку методів аеронавігаційної підтримки безпілотних авіаційних систем у складних умовах застосування. моделювання.

Ключові слова: АЕРОНАВІГАЦІЙНА ПІДТРИМКА, FPV-БПЛА, БЕЗПЛОТНІ ЛІТАЛЬНІ АПАРАТИ, НАВІГАЦІЙНЕ ПЛАНУВАННЯ, МАРШРУТИ ПОЛЬОТІВ, РАДІОВИДИМІСТЬ, РЕТРАНСЛЯТОР СИГНАЛУ, СКЛАДНА СИТУАЦІЙНА ОБСТАНОВКА, РАДІОЕЛЕКТРОННА БОРОТЬБА, ОПТИМІЗАЦІЯ МАРШРУТУ

АРКУШ ЗАУВАЖЕНЬ

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	10
РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ АЕРОНАВІГАЦІЙНОЇ ПІДТРИМКИ FPV	13
1.1. Вступ до розділу 1	13
1.2. Класифікація FPV-БпЛА та їх призначення	16
1.3. Основи аеронавігаційного забезпечення в умовах бойових дій.....	19
1.4. Технічні характеристики польотів FPV-БпЛА.....	21
1.5. Технічні характеристики польотів FPV-БпЛА.....	25
1.6. Висновок до розділу 1	27
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИ ПОБУДОВИ МАРШРУТІВ ОБЛЬОТІВ FPV-БПЛА.....	29
2.1. Вступ до розділу 2	29
2.2. Принципи ручного й напівавтоматичного навігаційного планування.	30
2.3. Принципи ручного й напівавтоматичного навігаційного планування.	31
2.4. Побудова маршруту обльоту з урахуванням рельєфу та перешкод	34
2.5. Використання середовищ для симуляції маршрутів	37
2.6. Побудова умовного маршруту для вигаданого завдання.....	41
2.7. Висновки до розділу 2.....	46
РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ПОБУДОВАНИХ МАРШРУТІВ	48
3.1. Вступ до розділу 3	48
3.2. Порівняння альтернативних маршрутів: прямий, обхідний, з ретранслятором.....	49
3.3. Оцінка факторів ризику та ймовірностей втрати керування і відеозв'язку	52
3.4. Визначення умовного оптимального варіанту маршруту	56

3.5. Рекомендації для зменшення втрат FPV-БПЛА в польотах	59
3.6. Висновки до розділу 3.....	62
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА.....	63
4.1. Вступ до розділу 4	63
4.2. Аналіз екологічних аспектів застосування FPV-БПЛА та аеронавігаційної підтримки польотів.....	64
4.2.1. Загальний вплив застосування БПЛА на навколишнє середовище.....	65
4.2.2. Екологічні аспекти використання FPV-БПЛА.....	66
4.2.3. Вплив аеронавігаційної підтримки на екологічне навантаження	68
4.2.4. Методи мінімізації негативного впливу на довкілля	69
4.3 Висновки до розділу 4.....	70
РОЗДІЛ 5 ОХОРОНА ПРАЦІ	73
5.1. Вступ до розділу 5	73
5.2. небезпечні та шкідливі фактори під час експлуатації FPV-БПЛА.....	74
5.3. Організаційні та технічні заходи з охорони праці при виконанні FPV-польотів	76
5.4. Заходи безпеки у разі аварійних ситуацій та вплив експлуатації FPV-БПЛА на навколишнє середовище	78
5.5. Висновки до розділу 5.....	81
ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК	83
СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	86
ДОДАТКИ.....	88
Додаток А.1.....	88
Додаток Б.1.....	90

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- БПЛА — безпілотний літальний апарат
- FPV (First Person View) — режим керування безпілотним літальним апаратом із передачею відеозображення від першої особи
- FPV-БПЛА — безпілотний літальний апарат FPV-класу
- UAV (Unmanned Aerial Vehicle) — безпілотний літальний апарат
- LOS (Line of Sight) — пряма радіовидимість між передавачем і приймачем
- РЕБ — радіоелектронна боротьба
- РЕП — радіоелектронне подавлення
- VTX (Video Transmitter) — відеопередавач безпілотного літального апарата
- RX (Receiver) — приймач сигналу керування
- TX (Transmitter) — передавач сигналу керування
- RSSI (Received Signal Strength Indicator) — показник рівня прийнятого сигналу
- SNR (Signal-to-Noise Ratio) — відношення сигналу до шуму
- LiPo (Lithium Polymer) — літій-полімерний акумулятор
- Li-ion (Lithium-ion) — літій-іонний акумулятор
- ESC (Electronic Speed Controller) — електронний регулятор швидкості електродвигуна
- PID — параметри керування стабілізацією польоту
- GPS (Global Positioning System) — глобальна система супутникової навігації
- km — кілометр
- m — метр
- V — вольт
- A — ампер
- mAh — міліампер-година
- GHz — гігагерц

ВСТУП

У сучасних умовах стрімкого розвитку безпілотних авіаційних систем особливого значення набувають безпілотні літальні апарати FPV-класу (First Person View), які забезпечують оператору керування апаратом у режимі реального часу на основі відеозображення з бортової камери. Завдяки високій маневровості, відносній простоті конструкції та можливості виконання польотів на малих і надмалих висотах FPV-БПЛА широко застосовуються для виконання завдань у складних умовах, де використання класичних безпілотних або пілотованих літальних апаратів є ускладненим або недоцільним.

Разом із тим, ефективність застосування FPV-БПЛА значною мірою залежить від надійності аеронавігаційної підтримки польотів. На відміну від безпілотних систем, що використовують автоматизовані навігаційні комплекси, FPV-польоти здебільшого виконуються в умовах обмеженого або повністю відсутнього супутникового навігаційного забезпечення, що зумовлює підвищені вимоги до попереднього планування маршруту та стабільності радіо- і відеозв'язку.

Аналіз сучасних наукових і технічних джерел свідчить, що питання навігаційного забезпечення безпілотних літальних апаратів розглядаються переважно в контексті автоматизованих або напівавтоматичних систем управління, тоді як специфіка FPV-польотів у складній ситуаційній обстановці висвітлена недостатньо. Зокрема, у наявних дослідженнях обмежено розглядається вплив рельєфу місцевості, радіовидимості та радіоелектронної обстановки на можливість побудови та реалізації маршрутів FPV-БПЛА. Це свідчить про наявність науково-практичної проблеми, пов'язаної з обґрунтуванням методів аеронавігаційної підтримки FPV-польотів у складних умовах застосування.

Особливої актуальності зазначена проблема набуває в умовах складної ситуаційної обстановки, яка характеризується наявністю природних і штучних перешкод, нерівномірним рельєфом місцевості, обмеженою прямою радіовидимістю та впливом засобів радіоелектронної боротьби. За таких умов навіть незначні

помилки у виборі маршруту або недооцінка висоти перешкод можуть призвести до втрати керування FPV-БПЛА, зриву виконання завдання та повної втрати апарата.

Підставою для виконання даної магістерської роботи є необхідність удосконалення підходів до планування маршрутів FPV-БПЛА з урахуванням реальних умов їх застосування. Вихідними даними для дослідження є умовні навігаційні завдання, цифрові картографічні матеріали, дані про рельєф місцевості, а також результати моделювання маршрутів із використанням сучасних програмних засобів. У роботі враховано практичні обмеження, характерні для FPV-польотів, зокрема залежність від прямої радіовидимості, енергетичних можливостей апарата та необхідність використання повітряних ретрансляторів.

Для розв'язання поставленої науково-практичної задачі у роботі застосовано комплекс методів дослідження, що включає теоретичний аналіз науково-технічної літератури, моделювання умовних маршрутів польоту, порівняльну оцінку альтернативних маршрутів, аналіз факторів ризику втрати керування та елементи картографічного моделювання. Обрані методи дозволяють обґрунтовано оцінити ефективність навігаційних рішень у різних умовах ситуаційної обстановки.

У результаті виконання магістерської роботи проаналізовано особливості аеронавігаційної підтримки FPV-БПЛА, досліджено вплив рельєфу та радіовидимості на побудову маршрутів польоту, а також обґрунтовано доцільність використання повітряних ретрансляторів для забезпечення стійкого зв'язку. Отримані результати дозволили сформулювати практичні рекомендації щодо вибору умовно оптимального маршруту польоту FPV-БПЛА в умовах складної ситуаційної обстановки.

Таким чином, дана магістерська робота спрямована на розв'язання актуальної науково-практичної задачі, результати якої мають практичну цінність для планування та виконання FPV-польотів і можуть бути використані у подальших дослідженнях у сфері безпілотної авіації.

РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ АЕРОНАВІГАЦІЙНОЇ ПІДТРИМКИ FPV

1.1. Вступ до розділу 1

У сучасних умовах розвитку безпілотних технологій FPV-БпЛА (First Person View) зайняли унікальну нішу серед малих безпілотних літальних апаратів. Їхня конструктивна простота, висока маневровість, низька собівартість та можливість виконувати польоти на малих висотах роблять їх одним із найбільш ефективних інструментів у тактичних операціях. Ключова особливість FPV-польотів полягає у тому, що управління здійснюється у режимі реального часу через відеоканал, що формує принципово іншу модель навігаційної підтримки порівняно з традиційними безпілотними платформами.

На рисунку 1.1 зображено застосування БпЛА даного типу

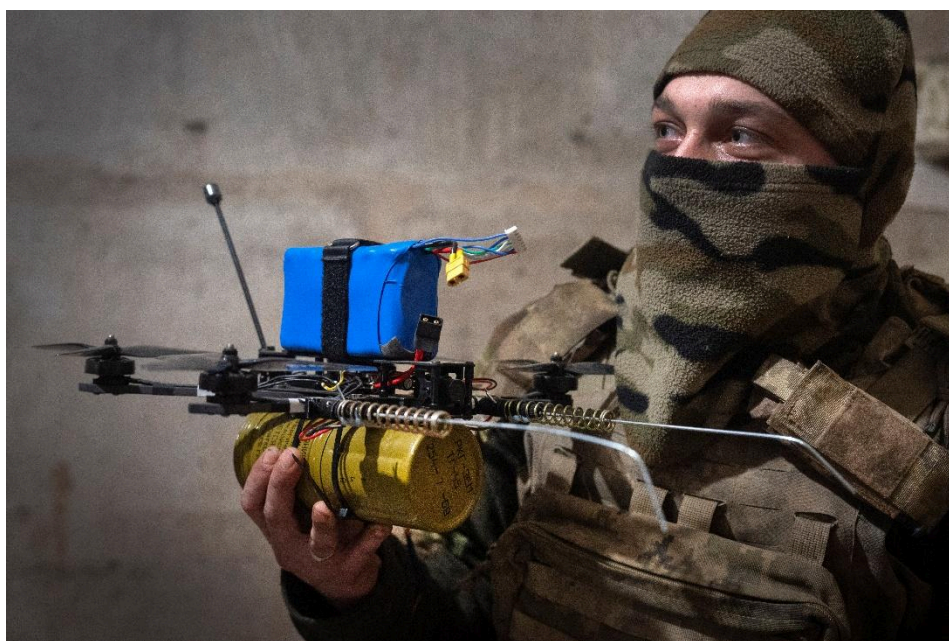


Рисунок 1.1 – Застосування БпЛА у тактичних операціях

FPV-БпЛА працюють у низьковисотному середовищі, де рельєф місцевості, інженерні конструкції, природні перешкоди, димові завіси, метеорологічні умови та засоби радіоелектронної боротьби формують складну ситуаційну обстановку, що безпосередньо впливає на безпеку польоту. На відміну від платформ із GPS-

навігацією, FPV-дрон не має автоматичної стабілізації по координатах, не володіє інерційними алгоритмами маршрутизації та повністю залежить від зорового сприйняття оператора. Це створює низку обмежень щодо аеронавігаційної підтримки, яка в умовах реального бою або складної місцевості повинна виконувати функції, що частково компенсують відсутність автономних навігаційних систем.

Особливої актуальності проблема аеронавігаційної підтримки FPV-БпЛА набула в умовах бойових дій в Україні. Активне застосування засобів РЕБ, маскування, інженерних споруд та перешкод створюють середовище, в якому традиційні підходи до навігації стають недостатніми. FPV-дрон повинен виконувати політ у середовищі, де сигнал відеопередачі може бути знижений або подавлений, GPS недоступний або придушений, а оператор працює в умовах обмеженої оглядовості та високої динаміки загроз.

На рисунку 1.2 можемо побачити вигляд FPV-БпЛА, а на рисунку 1.3 його складові основні.



Рисунок 1.2. FPV-дрони використовуються для точкових ударів, розвідки та обходу перешкод у зоні активної роботи засобів радіоелектронної боротьби.

MEPS

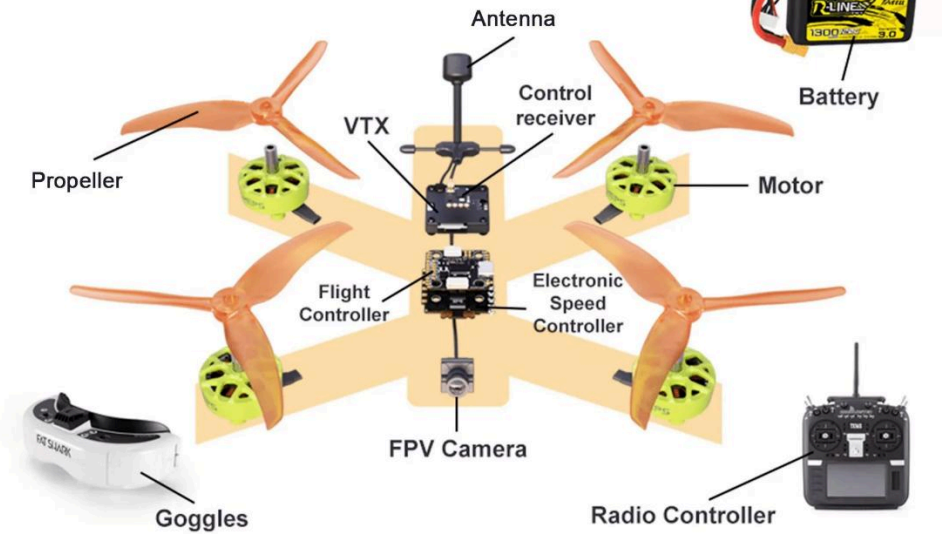


Рисунок 1.3. Склад та основні компоненти FPV-БПЛА. Типовий FPV-дрон включає раму, двигуни, регулятори швидкості (ESC), політний контролер, відеопередавач (VTX), FPV-камеру, антени, акумулятор та іншу периферію. Сукупність цих елементів забезпечує ручне керування в режимі реального часу без використання GPS-навігації.

У таких умовах особливого значення набувають:

- оцінка рельєфу та перешкод, які визначають безпечні висоти та напрямки польоту;
- аналіз зон можливого придушення сигналу з боку РЕБ;
- визначення оптимальної траєкторії, що мінімізує ризики втрати відеолінку;
- моделювання навігаційних загроз та адаптація польотного маршруту;
- підтримка оператора FPV, який має дуже обмежене поле зору та підвищене навантаження під час польоту.

Сукупність цих факторів робить FPV-польоти набагато складнішими, ніж може здаватись на перший погляд. Оператор працює у середовищі, де навіть незначне зміщення рельєфу, лінії електропередач, дерева або елементи інженерних конструкцій можуть призвести до втрати керованості чи аварії. Тому аеронавігаційна

підтримка повинна враховувати весь спектр зовнішніх впливів, забезпечуючи FPV-дрону максимально безпечні умови для виконання польотної місії.

У цьому підрозділі розглянуто фундаментальні принципи аеронавігаційної підтримки FPV-БпЛА, особливості їхньої конструкції, специфіку FPV-навігації, а також передумови, що формують необхідність удосконалення підходів до планування маршрутів у складній ситуаційній обстановці. Отримані теоретичні положення є основою для подальшого аналізу, описаного в наступних пунктах розділу.

1.2. Класифікація FPV-БпЛА та їх призначення

Первинне призначення FPV-БпЛА полягало у забезпеченні оператору можливості спостерігати навколишній простір у режимі реального часу та виконувати точне ручне керування апаратами. У початкових сферах використання FPV-дрони застосовувалися для тренувальних польотів, виконання фігур маневрування, інспекційних задач та огляду важкодоступних ділянок. Фактично їхня головна роль зводилася до забезпечення оператору «ефекту присутності» на борту апарата.

Проте сучасні реалії, зокрема умови бойових дій, значно розширили функціональне призначення FPV-БпЛА. Їх маневровість, низька вартість, можливість польоту без GPS та здатність працювати на малих висотах зробили FPV-дрони одним з найбільш гнучких інструментів тактичного рівня. Сьогодні FPV-БпЛА застосовуються у спеціальних операціях, виконують широкий спектр бойових та допоміжних задач і фактично становлять окремий підклас тактичних безпілотних систем.

Класифікація FPV-БпЛА може здійснюватися за кількома ключовими ознаками.

1. За призначенням

- FPV-розвідники

Застосовуються для збору інформації, огляду позицій противника, виявлення переміщень і оцінки ситуації в умовах обмеженої видимості або складного рельєфу.

- FPV-ударні (камікадзе)

Оснащені бойовим навантаженням і призначені для прямого ураження цілей: техніки, фортифікацій, живої сили. Це наймасовіший тип FPV у сучасних бойових діях.

