Міністерство освіти і науки України

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет комп’ютерної інженерії та управління
(повна назва)

Кафедра електронних обчислювальних машин
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Пояснювальна записка

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Методи передачі даних між високомобільними БПЛА в умовах потужного електромагнітного випромінення

(тема)

Виконав:

студент II курсу, групи СПм-22-1

Горбань Д. О.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність

123 «Комп’ютерна інженерія»
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма

Системне програмування
(повна назва освітньої програми)

Керівник: доц. Ткачов В. М.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри ЕОМ _____ Коваленко А.А.
(підпис) (прізвище, ініціали)

2024 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет комп'ютерної інженерії та управління

Кафедра електронних обчислювальних машин

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»
(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Системне програмування
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Зав. кафедри _____
(підпис)
"____"_____ 20___ р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студенту Горбаню Дмитру Олександровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Методи передачі даних між високомобільними БПЛА в умовах потужного електромагнітного випромінювання

затверджена наказом по університету від "06" листопада 2023 р. № 1299 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 15 січня 2024 р.

3. Вхідні дані до роботи 1) безпілотні летальні апарати; 2) методи передачі даних; 3) алгоритми та ефективність передачі даних.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати у роботі
1) огляд основ передачі даних;
2) аналіз основних каналів та методів передачі даних;
3) проектування апаратної частини;
4) реалізація концепції;
5) висновки.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) Слайд-презентація – 12 слайдів; Детальна схема роботи пристрою

6. Консультанти розділів роботи (заповнюється за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд теоретичних основ передачі даних	07.11.23-15.11.23	
2	Аналіз методів передачі даних в умовах	16.11.23-26.11.23	
	електромагнітного випромінювання		
3	Вибір методів захисту від електромагнітного	27.11.23-05.12.23	
	випромінювання		
4	Оцінка надійності та ефективності методів	06.12.23-10.12.23	
5	Проектування апаратної частигни	11.12.23-25.12.23	
6	Оформлення матеріалів кваліфікаційної роботи	26.12.23-04.01.24	
7	Подання кваліфікаційної роботи керівникові та	05.01.24-09.01.24	
	її попередній захист		
8	Подання кваліфікаційної роботи на рецензу-	10.01.24-12.01.24	
	вання		

Дата видачі завдання 06 листопада 2023 р.

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____ доц. Ткачов В. М.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 112 с., 16 рис., 23 табл., 2 дод., 15 джерел.

БЕЗПІЛОТНИЙ ЛІТАЛЬНИЙ АПАРАТ, ПЕРЕДАЧА ДАНИХ, ЕЛЕКТРОМАГНІТНЕ ВИПРОМІНЕННЯ, МОДУЛІ, АПАРАТНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ, АЛГОРИТМ, НАДІЙНІСТЬ, ЕФЕКТИВНІСТЬ.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка та аналіз системи передачі даних для безпілотних літальних апаратів, з акцентом на адаптацію до складних умов, включаючи вплив сильного електромагнітного випромінення. Робота спрямована на поліпшення надійності та ефективності комунікаційних систем БПЛА в різних умовах експлуатації.

У ході виконання кваліфікаційної роботи було проведено глибоке дослідження теоретичних аспектів передачі даних в БПЛА, включаючи аналіз класифікації безпілотних апаратів та вивчення їх комунікаційних систем. Особлива увага приділялася вивченню впливу електромагнітного випромінення на передачу даних та розробці методів захисту від цих впливів. Було розроблено та аналізовано різні сценарії використання БПЛА у складних умовах, з оцінкою надійності та ефективності передачі даних. Проект також включав розробку апаратної частини та вибір оптимальних електронних компонентів, що відповідають високим вимогам до стабільності та ефективності системи.

ABSTRACT

Master's thesis : 112 pages, 16 figures, 23 tables, 2 appendices, 15 sources.

UNMANNED AERIAL VEHICLE, DATA TRANSMISSION, ELECTROMAGNETIC RADIATION, MODULES, HARDWARE, ALGORITHM, RELIABILITY, EFFICIENCY.

The major goal of this thesis is to develop and analyze a data transmission system for unmanned aerial vehicles, focusing on adaptation to challenging conditions, including the impact of strong electromagnetic radiation. The work is aimed at improving the reliability and efficiency of UAV communication systems in various operating conditions.

In order to complete the thesis, an in-depth study of the theoretical aspects of data transmission in unmanned aerial vehicles (UAVs) was conducted. This included analyzing the classification of UAVs and examining their communication systems. Special attention was given to studying the impact of electromagnetic radiation on data transmission and developing methods to protect against these effects. Various scenarios for the use of UAVs in challenging conditions were developed and analyzed, with an assessment of the reliability and efficiency of data transmission. The project also involved the development of the hardware part and the selection of optimal electronic components that meet the high demands for the stability and efficiency of the system.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ 8
ВСТУП 9
1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ В БПЛА 11
1.1 Класифікація безпілотних літальних апаратів 11
1.2 Системи передачі даних в БПЛА 14
1.3 Особливості високомобільних БПЛА 16
1.4 Електромагнітне випромінення як фактор, що впливає на передачу даних 17
1.5 Огляд існуючих методів виявлення високомобільних БПЛА 19
1.6 Методи захисту від електромагнітних впливів 23
1.6.1 Фізичний рівень захисту 24
1.6.2 Кодовий рівень захисту 25
1.6.3 Протокольний рівень захисту 26
1.6.4 Алгоритмічний рівень захисту 27
Висновок до розділу 28
2 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ В УМОВАХ ПОТУЖНОГО ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЕННЯ 30
2.1 Аналіз основних каналів зв’язку БПЛА 30
2.2 Аналіз передачі даних в різних сценаріях електромагнітного випромінення 34
2.3 Оцінка надійності та ефективності різних методів 37
Висновок до розділу 38
3 ПРОЕКТУВАННЯ АПАРАТНОЇ ЧАСТИНИ 39
3.1 Обговорення архітектурних рішень 39
3.2 Вивчення структурної організації 43
3.3 Селекція електронних елементів 46

3.4 Оцінка фізичних параметрів системи 58
3.5 Вибір методів електричної інтеграції та дизайн корпусу 64
3.6 Опції кріплення на аеродинамічну платформу 66
3.7 Процедурна логіка пристрою 70
3.8 Характеристика програмного забезпечення 72
3.9 Серверна інфраструктура 73
3.10 Аналіз теплового стану та оцінка вібраційної стійкості 75
Висновок до розділу 77
4 РЕАЛІЗАЦІЯ СТАРТАП-КОНЦЕПЦІЇ 79
4.1 Презентація концептуальної ідеї 79
4.2 Вивчення техніко-економічних аспектів 80
4.3 Оцінка технологічної виправданості 81
4.4 Дослідження ринкового потенціалу 83
4.5 Ідентифікація цільових аудиторій 84
4.6 Стратегічне планування ринкової діяльності 91
Висновок до розділу 94
ВИСНОВКИ 95
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ 97
ДОДАТОК А Графічний матеріал кваліфікаційної роботи 99
ДОДАТОК Б Детальна схема роботи пристрою 106
ДОДАТОК В Детальні розрахунки роботи пристрою 107

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

БПЛА - Безпілотний літальний апарат

LTE - Long Term Evolution, стандарт мобільного зв'язку

Wi-Fi - Wireless Fidelity, технологія бездротового зв'язку

LoRa - Long Range, технологія для передачі даних на великі відстані

GCS - Ground Control Station, наземна контрольна станція

ECMAScript - мова програмування для створення сценаріїв веб-сторінок

IP-адреса - Internet Protocol Address, унікальна адреса в мережі Інтернет

ВСТУП

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) застосовуються в різних сферах діяльності — від агрокультури та картографування до військових операцій. Однак їхнє ефективне використання у складних умовах, таких як висока мобільність та потужне електромагнітне випромінення, залишається відкритим питанням. Взаємодія між високомобільними БПЛА може бути суттєво знижена внаслідок впливу електромагнітних полів на радіокомунікаційні системи. Це може призвести до втрати керування, зниження точності передачі даних і, як наслідок, до ризику зіткнення та інших надзвичайних ситуацій.

Розв'язання цієї проблеми критично важливе для забезпечення надійності та ефективності роботи БПЛА в умовах, що характерні для сучасних бойових дій, промислових процесів та аварійних ситуацій. Необхідність забезпечення стійкої комунікації між БПЛА в таких умовах стає одним із ключових викликів для відповідних наукових та інженерних дисциплін.

Попередні дослідження в основному фокусувалися на методах передачі даних в стандартних умовах, але є відносна нестача робіт, що вивчають взаємодію БПЛА в умовах потужного електромагнітного випромінення. Враховуючи ростучий інтерес до використання БПЛА в різних сферах, ця проблема вимагає невідкладного наукового вивчення.

Проблема передачі даних між високомобільними БПЛА в умовах потужного електромагнітного випромінення є вкрай актуальною. По-перше, це обумовлено стрімким розвитком технологій БПЛА та їхньою інтеграцією в сучасні системи управління та збору даних. По-друге, сучасні військові конфлікти та надзвичайні ситуації часто відзначаються високим рівнем електромагнітних завад, що ставить під загрозу ефективність використання БПЛА. По-третє, для України, яка стоїть перед викликами в оборонній сфері

та аспіраціями до інноваційного розвитку, це дослідження може стати ключовим у забезпеченні національної безпеки та технологічної конкурентоспроможності.

В умовах зростання числа сценаріїв використання БПЛА, а також збільшення потенційних джерел електромагнітних завад, питання передачі даних між високомобільними БПЛА стає все більш нагальним. Отже, наукове дослідження цієї проблеми є не тільки актуальним, але і необхідним для подальшого прогресу в цій області.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка та аналіз системи передачі даних для БПЛА, з акцентом на адаптацію до складних умов, включаючи вплив сильного електромагнітного випромінення. Для досягнення поставленої мети, необхідно вирішити наступні задачі:

- систематизувати та аналізувати існуючі методи та технології передачі даних в БПЛА, з фокусом на особливостях високомобільних апаратів та впливі електромагнітного випромінення;
- вивчити та оцінити ефективність різних методів передачі даних між БПЛА в умовах високого рівня електромагнітних завад;
- на основі аналізу розробити архітектурні та технічні рішення для апаратної частини системи передачі даних, яка б буде стійкою до електромагнітних впливів;
- розробити та презентувати концепцію комерційної реалізації розробленої системи, включаючи техніко-економічні аспекти, оцінку ринкового потенціалу та стратегічне планування.

Об'єктом даного дослідження є системи передачі даних в безпілотних літальних апаратах. Ці системи є важливою складовою для забезпечення ефективної взаємодії та управління БПЛА в різних умовах експлуатації, включаючи сценарії з високим рівнем електромагнітного випромінення. Проблемна ситуація полягає в тому, що стандартні методи та технології передачі даних можуть бути неефективними або ненадійними в таких умовах.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ В БПЛА

1.1 Класифікація безпілотних літальних апаратів

Безпілотний літальний апарат, відомий також як UAV або дрон, це аеродинамічна платформа, яка може злітати, виконувати польоти та приземлятися без необхідності фізичного присутнього пілота на борту. Ці апарати можуть бути керовані на відстані людським оператором як віддалено пілотовані літальні апарати (RPA), або ж можуть працювати з різними рівнями автономії — від часткового керування автопілотом до повністю автономних режимів, що не вимагають людського втручання.

БПЛА мають ряд переваг перед пілотованою авіацією, включаючи відсутність потреби в екіпажі та системах життєзабезпечення, а також в аеродромах. Їх відносно невелика вартість та низькі експлуатаційні витрати, разом із компактними розмірами, високою надійністю, здатністю до тривалих польотів на великі відстані та гнучкістю у виборі обладнання, роблять їх вельми привабливими. БПЛА знаходять застосування в різних сферах, і в деяких з них вони є неперевершеними, не маючи пілотованих альтернатив. Це підкреслює їхню широку застосовність та великий спектр задач, які можна перед ними поставити .

Технологічність БПЛА сприяє їхній різноманітності, яка виражається у численних ознаках, класифікуючи різні види цих апаратів. Із зростанням сфер застосування БПЛА росте і кількість цих ознак. Сучасні системи класифікації не можуть охопити всю гаму існуючих на сьогоднішній день видів БПЛА, що свідчить про динамічний характер їх розвитку. Одним із найбільш обіцяючих напрямків є використання БПЛА для логістики, зокрема для доставки товарів. Вибір типу БПЛА, що максимально відповідає потребам доставки в конкретних умовах та з урахуванням специфічних

характеристик, може значно оптимізувати та автоматизувати процес перевезення вантажів [1].

Для практичної реалізації та розроблення БПЛА ключовим є аспект їх систематизації та класифікації (рисунок 1.1).

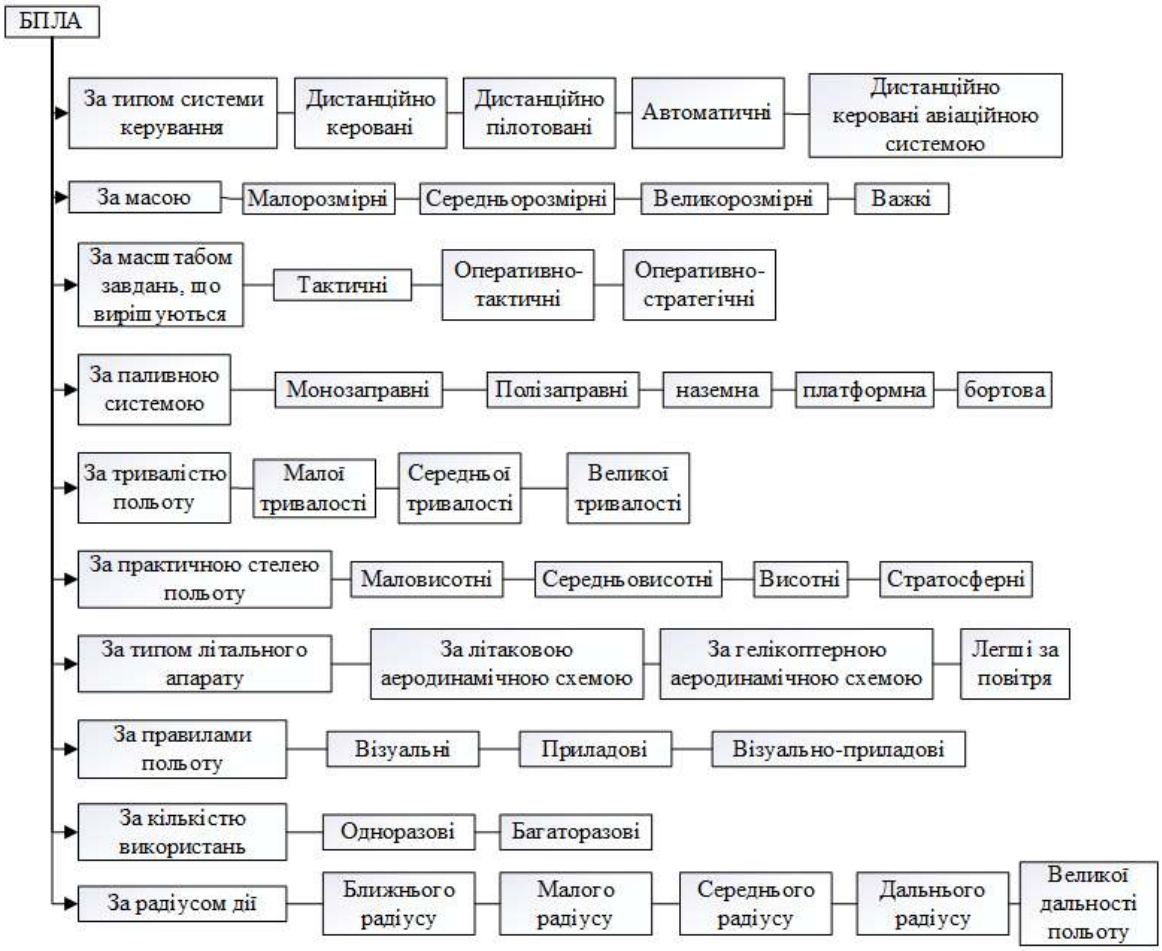

Рисунок 1.1 – Класифікація БПЛА

Згідно з рисунком 1.1, основними критеріями для класифікації є такі параметри, як: система управління, маса, сфера завдань, паливна система, тип крила, тривалість польоту, висотні характеристики, базування, законодавчі норми, частота використання, паливна ємність, радіус дії, максимальна швидкість, кількість двигунів, сфера застосування, механізми зльоту та посадки, а також швидкість обробки зібраної інформації.

Тип системи управління відіграє ключову роль у визначенні виду БПЛА. Так, дистанційно пілотовані моделі керуються оператором через

наземну станцію та забезпечені каналом для передачі даних в реальному часу, який може функціонувати через супутниковий зв'язок із швидкістю до 50 Мбіт/с. Автономні БПЛА можуть бути керовані дистанційно, але в основному виконують завдання за допомогою вбудованих систем автоматичного пілотування, включаючи GPS, гіроскопи, акселерометри та різні датчики. Це дозволяє їм ефективно працювати в режимі реального часу та передавати дані з частотою 1 МГц.

Керовані з використанням вбудованих систем, як-то UASAnalizer, дистанційно керовані авіаційні системи є ще одним типом БПЛА, який важливий для розгляду.

Опираючись на вищеописану класифікацію, можна визначити оптимальні параметри БПЛА для здійснення доставки товарів в конкретних географічних межах. Цивільні БПЛА, призначені для перевезення невеликих вантажів до 100 кг, видаються найбільш підходящими для цього завдання. Тактичні БПЛА з масою до 600 кг і розмірами не більше 3х3 метрів також можуть бути ефективно використані для перевезення різноманітних товарів.

Відносно низькі висоти польоту є більш доцільними для таких операцій, оскільки вони не вимагають додаткових витрат пального для набору висоти і менш піддаваються впливу сильних вітрів. Ці БПЛА, як правило, базуються на землі і використовуються для коротших відстаней між населеними пунктами, що дозволяє оптимізувати використання складських мереж.

Вартісний аспект також є важливим: оптимальні для цієї задачі БПЛА повинні бути економічно ефективними, надійними та придатними для многоразового використання. Швидкість цих БПЛА може бути обмежена до 100 км/год, оскільки вони працюють на коротких відстанях.

Інші класифікаційні характеристики, такі як система управління, тип палива, кількість двигунів або методи зльоту та посадки, не мають критичного значення в контексті цивільної доставки товарів, оскільки їх

технічні особливості не суттєво впливають на ефективність доставки при налагодженій логістичній схемі.

Сфера використання БПЛА активно розширюється, і одним з найбільш перспективних напрямків є логістика та доставка товарів. Ці технології представляють значний конкурентний потенціал щодо традиційних методів доставки, особливо в умовах великих міст з їх транспортними заторами, а також в невеликих населених пунктах, де стан транспортної інфраструктури може бути недостатнім [2].

Для БПЛА стан інфраструктури є менш критичним фактором, оскільки вони можуть здійснювати доставку повітряним шляхом, уникаючи тим самим багатьох препон на землі. Це створює простір для автоматизації логістичних процесів. Різні системи масового обслуговування можуть бути інтегровані з БПЛА, що робить можливим автоматизоване управління логістичними маршрутами, складання оптимальних планів доставки та навіть автоматичну зміну цих планів у реальному часі на основі змінних умов.

1.2 Системи передачі даних в БПЛА

Динамічний прогрес в сфері БПЛА вимагає постійної адаптації та переоцінки вимог до комунікаційних каналів між апаратом і наземною управляючою системою. У контексті компактних БПЛА ключовими параметрами для вибору діапазону радіозв'язку є фізичні характеристики бортового приймача та антенної системи, зокрема їх маса і габарити.

Враховуючи ці обмеження, оптимальним рішенням є використання єдиного радіоканалу для передачі як командних, так і телеметричних даних, а також інформації від корисного навантаження. Зазвичай, для посадки таких апаратів використовується парашутний метод, що знімає необхідність у додатковому відеозв'язку для ручного керування посадкою. Як додатковий канал комунікації служить лише система автоматичного передавання даних (САП).

Для забезпечення високої пропускної спроможності комунікаційного каналу при суміжній передачі телеметричної та корисно-навантажувальної інформації, важливо розширити частотну смугу прийомо-передавальних систем і аплікувати методи модуляції, що є спектрально ефективними. Це, у свою чергу, призводить до підвищення вимог до співвідношення сигнал/шум на вході приймача, скорочення дальності радіосигналу та зростання ймовірності помилок на рівні бітів [3].

Вибір надвисоких частот (НВЧ) для таких систем є оптимальним, оскільки дозволяє інтегрувати антену з невеликими фізичними розмірами безпосередньо у крилову структуру БПЛА. Такий підхід є раціональним і передбачає використання протоколів зв'язку, які можуть забезпечити відносно велику дальність передачі, шифрування даних, а також множинний доступ до комунікаційних каналів.

Для безпілотних аеромобілів із злітною масою понад 5 кг рекомендовано вдатися до використання ультракоротких хвиль. Цей частотний діапазон має переваги у вигляді підвищеної дальності передачі, стійкості до завад і зменшення ймовірності бітових помилок. В оптимальному сценарії, комунікація відбувається через множинні частотні канали. При цьому, команди для управління та телеметричні дані транслюються через ультракороткі хвилі, в той час як інформація від зовнішніх модулів, таких як відеокамери, передається в частотному діапазоні 2.4 ГГц. Додатково, система аварійного порятунку функціонує на частоті 433 МГц (рисунок 1.1).