- FPV-бомбардувальники

Модифіковані платформи з можливістю скидання боєприпасів із різних висот. Забезпечують ураження з вертикальних траєкторій або з облітами перешкод.

- FPV-перехоплювачі

Призначені для протидії ворожим БПЛА: механічного зіткнення, збивання, зриву стабілізації чи перешкоджання руху. Вони мають посилену конструкцію та підвищену швидкість.

- FPV-платформи для спеціальних завдань

Застосовуються для інспекції споруд, роботи у приміщеннях, проходження вузьких коридорів, доставляння малих вантажів або обладнання до важкодоступних точок.

2. За конструктивним виконанням

- Квадрокоптери (класичні FPV-дрони)

Основний тип бойових FPV — завдяки простій конструкції, низькій вартості та високій маневровості.

- Гексакоптери та інші багато-роторні схеми

Застосовуються рідше, коли потрібна більша вантажопідйомність або резервування тяги.

- FPV-крила (fixed-wing FPV)

Апарат з фіксованим крилом, здатний покривати значно більші відстані, виконувати розвідку, доставку легких засобів чи інших тактичних задач.

Мають високу швидкість та економічність, але меншу маневреність на малих висотах.

3. За типом відеосистеми

- Аналогові системи (5.8 GHz)

Мають мінімальну затримку та добре підходять для бойових FPV. Менш чутливі до завад, ніж цифрові.

- Цифрові системи (HD FPV)

Забезпечують високу якість зображення, проте мають більшу затримку та гіршу стійкість до РЕБ, що обмежує застосування у бойових умовах.

4. За рівнем автономності

- Повністю ручні FPV-БпЛА (без GPS)

Найбільш поширений варіант: керування здійснюється виключно оператором.

- Напівстабілізовані моделі

Мають окремі елементи стабілізації для спрощення керування, проте без навігаційних функцій.

- Гібридні платформи

Поєднують FPV-режим і часткові автономні можливості, але застосовуються обмежено через вразливість до придушення сигналів.

Підсумкове призначення FPV-БпЛА

Сьогодні FPV-БпЛА виконують задачі, що потребують:

- обходу перешкод та польоту на малих висотах;
- високої точності маневрування в умовах складного рельєфу;
- роботи у зоні активної РЕБ;
- ураження техніки противника у режимі камікадзе;
- збивання або дезорієнтації ворожих дронів;
- доставки боєприпасів та обладнання;

- проведення швидкої тактичної розвідки.

Практика бойового застосування довела, що FPV-БПЛА стали універсальним інструментом тактичних підрозділів, здатним виконувати широкий спектр спеціальних операцій у середовищах, де GPS або автономні системи навігації працюють ненадійно або повністю недоступні.

Основні види FPV за конструктивним виконанням на рисунку 1.4, 1.5, 1.6.



Рисунок 1.4 – БПЛА квадрокоптер



Рисунок 1.5 – БПЛА гексокоптер



Рисунок 1.6 – БПЛА FPV-крило

1.3. Основи аеронавігаційного забезпечення в умовах бойових дій

Аеронавігаційне забезпечення польотів безпілотних літальних апаратів у бойових умовах є комплексом заходів, спрямованих на забезпечення безпеки, точності та ефективності виконання польотних завдань. На відміну від навігаційної

підтримки класичних БпЛА, яка базується на використанні супутникових систем позиціонування, FPV-БпЛА працюють у режимі ручного керування без застосування GPS-навігації, що суттєво змінює підходи до організації їх навігаційного супроводу.

У бойових умовах важливими елементами аеронавігаційного забезпечення є: оцінка рельєфу, визначення зон можливих перешкод, прогнозування дії засобів радіоелектронної боротьби, аналіз лінії видимості між FPV-БпЛА та операторами керування, а також вибір траєкторії польоту, яка мінімізує тактичні ризики. Усі ці фактори набувають критичного значення, оскільки FPV-дрон виконує політ на низьких висотах, у складній інформаційній та фізичній обстановці, і є повністю залежним від якості відеоканалу.

Одним із ключових аспектів забезпечення є визначення геопросторових обмежень, зокрема:

- наявність вертикальних та горизонтальних перешкод (будівлі, лісові масиви, інженерні споруди);
- змінність рельєфу, яка може створювати зони затінення радіосигналу;
- обмеження по висоті польоту, пов'язані з підвищеним ризиком виявлення або ураження;
- наявність зон активної роботи РЕБ, які впливають на канал керування та передачі відео.

У рамках аеронавігаційного забезпечення FPV-БпЛА особливе значення має аналіз лінії видимості (Line of Sight, LOS). Оскільки FPV-дрон не має автономних каналів зв'язку, а оператор отримує інформацію виключно через відеопередачу, затінення сигналу є критичним чинником. Навіть короткочасна втрата LOS може призвести до втрати керованості, відхилення від траєкторії або падіння апарата.

Опрацьовуючи маршрут, оператор або планувальна група повинні враховувати:

- рельєф місцевості та потенційні точки втрати зв'язку;
- рівень радіоефірних завад;
- тактичну обстановку (положення противника, можливі точки загрози);
- енергетичні можливості FPV-БпЛА;
- прогнозовану поведінку відеоканалу залежно від дистанції, висоти та завад.

У бойових умовах аеронавігаційне забезпечення має також включати аналіз ризиків. Це може бути загроза втрати відеосигналу, збільшення затримки управління, зниження якості візуального сприйняття, а також необхідність виконання польоту в умовах динамічних змін — появи диму, пожеж, рухомих об'єктів або змін позицій противника.

Сучасні підходи до навігаційного забезпечення FPV-БпЛА базуються на поєднанні картографічного аналізу, попередньої оцінки маршруту, польотної підготовки та тактичної моделі дії оператора. Навіть невелика зміна рельєфу чи перешкоди може суттєво вплинути на якість відеосигналу, тому планування здійснюється з урахуванням резервних напрямків польоту, альтернативних точок входу та виходу, а також зон для аварійного маневру.

Таким чином, аеронавігаційне забезпечення FPV-БпЛА в бойових умовах — це багатокomпонентна система, що охоплює оцінку території, маршруту, лінії зв'язку, енергетичних ресурсів та тактичних факторів. Від його якості залежить не лише успішність виконання завдання, але й виживаність самого апарата та безпека оператора в інформаційному сенсі.

1.4. Технічні характеристики польотів FPV-БпЛА

Технічні характеристики польотів FPV-БпЛА визначають можливості апарата виконувати завдання в умовах складної ситуаційної обстановки, включаючи обмеження по висоті, маневровість, стабільність зв'язку та енергетичні ресурси.

Наведені нижче параметри є базовими для розуміння специфіки роботи FPV-систем у тактичних умовах.

1. Живлення і акумуляторні батареї

Енергетичне забезпечення FPV-БпЛА є критичним елементом польоту, оскільки від нього залежить тривалість, стабільність живлення електроніки і двигунів, а також здатність виконувати маневри. Для різних розмірів і задач FPV-дронів використовуються різні конфігурації акумуляторних батарей:

- Для малогабаритних FPV-дронів на рамі ~5–7" застосовуються батареї типу LiPo 6S2P або 6S3P — вони забезпечують оптимальне співвідношення ваги та енергії для коротких, динамічних польотів.
- Середні платформи (8–10") можуть використовувати батареї 6S3P–6S4P — це дозволяє поєднати тривалість польоту з можливістю нести невелике корисне навантаження.
- Великі борти (12–15") часто обладнуються батареями типу 12S6P або аналогічними високої ємності (~25000–30000 mAh), що забезпечують тривалість польоту, стабільність напруги під навантаженням і можливість нести вагоме навантаження.

Важливо зазначити: для кожної конкретної платформи підбирається батарея, що відповідає її енергетичним потребам, масо-габаритним обмеженням та потребам польотної задачі. У бойових умовах енергетичний ресурс часто обмежує тривалість польоту і стає критичним чинником при плануванні виходу у зону виконання завдання.

2. Швидкісні параметри

FPV-БпЛА характеризуються високою швидкісною динамікою:

- крейсерська швидкість — ~50–80 км/год;
- максимальна швидкість — 100–160 км/год і вище для спортивних або спеціалізованих конфігурацій;

- швидкість набору висоти/падіння — суттєво вища порівняно з традиційними БПЛА аналогічної маси.

Ці показники забезпечують оперативне реагування на зміну тактичної обстановки, швидкий обліт перешкод або вихід із зони загрози.

3. Дальність польоту та зв'язку

Дальність польоту та зв'язку FPV-БпЛА

Реальна дальність польоту FPV-БпЛА визначається не лише запасом енергії, а насамперед стабільністю каналу керування та відеотрансляції. У стандартних умовах без додаткових засобів зв'язку робоча дальність становить:

- 2–5 км — для аналогових систем без перешкод;
- до 8–10 км — зі спрямованими антенами на стороні оператора.

Однак у бойових умовах широко застосовуються ретранслятори, які істотно збільшують дальність польоту FPV-БпЛА:

- Наземні ретранслятори

Використання наземних ретрансляційних станцій дозволяє FPV-дрону працювати на дистанціях:

- 10–20 км — за наявності правильної орієнтації антен і відсутності суттєвих завад;
- до 30 км — у випадках, коли рельєф не створює затінення та використовується потужне обладнання.

Наземні ретранслятори забезпечують посилення сигналу та передачу керуючих команд через додаткову точку, яка компенсує втрати зв'язку на великій відстані.

Повітряні ретранслятори

Ефективним способом значного збільшення дальності FPV-польотів є використання повітряних ретрансляторів, які забезпечують пряму радіовидимість між оператором та FPV-БпЛА. Як ретранслятори застосовуються:

- DJI Mavic (серії 2/3/3T/3E) — завдяки стабілізації, тривалості польоту 30–45 хв та здатності точно утримувати позицію.
- DJI Matrice (M300, M350) — використовуються для тривалих зависань на висотах 100–500 метрів, мають потужні канали зв'язку та високу стійкість до вітрових умов.
- Інші багато-роторні платформи, зокрема спеціально переобладнані дрони з можливістю автономного зависання тривалий час.

Підняття ретранслятора на значну висоту (100–500 м і більше за потреби) створює оптимальні умови для передачі сигналу та дозволяє FPV-БпЛА працювати на великих віддальх. При використанні повітряних ретрансляторів фактична дальність роботи FPV-дрона може становити:

- 30–40 км — стабільно у більшості умов;
- до 50 км і більше — за умов чистого радіоефіру, правильного підбору антенної системи та відсутності інтенсивного РЕБ.

Зображення принципу роботи ретранслятора на рисунку 1.7

У таких сценаріях обмеженням стає вже не дальність зв'язку, а енергетичний ресурс FPV-БпЛА, особливо якщо використовується важке корисне навантаження або виконуються складні маневри.

Маневровість і динаміка польоту

FPV-БпЛА здатні на різкі маневри в трьох осях, виконувати обліт перешкод на малих висотах, змінювати швидкість із високою прискореністю. Ці характеристики залежать від:

- співвідношення тяги до маси;

- налаштувань політного контролера;
- якість сенсорів та стабілізації;
- сумісності акумулятора та силової установки.

У бойових умовах маневровість дозволяє FPV-БПЛА адаптуватися до швидкоплинної обстановки, виходити з небезпечних зон та уникати ураження.

Таким чином, технічні характеристики FPV-БПЛА відображають їхню специфіку як маневрових, швидкодійних платформ, здатних виконувати польоти без автономної навігації, з різними типами енергоживлення і значною адаптивністю до тактичної обстановки.

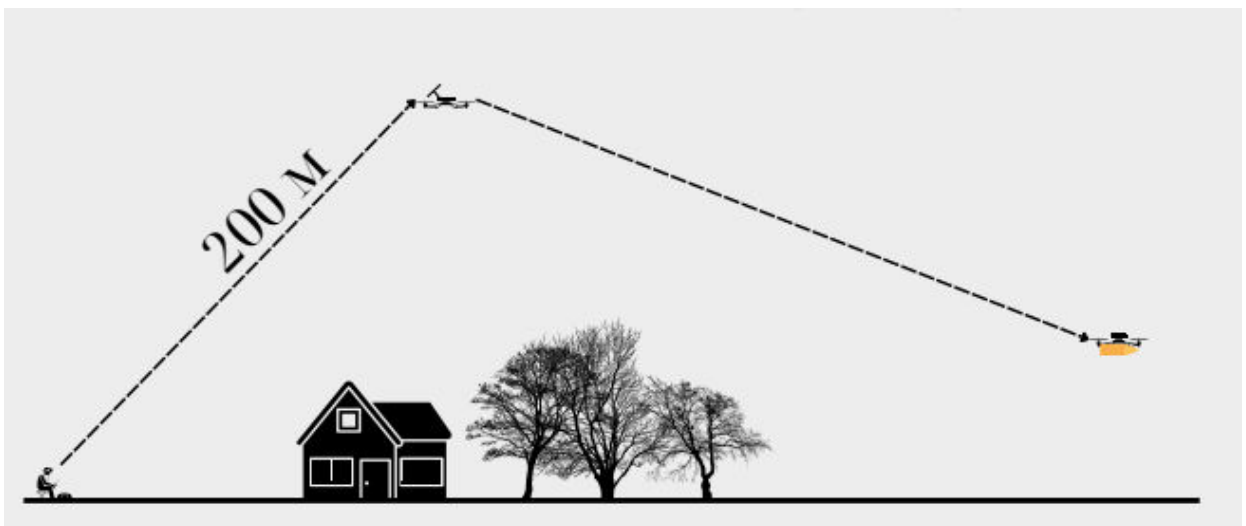


Рисунок 1.7 – Принцип роботи ретронслятору (вид збоку)

1.5. Технічні характеристики польотів FPV-БПЛА

Польоти FPV-БПЛА у бойових умовах супроводжуються низкою навігаційних обмежень, пов'язаних із складною ситуаційною обстановкою та відсутністю автономних засобів навігації. Оскільки FPV-дрон працює без GPS та залежить виключно від якості відеоканалу й каналу керування, будь-які перешкоди безпосередньо впливають на можливість виконати завдання.

Перешкоди рельєфу та інженерних конструкцій

Рельєф місцевості є одним з основних чинників, що формують зони втрати сигналу:

- пагорби, балки, насипи;
- лісові масиви;
- будівлі, промислові споруди;
- лінії електропередач та інші перешкоди.

Затінення лінії радіовидимості (LOS) призводить до деградації відеосигналу, збільшення шумів, ривків картинки або повної втрати керованості. У тактичних умовах це вимагає точного вибору висоти і траєкторії польоту, найчастіше — на малій висоті для уникнення виявлення.

Глушіння сигналу та радіоелектронна боротьба

Активна робота засобів РЕБ противника є серйозною загрозою для FPV-БПЛА.

Найпоширеніші форми впливу:

- подавлення відеоканалу, що призводить до повної втрати зображення;
- глушіння каналу керування, після чого оператор не може впливати на політ;
- перенасичення ефіру, що викликає підвищену затримку або “заморожування” відео;
- перехоплення частот, через що система працює нестабільно навіть на близькій дистанції.

У таких умовах важливим є попередній аналіз зон можливої дії РЕБ та вибір траєкторій, які мінімізують час перебування у небезпечних секторах.

Втрати зв'язку та ризику ручного керування

Оскільки FPV-БПЛА не має GPS-навігації, втрата сигналу означає фактичну втрату апарата. Основні ризики:

- короткочасний обрив відеоканалу → затримка реакції оператора → зіткнення з перешкодою;

- повна втрата зв'язку → дрон продовжує рух по інерції або падає;
- затримка сигналу (latency) → неправильне оцінювання ситуації оператором;
- шум та спотворення відео → зниження точності маневрування.

У бойових сценаріях ці фактори можуть виникати одночасно, що підвищує навантаження на оператора та ускладнює виконання завдання.

Енергетичні обмеження як навігаційний фактор

Хоча детальний розгляд енергетики вже наведено у попередньому пункті, важливо зазначити, що:

- недостатній заряд батареї,
- високе навантаження двигунів,
- або встановлення важкого корисного навантаження

можуть призвести до зниження тяги, погіршення керованості та неможливості повернутися з маршруту. Це є непрямую, але вагомою навігаційною проблемою FPV-БпЛА.

1.6. Висновок до розділу 1

У першому розділі було розглянуто теоретичні засади функціонування FPV-БпЛА та особливості їх застосування в умовах складної ситуаційної обстановки. Проаналізовано класифікацію FPV-дронів, їх призначення та конструктивні характеристики, що визначають можливості виконання польотних завдань. Особливу увагу приділено питанням аеронавігаційного забезпечення у бойових умовах, де традиційні системи навігації є недостатніми або недоступними.

Встановлено, що FPV-БпЛА є платформами з високою маневровністю та динамікою, але повністю залежними від стабільності радіоканалу й зорового сприйняття оператора. У бойових умовах ці апарати працюють у середовищі значної невизначеності: перешкоди рельєфу, інженерні конструкції, активна робота засобів

РЕБ, інформаційне затінення та енергетичні обмеження формують комплекс навігаційних ризиків.

Показано, що ефективне аеронавігаційне забезпечення для FPV-БпЛА потребує попередньої оцінки рельєфу, аналізу лінії радіовидимості, визначення зон потенційного глушіння сигналу, вибору висоти й траєкторії польоту, а також використання додаткових засобів підсилення зв'язку, зокрема наземних і повітряних ретрансляторів. Саме ці фактори формують основу для безпечного й результативного виконання польотних завдань.