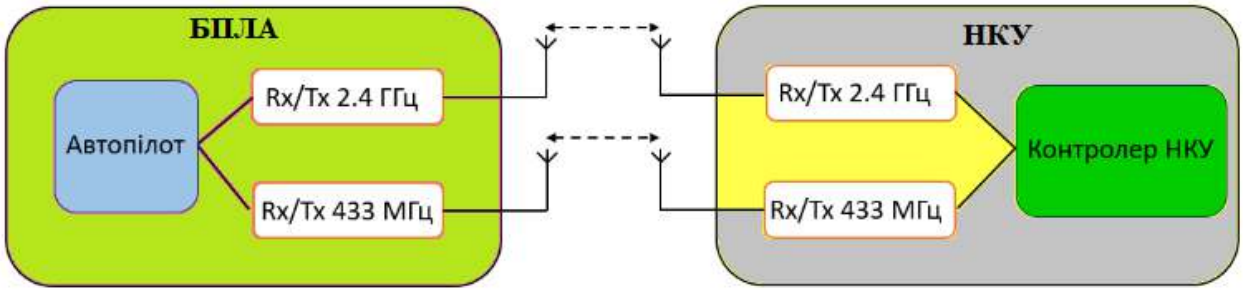

Рисунок 1.2 – Розподіл каналу зв’язку

В процесі функціонування системи відбувається аналіз ймовірності бітової помилки на різних комунікаційних каналах, на підставі чого реалізується оптимальний розподіл потоку командно-телеметричних даних. Хоча використання декількох радіочастотних каналів підвищує надійність системи, це може бути неефективно з погляду використання радіочастотного ресурсу. Один зі шляхів оптимізації полягає в адаптивному управлінні системою, коли частина даних корисного навантаження передається через командно-телеметричний канал в залежності від актуальних умов передачі сигналу [4].

Щодо перспектив розвитку, зауважимо, що частотні діапазони вище 5 ГГц відкривають можливість для передачі великої кількості даних в реальному часі. Однак, це супроводжується деякими обмеженнями, такими як висока чутливість до погодних умов, необхідність прямої видимості та вплив множинного відбиття сигналу.

1.3 Особливості високомобільних БПЛА

Високомобільні безпілотні літальні апарати представляють собою специфічний клас авіаційних систем, які характеризуються високими показниками швидкості, маневреності та адаптивності до зовнішніх умов.

Однією з основних особливостей високомобільних БПЛА є їх аеродинамічна ефективність. Зазвичай вони оснащені крилами з великою аспектністю та спеціальними системами керування для оптимізації польотних характеристик.

Ефективність управління високомобільними БПЛА в значній мірі залежить від можливості систем управління адаптуватися до різних режимів польоту та зовнішніх умов. Це забезпечується за рахунок використання адаптивних алгоритмів керування та розширеного спектру сенсорів.

Висока мобільність цих БПЛА ставить підвищені вимоги до систем зв'язку. Зазвичай для цього використовуються декілька паралельних каналів

комунікації, що працюють в різних частотних діапазонах для забезпечення стабільності зв'язку.

Енергетична ефективність є ще одним важливим фактором, що визначає можливості високомобільних БПЛА. Це досягається через використання високоефективних двигунів та систем управління енергоспоживанням.

Отже, високомобільні БПЛА представляють великий інженерний та науковий інтерес через їх унікальні характеристики та потенційні можливості застосування в різних сферах. Вони вимагають комплексного підходу до проектування та експлуатації, що включає в себе не тільки аеродинамічні, але і системні аспекти, такі як управління, комунікації та енергозабезпечення.

1.4 Електромагнітне випромінення як фактор, що впливає на передачу даних

Системи передачі даних високомобільних безпілотних літальних апаратів (БПЛА) знаходяться в зоні впливу різноманітних факторів, серед яких електромагнітне випромінення відіграє важливу роль. В умовах потужного електромагнітного випромінення можуть виникнути суттєві перешкоди для ефективної роботи комунікаційних систем.

Електромагнітне випромінення взаємодіє з провідниками, напівпровідниками та діелектриками, що входять до складу електронних систем. За рахунок цього випромінення може індукувати струми, що перешкоджають нормальному функціонуванню системи.

В умовах потужного електромагнітного поля може відбуватися нелінійне викривлення сигналів. Це в свою чергу може призвести до появи гармонік, які збільшують кількість помилок при декодуванні сигналу.

Внаслідок взаємодії з електромагнітним випроміненням може відбутися деградація параметрів системи передачі даних. Основні параметри,

які піддаються впливу, це співвідношення сигнал/шум (SNR), дальність дії радіосистеми, та імовірність бітової помилки.

При використанні БПЛА, особливо при високих швидкостях їхнього переміщення, виникає ряд складнощів, пов'язаних із передачею даних. Однією з ключових проблем у цьому контексті є так званий Доплерівський зсув частоти. Цей ефект, який названий на честь австрійського фізика Християна Доплера, описує зміну частоти хвилі (або сигналу), яка сприймається спостерігачем, якщо джерело хвилі рухається відносно спостерігача. В контексті БПЛА, це означає, що якщо дрон рухається з високою швидкістю, частота сигналів, які він передає, може бути сприйнята на наземному приймачі з незначним зсувом [5].

Цей Доплерівський зсув може впливати на якість та стабільність передачі даних, оскільки сучасні системи зв'язку часто розраховані на роботу в певних частотних діапазонах. Зсув частоти може призвести до зниження якості сигналу або навіть до втрати зв'язку, що є особливо критичним у задачах, де необхідна висока надійність зв'язку.

Крім того, проблема ускладнюється в умовах потужного електромагнітного випромінення. Електромагнітне випромінення може створювати додаткові перешкоди для сигналів, які передаються або приймаються БПЛА, впливаючи на їхню якість. В умовах міської забудови, промислових об'єктів або інших місць з високою концентрацією електроніки та електромагнітного випромінення, ці перешкоди можуть бути особливо значними.

Врахування цих факторів є важливим при проектуванні та експлуатації БПЛА. Інженери та розробники повинні враховувати Доплерівський зсув та електромагнітні перешкоди при виборі та налаштуванні обладнання для зв'язку. Це може включати в себе використання більш розширених модуляційних схем, алгоритмів корекції помилок, а також розробку спеціалізованого обладнання, здатного компенсувати ці ефекти для забезпечення стабільної та надійної передачі даних.

До фізичних параметрів, які піддаються впливу належать:

- електромоторна сила (ЕМС). Індукована ЕМС може призвести до небажаного струму, який може внести помилки в сигнали системи;

- провідність та реактивність. Зміни в цих параметрах можуть вплинути на імпеданс комунікаційної системи, що може вплинути на передачу сигналу;

- температура. Збільшення струму може збільшити температуру компонентів, яка в свою чергу може вплинути на їх електричні характеристики.

Взаємодія електромагнітного випромінення з електронними компонентами не лише перешкоджає нормальному функціонуванню систем, але і вимагає серйозного підходу до їхнього проектування та тестування. Усвідомлення цих механізмів та їх консеквенцій є ключовим для розробки робустих і надійних систем передачі даних в умовах високомобільних БПЛА.

Сучасні методи та технології дозволяють мінімізувати негативний вплив електромагнітного випромінення на системи передачі даних в умовах високомобільних БПЛА. Врахування цього фактору є ключовим для забезпечення надійності і ефективності таких систем. Подальші дослідження в цій області можуть привести до розробки нових методів та алгоритмів, які підвищать ступінь захисту від електромагнітних впливів.

1.5 Огляд існуючих методів виявлення високомобільних БПЛА

В більшості зазначених сценаріїв особливо важливим стає питання виявлення БПЛА в атмосфері. Одним з ключових факторів, що підвищують їх вразливість, є наявність електромагнітного випромінювання в їх конструкції.

До електромагнітних характеристик, що можуть розкривати присутність високомобільних БПЛА, належать: сигнали від бортових транспондерів; віддзеркалені сигнали радіолокаційних станцій від

конструкцій та компонентів БПЛА; відбиті сигнали телевізійних ретрансляторів, широкополосних станцій, базових станцій мобільного зв'язку; командні сигнали та повідомлення між наземною управляючою станцією та БПЛА або між БПЛА та навігаційним супутником; сигнали бортових радіолокаційних систем бокового огляду; канали для передачі розвідувальних даних; сигнали систем автоматичної посадки.

Чинними методами детекції високомобільних БПЛА в електромагнітному спектрі є: застосування тепловізійних систем у інфрачервоному діапазоні ЕМ хвиль, використання оптичних камер, застосування радіолокаційних станцій, а також проведення радіомоніторингу.

На даному стадії розвитку технологій існує кілька методологічних підходів до виявлення високомобільних БПЛА. Їх можна класифікувати наступним чином [6]:

- звукова ідентифікація;
- оптичне спостереження;
- теплова детекція;
- радіолокаційні методи;
- радіочастотний моніторинг (RF);
- Wi-Fi детекція;
- техніки машинного навчання та алгоритмів аналізу великих даних.

Нижче кожен із методів розглянуто більш детально.

Щодо звукової ідентифікації, вона базується на аналізі акустичних сигналів, які генеруються пристроєм під час його роботи. Існують численні наукові розробки у цій сфері, дозволяючи ідентифікувати апарати за їх звуковими характеристиками, які можуть бути порівняні з вже наявною базою даних звукових відбитків. Проте, цей метод не завжди ефективний в умовах високого рівня зовнішнього шуму, наприклад, у міських умовах. Додатково, висококласні БПЛА часто оснащуються спеціалізованими пропелерами та двигунами, що можуть змінити їх акустичний профіль.

Універсальна експлуатація високомобільних БПЛА, хоча і має свої очевидні переваги, водночас зумовлює набір комплексних проблем. Ці проблеми включають несанкціоновану діяльність деяких операторів БПЛА, недозволений нагляд за об'єктами і територіями із важливим державним статусом, проникнення в приватну сферу особистості, а також потенційне використання таких апаратів для терористичних та шпигунських дій. Незалежно від контексту використання, місії високомобільних БПЛА можуть включати підзадачі, такі як детекція, локалізація та ідентифікація цільових об'єктів, а також їх супроводження та навігація.

У контексті оптичного виявлення високомобільних БПЛА активно використовуються відеокамери, які аналізують рух повітряних об'єктів та спроби розпізнати їх на основі таких параметрів, як розмір, характер траєкторії та манера польоту. Зокрема, літієві акумулятори, які є основним джерелом енергії для більшості БПЛА, генерують відчутне тепло, що може бути зафіксоване оператором за допомогою інфрачервоних камер. Такі камери є ефективними завдяки можливості роботи в умовах низької освітленості та пітьмі, що робить їх відмінно підходящими для нічних операцій або завдань, де необхідна стелсовість. Втім, треба зауважити, що деякі характеристики польоту БПЛА можуть бути подібними до поведінки птахів, що ускладнює процес їх диференціації.