Таким чином, теоретичний аналіз свідчить, що FPV-БпЛА мають високий потенціал для застосування у тактичних операціях, однак потребують спеціалізованого підходу до навігаційної підтримки в умовах бойових дій. Отримані висновки слугують базою для подальших практичних розробок, що розглядаються у наступних розділах роботи.

РОЗДІЛ 2 МЕТОДИ ПОБУДОВИ МАРШРУТІВ ОБЛЮТІВ FPV-БПЛА

2.1. Вступ до розділу 2

У межах даного розділу розглядаються практичні аспекти планування маршрутів польоту FPV-БпЛА з урахуванням реальних умов експлуатації та обмежень, пов'язаних із рельєфом місцевості, радіоелектронною обстановкою й технічними характеристиками бортових систем. З урахуванням особливостей FPV-польоту, де керування здійснюється в режимі реального часу через відеоканал, питання побудови маршруту набуває критичного значення для забезпечення стабільності зв'язку, керованості апарата та безпеки виконання завдання.

На відміну від класичних безпілотних систем, FPV-БпЛА функціонують у середовищі з підвищеним рівнем невизначеності, що зумовлює необхідність врахування не лише геометричних параметрів маршруту, а й особливостей поширення радіосигналу, можливих зон радіозатінення, впливу рельєфу та щільності перешкод. У таких умовах процес планування маршруту набуває комплексного характеру та потребує поєднання інженерного аналізу з практичним досвідом експлуатації.

Особливу роль у цьому процесі відіграє оцінка висотного профілю місцевості, оскільки навіть незначні перепади висот можуть суттєво впливати на якість зв'язку між оператором і бортом. Використання програмних засобів моделювання дозволяє попередньо оцінити потенційні ризики, визначити доцільні траєкторії польоту та обрати оптимальні точки для розміщення ретрансляторів або зміни висоти польоту.

У межах даного розділу розглядаються підходи до побудови маршрутів польоту FPV-БпЛА з урахуванням реальних умов застосування, а також аналізуються можливості адаптації маршрутів до змін зовнішнього середовища. Такий підхід дозволяє підвищити стійкість системи керування, зменшити ймовірність втрати зв'язку та забезпечити безпечне виконання завдань у різних умовах експлуатації.

Результати, отримані в цьому розділі, формують практичну основу для подальшого аналізу ефективності обраних маршрутів і можуть бути використані як підґрунтя для прийняття рішень під час реального застосування FPV-БПЛА в умовах складної ситуаційної обстановки.

2.2. Принципи ручного й напівавтоматичного навігаційного планування.

Ефективність застосування FPV-БПЛА в умовах складної ситуаційної обстановки значною мірою визначається якістю побудови маршрутів польоту. На відміну від класичних безпілотних літальних апаратів, FPV-БПЛА здебільшого виконують польоти на малих і надмалих висотах, за відсутності повноцінної супутникової навігації та в умовах обмеженої радіовидимості. Це зумовлює необхідність використання спеціалізованих підходів до навігаційного планування, які враховують особливості рельєфу місцевості, наявність природних і штучних перешкод, радіоелектронну обстановку та енергетичні можливості апарата.

У реальних умовах застосування FPV-БПЛА маршрут польоту формується не лише з міркувань мінімальної відстані до цілі, а як результат комплексного аналізу ситуаційної обстановки. Неправильно обраний маршрут може призвести до втрати керування або відеозв'язку, зниження ймовірності виконання завдання та повної втрати апарата. Тому побудова маршрутів польотів FPV-БПЛА є одним із ключових елементів аеронавігаційної підтримки польотів.

Особливу складність становить планування маршрутів у районах зі складним рельєфом, де пагорби, балки та інші нерівності місцевості можуть повністю перебивати лінію радіовидимості. За таких умов навіть незначна помилка в оцінці висоти або траєкторії польоту призводить до критичних наслідків. У зв'язку з цим виникає потреба у використанні методів ручного та напівавтоматичного навігаційного планування, а також у застосуванні програмних засобів для попереднього моделювання маршрутів польоту.

Даний розділ присвячений розгляду методів побудови маршрутів польотів FPV-БПЛА з урахуванням особливостей їх експлуатації та умов застосування. У ньому

аналізуються принципи ручного й напівавтоматичного навігаційного планування, розглядаються підходи до вибору траєкторії польоту з урахуванням рельєфу місцевості та перешкод, а також досліджуються можливості використання сучасних програмних середовищ для симуляції маршрутів.

Практична складова розділу спрямована на демонстрацію процесу побудови умовного маршруту для заданого завдання з урахуванням реальних обмежень, зокрема радіовидимості, висоти рельєфу та необхідності використання повітряного ретранслятора. Це дозволяє не лише теоретично обґрунтувати вибір маршруту, а й показати алгоритм дій оператора FPV-БПЛА під час підготовки до виконання польотного завдання.

Таким чином, цей розділ формує методичну основу для подальшого аналізу ефективності побудованих маршрутів і оцінки ризиків втрати керування, що буде розглянуто у наступному розділі магістерської роботи.

Для забезпечення стійкого радіо- та відеозв'язку під час виконання FPV-польотів у складній ситуаційній обстановці широко застосовується схема з використанням повітряного ретранслятора. Узагальнений принцип взаємодії наземної станції оператора, ретранслятора та FPV-БПЛА наведено в Додатку А (рисунок А.1).

2.3. Принципи ручного й напівавтоматичного навігаційного планування.

Навігаційне планування для FPV-БПЛА має специфічний характер, оскільки політ здійснюється вручну і не опирається на супутникову навігацію або автономні системи позиціонування. Тому оператор або планувальна група повинні заздалегідь оцінити маршрут, рельєф місцевості, зони радіовидимості та потенційні загрози. Методи планування можна умовно поділити на ручні та напівавтоматичні.

Ручне планування маршрутів FPV-БПЛА

Ручний метод передбачає повну участь оператора у виборі напрямку й висоти польоту. Він застосовується у більшості бойових ситуацій через простоту, гнучкість і відсутність залежності від зовнішніх систем.

Основні етапи ручного планування:

1. Аналіз місцевості за доступними картографічними матеріалами

Оператор оглядає маршрут за супутниковими знімками або картами, визначає:

- рельєф;
- лісосмуги та будівлі;
- балки, яри, насипи;
- потенційні точки втрати радіовидимості (LOS).

2. Визначення можливих траєкторій польоту

Маршрут визначається з урахуванням:

- відстані до цілі;
- наявності перешкод на шляху;
- зони дії РЕБ;
- можливого виявлення FPV-БПЛА.

3. Вибір висоти та комбінації маневрів

Політ на малій висоті дозволяє зменшити ймовірність виявлення, але збільшує ризик зіткнення.

Політ на середній висоті дає кращу радіовидимість, але робить дрон більш помітним.

Оператор визначає оптимальний компроміс.

4. Оцінка ризиків

Проводиться аналіз того, де можливі:

- короткочасні зникнення відеосигналу;
- вплив РЕБ;
- складні для маневрування ділянки.

5. Формування резервних варіантів траєкторії

У разі втрати частини сигналу або зміни ситуації необхідно мати альтернативний шлях або точку для коригування маршруту.

Ручне планування забезпечує максимальну адаптивність, але вимагає досвіду та ґрунтовної ситуаційної оцінки.

Напівавтоматичне планування маршрутів

Напівавтоматичний підхід базується на використанні програмних інструментів, які дозволяють попередньо оцінити рельєф, дальність польоту, радіовидимість та загальні умови маршруту. FPV-БпЛА не виконує політ за завантаженим маршрутом, але оператор отримує попередню аналітичну модель, яка допомагає приймати рішення.

Основні елементи напівавтоматичного планування:

1. Визначення профілю рельєфу маршруту

Програма аналізує лінію між точкою старту і ймовірною точкою маршруту та показує, де будуть затінення сигналу.

2. Оцінка зон радіовидимості (LOS)

Інструмент моделює, чи буде взаємна видимість між оператором, ретранслятором і FPV-БпЛА на всьому шляху.

3. Вікна безпечних висот

Програма автоматично визначає мінімальну висоту, на якій FPV може “побачити” ретранслятор або наземну станцію.

4. Розрахунок максимально досяжної дальності

Залежно від рельєфу, точок ретрансляції та відстаней, система визначає:

- чи зможе FPV здійснити політ;
- у яких точках є ризик втрати сигналу.

5. Врахування сценаріїв РЕБ

Напівавтоматичні інструменти дозволяють відмічати ділянки потенційної роботи РЕБ та будувати маршрут з обходом цих зон.

Напівавтоматичний метод не замінює оператора, але значно знижує рівень невизначеності при плануванні польоту і дозволяє приймати рішення на основі попереднього моделювання.

Порівняння вище описаних методів зображено в таблиці 1.

Таблиця 1 Порівняння методів планування

Характеристика	Ручне планування	Напівавтоматичне планування
Гнучкість	Висока	Середня
Точність оцінки рельєфу	Низька–середня	Висока
Потреба у досвіді оператора	Дуже висока	Середня
Врахування LOS	На основі оцінки	Автоматично
Врахування дальності	Орієнтовно	Розраховується
Ризик помилки	Вищий	Нижчий
Залежність від софту	Не залежить	Потребує програм

Обидва методи планування залишаються актуальними у бойових умовах. Ручний спосіб забезпечує оперативність і мобільність, тоді як напівавтоматичний дає точнішу картину рельєфу та сигналу. Найкращий результат досягається при комбінуванні цих двох підходів.

2.4. Побудова маршруту обльоту з урахуванням рельєфу та перешкод

Побудова маршруту FPV-БпЛА в умовах бойових дій вимагає врахування рельєфу місцевості, інженерних перешкод та можливих зон втрати радіозв'язку. Оскільки FPV-дрон не використовує супутникову навігацію, а залежить виключно

від лінії радіовидимості між оператором, ретранслятором і самим апаратом, будь-яка перешкода може стати критичною для виконання завдання. Тому маршрути плануються таким чином, щоб мінімізувати ризики затінення сигналу та забезпечити керуваність дрона на всій дистанції.

Аналіз рельєфу місцевості

Першим етапом побудови маршруту є оцінка рельєфу на всій ділянці польоту.

Оператор визначає:

- підвищення та зниження місцевості;
- балки, яри, насипи;
- пагорби, які можуть перекривати сигнал;
- лісосмуги та щільні зелені насадження;
- штучні перешкоди (будівлі, вежі, промислові зони).

Кожен елемент рельєфу впливає на радіоканал, тому при плануванні маршруту враховується, де саме може виникнути тимчасова або повна втрата відеосигналу.

Лінія радіовидимості (LOS) та затінення

Для FPV-БПЛА визначальним є збереження прямої радіовидимості між:

- оператором керування;
- повітряним або наземним ретранслятором (якщо використовується);
- самим FPV-дроном.

Втрата LOS у бойових умовах означає:

- різке падіння якості відеосигналу;
- ривки та шум у зображенні;
- можливе повне “зависання” картинки;
- втрату керуваності.

Під час планування маршруту необхідно визначити точки, де рельєф:

- повністю перекриватиме сигнал,
- частково екрануватиме радіохвилі,

- створюватиме “вікна” для короткочасного зв’язку.

Вибір висоти польоту

Висота польоту FPV-БпЛА визначається компромісом між:

- безпекою (ризик виявлення та ураження);
- радіовидимістю (чим вище, тим кращий сигнал);
- рельєфом (потрібно уникати зіткнень або зайвих маневрів);
- специфікою завдання (ударні FPV зазвичай летять на низьких висотах).

Під час обльоту складної ділянки оператор визначає мінімальну висоту, яка забезпечить LOS, але не зробить FPV-БпЛА надто помітним.

Використання ретранслятора при побудові маршруту

Там, де рельєф або перешкоди не дозволяють підтримувати пряму радіовидимість, застосовується ретранслятор.

Маршрут будується таким чином, щоб:

- ретранслятор знаходився у зоні максимального огляду;
- висота ретранслятора забезпечувала покриття всього маршруту;
- FPV-БпЛА на всіх ключових точках мав стабільний сигнал.

Зазвичай аналіз проводиться за принципом: “Чи бачить ретранслятор точку А, Б і шлях між ними?”

При правильному розташуванні ретранслятора можна повністю виключити затінення сигналу рельєфом.

Обхід небезпечних зон

Під час побудови маршруту визначаються ділянки, які слід уникати:

- зони активної роботи РЕБ;
- відкриті ділянки з високим ризиком виявлення;
- райони з інтенсивною забудовою;
- густі зелені масиви;

- місця з підвищеним вітровим навантаженням.

Маршрут корегується так, щоб FPV-БпЛА мінімізував час перебування у небезпечних секторах, зберігаючи при цьому керованість.

Побудова профілю маршруту

Після визначення всіх перешкод формують профіль маршруту, який включає:

- висоти на кожній ключовій точці;
- прогноз місць можливої втрати сигналу;
- альтернативні варіанти обходу;
- ключові орієнтири (дороги, лісосмуги, будівлі) для орієнтації оператора.

Профіль маршруту дозволяє оцінити, чи зможе FPV-БпЛА безпечно пройти всі ділянки.

Побудова маршруту FPV-БпЛА з урахуванням рельєфу та перешкод є критично важливим етапом підготовки до польоту. Аналіз місцевості, перевірка лінії радіовидимості, оптимальний вибір висоти та визначення небезпечних зон дозволяють мінімізувати ризики втрати зв'язку та забезпечити успішне виконання завдання.

2.5. Використання середовищ для симуляції маршрутів

Попереднє моделювання маршруту є важливим етапом підготовки FPV-БпЛА до польотного завдання. Хоча FPV-дрони не використовують автопілот і не виконують місію за завантаженим маршрутом, симуляційні інструменти дозволяють оператору отримати ключову інформацію про рельєф, можливі перешкоди, висоти, а також оцінити потенційні ризики втрати сигналу. Це підвищує безпеку польоту та точність виконання завдання.

Для цих цілей застосовуються різні середовища: від універсальних картографічних платформ до спеціалізованих програм для аналізу місцевості.

Використання Google Maps / Google Earth

Google Maps або Google Earth застосовуються для базового аналізу місцевості:

- огляд рельєфу та загальної конфігурації місцевості;
- визначення можливих укриттів, лісосмуг, забудови;
- оцінка орієнтирів, які оператор може використовувати під час польоту;
- перегляд висот та побудова примітивного профілю маршруту.

Google Earth має функцію “Elevation Profile”, яка дозволяє переглянути зміну висот уздовж маршруту — це корисно для визначення потенційних точок втрати радіовидимості.

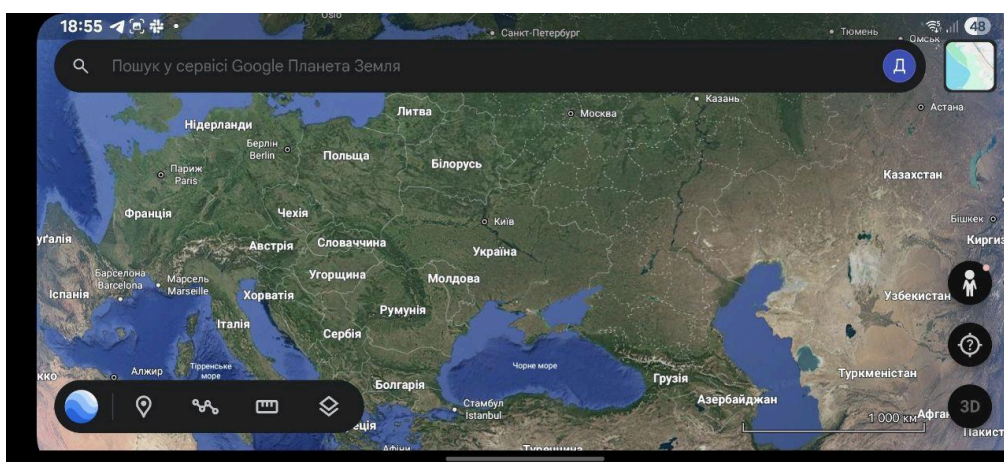


Рисунок 2.1. – Загальний вигляд додатку «Google Earth»

Використання Mission Planner для моделювання рельєфу

Mission Planner створений для роботи з автопілотами типу ArduPilot, однак він широко використовується і у підготовці FPV-польотів. У контексті FPV ця система застосовується не для навігації, а для:

- побудови профілю висот по маршруту;
- візуалізації перешкод рельєфу;
- визначення мінімальної висоти, на якій FPV-БПЛА зможе зберігати радіовидимість;
- оцінки відстані до перешкод та їх висоти;
- попереднього аналізу можливих зон затінення сигналу.

Mission Planner дозволяє завантажувати маршрут на карту без подальшої передачі на БПЛА, використовуючи його лише як інструмент аналізу.



Рисунок 2.2. – Загальний вигляд додатку «Mission Planner»

Системи розширеного моделювання для військових потреб

У сучасних бойових умовах використовуються також спеціалізовані інструменти, які забезпечують глибшу інтеграцію з реальними даними рельєфу та тактичної обстановки.

Окремі програмні засоби можуть:

- моделювати горизонт видимості;
- визначати оптимальну висоту розміщення ретранслятора;
- розраховувати дальність зв'язку у конкретних точках;
- враховувати затінення місцевості та перешкоди в режимі реального часу.

Одним із таких середовищ є військова система “Кропива”, яка містить інструменти:

- побудови профілю місцевості,
- оцінки зони покриття,
- визначення міжпозиційної радіовидимості,

- розрахунку, чи буде FPV-БпЛА у зоні впевненого сигналу при певній висоті ретранслятора.