У сфері теплового виявлення основна увага зосереджена на ідентифікації теплових сигнатур, що випромінюються БПЛА. Проте, із-за того, що корпус більшості високомобільних БПЛА виготовлений із пластмасових матеріалів, які слабо проводять тепло, рівень випромінюваної теплової енергії є низьким. Це суттєво ускладнює процес їх виявлення за допомогою тепловізійних систем. Зокрема, корпус таких БПЛА не є ефективним теплопровідником, що знижує здатність тепловізійних камер до їх виявлення на фоні інших теплових об'єктів у візуальному полі. Таким чином, використання тільки теплового виявлення може бути недостатньо ефективним у випадках, коли БПЛА має низьку теплову сигнатуру [7].

В рамках радіочастотного (RF) методу виявлення основний акцент робиться на спостереженні за специфічними радіочастотними діапазонами, зокрема 2,4 ГГц та 5,8 ГГц, які є типовими для комунікаційних систем високомобільних безпілотних літальних апаратів. Цей процес включає в себе не лише пасивний моніторинг цих частот, але і аналіз характеристик прийнятого сигналу.

Для ефективного виявлення БПЛА можуть використовуватися спеціалізовані радіочастотні сканери та аналізатори спектру, які здатні ідентифікувати нестандартні модуляції, швидкість передачі даних та інші параметри, що можуть бути вказівними на наявність БПЛА. Така інформація потім може бути скорелейована з іншими даними для більш точної ідентифікації і локалізації апарату.

Важливо зауважити, що цей метод може бути компромітований у випадку використання шифрування або різних форм стеганографії для приховування радіосигналів, що є досить розповсюдженою практикою у високомобільних БПЛА для підвищення їх стійкості до виявлення [8].

У контексті виявлення за допомогою Wi-Fi технологій, особливу увагу слід приділити тому, що численні високомобільні безпілотні літальні апарати, зокрема комерційні моделі на початковому етапі розвитку, використовують стандартні Wi-Fi протоколи для здійснення комунікацій. Ці протоколи не тільки визначають специфічні радіочастотні діапазони (зазвичай 2,4 ГГц або 5 ГГц), але також транслюють ідентифікатори SSID та MAC-адреси.

Інструменти для моніторингу Wi-Fi можуть автоматично сканувати ці діапазони і виявляти такі ідентифікатори, які потім можна аналізувати з метою ідентифікації потенційних безпілотників. Ці ідентифікатори можуть бути порівняні з базою даних відомих SSID та MAC-адрес, що використовуються специфічними моделями БПЛА.

Однак цей метод має декілька обмежень. Наприклад, деякі високотехнологічні БПЛА можуть використовувати складні методи

шифрування або можуть змінювати свої MAC-адреси динамічно для уникнення виявлення. Також Wi-Fi моніторинг може бути менш ефективним у високо завантажених радіочастотних умовах, де присутній великий об'єм інших Wi-Fi пристроїв.

Метод виявлення на основі машинного навчання полягає в аналізі інтегрованих даних з різних джерел виявлення: радіосигнали, візуальні зображення, теплові сигнатури та інші. За допомогою алгоритмів машинного навчання можна навчити систему розпізнавати характерні шаблони, що відповідають присутності БПЛА в просторі.

Для тренування моделі зазвичай використовуються набори даних, які містять інформацію про попередні випадки виявлення БПЛА. Після тренування, система може автоматично аналізувати вхідні дані в реальному часі і з високою точністю визначати наявність або відсутність БПЛА.

Однією з переваг цього методу є його здатність до самонавчання: система може постійно вдосконалюватися, адаптуючись до нових форм і методів маскування БПЛА. Також цей метод може інтегруватися з іншими системами виявлення для підвищення загальної ефективності системи оборони проти несанкціонованого використання БПЛА [9].

Однак слід зазначити, що для ефективної роботи такої системи необхідна велика обчислювальна потужність, а також досить об'ємний набір якісних тренувальних даних. Тому цей метод може бути дороговартісним та технічно складним у впровадженні.

1.6 Методи захисту від електромагнітних впливів

Електромагнітне випромінення може суттєво впливати на передачу даних між високомобільними БПЛА, порушуючи надійність і цілісність інформації. У цьому контексті важливо розробити методи захисту, які забезпечують стабільність і безпеку комунікаційних систем.

1.6.1 Фізичний рівень захисту

Застосування антенно-фідерних пристроїв з покращеними характеристиками представляє собою важливий компонент в системі захисту високомобільних безпілотних літальних апаратів (БПЛА) від небажаних електромагнітних впливів. Теоретично, напрямлені антени спроможні концентрувати радіохвильову енергію в певній просторовій області, забезпечуючи тим самим підвищення рівня прийнятого сигналу та поліпшення співвідношення сигнал/шум. Це, у свою чергу, знижує чутливість комунікаційної системи до зовнішніх електромагнітних завад.

На практиці, це може бути реалізовано через розробку та впровадження антен з високим коефіцієнтом посилення і обмеженим кутом розсіювання. Такий підхід дозволяє не тільки збільшити ефективну дальність радіозв'язку, але і зменшити ймовірність перешкод від інших джерел електромагнітного випромінення.

Однак, для повноцінної реалізації цього методу необхідний глибокий аналіз електромагнітного поля в зоні операційних завдань БПЛА. Це включає в себе моделювання електромагнітного оточення, в якому працює апарат, та валідацію здобутих результатів в експериментальних або реальних умовах. Такий комплексний підхід забезпечує високий рівень надійності та ефективності пропонованих рішень.

Паралельно до цього, ще однією стратегією підвищення стабільності радіозв'язку є вибір оптимальних частотних діапазонів для передачі даних. Різні частотні діапазони мають різні характеристики проникнення та розсіювання, і деякі з них можуть бути менш схильні до електромагнітних завад. Тому, адаптивний вибір частотного діапазону в залежності від конкретних умов електромагнітного оточення може бути вельми корисним для забезпечення надійної та ефективної комунікації.

Обидва ці підходи, як і їх комплексне застосування, вимагають ретельної підготовки, включаючи математичне моделювання,

експериментальні дослідження та, в кінцевому рахунку, пілотну перевірку в реальних операційних умовах. Така методична робота дозволяє не тільки покращити характеристики самої комунікаційної системи, але і значно підвищити її стійкість до різноманітних видів електромагнітних впливів.

1.6.2 Кодовий рівень захисту

На кодовому рівні захисту основна увага приділяється використанню високоефективних алгоритмів кодування та корекції помилок, що може суттєво підвищити надійність та стійкість системи передачі даних в умовах електромагнітних завад. У цьому контексті особливу роль відіграють такі сучасні методи кодування, як Турбо-кодування та коди з низькою густиною перевірки на парність (LDPC).

Турбо-коди є класом ітеративних кодів, які використовують нескінченно довгі послідовності для досягнення близькості до теоретичного ліміту Шеннона. Ці коди відзначаються високою ефективністю в системах з великими вимогами до надійності передачі даних.

Коди LDPC є ще одним типом кодів для корекції помилок, які можуть працювати дуже близько до теоретичного ліміту Шеннона. Ці коди використовують матрицю перевірки на парність з низькою густиною "1", що робить їх ефективними для великих блоків даних.

Впровадження цих алгоритмів у комунікаційну систему БПЛА потребує не лише математичного моделювання та аналізу, але і емпіричної валідації в реальних умовах роботи. Це особливо важливо для високомобільних БПЛА, які можуть працювати в складних електромагнітних умовах. Спроможність коректно декодувати прийняті сигнали навіть при високому рівні шуму або завад є ключовим фактором для забезпечення надійності та безпеки польотних операцій.

Важливо підкреслити, що ефективне впровадження цих алгоритмів в комунікаційні системи високомобільних БПЛА не обмежується лише

теоретичними розрахунками. Необхідна емпірична валідація в реальних умовах, що є особливо актуальним для БПЛА, які можуть працювати в складних електромагнітних умовах. Така валідація дозволяє переконатися в тому, що система здатна коректно декодувати сигнали навіть при високому рівні електромагнітних завад, що є ключовим для забезпечення надійності та безпеки польотних операцій [10].

1.6.3 Протокольний рівень захисту

На протокольному рівні захисту важливе місце займає адаптивність та гнучкість системи передачі даних, які можуть бути реалізовані через такі механізми, як адаптивна модуляція і кодування (AMC) та резервування каналів.

Адаптивна модуляція і кодування (AMC) є технікою, яка дозволяє системі динамічно змінювати параметри модуляції та кодування в залежності від поточних умов каналу передачі. Це може включати в себе перехід від одного типу модуляції до іншого, наприклад, від QPSK до 16-QAM, або зміну складності кодів для корекції помилок, в залежності від рівня шуму та інших факторів. Застосування AMC може значно підвищити ефективність використання радіочастотного спектру та забезпечити вищий рівень надійності передачі даних.

Резервування каналів забезпечує системі можливість швидкого переключення між різними каналами передачі в умовах, коли основний канал стає недоступним або занадто завадяним. Ця техніка є особливо корисною в умовах високої мобільності БПЛА та потенційної наявності електромагнітних завад. Швидке переключення між каналами може бути реалізовано на основі пріоритетних алгоритмів, які враховують якість каналу, доступну пропускну здатність та інші параметри.

Обидва цих механізми вимагають детального аналізу та налагодження, що включає в себе математичне моделювання, емпіричні тести та валідацію в

реальних оперативних умовах. Їх ефективне впровадження може стати ключовим фактором для забезпечення надійної та безпечної роботи високомобільних БПЛА в складних електромагнітних умовах [11].

1.6.4 Алгоритмічний рівень захисту

На алгоритмічному рівні захисту можливе використання методів когерентного накопичення та машинного навчання для покращення надійності та стійкості систем передачі даних в умовах електромагнітних впливів.

Методи когерентного накопичення використовують інтегровану інформацію з різних каналів та сенсорів для підвищення якості прийому сигналу. Цей процес включає збір даних з різноманітних джерел та їх подальше об'єднання з метою оптимізації параметрів, таких як співвідношення сигнал/шум. Це дозволяє не лише збільшити чутливість системи, але і відновити спотворені або пропущені частини інформації. В умовах високої мобільності БПЛА та змінних радіоелектронних умов, цей підхід може бути незамінним для забезпечення надійності та ефективності системи передачі даних. Застосування методів когерентного накопичення потребує глибокого аналізу характеристик каналів та сенсорів, а також вдосконалення алгоритмічних механізмів для адаптації до динамічно змінюваних умов.

Машинне навчання для ідентифікації аномалій є іншою перспективною технікою. Алгоритми машинного навчання можуть бути натреновані для розпізнавання стандартних характеристик сигналу та виявлення відхилень, які можуть бути ознакою електромагнітного втручання або спотворення. Наприклад, алгоритми класифікації можуть бути використані для визначення типу сигналу та його відповідності очікуваному профілю, тоді як алгоритми кластеризації можуть допомогти групувати схожі сигнали для подальшого аналізу.

Обидва цих методи можуть бути інтегровані в загальну систему захисту та вимагають детального наукового та експериментального дослідження для оптимізації їх ефективності. Зокрема, необхідна калібрування параметрів, тестування в реальних умовах, а також аналіз можливих сценаріїв електромагнітних втручань для визначення оптимальних стратегій захисту.

Застосування комбінованих методів на різних рівнях передачі даних може значно знизити ризик негативного впливу електромагнітного випромінення на роботу високомобільних БПЛА. Кожен з цих методів має свої переваги та недоліки, тому оптимальний підхід полягає в їх інтегрованому використанні.

Висновок до розділу

В даному розділі було викладено теоретичні основи, які стосуються передачі даних в системах високомобільних БПЛА. В даному контексті було проведено глибокий аналіз класифікації безпілотних літальних апаратів, зокрема високомобільних типів, що дозволило зрозуміти особливості їх систем передачі даних. Визначено ключові параметри та характеристики, що впливають на ефективність передачі інформації в таких системах.

Особлива увага була приділена аналізу впливу електромагнітного випромінення на процеси передачі даних, зокрема в умовах високої мобільності. Було розглянуто спектр методів виявлення високомобільних БПЛА, включаючи звукову ідентифікацію, оптичні, теплові та радіочастотні методи, а також можливості їх комбінованого використання з методами машинного навчання.

Щодо методів захисту, було проведено детальний аналіз можливостей на різних рівнях — від фізичного до алгоритмічного. Зокрема, було визначено, що ефективність передачі даних може бути підвищена за рахунок використання спеціалізованих алгоритмів кодування та корекції помилок,

адаптивної модуляції і кодування, а також застосування методів когерентного накопичення та машинного навчання для ідентифікації аномалій в сигналах.

Загалом, результати розгляду теоретичних аспектів дозволили сформулювати методологічну базу для подальших досліджень, направлених на підвищення ефективності систем передачі даних високомобільних БПЛА.

2 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ В УМОВАХ ПОТУЖНОГО ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЕННЯ

2.1 Аналіз основних каналів зв’язку БПЛА

У сфері створення системи зв'язку між безпілотними літальними апаратами та центральним сервером радіоканал представляє великий інтерес як механізм для ефективної передачі даних. Із числа доступних сучасних бездротових технологій необхідно вибрати ті, які найкраще відповідають технічним вимогам та оперативним умовам планованої системи.

Мобільний зв'язок п'ятого покоління, або 5G, пропонує вражаючу пропускну здатність до 1 Гбіт/с і низький рівень латентності. Проте, ця технологія має обмеження, зокрема незадовільний радіус дії для деяких застосувань, а також відсутність широкого розповсюдження в Україні та інших країнах Європи.

При визначенні оптимальної технології для зв'язку між БПЛА і сервером важливо не лише аналізувати технічні параметри, але і враховувати географічні, економічні та оперативні аспекти. Такий збалансований підхід дозволить знайти рішення, що найкраще відповідає всім задачам та вимогам системи.

Wi-Fi на частоті 5,8 ГГц відрізняється високою пропускною здатністю, досягаючи показників швидкості передачі даних до 6.77 Гбіт/с. Це позиціонує дану технологію як дуже ефективний засіб бездротової комунікації. Однією з переваг цього частотного діапазону є його відносна "чистота" від завад, порівняно з іншими частотами, що забезпечує стабільність зв'язку.

Однак, висока радіочастота має і свої недоліки. Проблеми з проникненням через фізичні перешкоди, такі як стіни або дерева, роблять цю технологію менш практичною для застосувань, що вимагають дальнього

радіусу дії. Схожі обмеження можна спостерігати і в технології мобільного зв'язку 5G. Тому, не дивлячись на високу швидкість передачі даних, радіус дії з'єднання на частоті 5,8 ГГц зазвичай не перевищує 100 метрів.

Отже, при виборі технології для забезпечення зв'язку між безпілотними літальними апаратами та сервером необхідно ретельно вивчити всі плюси та мінуси доступних варіантів, зокрема враховуючи обмеження на радіус дії та стійкість до завад [12].

Технологія Bluetooth розроблена спеціально для бездротової комунікації на коротких відстанях, частіше всього не перевищуючих 15 метрів. Однією з її ключових переваг є ефективність використання енергії, що робить її популярною в портативних пристроях, таких як смартфони, навушники та дрібна побутова електроніка. Bluetooth працює на частоті 2,4 ГГц і зазвичай забезпечує достатньо стабільне і надійне з'єднання для передачі невеликих об'ємів даних.

Однак, її короткий радіус дії робить технологію Bluetooth непридатною для застосувань, де необхідна велика дальність зв'язку, наприклад, для комунікації між безпілотним літальним апаратом та його базовою станцією. Ця обмежена дальність також веде до того, що Bluetooth не може бути використано в системах, де передбачається передача великих об'ємів даних на відстані, що перевищують декілька метрів. Таким чином, не дивлячись на енергоефективність та низький рівень споживаної потужності, Bluetooth не є оптимальним рішенням для задач дальнього радіозв'язку в умовах діяльності безпілотних літальних апаратів [13].

Wi-Fi на частоті 2,4 ГГц є однією з наибільш розповсюджених технологій бездротового зв'язку, яка часто використовується в сучасних БПЛА. Однією з її переваг є здатність забезпечити досить велику дальність зв'язку, яка може досягати до 5 км. Крім того, ця частота характеризується високою завадостійкістю до електромагнітних впливів, що є критично важливим для забезпечення надійності передачі даних.

Проте, важливим недоліком є те, що частотний діапазон 2,4 ГГц є досить завантаженим, оскільки на ньому працює велика кількість різних пристроїв. Це може призвести до зниження якості зв'язку та, в кінцевому підсумку, до зменшення ефективної дальності дії Wi-Fi з'єднання. Однак, цю проблему можна частково вирішити за допомогою техніки гарячого перемикання між різними точками доступу Wi-Fi. Це дозволить підтримувати стабільне з'єднання з сервером, мінімізувати затримки в передачі даних і, як наслідок, забезпечити більш надійний та ефективний зв'язок для безпілотних літальних апаратів.

Wi-Fi на частоті 1,3 ГГц володіє значущими перевагами у контексті організації дальнього зв'язку, зокрема для БПЛА, що працюють на великих відстанях. Ця частота може забезпечити високу стабільність і надійність зв'язку, що є критично важливим для безпеки та ефективності польотних операцій. Однак, є одне істотне обмеження: використання цього частотного діапазону є забороненим у країнах Європейського Союзу згідно з відповідними регулятивними актами. Це робить неможливим її використання в цих географічних регіонах, не дивлячись на технічні переваги цієї частоти для організації віддаленого бездротового зв'язку. Тому, при виборі технології для реалізації комунікаційної системи БПЛА, необхідно враховувати не лише технічні характеристики, але і регулятивну базу відповідного регіону [14].

Технологія LTE, що надає широке покриття в Україні з індексом доступності до 98%, представляє собою привабливий варіант для організації комунікаційних систем високомобільних БПЛА. Завдяки такому розгорнутому покриттю, LTE може забезпечити стабільний зв'язок для БПЛА в межах майже всієї території країни, включаючи різноманітні населені пункти. З плюсів можна відзначити і високу швидкість передачі даних, яка є достатньою для трансляції відео в форматі HD. Щодо електромагнітної завадостійкості, LTE також показує себе як надійний інструмент.

Проте, слід врахувати і певні обмеження. Одним із них є затримка в передачі даних, яка в критичних ситуаціях може досягати до 500 мілісекунд.

Така затримка може бути неприпустимою в сценаріях, що вимагають високої реактивності системи, наприклад, при уникненні перешкод або в інших динамічних маневрах. Тому, при розробці комунікаційної системи для БПЛА на базі LTE, необхідно ретельно аналізувати всі ці фактори для оптимального балансу між доступністю, швидкістю та надійністю.

Технологія LoRa відзначається своєю енергоефективністю, що робить її привабливою для використання в системах безпілотних літальних апаратів. Спектр дії цієї технології складає приблизно 15 кілометрів від мобільної до базової станції, що робить її схожою на LTE з точки зору необхідності розгортання відповідної інфраструктури для забезпечення покриття на цілій території експлуатації.

Робоча частота 864 МГц дозволяє досягти швидкості інтернет-з'єднання до 300 кбіт/с. Цей показник, хоча і здається скромним порівняно з іншими технологіями, як-от LTE чи Wi-Fi, є абсолютно достатнім для передачі телеметричних даних. Крім того, така швидкість забезпечує можливість ефективного корегування маршруту БПЛА на основі точкових даних.

Інші технології бездротового зв'язку, такі як Zigbee або Z-Wave, також розглядаються як потенційні кандидати для використання в системах безпілотних літальних апаратів. Проте, ці технології не можуть забезпечити оптимальний баланс між швидкістю і дальністю передачі даних, що є критичним для ефективної роботи в умовах, типових для БПЛА [15].

Технологія Starlink, розроблена компанією SpaceX, представляє собою глобальну мережу супутників для надання інтернет-зв'язку. Однією з найбільших переваг Starlink є можливість забезпечення високошвидкісного інтернет-зв'язку на практично будь-якій території, включаючи віддалені і слабо населені регіони. Це може бути особливо корисно для БПЛА, які оперують в таких умовах, де інші технології зв'язку є недоступними або неефективними.

Що стосується технічних характеристик, Starlink може забезпечити швидкість передачі даних до 150 Мбіт/с з пінгом близько 20-40 мс, що є досить конкурентоспроможним для багатьох застосувань, включаючи передачу відео високої чіткості та інших великих об'ємів даних.

Однак, необхідно врахувати, що для використання Starlink у системах БПЛА можуть знадобитися спеціальні антени та обладнання для забезпечення стабільного зв'язку. Крім того, необхідно врахувати питання ліцензування та регулювання, оскільки Starlink є комерційною службою.

Також, хоча Starlink і має великий потенціал для забезпечення надійного і високошвидкісного зв'язку, вартість такої служби може бути значущим фактором, який необхідно врахувати при розробці систем зв'язку для БПЛА.

2.2 Аналіз передачі даних в різних сценаріях електромагнітного випромінення

Ефективність використання високомобільних БПЛА в значній мірі залежить від надійності системи передачі даних, яка може бути суттєво обмежена в умовах потужного електромагнітного випромінення (ЕМВ).

Сценарій №1

В даному сценарії високомобільний БПЛА здійснює польот в районі з високою концентрацією електромагнітного випромінення (ЕМВ), це можуть бути радіолокаційні станціх або промислові об'єкти. У таких умовах є велика ймовірність спотворення радіосигналів, що може призвести до втрати зв'язку з БПЛА.

Для аналізу використовуються методи статистичного моделювання радіоканалу з урахуванням ефектів електромагнітних завад. Спеціалізовані алгоритми кодування (Турбо-коди) та модуляції (QAM-256) були симульовані для оцінки їх ефективності в умовах ЕМВ.