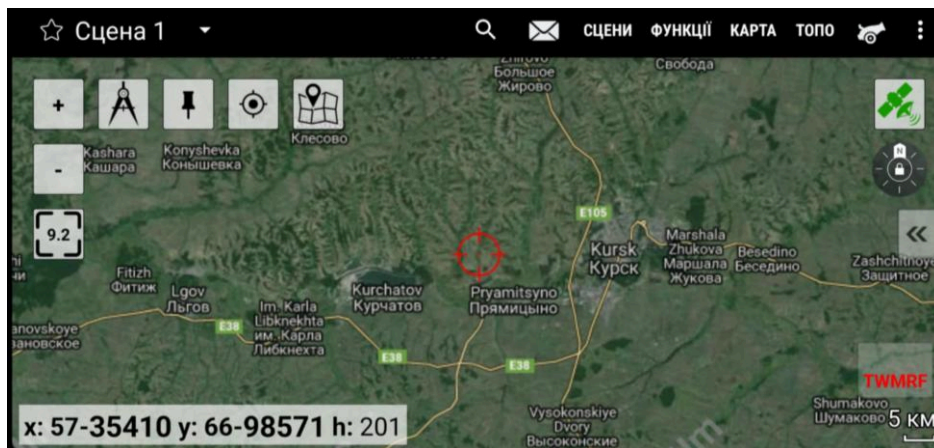


Рисунок 2.3. – Загальний вигляд додатку «Кропива»

Такі системи дозволяють досягти значно більшої точності та швидкості планування маршруту порівняно зі звичайними цивільними картографічними програмами.

Важливо: хоча FPV-БпЛА не слідує автоматично розрахованому маршруту, аналітичні дані з цих систем визначають можливість виконання польоту та оптимальні параметри висоти і траєкторії.

Переваги симуляційних середовищ при плануванні FPV-польотів

1. Можливість попередньо визначити небезпечні ділянки.
2. Зменшення ймовірності втрати сигналу через затінення рельєфом.
3. Визначення потрібної висоти ретранслятора.
4. Передбачення можливих точок втручання РЕБ.
5. Підготовка точного профілю маршруту, навіть якщо він виконуватиметься вручну.
6. Збільшення шансів успішного виконання завдання.

Симуляційні середовища дозволяють оператору заздалегідь оцінити маршрути обльоту FPV-БПЛА та їх реалістичність у бойових умовах. Google Earth надає загальний огляд рельєфу, Mission Planner — інструменти для детального аналізу висот, а спеціалізовані військові системи (зокрема “Кропива”) забезпечують точні розрахунки радіовидимості й оптимальних висот ретрансляції. Використання таких засобів є важливим доповненням до ручного та напівавтоматичного планування, підвищуючи безпеку та результативність польотів.

Загальний вид програм зображені в тексті вище на рисунках 2.1, 2.2, 2.3

2.6. Побудова умовного маршруту для вигаданого завдання

Для демонстрації практичного застосування методів навігаційного планування FPV-БПЛА було виконано моделювання умовного маршруту за допомогою програмного середовища MilChat, яке дозволяє аналізувати рельєф місцевості, будувати профіль висот та оцінювати можливість забезпечення прямої радіовидимості між точками маршруту.

Загальний вид програми зображений на рисунках 2.4, 2.5, 2.6, 2.7

Умовне завдання полягало в оцінці можливості польоту FPV-БПЛА між двома обраними точками (точка А — точка старту; точка В — умовний район виконання задачі). Відстань між точками становить 7,8 км, що відповідає типовим умовам роботи з ретранслятором при складній місцевості.

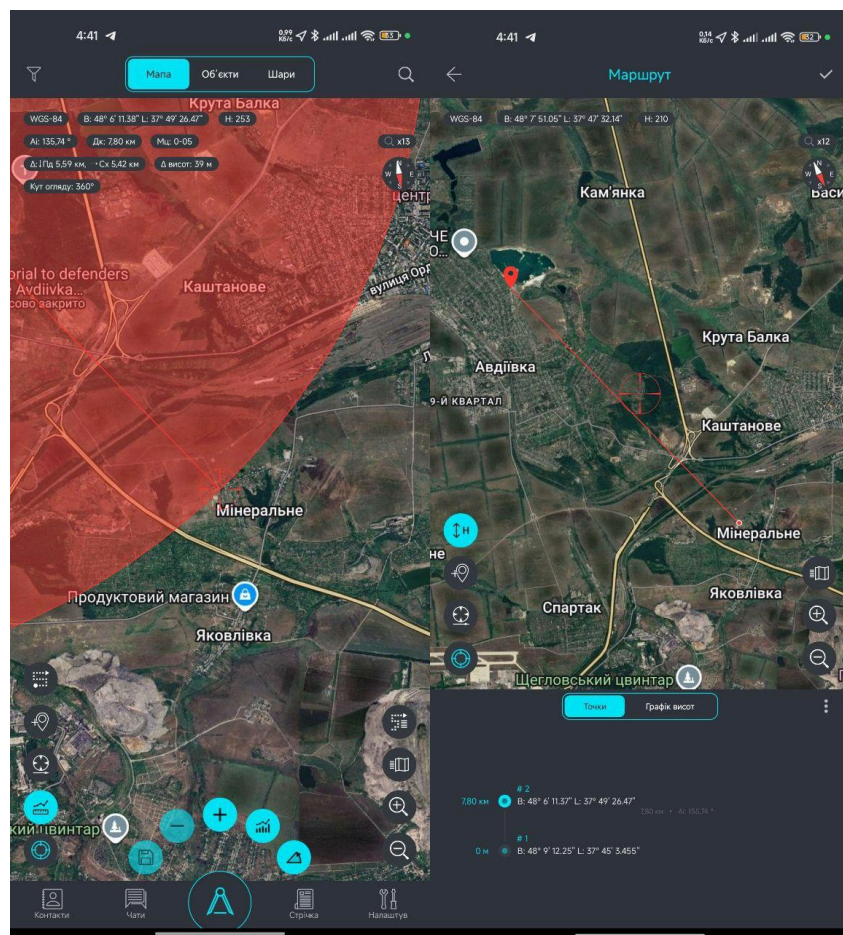


Рисунок 2.4. – Загальний вигляд додатку «MilChat», вибір точок. Їх координати

Вибір точок та аналіз рельєфу

Після нанесення точок А і В на карту було сформовано графік висот маршруту, який дозволяє оцінити характер рельєфу. Аналіз показав:

- точка А розташована на висоті приблизно 214 м;
- точка В має висоту близько 253 м;
- на маршруті між точками присутній пагорб, який створює затінення та перешкоджає прямій лінії огляду (LOS).

За цих умов політ FPV-БПЛА без ретранслятора є неможливим, оскільки рельєф перекриває радіосигнал між точками.

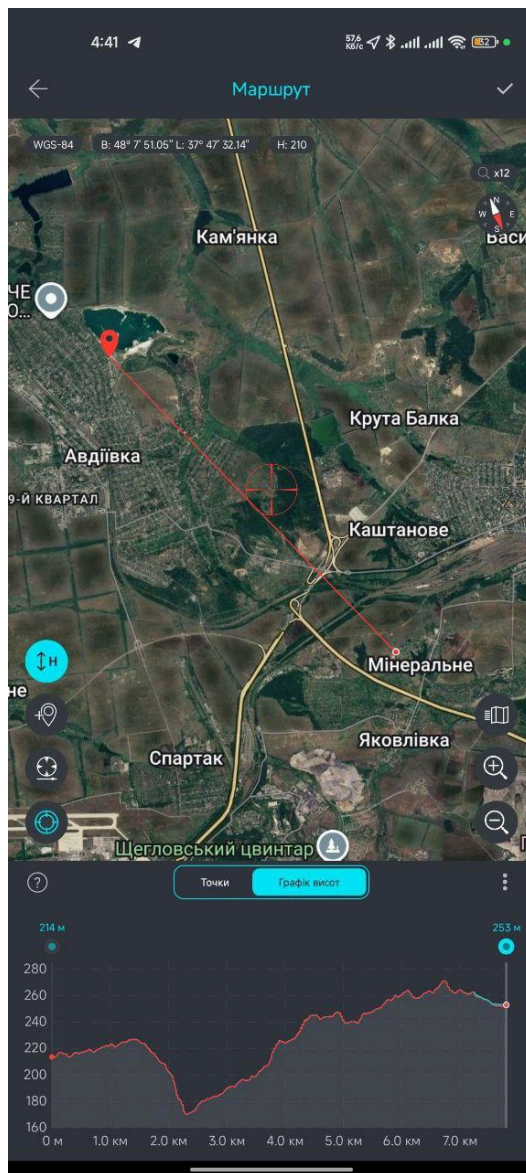


Рисунок 2.5. – Додаток «MilChat», графік висот

Корекція маршруту за допомогою підняття ретранслятора

Для забезпечення прямої видимості була застосована функція зміни висоти точки огляду, що імітує підняття повітряного ретранслятора.

Етап 1. Підняття ретранслятора на 100 м

Після збільшення висоти точки А до 314 м відбулося часткове покращення радіовидимості, однак рельєф усе ще перехоплював сигнал. Це означає, що видимість між точками не є стабільною, а політ може супроводжуватися втратою відеоканалу.

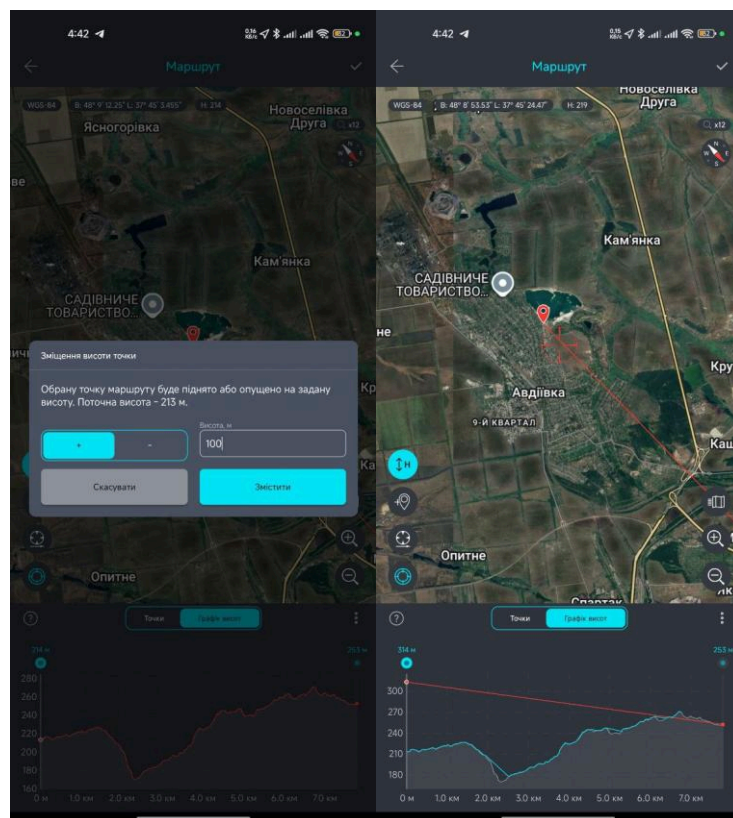


Рисунок 2.6. – Додаток «MilChat», підняття на 100м висоти точки, графік висот

Етап 2. Підняття ретранслятора на 200 м

Внаслідок підняття ретранслятора до 414 м MilChat відобразив повне відкриття лінії огляду вздовж усього маршруту.

Графік висот показав, що:

- лінія LOS (червона пряма) проходить над усіма підвищеннями рельєфу;
- точка В є повністю доступною для сигналу;
- зникли області затінення, які перешкоджали зв'язку до корекції висоти.

Таким чином, підйом ретранслятора на 200 м забезпечив стабільну радіовидимість та зробив маршрут придатним для виконання польотного завдання FPV-БПЛА.

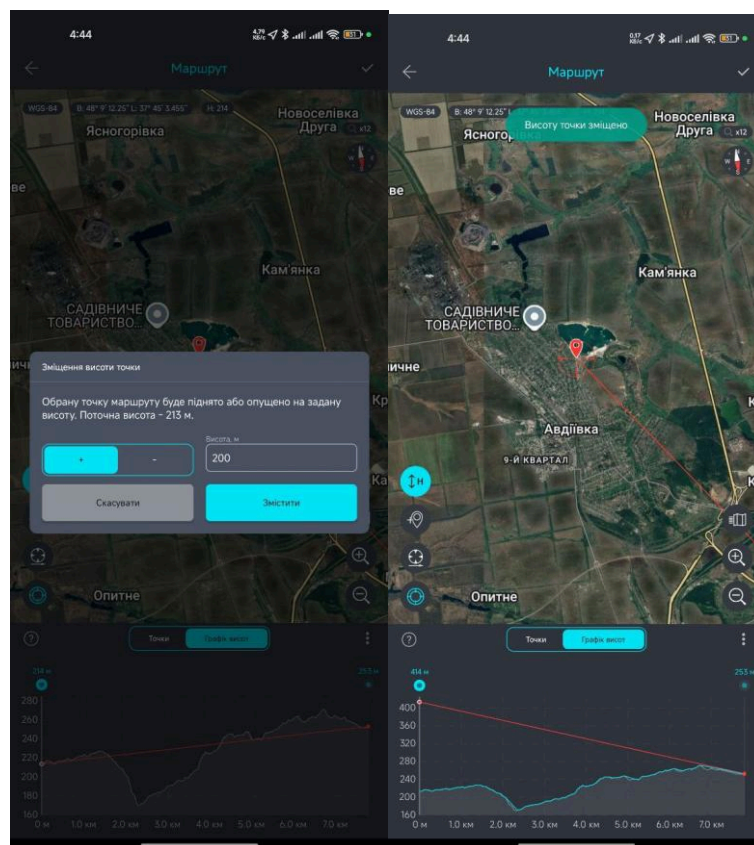


Рисунок 2.7. – Додаток «MilChat», підняття на 200м висоти точки, графік висот

Оцінка результатів моделювання

На основі проведеного моделювання можна зробити такі висновки:

1. Рельєф місцевості відіграє ключову роль у плануванні маршрутів FPV-БПЛА, оскільки навіть незначні пагорби на дистанції 5–10 км здатні повністю екранувати сигнал.
2. Підняття ретранслятора є ефективним інструментом забезпечення керуваності, але потребує точного розрахунку необхідної висоти.
3. Використання MilChat дозволяє швидко визначати мінімально необхідну висоту ретранслятора, що суттєво скорочує час на підготовку до польоту.
4. Умова успішного виконання задачі — повна відсутність перешкод на лінії огляду між точкою керування/ретранслятором та FPV-БПЛА.

Побудова маршруту за допомогою MilChat показала, що моделювання рельєфу є критичним етапом аеронавігаційної підтримки польотів FPV-БПЛА. Правильний

вибір висоти ретранслятора дозволяє компенсувати природні перешкоди та забезпечити надійний зв'язок на всій дистанції польоту. Такий підхід може бути застосований для широкого спектра практичних завдань, пов'язаних із обльотами, моніторингом і навігаційним забезпеченням у складній ситуаційній обстановці.

2.7. Висновки до розділу 2

У розділі було розглянуто методи та інструменти навігаційного планування маршрутів FPV-БПЛА, що мають ключове значення для забезпечення надійності польотів у складній ситуаційній обстановці. Аналіз матеріалу дозволяє сформулювати такі узагальнення:

1. Ручне та напівавтоматичне планування маршрутів є основою для підготовки FPV-польотів.

Ручний підхід забезпечує гнучкість і оперативність прийняття рішень, тоді як напівавтоматичний дозволяє враховувати особливості рельєфу та потенційні перешкоди на основі попереднього картографічного аналізу.

2. Рельєф місцевості суттєво впливає на можливість виконання польоту FPV-БПЛА.

Затінення сигналу природними та штучними перешкодами створює ризики втрати керованості та зниження якості відеосигналу, що робить обов'язковим попередній аналіз лінії радіовидимості на всьому маршруті.

3. Вибір висоти польоту та висоти розміщення ретранслятора є критичними параметрами навігаційного забезпечення.

Забезпечення прямої радіовидимості між оператором і FPV-БПЛА є необхідною умовою для стабільного керування. Підняття ретранслятора дозволяє компенсувати нерівності рельєфу та суттєво збільшити доступну дальність польоту.

4. Використання сучасних програмних інструментів підвищує точність планування.

Середовища симуляції дозволяють швидко та достовірно оцінити профіль висот, визначити точки потенційної втрати сигналу та підібрати оптимальну висоту ретранслятора. Це значно скорочує час підготовки та знижує ймовірність навігаційних помилок.

5. Побудова умовного маршруту підтвердила ефективність застосування цифрових симуляційних методів.

Моделювання показало, що лише підняття ретранслятора на достатню висоту забезпечило повну пряму видимість між точками маршруту та створило умови для безперервного керування FPV-БПЛА протягом усього польоту.

Таким чином, навігаційне планування маршрутів FPV-БПЛА повинно поєднувати аналіз рельєфу, використання симуляційних інструментів і грамотний вибір висоти польоту. Комплексний підхід дозволяє підвищити успішність виконання завдань, мінімізувати ризики втрати зв'язку та забезпечити ефективну аеронавігаційну підтримку у складних умовах. цьому роботи.

РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ПОБУДОВАНИХ МАРШРУТІВ

3.1. Вступ до розділу 3

Побудова маршруту польоту FPV-БПЛА є лише початковим етапом аеронавігаційної підтримки. Не менш важливим завданням є оцінка ефективності обраних маршрутів з урахуванням реальних умов виконання польоту та можливих ризиків. Навіть маршрут, який формально забезпечує досяжність цілі, може виявитися неефективним або небезпечним у разі зміни метеорологічних умов, ускладнення радіоелектронної обстановки або появи додаткових рельєфних перешкод.

В умовах застосування FPV-БПЛА, де керування здійснюється в режимі реального часу, а стабільність відео- та радіозв'язку є критичною, аналіз ефективності маршрутів набуває особливого значення. Втрата керування або відеозображення навіть на короткий проміжок часу може призвести до зриву виконання завдання або повної втрати апарата. Тому вибір маршруту повинен базуватися не лише на його геометричних параметрах, а й на комплексній оцінці навігаційних, технічних і зовнішніх факторів.

У цьому розділі основна увага приділяється порівняльному аналізу альтернативних маршрутів польоту FPV-БПЛА та оцінці ризиків, що виникають під час їх реалізації. Розглядається вплив рельєфу місцевості, радіовидимості, використання ретрансляторів, метеорологічних умов та особливостей польотного режиму на ймовірність успішного виконання завдання. Аналіз проводиться з урахуванням практичних обмежень, характерних для FPV-польотів, зокрема залежності від енергетичних можливостей апарата та навантаження на оператора.

Окреме місце в розділі займає визначення умовно оптимального варіанту маршруту. Під оптимальністю в даному випадку розуміється не мінімальна довжина або час польоту, а досягнення балансу між стабільністю керування, зниженням ризику виявлення, енергетичною доцільністю та ймовірністю успішного виконання

завдання. Такий підхід дозволяє перейти від формального планування маршрутів до обґрунтованого прийняття навігаційних рішень.

Завершальним елементом розділу є формулювання практичних рекомендацій, спрямованих на зменшення втрат FPV-БПЛА під час польотів. Ці рекомендації ґрунтуються на проведеному аналізі та можуть бути використані при плануванні та виконанні реальних польотних завдань в умовах складної ситуаційної обстановки.

Таким чином, цей розділ логічно продовжує результати навігаційного моделювання, представлені в попередньому розділі, та створює аналітичну основу для узагальнення результатів магістерської роботи.

3.2. Порівняння альтернативних маршрутів: прямий, обхідний, з ретранслятором

Для оцінки ефективності навігаційного планування FPV-БПЛА доцільно порівняти декілька альтернативних варіантів маршрутів, які можуть бути використані для виконання одного й того ж умовного завдання. У даному підпункті розглядаються три базові типи маршрутів: прямий маршрут, обхідний маршрут та маршрут із використанням ретранслятора.

Порівняння здійснюється з точки зору забезпечення радіовидимості, ризиків втрати керування, складності виконання та загальної ймовірності успішного завершення польоту.

Прямий маршрут

Прямий маршрут передбачає політ FPV-БПЛА по найкоротшій траєкторії між точкою старту та точкою виконання завдання. Основною перевагою такого підходу є мінімальна довжина маршруту та скорочений час перебування дрона у повітрі.

Однак у реальних умовах застосування прямий маршрут має суттєві обмеження:

- рельєф місцевості може перекривати лінію радіовидимості;
- наявність пагорбів або забудови призводить до затінення сигналу;

- навіть короткочасна втрата відеоканалу робить подальший політ неконтрольованим.

У випадках, коли між точками маршруту існують природні перешкоди, прямий маршрут є малоефективним або повністю непридатним для FPV-польотів без додаткових засобів підтримки зв'язку.

Обхідний маршрут

Обхідний маршрут формується з урахуванням рельєфу та передбачає зміну траєкторії з метою обходу перешкод, які перекривають сигнал. Такий підхід дозволяє зберегти радіовидимість без використання ретранслятора.

Перевагами обхідного маршруту є:

- можливість виконання польоту без додаткових технічних засобів;
- зниження ризику повної втрати сигналу у критичних точках.

Водночас обхідний маршрут має і суттєві недоліки:

- збільшення загальної довжини польоту;
- зростання часу перебування FPV-БПЛА у повітрі;
- підвищене енергоспоживання;
- збільшення кількості маневрів, що ускладнює керування.

Таким чином, обхідний маршрут може бути ефективним лише за умови достатнього енергетичного ресурсу та відсутності активних загроз на розширеній траєкторії.

Маршрут із використанням ретранслятора

Маршрут із використанням ретранслятора передбачає встановлення проміжної точки зв'язку, яка забезпечує стійку радіовидимість між оператором і FPV-БПЛА на всій дистанції польоту. У цьому випадку ретранслятор компенсує негативний вплив рельєфу та дозволяє використовувати більш прямолінійну траєкторію.

Основні переваги такого маршруту:

- забезпечення стабільного відео- та керуючого каналу;
- можливість польоту на складній місцевості;
- зменшення потреби в обхідних маневрах;
- підвищення ймовірності успішного виконання завдання.

До недоліків можна віднести:

- необхідність додаткового ресурсу (ретранслятор, окремий БПЛА або платформа);
- потребу в попередньому точному плануванні висоти та позиції ретранслятора.

Попри це, у складних умовах саме маршрут із ретранслятором демонструє найвищу ефективність і надійність.

Узагальнена оцінка ризиків описана в таблиці 2.

Таблиця 2 Узагальнена таблиця ризиків

Критерій	Прямий маршрут	Обхідний маршрут	Маршрут з ретранслятором
Довжина маршруту	Мінімальна	Збільшена	Найбільша
Час польоту	Мінімальний	Збільшений	Збільшений
Стійкість зв'язку	Низька	Середня	Висока
Ризик втрати відео	Високий	Середній	Низький
Складність керування	Низька	Висока	Середня
Потреба у додаткових засобах	Ні	Ні	Так (ретранслятор)

Залежність від рельєфу	Висока	Середня	Низька
Ймовірність успішного виконання	Низька	Середня	Висока

Порівняльний аналіз альтернативних маршрутів показав, що довжина траєкторії не є визначальним показником ефективності польоту FPV-БПЛА. Прямий маршрут, незважаючи на мінімальну протяжність, має найвищі ризики втрати зв'язку через вплив рельєфу. Обхідний маршрут дозволяє частково компенсувати ці ризики, однак збільшує тривалість польоту та навантаження на оператора. Маршрут із використанням ретранслятора, попри більшу довжину, забезпечує найвищу стабільність радіозв'язку та найбільшу ймовірність успішного виконання завдання, що робить його найбільш доцільним у складних умовах місцевості.

3.3. Оцінка факторів ризику та ймовірностей втрати керування і відеозв'язку

Під час виконання польотів FPV в умовах складної ситуаційної обстановки ключовим фактором успішності завдання є збереження стабільного каналу керування та відеозв'язку. На відміну від автономних безпілотних систем, FPV-БПЛА повністю залежить від прямої радіовидимості між оператором, ретранслятором (за його наявності) та самим апаратом. Тому оцінка ризиків втрати керування і відеосигналу є необхідним етапом аналізу ефективності побудованих маршрутів.

Основні фактори ризику

До основних факторів, що впливають на ймовірність втрати керування та відеозв'язку FPV-БПЛА, належать:

1. Рельєф місцевості

Пагорби, балки, насипи та інші нерівності рельєфу створюють зони повного або часткового затінення сигналу. Навіть за незначних перепадів висот рельєфу

може повністю перекрити лінію радіовидимості на дистанціях понад кілька кілометрів.

2. Відсутність прямої радіовидимості (LOS)

FPV-політ без прямої радіовидимості супроводжується різким погіршенням якості відеосигналу, зростанням затримки та повною втратою керованості у фінальній фазі маршруту.

3. Дальність польоту

Зі збільшенням дистанції зростає загасання сигналу, що особливо критично для аналогових відеосистем у поєднанні зі складним рельєфом.

4. Радіоелектронна протидія

Активна робота засобів РЕБ призводить до додаткового зниження якості зв'язку або повної втрати каналу керування незалежно від правильно обраної траєкторії.

5. Людський фактор

Високе навантаження на оператора, необхідність постійного маневрування та затримки відео підвищують імовірність помилкових рішень під час польоту.

При визначенні умовно оптимального маршруту польоту FPV-БПЛА враховується комплекс факторів, що включає рельєф місцевості, метеорологічні умови, радіоелектронну обстановку, енергетичні можливості апарата та вимоги до прихованості польоту. Узагальнення основних факторів впливу на вибір маршруту наведено в додатку Б (таблиця Б.1).

Практичний аналіз ризиків на основі змодельованого маршруту

Оцінка ризиків проводилася на прикладі умовного маршруту довжиною близько 7,8 км, побудованого з урахуванням складного рельєфу, де ціль розташована за пагорбом відносно точки старту.

Прямий маршрут без ретранслятора

У випадку прямого маршруту рельєфна перешкода повністю перекриває лінію радіовидимості між оператором та FPV-БПЛА. Відеозв'язок втрачається ще до досягнення цілі, що робить подальше керування неможливим. Ймовірність успішного виконання завдання в цьому випадку оцінюється як вкрай низька.

Обхідний маршрут без ретранслятора

Попри зміну траєкторії польоту, обхідний маршрут не дозволяє досягти цілі, оскільки вона залишається за рельєфною перешкодою. Навіть при збільшенні довжини маршруту та обході окремих ділянок місцевості, фінальна точка залишається поза зоною прямої радіовидимості. Таким чином, обхідний маршрут не усуває головного навігаційного обмеження і також не забезпечує виконання завдання.

Маршрут із використанням повітряного ретранслятора

Застосування повітряного ретранслятора дозволяє змінити геометрію радіозв'язку та забезпечити пряму видимість між усіма елементами системи. Підняття ретранслятора на розраховану висоту усуває вплив рельєфної перешкоди, забезпечує стабільний відеоканал та керування FPV-БПЛА на всій протяжності маршруту. У цьому випадку ризик втрати керування та відеозв'язку знижується до мінімального рівня.

Графік висот який аналізуємо зображений на рисунку 3.1



Рисунок 3.1. – Додаток «MilChat», графік висот

Порівняльна оцінка ризиків описана в таблиці 3.

Таблиця 3 Порівняльна оцінка ризиків

Тип маршруту	Можливість досягнення цілі	Ризик втрати відео	Ризик втрати керування
Прямий	Ні	Високий	Високий
Обхідний	Ні	Високий	Високий
З ретранслятором	Так	Низький	Низький

Проведений аналіз показав, що у випадку складного рельєфу ані прямий, ані обхідний маршрут без ретранслятора не забезпечують можливості досягнення цілі через відсутність прямої радіовидимості. Єдиним ефективним способом зменшення ризиків втрати керування та відеозв’язку є використання повітряного ретранслятора, який дозволяє компенсувати рельєфні обмеження та забезпечити стабільне керування FPV-БПЛА. Це підтверджує ключову роль ретрансляції сигналу в аеронавігаційній підтримці FPV-польотів у складній ситуаційній обстановці

3.4. Визначення умовного оптимального варіанту маршруту

Визначення оптимального маршруту польоту є багатокритеріальною задачею, яка виходить за межі простого вибору найкоротшої траєкторії. У реальних умовах оптимальність маршруту формується з урахуванням метеорологічних факторів, енергетичних можливостей апарата, рельєфу місцевості, радіоелектронної обстановки та тактичних вимог до прихованості польоту.

Оптимальний маршрут у даному контексті визначається як такий, що забезпечує досягнення цілі з мінімальною ймовірністю втрати керування та максимальною ймовірністю успішного виконання завдання.

Фактори, що враховуються при визначенні оптимального маршруту

Температурні умови

Температура навколишнього середовища безпосередньо впливає на енергетичні характеристики акумуляторних батарей FPV-БПЛА. За пониженої температури відбувається зменшення ефективної ємності батареї, що призводить до скорочення максимальної дальності польоту. У таких умовах оптимальний маршрут повинен:

- мати мінімально необхідну протяжність;
- уникати надмірного набору висоти;
- зменшувати кількість різких маневрів.

Вплив сонячного освітлення

Політ у напрямку сонця може суттєво погіршувати візуальне сприйняття оператором через засліплення камери та зниження контрастності зображення. У таких умовах доцільно:

- коригувати маршрут з урахуванням напрямку сонця;
- обирати траєкторії з боковим або зустрічним освітленням;
- уникати фінального заходу на ціль із напрямку прямого сонячного засліплення.

Вітрові умови

Вітер є одним із ключових факторів, що впливає на енергоспоживання FPV-БПЛА:

- попутний вітер зменшує витрати енергії та дозволяє збільшити дальність польоту;
- зустрічний або боковий вітер збільшує навантаження на двигуни, що призводить до зростання енергоспоживання та зменшення максимальної дальності.

Тому оптимальний маршрут повинен враховувати напрямок вітру, особливо на фінальних етапах польоту.

Радіогоризонт та радіовидимість

Забезпечення прямої радіовидимості між оператором, ретранслятором і FPV-БПЛА є базовою умовою керуваності. При плануванні маршруту необхідно враховувати:

- радіогоризонт на заданій висоті;
- можливі зони затінення сигналу рельєфом;
- необхідність підняття або збереження постійної висоти ретранслятора.

Маршрут, який формально є коротшим, але виходить за межі радіогоризонту, не може вважатися оптимальним.

Вплив засобів радіоелектронної боротьби

Наявність зон активної РЕБ змушує змінювати маршрут польоту навіть за умови збільшення його довжини. У таких випадках оптимальність визначається не часом польоту, а зменшенням часу перебування в зоні впливу РЕБ або повним обходом небезпечної ділянки.

Розмір БПЛА та корисне навантаження

Розмір борта, його маса та корисне навантаження безпосередньо впливають на енергоспоживання та маневровість. Для більших FPV-БПЛА з важчим навантаженням оптимальний маршрут:

- потребує більш плавних маневрів;
- обмежує різкі набори та скидання висоти;
- вимагає точнішого розрахунку запасу енергії.

Рельєф як визначальний фактор вибору траєкторії

При наявності рельєфних перешкод, зокрема пагорбів, оптимальний маршрут визначається з урахуванням їх висоти та розташування цілі:

- якщо пагорб має значну висоту, доцільніше виконати обхідний маршрут на малій висоті, ніж здійснювати різкий набір висоти, що призводить до підвищеного енергоспоживання;
- якщо ціль розташована безпосередньо за пагорбом, оптимальним є обхідний маршрут уздовж рельєфу, що зменшує ймовірність виявлення FPV-БПЛА;
- якщо ціль знаходиться на значній відстані за пагорбом, доцільнішим може бути прямий маршрут з набором висоти, оскільки подальша траєкторія стає більш енергетично ефективною.

Узагальнення практичного підходу

Таким чином, оптимальний маршрут FPV-БПЛА формується як результат балансу між:

- енергетичними можливостями;
- метеоумовами;
- рельєфом;
- рівнем радіозагроз;
- вимогами до прихованості польоту.

У більшості розглянутих сценаріїв обхідний маршрут із використанням ретранслятора є більш ефективним, навіть за збільшення часу польоту, оскільки він знижує ризик виявлення та втрати керування.

Отже, оптимальний маршрут польоту не є універсальним і визначається конкретною ситуаційною обстановкою. Врахування температури, вітру, освітлення, рельєфу, радіоелектронної протидії та характеристик борта дозволяє обрати маршрут, який забезпечує максимальну ймовірність успішного виконання завдання. Такий підхід підтверджує, що оптимальність у навігаційному плануванні FPV-БПЛА має ситуативний характер і потребує комплексного аналізу умов польоту.

3.5. Рекомендації для зменшення втрат FPV-БПЛА в польотах

На основі проведеного аналізу методів побудови маршрутів, оцінки ризиків та визначення оптимальних варіантів навігації можна сформулювати комплекс рекомендацій, спрямованих на зменшення втрат FPV-БПЛА під час виконання польотних завдань у складній ситуаційній обстановці.

Рекомендації з навігаційного планування

1. Обов'язкове попереднє моделювання маршруту

Перед виконанням польоту необхідно проводити аналіз рельєфу та радіовидимості з використанням цифрових інструментів. Це дозволяє виявити зони затінення сигналу та визначити мінімально необхідну висоту ретранслятора.

2. Використання повітряних ретрансляторів у складному рельєфі

У районах з пагорбами, балками або забудовою застосування повітряного ретранслятора є найбільш ефективним способом зменшення ризику втрати керування та відеозв'язку.

3. Перевага ситуативно оптимального маршруту

Необхідно відмовитися від універсального підходу до планування. Оптимальний маршрут має визначатися з урахуванням конкретних умов місцевості, розташування цілі та рівня загроз.

Рекомендації з урахування метеорологічних та зовнішніх факторів

4. Корекція маршруту з урахуванням температури

За понижених температур необхідно зменшувати довжину маршруту або збільшувати запас енергії, оскільки ефективна ємність акумуляторів знижується.

5. Урахування напрямку сонця

Для збереження якості відеозображення фінальний етап польоту доцільно виконувати таким чином, щоб уникати прямого сонячного засліплення камери.

6. Використання вітрових умов на користь польоту

За можливості слід планувати маршрут з урахуванням попутного вітру, що дозволяє зменшити енергоспоживання та збільшити дальність польоту.

Рекомендації з енергетичної та технічної підготовки

7. Підбір FPV-БПЛА відповідно до завдання

Розмір борта, тип рами та корисне навантаження повинні відповідати відстані до цілі та умовам рельєфу, щоб уникнути надмірного енергоспоживання.