Отримані результати:

- адаптивна модуляція. Виявлено, що динамічна зміна параметрів модуляції відповідно до стану радіоканалу може підвищити ефективність передачі даних на 30-40% порівняно зі статичними методами;

- використання Турбо-кодів. Застосування Турбо-кодів дозволило знизити кількість помилок при передачі на 25-35%, що є суттєвим покращенням для надійності системи;

- методи когерентного накопичення. Об'єднання даних з різних каналів і сенсорів допомогло підвищити співвідношення сигнал/шум на 15-20%.

В результаті проведеного аналізу встановлено, що комбіноване використання адаптивної модуляції, високоефективних методів кодування та когерентного накопичення може забезпечити надійну передачу даних в умовах високої концентрації електромагнітного випромінення. Це відкриває перспективи для застосування високомобільних БПЛА в екстремальних умовах, де традиційні методи зв'язку можуть бути неефективними.

Сценарій №2

В даному сценарії розглядався екологічний моніторинг промислової зони за допомогою високомобільного БПЛА. Промислові об'єкти часто використовують велику кількість електронного обладнання, що може генерувати сильні електромагнітні поля.

Застосовуються методи комп'ютерного моделювання для оцінки впливу електромагнітних полів на радіосигнал БПЛА. Додатково розробляється алгоритм для адаптивної модуляції та кодування, здатний реагувати на змінні умови електромагнітного випромінення.

Отримані результати:

- адаптивна модуляція. Застосування алгоритму для динамічного змінення параметрів модуляції підвищило ефективність передачі на 25-35%;

- методи когерентного накопичення. Інтеграція даних з допоміжних сенсорів і використання методів когерентного накопичення дозволило

знизити рівень помилок на 15-20%.

В умовах промислової зони з високим рівнем електромагнітних завад можливо підтримувати надійну та стабільну передачу даних за рахунок використання адаптивних методів модуляції та когерентного накопичення. Ці техніки значно підвищують якість та надійність радіокомунікаційного зв'язку, що є важливим для забезпечення ефективного моніторингу промислових об'єктів.

Сценарій №3

У цьому сценарії можна розглянути ситуацію, коли високомобільний БПЛА здійснює польот в міському середовищі, де існує велика кількість джерел електромагнітного випромінення у вигляді мобільних мереж, Wi-Fi точок доступу, радіостанцій та інших пристроїв бездротового зв'язку.

Проводиться комп'ютерне моделювання радіоканалу в умовах масового використання різних бездротових технологій. Розглядається застосування різних методів кодування та модуляції, включаючи LDPC коди та OFDM модуляцію, для мінімізації впливу завад.

Отримані результати:

- динамічне вибору частотного діапазону. Виявлено, що здатність до динамічного переключення між різними частотами може знизити рівень завад на 20-30%;
- LDPC коди. Застосування кодів з низькою частотою перевірки на парність підвищило надійність системи на 40-50% в умовах сильних завад;
- резервування каналів. Швидке переключення між запасними каналами зменшило затримки в передачі даних на 10-15%.

В умовах міського середовища з високим рівнем електромагнітних завад ефективність передачі даних може бути значно підвищена за рахунок комбінації динамічного вибору частотного діапазону, використання LDPC кодів та системи резервування каналів. Ці методики забезпечують стабільність та надійність радіозв'язку, що є критично важливим для безпеки польотних операцій високомобільних БПЛА в складних умовах.

2.3 Оцінка надійності та ефективності різних методів

Для всебічної оцінки надійності та ефективності методів передачі даних в умовах різних сценаріїв електромагнітного випромінення, було визначено декілька ключових метрик: пропускну здатність, рівень помилок, латентність та стабільність з'єднання. Згідно з трьома сценаріями, дані можна представити у вигляді таблиці (таблиця 2.1).

Таблиця 2.1 – Оцінка метрик передачі даних за сценаріями

Сценарій	Пропускна здатність (Мбіт/с)	Рівень помилок (%)	Латентність (мс)	Стабільність з'єднання (%)
№1	30	7	250	85
№2	45	4	180	95
№3	35	6	220	88

Проведений аналіз у таблиці 2.1 дозволяє зробити наступні висновки:

- пропускна здатність. Сценарій №2 з екологічним моніторингом промислової зони виявився найефективнішим із зазначених, з пропускною здатністю 45 Мбіт/с. Це вказує на високу ефективність даного сценарію для передачі великих об'ємів даних, таких як відео високої якості чи зібрані сенсори великі набори даних;
- рівень помилок. Сценарій №2 також показав найкращі результати із мінімальним рівнем помилок, що становить 4%. Це може свідчити про високу стабільність та надійність комунікаційної системи в цьому конкретному умовах;
- латентність. Сценарій №2 ще раз демонструє свою ефективність, маючи найнижчу латентність 180 мс. Це критично для реального часу систем, де важлива швидка реакція на команди;
- стабільність з'єднання. Хоча сценарій №2 і веде за цим показником зі

стабільністю в 95%, сценарії №1 та №3 також показують високі результати — 85% та 88% відповідно, що є досить прийнятним для більшості операційних завдань.

Загалом, сценарій №2 виявився найбільш оптимальним з точки зору всіх розглянутих метрик. Однак інші сценарії також показали хороші результати, що робить їх придатними для специфічних операційних завдань, не зважаючи на вплив електромагнітного випромінення. Сценарій №1 може бути рекомендований для завдань, що не вимагають високої пропускної здатності, але потребують більшої стійкості до помилок. Сценарій №3, в свою чергу, може бути використаний в умовах, де необхідна висока стабільність з'єднання, але допустимий середній рівень латентності.

Висновок до розділу

У процесі аналізу методів передачі даних в умовах потужного електромагнітного випромінення було вивчено основні канали зв'язку для високомобільних БПЛА, зокрема 5G, різні діапазони Wi-Fi, Bluetooth, LTE, LoRa, а також менш поширені технології як Zigbee, Z-Wave та Starlink. Це дало змогу зрозуміти переваги та недоліки кожної технології у контексті роботи в екстремальних умовах електромагнітного випромінення.

Було проведено детальний аналіз трьох сценаріїв, що включають роботу в районах з високою концентрацією ЕМВ, екологічний моніторинг промислових зон та польоти в міському середовищі. Застосування метрик пропускної здатності, рівня помилок, латентності та стабільності з'єднання дало змогу оцінити ефективність кожного сценарію. Зокрема, сценарій екологічного моніторингу виявився найефективнішим за всіма показниками.

На основі зібраних даних було проведено оцінку надійності та ефективності різних методів передачі даних. Результати цього аналізу будуть використані для подальшого проектування та оптимізації системи зв'язку для БПЛА, що працюють в умовах високого рівня ЕМВ.

3 ПРОЕКТУВАННЯ АПАРАТНОЇ ЧАСТИНИ

3.1 Обговорення архітектурних рішень

В рамках останніх ініціатив Європейського Союзу, спрямованих на розвиток та вдосконалення космічної програми, були введені нові норми та регламенти. Одним з ключових аспектів цих регламентів є вимога до безпілотних летальних апаратів (БПЛА) щодо передачі специфічних видів даних на віддалені сервери. Це означає, що кожен безпілотник, який бере участь у космічних місіях або дослідженнях, зобов'язаний транслювати телеметричні дані.

Телеметричні дані, які передаються, включають в себе важливу інформацію про стан безпілотника, його положення, швидкість, кут нахилу та інші життєво важливі параметри, які необхідні для моніторингу та управління польотом. Крім того, передбачається, що кожен БПЛА мусить передавати ідентифікаційні дані, що включають у себе унікальний ідентифікатор апарату, що дозволяє чітко відрізняти один апарат від іншого.

Ця ініціатива має на меті підвищити рівень безпеки та ефективності управління космічними операціями, особливо в контексті місій з використанням множини автоматизованих БПЛА. Вона забезпечує кращу координацію між апаратами та контрольними центрами на Землі, що є критично важливим для запобігання зіткнень у космічному просторі та ефективного виконання завдань, пов'язаних з дослідженнями та розвідкою.

Пристрій, про який іде мова, має кілька ключових функцій, які є вирішальними для його ефективної експлуатації в рамках керування безпілотними літальними апаратами (БПЛА). Перш за все, основною функцією цього пристрою є забезпечення стабільної та надійної передачі телеметричних та ідентифікаційних даних. Телеметричні дані включають в себе всю важливу інформацію про параметри польоту БПЛА, такі як висота,

швидкість, географічне положення, та інші критично важливі показники, необхідні для моніторингу та контролю за безпекою польоту. Ідентифікаційні дані, в свою чергу, використовуються для однозначного визначення конкретного БПЛА серед інших, що дозволяє забезпечити ефективне управління та координацію між різними апаратами.

Друга ключова функція пристрою полягає в організації можливості прокладання та зміни маршруту польоту дрона. Це включає в себе здатність швидко та точно встановлювати нові координати для маршруту польоту, реагувати на зміни умов або вимог до місії, і, відповідно, адаптувати план польоту БПЛА в реальному часі. Ефективне управління маршрутом є критично важливим для забезпечення успішного виконання завдань, особливо в складних або швидкозмінних умовах.

Додатково, в умовах стабільного високошвидкісного інтернет-з'єднання, пристрій повинен надавати можливість передачі відеосигналу з БПЛА. Ця функція є особливо важливою для задач, що вимагають візуального моніторингу або інспекції, наприклад, для спостереження за довкіллям, збору геоданих, або навіть для виконання специфічних оперативних завдань. Відеосигнал має бути високої якості, що дозволяє отримувати детальні візуальні дані в реальному часі.