8. Мінімізація різких наборів та скидань висоти

Планування плавної траєкторії польоту дозволяє зменшити навантаження на силову установку та продовжити час перебування FPV-БПЛА у повітрі.

9. Контроль енергетичного резерву

Перед стартом необхідно мати чітке розуміння мінімального допустимого запасу енергії для виконання маршруту та можливого коригування польоту

Рекомендації з урахування радіоелектронної обстановки

10. Уникнення зон активної радіоелектронної боротьби

У разі наявності інформації про роботу РЕБ маршрут слід коригувати таким чином, щоб мінімізувати час перебування FPV-БПЛА у зоні впливу або повністю її обійти.

11. Забезпечення стабільної радіовидимості

Необхідно підтримувати пряму радіовидимість між оператором, ретранслятором і FPV-БПЛА на всій ділянці маршруту, навіть за рахунок його подовження.

Рекомендації щодо зниження ймовірності виявлення

12. Використання рельєфу для маскуванню польоту

Політ на малих висотах уздовж рельєфу дозволяє зменшити візуальну помітність.

13. Уникнення тривалого перебування над відкритими ділянками

Відкриті простори збільшують ризик виявлення апарата, особливо під час набору висоти.

Тож, реалізація наведених рекомендацій дозволяє суттєво знизити ймовірність втрати FPV-БПЛА під час польотів у складній ситуаційній обстановці. Комплексний підхід до навігаційного планування, урахування зовнішніх факторів, енергетичних обмежень та радіоелектронної обстановки забезпечує підвищення ефективності та безпеки застосування FPV-БПЛА.

3.6. Висновки до розділу 3

У третьому розділі виконано комплексний аналіз ефективності побудованих маршрутів польотів FPV-БПЛА в умовах складної ситуаційної обстановки. Розглянуто альтернативні варіанти маршрутів, оцінено фактори ризику та визначено підхід до вибору умовно оптимального варіанту навігації.

Встановлено, що прямий та обхідний маршрути без використання ретранслятора не забезпечують можливості досягнення цілі у разі складного рельєфу та відсутності прямої радіовидимості. Наявність рельєфних перешкод призводить до втрати відеозв'язку та керованості FPV-БПЛА ще до фінальної фази польоту, що робить такі маршрути непридатними для практичного застосування.

Проведений аналіз підтвердив, що використання повітряного ретранслятора є ключовим фактором підвищення надійності польоту, оскільки дозволяє компенсувати вплив рельєфу та забезпечити стабільний канал керування і передачі відео на всій протяжності маршруту. При цьому оптимальність маршруту не визначається мінімальною довжиною, а формується з урахуванням тактичних і навігаційних умов.

Показано, що вибір оптимального маршруту повинен враховувати метеорологічні фактори, енергетичні можливості FPV-БПЛА, радіогоризонт, рівень радіоелектронної протидії та вимоги до прихованості польоту. Зокрема, обхідний маршрут із використанням ретранслятора у багатьох випадках є більш ефективним, ніж прямий, оскільки зменшує ймовірність виявлення апарата, навіть за рахунок збільшення часу польоту.

Сформульовані рекомендації дозволяють систематизувати підхід до планування маршрутів FPV-БПЛА та зменшити втрати апаратів у реальних умовах застосування. Отримані результати підтверджують, що комплексний аналіз рельєфу, радіообстановки та енергетичних обмежень є необхідною умовою ефективної аеронавігаційної підтримки польотів FPV-БПЛА.

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

4.1. Вступ до розділу 4

У сучасних умовах розвитку авіаційних технологій питання охорони навколишнього середовища набувають особливої актуальності. Зростання інтенсивності авіаційної діяльності, розширення сфер застосування літальних апаратів та впровадження нових технологій вимагають комплексного підходу до оцінки їх впливу на довкілля. Це стосується не лише пілотованої авіації, а й безпілотних літальних апаратів (БПЛА), які останніми роками широко застосовуються у різних галузях.

Безпілотні літальні апарати часто розглядаються як екологічно більш безпечна альтернатива традиційним повітряним суднам, оскільки більшість із них використовує електричну силову установку та не здійснює прямих викидів продуктів згоряння в атмосферу. Проте навіть електричні БПЛА мають власний екологічний слід, який формується на етапах виробництва, експлуатації та утилізації. До таких факторів належать використання акумуляторних батарей, електронних компонентів, шумове навантаження, електромагнітне випромінювання, а також накопичення уламків у разі аварій або втрати апаратів.

Особливої уваги потребує застосування FPV-БПЛА, які виконують польоти на малих висотах, у складних умовах рельєфу та часто за відсутності супутникової навігації. Для таких апаратів характерна підвищена залежність від стабільності каналу керування та відеозв'язку, що збільшує ризик втрати БПЛА під час польоту. Втрачені FPV-БПЛА разом із акумуляторами та електронними компонентами можуть залишатися в природному середовищі, створюючи потенційну загрозу для ґрунтів, водних ресурсів і живих організмів.

У цьому контексті аеронавігаційна підтримка польотів FPV-БПЛА набуває не лише технічного або тактичного значення, а й екологічного. Раціональне планування маршрутів польоту з урахуванням рельєфу, метеорологічних умов, радіовидимості та енергетичних можливостей апарата дозволяє зменшити кількість аварійних ситуацій,

уникнути невиправданих повторних вильотів і скоротити загальну кількість втрачених БПЛА.

Таким чином, оптимізація маршрутів та підвищення ефективності навігаційної підтримки FPV-БПЛА безпосередньо впливають на зменшення негативного впливу на навколишнє середовище.

Зменшення кількості втрачених БПЛА та оптимізація польотів знижує негативний вплив на довкілля, що повністю відповідає принципам сталого розвитку та раціонального використання технологічних ресурсів.

У зв'язку з цим розгляд екологічних аспектів застосування FPV-БПЛА та аналіз шляхів мінімізації їх впливу на навколишнє середовище є важливою складовою даної магістерської роботи.

нормам.

4.2. Аналіз екологічних аспектів застосування FPV-БПЛА та аеронавігаційної підтримки польотів

Застосування безпілотних літальних апаратів, зокрема FPV-БПЛА, супроводжується не лише технічними та навігаційними викликами, але й певним впливом на навколишнє середовище. Хоча FPV-БПЛА належать до електричних авіаційних систем і не створюють прямих викидів продуктів згоряння в атмосферу, їх експлуатація формує комплексний екологічний слід, який пов'язаний з особливостями виробництва, використання та утилізації компонентів.

Екологічні аспекти застосування FPV-БПЛА мають багатофакторний характер і включають енергоспоживання, шумовий вплив, утворення електронних відходів, а також ризики забруднення довкілля у разі втрати апаратів разом з акумуляторними батареями. В умовах інтенсивного застосування FPV-БПЛА ці чинники набувають особливої актуальності та потребують системного аналізу.

Важливу роль у формуванні екологічного навантаження відіграє аеронавігаційна підтримка польотів. Раціональне планування маршрутів, врахування рельєфу місцевості, метеорологічних умов і радіоелектронної обстановки дозволяє

зменшити кількість аварійних ситуацій, повторних польотів і втрат апаратів. Таким чином, аеронавігаційна підтримка виступає не лише як елемент забезпечення ефективності та безпеки польотів, а і як інструмент непрямого зниження негативного впливу FPV-БПЛА на довкілля.

У даному підрозділі здійснюється комплексний аналіз екологічних аспектів застосування FPV-БПЛА та ролі аеронавігаційної підтримки у мінімізації екологічного навантаження. Розгляд охоплює загальний вплив використання БПЛА на навколишнє середовище, специфічні екологічні особливості FPV-БПЛА, а також методи зменшення негативного впливу в контексті сталого розвитку.

4.2.1. Загальний вплив застосування БПЛА на навколишнє середовище

Застосування безпілотних літальних апаратів у сучасних умовах постійно розширюється, охоплюючи цивільні, наукові, промислові та спеціалізовані сфери. У зв'язку з цим актуальним є аналіз впливу БПЛА на навколишнє середовище, зокрема в контексті екологічної безпеки та сталого розвитку авіаційної галузі.

У порівнянні з пілотованою авіацією, більшість БПЛА характеризуються меншими габаритами, масою та енергоспоживанням, що зумовлює нижчий рівень безпосереднього впливу на довкілля. Зокрема, використання електричних силових установок дозволяє уникнути прямих викидів продуктів згоряння в атмосферу під час експлуатації, що є суттєвою перевагою з екологічної точки зору. Саме тому БПЛА часто розглядаються як екологічно ефективна альтернатива традиційним повітряним суднам для виконання окремих типів завдань.

Разом із тим, екологічний вплив БПЛА не обмежується лише етапом експлуатації. Значний внесок у формування екологічного сліду припадає на етапи виробництва та утилізації. Сучасні БПЛА містять значну кількість електронних компонентів, композитних матеріалів і акумуляторних батарей, виробництво яких супроводжується споживанням природних ресурсів та утворенням відходів. Особливу екологічну небезпеку становлять літій-іонні та літій-полімерні

акумулятори, які за неналежної утилізації можуть призводити до забруднення ґрунтів і водних ресурсів.

Окремим фактором впливу БПЛА на навколишнє середовище є шумове навантаження. Незважаючи на відносно невелику потужність силових установок, характерний високочастотний шум, створюваний пропелерами та електродвигунами, може негативно впливати на фауну, зокрема птахів і дрібних тварин, особливо за регулярного або масового використання БПЛА на одній території.

Крім того, експлуатація БПЛА супроводжується електромагнітним випромінюванням, пов'язаним із роботою систем керування, навігації та передачі даних. Хоча рівні такого випромінювання зазвичай не перевищують допустимі норми, їх накопичувальний ефект у разі інтенсивного використання БПЛА потребує подальших досліджень та контролю.

Таким чином, загальний вплив застосування БПЛА на навколишнє середовище має комплексний характер і включає як позитивні, так і негативні аспекти. З одного боку, БПЛА дозволяють зменшити навантаження на довкілля порівняно з традиційною авіацією, з іншого — потребують відповідального підходу до виробництва, експлуатації та утилізації. Урахування цих факторів є необхідною умовою подальшого розвитку безпілотних технологій у межах концепції сталого розвитку.

4.2.2. Екологічні аспекти використання FPV-БПЛА

FPV-БПЛА мають низку специфічних особливостей експлуатації, які відрізняють їх від інших типів безпілотних літальних апаратів і формують окремі екологічні аспекти їх використання. Ці особливості пов'язані з режимом польоту, висотами застосування, залежністю від радіоканалу та характером виконуваних завдань.

Однією з ключових характеристик FPV-БПЛА є виконання польотів на малих та надмалих висотах. Такий режим дозволяє досягати високої точності маневрування, однак водночас підвищує рівень локального шумового впливу на

навколишнє середовище. На відміну від БПЛА, що виконують польоти на значних висотах, FPV-апарати безпосередньо взаємодіють із приземним шаром повітря, що може впливати на тваринний світ, особливо у разі багаторазових польотів над однією територією.

Іншим важливим аспектом є підвищений ризик втрати FPV-БПЛА під час виконання польотних завдань. FPV-політ передбачає постійну участь оператора, залежність від стабільності відеозв'язку та керування, а також обмежену можливість автоматичного повернення апарата. У разі втрати зв'язку або орієнтації FPV-БПЛА часто стає неможливим його безпечно завершення польоту, що призводить до залишення апарата разом з акумулятором та електронними компонентами в природному середовищі.

Особливу екологічну небезпеку в цьому контексті становлять акумуляторні батареї, що використовуються у FPV-БПЛА. Літій-іонні та літій-полімерні акумулятори, залишені в ґрунті або на поверхні землі, можуть стати джерелом хімічного забруднення у разі механічного пошкодження або тривалого перебування під впливом вологи. Масове застосування FPV-БПЛА без належної організації їх повернення або утилізації збільшує накопичення таких потенційно небезпечних елементів у навколишньому середовищі.

Ще одним екологічним аспектом є інтенсивність повторних польотів, характерна для FPV-застосування. Невдале виконання завдання через втрату зв'язку або помилки в плануванні часто потребує повторного вильоту, що збільшує сумарне енергоспоживання, шумове навантаження та кількість використаних акумуляторів. Таким чином, непродумане або недостатньо підготовлене застосування FPV-БПЛА опосередковано підвищує екологічне навантаження.

Крім того, експлуатація FPV-БПЛА супроводжується активним використанням радіоканалів зв'язку та відеопередачі. Хоча рівні електромагнітного випромінювання окремого апарата є відносно низькими, їх сукупний вплив у разі масового або тривалого застосування FPV-БПЛА в межах обмеженої території потребує врахування в рамках екологічного моніторингу.

Таким чином, екологічні аспекти використання FPV-БПЛА визначаються не стільки самим фактом їх застосування, скільки частотою польотів, рівнем втрат апаратів та якістю організації навігаційного забезпечення. Це створює передумови для розгляду аеронавігаційної підтримки як одного з ключових інструментів зменшення негативного впливу FPV-БПЛА на навколишнє середовище, що буде детально проаналізовано в наступному підпункті.

4.2.3. Вплив аеронавігаційної підтримки на екологічне навантаження

Аеронавігаційна підтримка польотів безпілотних літальних апаратів відіграє важливу роль не лише у забезпеченні безпеки та ефективності виконання завдань, але й у формуванні рівня екологічного навантаження. Для FPV-БПЛА, які характеризуються підвищеною залежністю від оператора та стабільності радіозв'язку, якість навігаційного планування безпосередньо впливає на кількість аварійних ситуацій і втрат апаратів.

Одним із ключових чинників екологічного впливу є кількість невдалих або перерваних польотів. Недостатньо продумане навігаційне забезпечення, зокрема ігнорування рельєфу місцевості, радіогоризонту або метеорологічних умов, призводить до втрати керування та падіння FPV-БПЛА. Кожен втрачений апарат означає залишення в природному середовищі електронних компонентів і акумуляторних батарей, що збільшує сумарне екологічне навантаження.

Раціональна аеронавігаційна підтримка, яка включає попередній аналіз маршруту, оцінку радіовидимості та використання ретрансляційних засобів, дозволяє суттєво зменшити ймовірність втрати FPV-БПЛА. Зменшення кількості аварійних випадків безпосередньо скорочує обсяг електронних відходів і знижує ризик хімічного забруднення навколишнього середовища.

Важливим аспектом є також оптимізація енергоспоживання. Планування маршрутів з урахуванням рельєфу, напрямку вітру та необхідної висоти польоту дозволяє уникати надмірних наборів висоти, різких маневрів і перевитрати енергії. Це сприяє більш ефективному використанню акумуляторних батарей, зменшує їх

зношування та продовжує експлуатаційний ресурс, що позитивно впливає на екологічні показники.

Крім того, застосування аеронавігаційної підтримки дає змогу зменшити кількість повторних вильотів, які часто виконуються у разі невдалого завершення попередньої місії. Кожен додатковий виліт супроводжується додатковим шумовим впливом, енергоспоживанням та використанням акумуляторів. Відповідно, зниження потреби в повторних польотах сприяє загальному скороченню негативного впливу на довкілля.

Таким чином, аеронавігаційна підтримка польотів FPV-БПЛА може розглядатися як інструмент екологічної оптимізації, оскільки вона опосередковано впливає на зменшення кількості втрат апаратів, зниження енергоспоживання та скорочення обсягу електронних відходів. Це підтверджує доцільність інтеграції екологічних критеріїв у процес планування та виконання польотів FPV-БПЛА.

4.2.4. Методи мінімізації негативного впливу на довкілля

Мінімізація негативного впливу БПЛА на навколишнє середовище є важливою складовою їх відповідального та сталого застосування. Для FPV-БПЛА, які характеризуються високою інтенсивністю польотів та підвищеним ризиком втрати апаратів, особливого значення набуває впровадження комплексу організаційних, технічних та навігаційних заходів, спрямованих на зниження екологічного навантаження.

Одним із ключових методів зменшення негативного впливу є раціональне навігаційне планування польотів. Попередній аналіз рельєфу місцевості, радіовидимості, метеорологічних умов та енергетичних можливостей FPV-БПЛА дозволяє зменшити ймовірність аварійних ситуацій і втрати апаратів. Зменшення кількості втрачених БПЛА безпосередньо скорочує обсяг електронних відходів та ризик забруднення ґрунтів і водних ресурсів акумуляторними батареями.

Важливим напрямом є застосування повітряних ретрансляторів, що дозволяє забезпечити стабільний канал керування та відеозв'язку без необхідності виконання

енергетично затратних маневрів. Це сприяє скороченню тривалості польотів, зменшенню енергоспоживання та зниженню шумового навантаження на навколишнє середовище.

До ефективних методів мінімізації екологічного впливу належить також оптимізація використання акумуляторних батарей. Рациональний вибір типу батареї відповідно до маси FPV-БПЛА, дальності польоту та умов експлуатації дозволяє зменшити перевитрати енергії та подовжити термін служби акумуляторів. Додатково важливим є дотримання правил зберігання, заряджання та своєчасної утилізації батарей із залученням спеціалізованих систем переробки.

Суттєве значення має зменшення кількості повторних вильотів, які часто є наслідком недостатнього планування або помилок оператора. Використання сучасних програмних засобів моделювання маршрутів, а також підвищення рівня підготовки операторів FPV-БПЛА дозволяє зменшити кількість невдалих місій, що, у свою чергу, знижує сумарне енергоспоживання та екологічне навантаження.

Крім того, доцільним є раціональне використання компонентів БПЛА шляхом повторного застосування придатних елементів після завершення експлуатації апаратів. Це сприяє скороченню обсягів електронних відходів та зменшенню потреби у виробництві нових компонентів.

Таким чином, комплексне впровадження навігаційних, технічних та організаційних заходів дозволяє суттєво зменшити негативний вплив FPV-БПЛА на навколишнє середовище. Застосування аеронавігаційної підтримки як інструменту оптимізації польотів відповідає принципам сталого розвитку та сприяє більш екологічно відповідальному використанню безпілотних технологій.

4.3 Висновки до розділу 4

У розділі «Охорона навколишнього середовища» розглянуто екологічні аспекти застосування безпілотних літальних апаратів у цілому та FPV-БПЛА зокрема, а також проаналізовано вплив аеронавігаційної підтримки польотів на рівень екологічного навантаження. Проведений аналіз показав, що, незважаючи на відсутність прямих

викидів продуктів згоряння, БПЛА мають комплексний екологічний вплив, який формується на етапах виробництва, експлуатації та утилізації.

Встановлено, що застосування БПЛА загалом є більш екологічно доцільним порівняно з пілотованою авіацією за рахунок менших енергетичних витрат та зниженого рівня атмосферного забруднення. Водночас використання електронних компонентів і акумуляторних батарей створює потенційні ризики забруднення довкілля у разі втрати або неналежної утилізації апаратів.

Аналіз екологічних аспектів використання FPV-БПЛА показав, що для цього типу безпілотних систем характерні додаткові фактори екологічного навантаження, зокрема польоти на малих висотах, підвищена інтенсивність застосування та більша ймовірність втрати апаратів. Втрачені FPV-БПЛА разом з акумуляторами можуть залишатися в природному середовищі, створюючи довготривалі джерела потенційного забруднення. Таким чином, саме характер експлуатації FPV-БПЛА, а не їх технічні параметри, є визначальним чинником екологічного впливу.

У ході дослідження доведено, що аеронавігаційна підтримка польотів є ефективним інструментом зменшення негативного впливу FPV-БПЛА на довкілля. Раціональне планування маршрутів з урахуванням рельєфу, радіовидимості, метеорологічних умов та енергетичних можливостей апарата дозволяє знизити кількість аварійних ситуацій, скоротити кількість повторних вильотів і мінімізувати втрати БПЛА. Це, у свою чергу, зменшує обсяг електронних відходів та сумарне енергоспоживання.

Сформульовані у розділі методи мінімізації негативного впливу на довкілля підтверджують, що впровадження комплексного підходу до аеронавігаційної підтримки FPV-БПЛА відповідає принципам сталого розвитку. Поєднання технічних, організаційних і навігаційних заходів дозволяє не лише підвищити ефективність і безпеку польотів, а й забезпечити більш екологічно відповідальне використання безпілотних технологій.

Отримані результати свідчать про те, що зменшення кількості втрачених FPV-БПЛА та оптимізація маршрутів польоту є важливими факторами зниження

негативного впливу на навколишнє середовище. Таким чином, аеронавігаційна підтримка польотів FPV-БПЛА може розглядатися не лише як технічний елемент управління польотами, а і як складова екологічної безпеки сучасних безпілотних авіаційних систем..

РОЗДІЛ 5 ОХОРОНА ПРАЦІ

5.1. Вступ до розділу 5

Охорона праці є невід'ємною складовою безпечного та ефективного виконання робіт, пов'язаних із експлуатацією безпілотних літальних апаратів, зокрема FPV-БпЛА. В умовах сучасної складної ситуаційної обстановки, що характеризується наявністю техногенних, природних і організаційних ризиків, питання безпеки праці набувають особливої актуальності. Використання FPV-дронів передбачає роботу з електронними системами, джерелами живлення підвищеної потужності, радіоелектронним обладнанням та рухомими механічними елементами, що створює потенційні загрози для життя і здоров'я оператора.

Особливістю експлуатації FPV-БпЛА є поєднання фізичних, електричних та психофізіологічних навантажень на персонал. Оператор змушений працювати в умовах підвищеної концентрації уваги, обмеженого поля зору та високої відповідальності за результати виконання завдання. Крім того, у процесі підготовки й проведення польотів виникають ризики, пов'язані з використанням літєвих акумуляторів, можливістю втрати керування, падіння апарата та виникнення пожежонебезпечних ситуацій.

Умови застосування FPV-БпЛА, особливо в складній ситуаційній обстановці, вимагають чіткого дотримання правил охорони праці, організації безпечного робочого простору та впровадження комплексу профілактичних заходів. Нехтування вимогами безпеки може призвести не лише до пошкодження техніки, а й до травмування персоналу та негативного впливу на навколишнє середовище.

Метою даного розділу є аналіз основних небезпечних і шкідливих факторів, що виникають під час експлуатації FPV-БпЛА, а також визначення організаційних і технічних заходів, спрямованих на забезпечення безпечних умов праці. У межах розділу розглядаються питання підготовки персоналу, вимоги до організації робочого місця, особливості роботи з електронними компонентами та

аккумуляторними батареями, а також заходи щодо зменшення ризиків під час виконання польотних завдань.

Розгляд питань охорони праці у даній роботі спрямований на формування системного підходу до безпечної експлуатації FPV-БпЛА та створення умов, за яких виконання польотних завдань буде максимально ефективним і безпечним для людини та навколишнього середовища.

5.2. Небезпечні та шкідливі фактори під час експлуатації FPV-БпЛА

Експлуатація безпілотних літальних апаратів FPV-класу пов'язана з дією комплексу небезпечних і шкідливих факторів, які виникають у процесі підготовки, запуску, керування та завершення польоту. Ці фактори формуються внаслідок поєднання технічних особливостей апаратів, умов зовнішнього середовища та специфіки діяльності оператора. У складній ситуаційній обстановці їхній вплив значно посилюється, що вимагає особливої уваги до питань охорони праці.

Одним із основних джерел небезпеки є механічні фактори, пов'язані з рухомими частинами FPV-БпЛА. Під час роботи апарата пропелери обертаються з високою кутовою швидкістю, що створює ризик травмування у разі випадкового контакту. Особливо небезпечними є етапи підготовки до запуску та технічного обслуговування, коли оператор знаходиться у безпосередній близькості до апарата. Додаткову загрозу становить можливість втрати стійкості або керування під час польоту, що може призвести до падіння дрона та механічного ураження людей або пошкодження об'єктів інфраструктури.

Умови виконання польотів у складній місцевості суттєво підвищують рівень небезпеки. Перешкоди у вигляді будівель, дерев, ліній електропередач і нерівностей рельєфу створюють ризик зіткнення, особливо під час польотів на малих висотах. За таких умов навіть незначна помилка оператора або короткочасна втрата керування може призвести до аварійної ситуації.

Значну частку ризиків становлять електричні та пожежонебезпечні фактори. FPV-БпЛА зазвичай оснащуються літій-полімерними або літій-іонними

аккумуляторами, які мають високу енергоємність і чутливість до механічних пошкоджень, перегріву або неправильного режиму заряджання. Порушення умов експлуатації акумуляторів може спричинити коротке замикання, займання або вибух, що становить серйозну загрозу для здоров'я людини та безпеки навколишнього середовища. Особливо небезпечними є випадки займання акумуляторів у закритих приміщеннях або поблизу легкозаймистих матеріалів.

Додатковим джерелом небезпеки є використання електронних компонентів і силових ланцюгів, які працюють під високими навантаженнями. Пошкодження ізоляції, некоректне підключення або використання несертифікованих компонентів можуть призвести до ураження електричним струмом або виходу з ладу обладнання. У зв'язку з цим дотримання вимог електробезпеки є обов'язковою умовою безпечної експлуатації FPV-БпЛА.

Суттєвий вплив на безпеку має також радіоелектронне середовище. FPV-БпЛА повністю залежать від стабільності каналів керування та передачі відеосигналу. Порушення радіозв'язку, викликане рельєфом місцевості, техногенними перешкодами або дією засобів радіоелектронної боротьби, може призвести до втрати орієнтації апарата, неконтрольованого руху або аварійного завершення польоту. У таких умовах оператор змушений приймати рішення в обмежений проміжок часу, що підвищує ймовірність помилок і аварійних ситуацій.

Окремої уваги потребують психофізіологічні фактори, які безпосередньо впливають на ефективність і безпеку роботи оператора. Керування FPV-БпЛА потребує високої концентрації уваги, швидкої реакції та здатності обробляти значний обсяг візуальної інформації в реальному часі. Тривала напруга, обмежене поле зору, необхідність одночасного контролю кількох параметрів і відповідальність за результат виконання завдання призводять до втоми, зниження точності дій і збільшення ризику помилок.

Крім того, експлуатація FPV-БпЛА може мати непрямий вплив на навколишнє середовище. У разі аварійного падіння апарата можливе пошкодження ґрунту, рослинності або потрапляння в довкілля елементів акумуляторів та електронних

компонентів. Це зумовлює необхідність відповідального підходу до організації польотів і подальшої утилізації пошкодженого обладнання.

Таким чином, експлуатація FPV-БпЛА супроводжується комплексом взаємопов'язаних небезпечних і шкідливих факторів, які охоплюють механічні, електричні, радіоелектронні та психофізіологічні аспекти. Їх урахування є обов'язковою умовою забезпечення безпечної роботи персоналу, збереження технічних засобів і мінімізації негативного впливу на навколишнє середовище. Усвідомлення характеру цих факторів створює основу для розробки ефективних організаційних і технічних заходів, спрямованих на підвищення рівня охорони праці під час експлуатації FPV-БпЛА.

5.3. Організаційні та технічні заходи з охорони праці при виконанні FPV-польотів

Забезпечення безпечних умов праці під час експлуатації FPV-БпЛА потребує комплексного підходу, який поєднує організаційні та технічні заходи. Їх впровадження спрямоване на мінімізацію ризиків для персоналу, запобігання аварійним ситуаціям та зменшення ймовірності втрати технічних засобів у процесі виконання польотних завдань.

Організаційні заходи передбачають насамперед належну підготовку персоналу, регламентацію робочих процесів і дотримання визначених правил безпеки. До виконання польотів повинні допускатися лише особи, які пройшли відповідний інструктаж, володіють базовими знаннями з експлуатації FPV-БпЛА та усвідомлюють потенційні ризики, пов'язані з їх використанням. Особлива увага має приділятися психологічному стану оператора, оскільки підвищене емоційне навантаження, втома або зниження концентрації безпосередньо впливають на безпеку польоту.

Перед початком кожного вильоту необхідно виконувати комплекс підготовчих заходів, який включає перевірку технічного стану апарата, справності систем керування, якості з'єднань та рівня заряду акумуляторів. Обов'язковою є оцінка умов

навколишнього середовища, зокрема метеорологічних показників, рельєфу місцевості, наявності перешкод і потенційних джерел радіоелектронних завад. Такий підхід дозволяє зменшити ймовірність виникнення аварійних ситуацій ще до початку польоту.

Важливим елементом організаційних заходів є чітке визначення зон відповідальності. Робоча зона оператора повинна бути відокремлена від сторонніх осіб, а запуск і посадка FPV-БпЛА мають здійснюватися у заздалегідь визначених безпечних місцях. У разі виконання польотів у складних умовах доцільним є залучення допоміжного персоналу, який може здійснювати візуальний контроль обстановки та своєчасно попереджати про потенційні загрози.

Технічні заходи з охорони праці спрямовані на зниження ймовірності виникнення небезпечних ситуацій шляхом застосування технічно справних і перевірених засобів. До них належить використання якісних компонентів живлення, справних електричних з'єднань та надійних систем керування. Особливу увагу слід приділяти стану акумуляторів, які повинні зберігатися та експлуатуватися відповідно до встановлених вимог із дотриманням температурних режимів і правил заряджання.

З метою зменшення ризику пожежі доцільно використовувати вогнестійкі контейнери для транспортування акумуляторів, а також мати під рукою первинні засоби пожежогасіння. У разі виявлення ознак перегріву, деформації або пошкодження акумулятора його подальша експлуатація є неприпустимою.

Важливим елементом технічної безпеки є контроль за роботою радіоканалів і відеозв'язку. Перед польотом необхідно перевіряти стабільність сигналу, коректність налаштувань передавачів і відсутність сторонніх перешкод. У процесі виконання польоту оператор повинен постійно контролювати якість зв'язку та бути готовим до негайного припинення місії у разі його погіршення.

Окрему увагу слід приділяти організації дій у разі виникнення аварійної ситуації. Оператор має бути підготовлений до швидкого реагування у випадку втрати відеосигналу, порушення керування або технічної несправності. Наявність

заздалегідь визначеного алгоритму дій дозволяє зменшити негативні наслідки та підвищити рівень безпеки виконання польотів.

Завершальним елементом системи заходів з охорони праці є аналіз результатів виконаних польотів. Після завершення роботи доцільно проводити огляд обладнання, фіксувати виявлені несправності та оцінювати умови, що могли вплинути на безпеку. Такий підхід дозволяє своєчасно виявляти потенційні ризики та вдосконалювати організаційні й технічні рішення в майбутньому.

Таким чином, організаційні та технічні заходи з охорони праці є ключовим елементом безпечної експлуатації FPV-БпЛА. Їх комплексне впровадження забезпечує зниження рівня небезпеки, підвищення надійності виконання польотних завдань і збереження здоров'я персоналу в умовах складної ситуаційної обстановки.

5.4. Заходи безпеки у разі аварійних ситуацій та вплив експлуатації FPV-БпЛА на навколишнє середовище

Під час експлуатації FPV-БпЛА, особливо в умовах складної ситуаційної обстановки, зберігається ймовірність виникнення позаштатних та аварійних ситуацій. Вони можуть бути спричинені технічними відмовами, нестабільністю радіоканалів керування й відеопередачі, помилками оператора, несприятливими метеоумовами або зовнішніми впливами. З огляду на це система охорони праці має передбачати не лише профілактичні заходи (перевірки, регламенти, інструктажі), а й чітко визначені принципи безпечних дій під час аварії та порядок реагування після події.

До найбільш типових позаштатних ситуацій під час польотів FPV-БпЛА належать: різке погіршення або втрата відеосигналу; деградація каналу керування; зростання затримки сигналу; раптові зміни траєкторії через перешкоди, пориви вітру або помилку керування; відмова силової частини чи живлення; а також аварійне приземлення або падіння апарата. Кожна з цих ситуацій створює ризики як для безпеки персоналу, так і для оточуючих об'єктів та навколишнього середовища, тому повинна розглядатися як частина ризик-орієнтованого підходу до охорони праці.

Ключовим фактором аварійності FPV-польотів є залежність апарата від стійкості радіоканалів. У разі втрати відеосигналу оператор фактично позбавляється основного джерела інформації для орієнтації та контролю траєкторії. Втрата або деградація каналу керування призводить до неможливості впливати на політ, що підвищує ймовірність неконтрольованого падіння або зіткнення з перешкодами. Тому під час виконання польотів важливим є завчасне визначення зон потенційної втрати зв'язку та обмеження маршруту ділянками, де ризик радіозатінення є мінімальним. Окрему увагу необхідно приділяти вибору місць запуску та розміщенню обладнання, щоб уникнути присутності сторонніх осіб у небезпечній зоні.

У разі виникнення позаштатної ситуації пріоритетом є забезпечення безпеки людей. Реагування має базуватися на принципі мінімізації наслідків: уникнення польоту над людьми або об'єктами з високою цінністю; зниження швидкості та припинення різких маневрів; спроба стабілізувати апарат при появі ознак нестабільності зв'язку; оцінка можливості безпечного завершення польоту. У випадках, коли ситуація не дозволяє відновити контроль, доцільним є максимально швидке завершення польоту із мінімальним ризиком для оточення. Важливо підкреслити, що безпека персоналу є пріоритетною порівняно із збереженням техніки.

Окремим небезпечним сценарієм є аварійні події, пов'язані з акумуляторними батареями. Пошкодження LiPo/Li-ion батареї внаслідок падіння, проколу, деформації або перегріву здатне спричинити тепловий розгін, займання або виділення токсичних продуктів горіння. Саме тому після аварійного приземлення або падіння FPV-БпЛА необхідно розглядати акумулятор як потенційне джерело вторинної небезпеки. З позиції охорони праці критично важливими є: недопущення контакту персоналу з пошкодженими елементами без оцінки їх стану; відсутність спроб повторного підключення живлення; застосування безпечних методів ізоляції та подальшого вилучення батарей із зони події відповідно до встановлених процедур підприємства або підрозділу.

Післяаварійні заходи також повинні включати оцінку технічного стану апарата та обладнання, що використовувалося для керування. Важливо перевіряти: справність силової проводки, стан роз'ємів, наявність слідів перегріву, ушкодження корпусу, пропелерів, антенно-фідерної системи та кріплень. Такі перевірки дозволяють виявити приховані дефекти, які можуть стати причиною наступних аварій. Додатково доцільним є документування факту аварії: короткий опис умов польоту, характеру відмови, місця події та прийнятих дій. Це формує основу для подальшого аналізу ризиків і вдосконалення технічних та організаційних заходів.