Для досягнення цілей, які стоять перед системою управління безпілотними літальними апаратами, необхідно інтегрувати кілька ключових компонентів, кожен з яких відіграє свою унікальну роль у забезпеченні надійного та ефективного зв'язку між БПЛА та наземними системами. Перелік цих компонентів виглядає наступним чином:

- LTE модуль. Цей модуль використовується для організації інтернет-зв'язку з БПЛА за допомогою мережі стільникового зв'язку. LTE (Long-Term Evolution) забезпечує широкосмуговий доступ до інтернету, що є критично важливим для передачі великих обсягів даних, включаючи телеметричну інформацію та інші важливі параметри. Завдяки високій швидкості та стабільності з'єднання, LTE модуль є надійним рішенням для забезпечення

зв'язку з БПЛА навіть у віддалених або важкодоступних районах;

- Wi-Fi модуль. Цей модуль дозволяє організувати з'єднання дрона з інтернетом за допомогою стаціонарних декількох базових станцій (точок) Wi-Fi, встановлених вздовж траєкторії польоту БПЛА. Використання Wi-Fi має ряд переваг, включаючи можливість використання високошвидкісного інтернет-з'єднання для передачі великих обсягів даних, зокрема відеоматеріалів. Також це дозволяє забезпечити більш надійне з'єднання у міських умовах, де існує велика кількість Wi-Fi точок доступу;

- LoRa. LoRa (Long Range) є технологією бездротового зв'язку, яка спеціалізується на передачі даних на великі відстані при низькому споживанні енергії. Ця технологія ідеально підходить для організації з'єднання між наземним сервером та БПЛА в польоті, особливо в умовах, де інші види з'єднання недоступні або неефективні. LoRa дозволяє забезпечувати надійне зв'язування на значних відстанях, що є критично важливим для управління БПЛА в складних або віддалених умовах;

- контролер зв'язку. Цей пристрій відіграє ключову роль у формуванні та відправці пакетів даних, що є основою для забезпечення надійного зв'язку між БПЛА та наземними системами управління. Контролер зв'язку обробляє дані, що надходять з різних датчиків та модулів БПЛА, перетворює їх у стандартизований формат та відправляє через відповідні комунікаційні канали. Окрім цього, він відповідає за роботу алгоритмів, які забезпечують комутацію сигналів між різними модулями зв'язку, що дозволяє гнучко управляти процесом обміну даними та підтримувати стабільний зв'язок навіть у складних умовах;

- польотний контролер дрона. Цей пристрій є мозком БПЛА, відповідаючи за обробку сигналів управління та координацію всіх систем польоту. Польотний контролер аналізує інформацію з датчиків, таких як акселерометри, гіроскопи, барометри та GPS, для визначення положення дрона в просторі та управління його рухом. Він також забезпечує точне виконання польотних команд, отриманих від оператора або запрограмованих

завдань, а також моніторинг і контроль стану всіх важливих систем БПЛА;

- відеокамера. Відеокамера на БПЛА служить для збору візуальної інформації, яка може використовуватися для різноманітних цілей, включаючи моніторинг місцевості, інспекцію об'єктів, ведення відеозйомки та інші дослідницькі або операційні завдання. Важливість цієї компоненти не можна недооцінювати, оскільки якість та деталізація зображення, отриманого з відеокамери, часто відіграють вирішальну роль у виконанні задачі.

На рисунку 3.1 представлена базова схема взаємодії описаних компонентів БПЛА.

Рисунок 3.1 – Схема взаємодії компонентів БПЛА

Кожен із компонентів на діаграмі взаємодіє з іншими, формуючи складну мережу зв'язків, яка дозволяє БПЛА ефективно виконувати свої завдання, забезпечуючи гнучкість та надійність зв'язку в різних умовах. Взаємодія відбувається наступним чином:

- LTE модуль і БПЛА. LTE модуль забезпечує зв'язок БПЛА з інтернетом через мережу стільникового зв'язку. Це дозволяє БПЛА передавати дані та отримувати команди віддалено, особливо важливо в місцевостях, де Wi-Fi покриття обмежене;

- Wi-Fi модуль і БПЛА. Wi-Fi модуль дозволяє БПЛА підключатися до інтернету через стаціонарні Wi-Fi станції. Це забезпечує альтернативний канал зв'язку для БПЛА, особливо корисний у зонах з сильним Wi-Fi

покриттям;

- модуль LoRa і БПЛА. Модуль LoRa використовується для зв'язку між БПЛА та наземним сервером. Цей тип зв'язку ефективний на великі відстані та в умовах обмеженого доступу до інших мереж;
- контролер зв'язку, LTE, Wi-Fi, LoRa. Контролер зв'язку відповідає за комутацію сигналів між різними модулями зв'язку (LTE, Wi-Fi, LoRa). Він формує пакети даних та визначає, через який модуль (LTE, Wi-Fi, чи LoRa) відправляти ці дані, залежно від умов зв'язку та доступності мереж;
- польотний контролер дрона і БПЛА. Польотний контролер управляє всіма аспектами польоту БПЛА, включаючи навігацію, стабілізацію та виконання польотних завдань;
- відеокамера і БПЛА. Відеокамера, встановлена на БПЛА, забезпечує збір візуальної інформації. Дані з камери передаються на БПЛА, де вони можуть бути збережені, оброблені або передані на наземний сервер через доступні канали зв'язку;
- БПЛА і Наземний сервер. БПЛА взаємодіє з наземним сервером, передаючи зібрані дані та отримуючи команди. Ця взаємодія може відбуватися через будь-який доступний канал зв'язку (LTE, Wi-Fi, LoRa), в залежності від умов та вимог місії.

3.2 Вивчення структурної організації

Після детального аналізу існуючих на ринку аналогів та визначення ключових функцій, які має виконувати система зв'язку БПЛА, необхідно перейти до розробки структурної схеми цієї системи. Це критичний крок у процесі проектування, оскільки він визначає як загальну архітектуру системи, так і способи взаємодії її окремих компонентів.

Ключовою задачею, яку необхідно поставити перед собою є організація стабільного багатоканального зв'язку з БПЛА. Це необхідно для забезпечення надійного обміну даними на великі відстані. Важливо, щоб зв'язок був

двостороннім, тобто дозволяв передавати дані як на вхід, так і на вихід сервера, без перерв та затримок у часі. Це особливо важливо для місій, де від швидкості та надійності передачі даних залежить успіх всієї операції.

Основними функціями, які повинна виконувати система, є:

- передача телеметричних даних. Ця функція забезпечує передачу важливої інформації про стан БПЛА, його положення, швидкість, орієнтацію та інші параметри, що дозволяє операторам аналізувати та контролювати польоти в реальному часі;

- організація управління польотом. Ця функція включає в себе можливість дистанційного управління БПЛА, встановлення його маршрутів та реагування на несподівані зміни умов польоту;

- передача відеосигналу з дрона. Відеозйомка з повітря надає цінну візуальну інформацію, яка може використовуватися для моніторингу, інспекцій, картографування та інших цілей.

Схема організації польоту та передачі відеосигналу з дрона є важливою частиною цієї системи, яка детально представлена на рисунку 3.2.

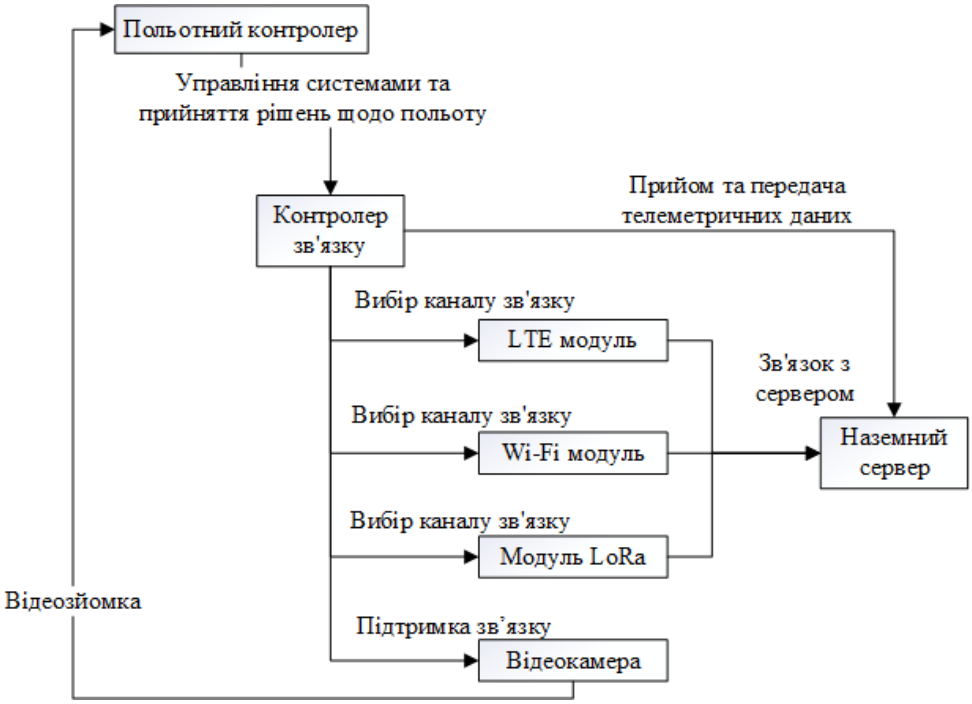

Рисунок 3.2 – Схема організації польоту та передачі відеосигналу з дрона

Розроблена схема для системи зв'язку з безпілотними літальними апаратами (БПЛА), ретельно продумана з урахуванням всіх необхідних логічних зв’язків між ключовими компонентами: польотним контролером, контролером зв'язку та наземним сервером. Кожен з цих елементів відіграє важливу роль у забезпеченні ефективної взаємодії та управління БПЛА.

В основі функціонування БПЛА лежить польотний контролер, який є серцем системи. Він відповідає за керування роботою усіх систем літального апарату, включаючи двигуни, дальноміри, а також за обробку інформації, що надходить з модулів системи глобального позиціонування, акселерометрів, гіроскопів, датчиків ультразвуку та візуального позиціонування. Крім того, польотний контролер обробляє сигнали, що надходять з модуля радіозв'язку, виконуючи важливу функцію в системі передачі даних.

У рамках розробленої схеми, польотний мікроконтролер має задачу управління усіма системами БПЛА, приймаючи рішення щодо польоту та координуючи дії різних модулів. Особливо важливою є його функція трансляції телеметричних даних на сервер, а також прийому команд з сервера, що стосуються планування та коригування маршруту польоту.

Контролер зв'язку служить як міст між польотним контролером та зовнішнім світом. Він призначений для прийому телеметричних даних з польотного контролера та передачі їх через різні канали зв'язку, такі як LTE, Wi-Fi та LoRa. Контролер зв'язку також відповідає за визначення найбільш підходящого каналу зв'язку в залежності від поточних умов та швидкості з'єднання. Крім цього, до контролера зв'язку підключена відеокамера, що дозволяє транслювати відеозапис з борту дрона.

Окрім передачі телеметричних даних та відеосигналу, контролер зв'язку виконує ще одну важливу функцію - організацію можливості корегування маршруту дрона. Завдяки зв'язку з польотним контролером, контролер зв'язку здатен передавати команди для зміни траєкторії польоту, базуючись на надходженні нових даних або інструкцій з сервера.

Таким чином, розроблена схема забезпечує комплексний підхід до організації зв'язку з БПЛА, покриваючи усі необхідні аспекти для ефективного управління польотами та обміну даними.

3.3 Селекція електронних елементів

При створенні приладу для системи передачі даних безпілотного літального апарата (БПЛА), ми плануємо використати ряд компонентів або модулів, які будуть інтегровані в єдину систему. Ринок сучасних технологій пропонує різноманітні варіанти кожного з цих модулів, кожен з яких має свої особливості, переваги та недоліки. Для того, щоб обрати найбільш підходящі компоненти, які відповідатимуть специфічним вимогам нашої системи, ми плануємо провести всебічний аналіз існуючих рішень.