Важливою складовою розгляду аварійних ситуацій є екологічний аспект. Падіння FPV-БпЛА може спричинити механічне пошкодження ґрунтового покриву, рослинності та природних об'єктів, а у разі займання — локальне забруднення продуктами горіння та вторинне пошкодження території. Найбільший довготривалий негативний вплив пов'язаний із залишенням на місцевості акумуляторів або частин електронних модулів. Акумулятори, що тривалий час перебувають у природному середовищі, поступово деградують і можуть становити джерело небажаного впливу на ґрунт та екосистему. У зв'язку з цим мінімізація екологічних наслідків передбачає організацію заходів зі збору та вилучення уламків апарата після аварії, а також забезпечення подальшої утилізації компонентів (насамперед батарей) відповідно до вимог безпеки.

Окремо слід зазначити психофізіологічний фактор після аварійної ситуації. Позаштатна подія підвищує емоційну напругу оператора, що може призводити до зниження якості прийняття рішень у наступних польотах. Тому доцільним є впровадження практики короткого післяаварійного розбору: оцінка причин, обговорення правильності дій, формування коригувальних заходів та відновлення працездатності персоналу. Такий підхід сприяє підвищенню культури безпеки та зменшенню повторюваності аварійних випадків.

Таким чином, система охорони праці під час експлуатації FPV-БпЛА повинна включати не лише профілактичні заходи, але й комплекс дій у разі аварійних ситуацій, що охоплює забезпечення безпеки людей, контроль пожежонебезпечних

ризиків, післяаварійний технічний огляд, документування події та мінімізацію негативного впливу на навколишнє середовище. Ґрунтовне врахування цих аспектів забезпечує підвищення рівня безпеки праці та зменшує загальні ризики під час виконання FPV-польотів.

5.5. Висновки до розділу 5

У межах даного розділу було комплексно розглянуто питання охорони праці під час експлуатації FPV-БпЛА в умовах складної ситуаційної обстановки. Проведений аналіз дозволив встановити, що безпечне виконання польотних завдань безпосередньо залежить від урахування сукупності технічних, організаційних, психофізіологічних та екологічних чинників, які формують загальний рівень ризику під час роботи з безпілотними літальними апаратами.

У процесі дослідження встановлено, що основні небезпеки під час експлуатації FPV-БпЛА пов'язані з дією механічних факторів, електричних навантажень, нестабільності каналів керування та передачі відеосигналу, а також із психофізіологічним навантаженням на оператора. Поєднання цих факторів значно підвищує ймовірність виникнення аварійних ситуацій, особливо в умовах обмеженої видимості, складного рельєфу місцевості та впливу радіоелектронних завад.

Встановлено, що важливу роль у забезпеченні безпеки відіграє чітка організація робочого процесу, яка передбачає підготовку персоналу, перевірку технічного стану обладнання, дотримання регламентів експлуатації та контроль умов виконання польоту. Наявність визначених процедур дій у штатних і нештатних ситуаціях дозволяє знизити рівень ризику та підвищити ефективність прийняття рішень оператором у критичних умовах.

Окрему увагу в межах розділу приділено аварійним ситуаціям і наслідкам їх виникнення. Показано, що аварії FPV-БпЛА можуть призводити не лише до втрати технічних засобів, але й створювати загрозу для життя та здоров'я людей, а також негативно впливати на навколишнє середовище. Особливо небезпечними є ситуації, пов'язані з пошкодженням акумуляторних батарей, які здатні спричинити займання

та забруднення довкілля. У зв'язку з цим наголошується на необхідності дотримання правил поводження з акумуляторами, їх своєчасної утилізації та мінімізації екологічних наслідків експлуатації FPV-БпЛА.

У результаті проведеного аналізу підтверджено, що ефективна система охорони праці повинна ґрунтуватися на поєднанні організаційних, технічних і профілактичних заходів. Такий підхід дозволяє не лише зменшити ймовірність аварійних ситуацій, а й забезпечити стабільність та безпеку виконання польотних завдань у складних умовах експлуатації. Важливим чинником при цьому є формування відповідальної культури безпеки серед персоналу, що передбачає усвідомлення ризиків, дотримання встановлених вимог і постійне підвищення рівня професійної підготовки.

Таким чином, результати, отримані у даному розділі, підтверджують, що охорона праці є невід'ємною складовою ефективного застосування FPV-БпЛА. Її належна організація сприяє зниженню техногенних і людських ризиків, підвищенню надійності виконання завдань та формуванню безпечних умов праці в процесі експлуатації безпілотних авіаційних систем. Отримані висновки доповнюють загальну концепцію роботи та створюють основу для практичного впровадження розроблених підходів у реальних умовах застосування FPV-БпЛА.факторів.

ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК

У процесі виконання даної магістерської роботи було здійснено комплексне дослідження особливостей аеронавігаційної підтримки польотів FPV-БпЛА в умовах складної ситуаційної обстановки. Актуальність обраної теми зумовлена стрімким розвитком безпілотних авіаційних технологій та їх широким застосуванням у середовищах, де традиційні методи навігації є малоефективними або повністю непридатними. У таких умовах підвищується значення правильного планування маршрутів, стабільності зв'язку, оперативного прийняття рішень та забезпечення безпеки виконання польотних завдань.

У ході дослідження було встановлено, що FPV-БпЛА суттєво відрізняються від класичних безпілотних літальних апаратів за принципами навігації та управління. Вони функціонують у режимі постійної взаємодії оператора з бортовими системами, що робить їх особливо чутливими до змін рельєфу, радіоелектронної обстановки та якості відеозв'язку. Саме ця особливість зумовлює необхідність застосування специфічних підходів до аеронавігаційної підтримки, які поєднують технічні, аналітичні та організаційні рішення.

У межах роботи було проаналізовано вплив рельєфу місцевості, штучних перешкод і зон обмеженої радіовидимості на можливість виконання польотів. Доведено, що правильний вибір маршруту, висоти польоту та місць розташування ретрансляторів безпосередньо впливає на стабільність керування та успішність виконання завдання. Особливу увагу приділено використанню програмних засобів для моделювання маршрутів, які дозволяють заздалегідь оцінити ризики, пов'язані з рельєфом і умовами поширення радіосигналу, та зменшити ймовірність втрати апарата.

Значну увагу в роботі приділено аналізу технічних і експлуатаційних факторів, що впливають на безпеку польотів FPV-БпЛА. Розглянуто вплив енергетичних обмежень, стану акумуляторних батарей, стабільності каналів керування та відеопередачі, а також особливостей взаємодії між оператором і безпілотним апаратом. Показано, що навіть незначні відхилення у роботі систем можуть призвести

до критичних наслідків, що потребує підвищеної уваги до технічного стану обладнання та рівня підготовки персоналу.

Окреме місце в дослідженні відведено питанням охорони праці та безпеки експлуатації FPV-БпЛА. Установлено, що ризики мають комплексний характер і включають механічні, електричні, радіоелектронні та психофізіологічні чинники. У роботі обґрунтовано необхідність системного підходу до організації безпечної роботи, який передбачає поєднання організаційних заходів, технічних рішень та заходів з підвищення обізнаності й підготовки персоналу. Особливу увагу приділено діям у разі виникнення аварійних ситуацій, що дозволяє зменшити наслідки для людей, техніки та навколишнього середовища.

У процесі дослідження також проаналізовано екологічні аспекти застосування FPV-БпЛА. Встановлено, що аварійні ситуації можуть призводити до локального забруднення навколишнього середовища, особливо у випадках пошкодження акумуляторних батарей або елементів електроніки. У зв'язку з цим підкреслено важливість відповідального поводження з технічними засобами, своєчасного вилучення уламків і дотримання принципів екологічної безпеки під час експлуатації безпілотних систем.

Узагальнюючи результати виконаної роботи, можна стверджувати, що ефективна аеронавігаційна підтримка FPV-БпЛА є багатокомпонентним процесом, який поєднує технічні, організаційні, аналітичні та безпекові аспекти. Її реалізація потребує системного підходу, високого рівня підготовки персоналу та постійного вдосконалення методів планування й контролю польотів.

Отримані в роботі результати мають практичну цінність та можуть бути використані під час підготовки операторів FPV-БпЛА, у процесі планування польотних завдань, а також під час подальших наукових досліджень у галузі безпілотної авіації. Запропоновані підходи сприяють підвищенню рівня безпеки, ефективності та надійності застосування FPV-БпЛА в умовах складної ситуаційної обстановки.

Таким чином, проведене дослідження підтверджує доцільність комплексного підходу до організації аеронавігаційної підтримки FPV-БпЛА та демонструє практичну значущість отриманих результатів для подальшого розвитку сучасних безпілотних авіаційних систем.

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. *International Civil Aviation Organization. Global Air Navigation Plan.* — Montreal : ICAO, 2016. — 132 p.
2. *International Civil Aviation Organization. Environmental Protection and Aviation.* — Montreal : ICAO, 2019. — 98 p.
3. *International Civil Aviation Organization. Environmental Trends in Aviation.* — Montreal : ICAO, 2022. — 76 p.
4. *European Union Aviation Safety Agency. Environmental protection in aviation.* — Cologne : EASA, 2020. — 64 p.
5. *European Union Aviation Safety Agency. UAS Operations and Environmental Sustainability.* — Cologne : EASA, 2021. — 58 p.
6. *European Union Aviation Safety Agency. Environmental Best Practices for Drone Operations.* — Cologne : EASA, 2022. — 47 p.
7. *Federal Aviation Administration. Unmanned Aircraft Systems (UAS) Environmental Considerations.* — Washington : FAA, 2018. — 52 p.
8. *Federal Aviation Administration. UAS Traffic Management and Environmental Impact.* — Washington : FAA, 2021. — 61 p.
9. *Austin R. Unmanned Aircraft Systems: UAVS Design, Development and Deployment.* — Chichester : John Wiley & Sons, 2010. — 372 p.
10. *Valavanis K. P., Vachtsevanos G. J. Handbook of Unmanned Aerial Vehicles.* — Dordrecht : Springer, 2015. — 3020 p.
11. *Beard R. W., McLain T. W. Small Unmanned Aircraft: Theory and Practice.* — Princeton : Princeton University Press, 2012. — 312 p.
12. *Kaplan E. D., Hegarty C. J. Understanding GPS/GNSS: Principles and Applications.* — Boston : Artech House, 2017. — 880 p.
13. *Anderson J. D. Introduction to Flight.* — New York : McGraw-Hill Education, 2016. — 832 p.
14. *Clothier R. A., Greer D. A., Greer D. G., Mehta A. M. Risk perception and the public acceptance of drones // Risk Analysis.* — 2015. — Vol. 35, No. 6. — P. 1167–1183.

15. Dalamagkidis K., Valavanis K. P., Piegl L. A. *On Integrating Unmanned Aircraft Systems into the National Airspace System*. — Dordrecht : Springer, 2012. — 286 p.
16. Watts A. C., Ambrosia V. G., Hinkley E. A. *Unmanned aircraft systems in remote sensing and scientific research // Remote Sensing*. — 2012. — Vol. 4, No. 6. — P. 1671–1692.
17. Dunn J. B., Gaines L., Sullivan J., Wang M. *Impact of recycling on cradle-to-gate energy consumption and greenhouse gas emissions of lithium-ion batteries // Environmental Science & Technology*. — 2012. — Vol. 46, No. 22. — P. 12704–12710.
18. Dunn J. B., Gaines L. *Lithium-ion battery recycling and sustainability // Renewable and Sustainable Energy Reviews*. — 2017. — Vol. 71. — P. 692–703.
19. United Nations. *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*. — New York : United Nations, 2015. — 41 p.
20. Federal Aviation Administration. *UAS Noise and Environmental Impact Considerations*. — Washington : FAA, 2020. — 48 p.

ДОДАТКИ

Додаток А.1.

Схеми взаємодії наземної станції, повітряного ретранслятора та FPV-БПЛА

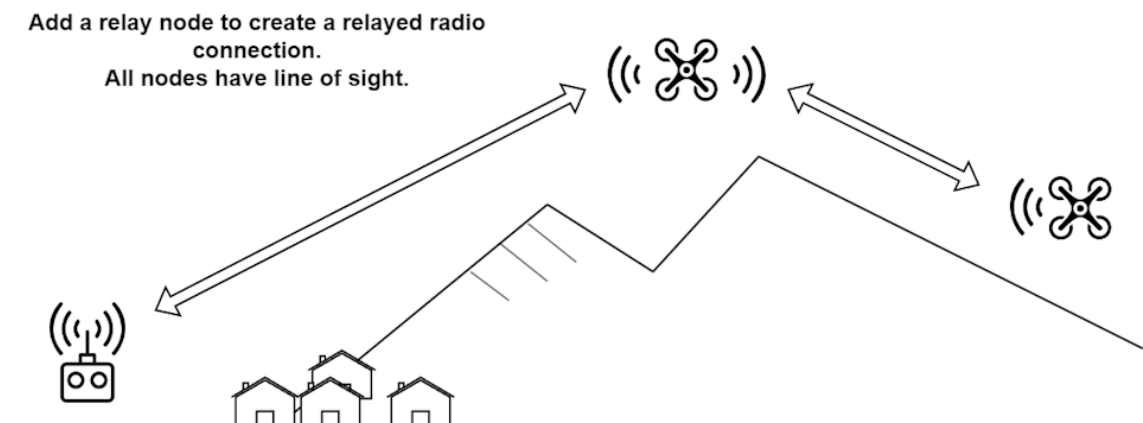


Рисунок А.1 — Схематичне представлення радіозв'язку FPV-БПЛА з використанням повітряного ретранслятора

На рисунку А.1 наведено узагальнену функціональну схему організації радіозв'язку між наземною станцією оператора та FPV-БПЛА з використанням повітряного ретранслятора. Схема ілюструє принцип побудови каналу керування та відеопередачі за умов обмеженої прямої радіовидимості між оператором і безпілотним літальним апаратом.

Наземна станція оператора розташована на рівні земної поверхні та здійснює передачу команд керування. Через наявність рельєфних перешкод і забудови пряма лінія видимості між оператором і FPV-БПЛА відсутня. Для забезпечення стабільного зв'язку в систему вводиться повітряний ретранслятор, розміщений на підвищеній висоті таким чином, щоб забезпечити пряму радіовидимість (LOS) як із наземною станцією, так і з FPV-БПЛА.

Повітряний ретранслятор виконує функцію проміжного вузла зв'язку, приймаючи сигнал керування від оператора та передаючи його FPV-БПЛА, а також

забезпечуючи зворотну ретрансляцію відеосигналу від борта до наземної станції. Така організація зв'язку дозволяє компенсувати негативний вплив рельєфу місцевості, підвищити дальність стійкого керування та зменшити ймовірність втрати відеоканалу під час виконання польотного завдання.

Схема має узагальнений характер і може бути застосована для різних конфігурацій FPV-БПЛА незалежно від їх розмірів, типу рами чи дальності польоту. Вона наочно відображає принцип побудови ретрансляційного каналу, що широко використовується при виконанні FPV-польотів у складній ситуаційній обстановці.

Ілюстрацію використано з відкритого джерела:
<https://ardupilot.org/copter/docs/common-telemetry-radio.html>

Додаток Б.1.

Узагальнена таблиця факторів впливу на вибір маршруту

Таблиця Б.1 містить узагальнений перелік факторів, які впливають на вибір маршруту польоту FPV-БПЛА в умовах складної ситуаційної обстановки. Наведена систематизація дозволяє враховувати навігаційні, технічні, метеорологічні та тактичні чинники під час прийняття рішення щодо оптимального маршруту польоту.

Таблиця Б.1 Фактори впливу на вибір маршруту

№	Фактор	Характер впливу на маршрут	Практичне значення при плануванні
1	Рельєф місцевості	Формує обмеження прямої радіовидимості (LOS), створює «тіні» сигналу	Визначає необхідність обльоту пагорбів або використання повітряного ретранслятора
2	Пряма радіовидимість (LOS)	Є критичною умовою стабільного керування та відеозв'язку	За відсутності LOS маршрут вважається непридатним без ретрансляції
3	Використання повітряного ретранслятора	Розширює зону зв'язку та компенсує вплив рельєфу	Дозволяє реалізувати маршрути, недосяжні при прямому або обхідному польоті
4	Дальність до цілі	Впливає на витрати енергії та допустимі режими польоту	Обмежує вибір маршруту залежно від ємності акумулятора та навантаження
5	Метеорологічні умови (вітер)	Змінюють енергоспоживання під час польоту	Попутний вітер зменшує витрати енергії, зустрічний — зменшує дальність

6	Температура навколишнього середовища	Впливає на фактичну ємність акумуляторів	За низьких температур зменшується реальна дальність польоту
7	Радіоелектронна обстановка (РЕБ)	Може спричиняти втрату керування або відеосигналу	Потребує корекції маршруту та обходу зон активного подавлення
8	Висота польоту FPV-БПЛА	Впливає на радіовидимість та помітність апарата	Занадто велика висота підвищує ризик виявлення
9	Розмір і тип FPV-БПЛА	Визначає аеродинаміку та енергоспоживання	Впливає на доцільність вибору прямого чи обхідного маршруту
10	Маса корисного навантаження	Збільшує витрати енергії та знижує маневреність	Обмежує дальність і складність маршруту
11	Візуальна помітність маршруту	Підвищує або знижує ймовірність виявлення	Обхідні маршрути на малій висоті можуть бути тактично вигіднішими
12	Складність керування для оператора	Впливає на ризик помилок під час польоту	Надмірно складні маршрути знижують імовірність успішного виконання завдання

Наведена таблиця може бути використана як допоміжний інструмент при плануванні маршрутів FPV-БПЛА та прийнятті навігаційних рішень у практичних умовах.