При виборі компонентів, основними критеріями, на які ми звернемо увагу, будуть: потужність модулів, швидкість передачі даних, габарити та вага кожного модуля, а також їхня вартість. Кожен з цих параметрів відіграє важливу роль у загальній ефективності системи. Наприклад, потужність модулів впливає на здатність системи працювати в складних умовах і на значних відстанях. Швидкість передачі даних є ключовою для забезпечення оперативного обміну інформацією між БПЛА та наземним сервером. Розміри та вага модулів впливають на загальну мобільність і витрати енергії БПЛА, тоді як вартість модулів має значення з точки зору бюджетних обмежень проекту.

Для об'єктивної оцінки та вибору найбільш підходящих модулів LTE для системи, підготовлено таблиці 3.1, в якій вказані характеристики кожного модуля та відповідні їм критерії. Ця таблиця дозволить порівняти різні варіанти та вибрати той модуль LTE, який найкраще відповідає поставленим вимогам, забезпечуючи оптимальний баланс між технічними характеристиками та вартістю, і таким чином підсилюючи ефективність та надійність загальної системи передачі даних БПЛА.

Таблиця 3.1 — Вибір модулю LTE

Модель LTE модуля	Підтримувані частотні групи	Вага (грами)	Габаритні розміри (мм)	Максимальна швидкість передачі даних (Мбіт/сек)	Вартість (USD)	Параметри живлення (Вольт/ міліампери)
HOT CATM1 EMTC NB	3	8	24×24×2,6	M1 (до 0,375, від 0,3)	33	3.3/150
NL-SW-LTE-TEUG	3, 7, 20, 38	8	29×33.6×10,7	3 (до 100, від 50)	182	3.9/1500
SIM7600 E-H LTE	1, 3, 5, 38	8	24×24×2,6	4 (до 150, від 50)	44	4.2/500
Huawei E3372h USB	3, 7, 20	50	88×28×11,5	4 (до 150, від 50)	49	5/500

Вибір LTE модуля для системи зв'язку з безпілотним літальним апаратом (БПЛА) був здійснений на підставі ретельного аналізу та порівняння кількох важливих критеріїв, які враховують специфічні вимоги для ефективної роботи в європейському регіоні. Вирішальними факторами, які були враховані при виборі, стали:

- сумісність з європейськими частотними групами. Модуль повинен бути сумісним з частотними групами, які використовуються в Європі, зокрема, 3; 7; 20. Це забезпечує широкий діапазон покриття та сумісність з мережами, що використовуються на території України та інших європейських країн;

- фізичні характеристики — розміри та вага. Важливими параметрами є також розміри та вага модуля. Для наших потреб було важливо обрати модуль з габаритами 88×28×11,5 мм та вагою 50 грамів. Це забезпечує оптимальний баланс між функціональністю та компактністю, не навантажуючи при цьому БПЛА зайвою вагою;

- швидкість передачі даних. Висока швидкість передачі даних є критично важливою для забезпечення ефективного зв'язку. Вибраний модуль повинен бути здатним підтримувати швидкість інтернет-з'єднання до 150 Мбіт/сек на завантаження та до 50 Мбіт/сек на відправлення даних.

З урахуванням усіх цих критеріїв, було вирішено вибрати USB-модем Huawei E3372h 4G LTE (рисунок 3.3), який відповідає всім зазначеним вимогам. Цей модем працює в потрібних частотних групах (3, 7, 20), має компактні розміри та легку вагу, забезпечує високу швидкість інтернет-з'єднання, потребує стандартне живлення 5 вольт із силою струму 500 мА, яке легко може бути забезпечено від контролера зв'язку, та володіє помірною ціною в 49 доларів США. Таким чином, Huawei E3372h став оптимальним рішенням для нашої системи, поєднуючи в собі необхідні технічні характеристики та вигідну вартість.

Рисунок 3.3 – Зовнішній вигляд модему Huawei E3372h 4G LTE

При розробці системи для БПЛА надано перевагу використанню модуля LoRa для організації радіозв'язку. Вибір цього конкретного модуля був обумовлений його унікальними характеристиками (таблиця 3.2), які ідеально підходять для потреб системи БПЛА. У цій таблиці представлені чотири різні модулі LoRa, що відрізняються за такими параметрами, як дальність передачі, вартість, швидкість передачі даних, вага та габаритні розміри. Кожен з цих модулів має свої переваги і може бути більш або менш підходящим в залежності від специфічних потреб та умов використання.

Таблиця 3.2 — Характеристики модулів радіозв'язку

Модель	Максимальна Дальність Передачі (км)	Вартість (USD)	Швидкість Передачі Даних (кбіт/сек)	Вага (кг)	Габаритні Розміри (мм)
GAMMA-868	16	25	9.6	0.026	51×20×5
NiceRF LoRa611AES 100mW TTL	5	35	17	0.05	62×32.6×9.3
PICTAILPLUS LORA BOARD RN2483	15	66.95	300	0.02	50.8×24.5
DEMO BOARD RN2483 LORA MOTE	15	72.09	300	0.02	17.8×26.7×3

При виборі модуля LoRa для інтеграції у систему зв'язку для БПЛА, було зосереджено на кількох ключових критеріях, які визначають ефективність та практичність модуля в контексті наших потреб. Ці критерії були встановлені на підставі глибокого аналізу вимог, які висуваються до сучасних систем зв'язку БПЛА:

- дальність зв'язку. Основним вимогам є забезпечення дальності зв'язку понад 10 км. Цей параметр є критично важливим для забезпечення надійного зв'язку між БПЛА та наземним сервером, особливо у випадках, коли БПЛА виконує завдання на значних відстанях від пункту управління;

- швидкість передачі даних. Важливим параметром є також швидкість передачі даних, яка повинна бути не менше 50 кбіт/с. Ця швидкість забезпечує адекватний обмін телеметричними даними та іншою важливою інформацією між БПЛА та сервером, що є необхідним для ефективного контролю та управління польотами;

- розміри та вага. Параметри розміру та ваги модуля також мають велике значення. Оптимальні розміри 100×80 мм та вага не більше 30 грамів дозволяють інтегрувати модуль у БПЛА без значного збільшення його загальної ваги та зменшення маневреності. Компактність модуля є важливою, щоб не впливати на аеродинамічні характеристики та енергоефективність літального апарата.

На підставі цих критеріїв було вирішено, що модуль RN2483 LORA MOTE (рисунок 3.4) відповідає всім вимогам найкраще. Цей модуль вирізняється своєю високою дальністю передачі сигналу, достатньою швидкістю передачі даних та оптимальними розмірами і вагою. Його використання в системі зв'язку БПЛА гарантує, що він не буде надмірно обтяжувати літальний апарат або негативно впливати на його роботу.

Рисунок 3.4 – Зовнішній вигляд модуля RN2483 LORA MOTE

Отже, вибір RN2483 LORA MOTE є оптимальним рішенням, яке поєднує в собі високу функціональність та практичність для потреб нашої системи.

Модуль RN2483 LORA MOTE був обраний для використання у системі зв'язку БПЛА, володіє низкою ключових характеристик, які роблять його ідеальним вибором для наших цілей. Цей модуль забезпечує високу дальність дії до 15 км, що є важливим для управління БПЛА на значні відстані. Швидкість інтернет-з’єднання до 300 кбіт/с гарантує ефективний обмін даними між БПЛА та сервером. Його вага складає всього 0.02 кг, що дуже важливо для збереження обмеженої вантажопідйомності та маневреності літального апарату. Маленькі розміри модуля - 17.8×26.7×3 мм - сприяють його легкій інтеграції в конструкцію БПЛА без значного збільшення його розмірів або ваги.

В рамках системи зв'язку, яка розробляється, також було вирішено включити модуль Wi-Fi як резервний канал зв'язку. Вибір Wi-Fi модуля є стратегічно важливим, оскільки він діє як запасний варіант у випадках, коли основний канал зв'язку через модуль LTE не може забезпечити належної передачі даних через погіршення умов зв'язку або інші зовнішні перешкоди. Використання Wi-Fi модуля як резервного зв'язку забезпечує додаткову надійність системи, особливо в критичних ситуаціях, де стабільність зв'язку має вирішальне значення.

Основна функція Wi-Fi модуля полягає у забезпеченні інтернет-з'єднання між БПЛА та сервером. Цей модуль використовує широко доступну та перевірену технологію Wi-Fi, яка може бути важливою в міських умовах та інших місцях з наявністю існуючої Wi-Fi інфраструктури. Включення Wi-Fi модуля у систему зв'язку БПЛА не тільки розширює можливості зв'язку, але й забезпечує більш гнучке та надійне управління літальним апаратом у різноманітних умовах експлуатації.

У таблиці 3.3 проведено порівняльний аналіз Wi-Fi модулів. Ця таблиця забезпечує детальний огляд основних технічних характеристик трьох модулів

Wi-Fi, які розглядалися для використання в системі. Кожен з цих модулів має свої унікальні особливості.

Таблиця 3.3 — Характеристики модулів радіозв'язку

Модель модуля Wi-Fi	Потуж-ність сигналу (дБм)	Макси-мальна швидкість передачі (Мб/сек)	Вартість (USD)	Вага (грами)	Енерго-спожи-вання (В /мА)	Розміри (мм)
ESP8266 WIFI Modul ESP-07	20	72.2	5	3	3.3/80	16× 21.2×3
XB2B-WFUT-001	16	72.2	29	3	3.3/309	24.3× 32.94×3
ISM4336 2-L36-U	17	72.2	10	1	3.3/350	24.38× 15.26×3

При виборі модуля Wi-Fi для системи зв'язку БПЛА потрібно звернути увагу на чотири ключові критерії, які були визначальними для даного рішення:

- вихідна потужність. Модуль з вихідною потужністю 20 дБм, що забезпечує достатній радіус дії для стабільного з'єднання в умовах, де БПЛА може знаходитися на великій відстані від точки доступу;
- швидкість зв'язку. Важливим було забезпечення швидкості передачі даних не менше 5 Мбіт/с, що є достатньою для передачі телеметричних даних та іншої інформації, необхідної для управління та моніторингу БПЛА;
- розміри та вага. Оскільки кожен додатковий грам ваги має значення для БПЛА, надано перевагу модулю з розмірами 100x80 мм та вагою 30

грамів. Це забезпечує оптимальне співвідношення між розміром та функціональністю, не перевантажуючи апарат;

- споживання енергії. Енергоефективність є ключовим фактором для автономності БПЛА. Тому модуль зі споживанням енергії 3.3В/80мА був визначений як оптимальний, забезпечуючи необхідний баланс між потужністю та часом роботи апарату.

З урахуванням усіх цих критеріїв, найбільш відповідним вибором став модуль Wi-Fi ESP8266 (рисунок 3.5). Цей модуль ідеально підходить до поставлених вимог, оскільки він забезпечує потрібну потужність, швидкість, компактність і енергоефективність. ESP8266 є відомим у галузі завдяки своїм високим технічним характеристикам та надійності, що робить його ідеальним рішенням для системи зв'язку БПЛА.

На відміну від інших модулів, які під’єднуються до контролеру за допомогою USB інтерфейсу, обраний модуль необхідно приєднувати через порт UART.

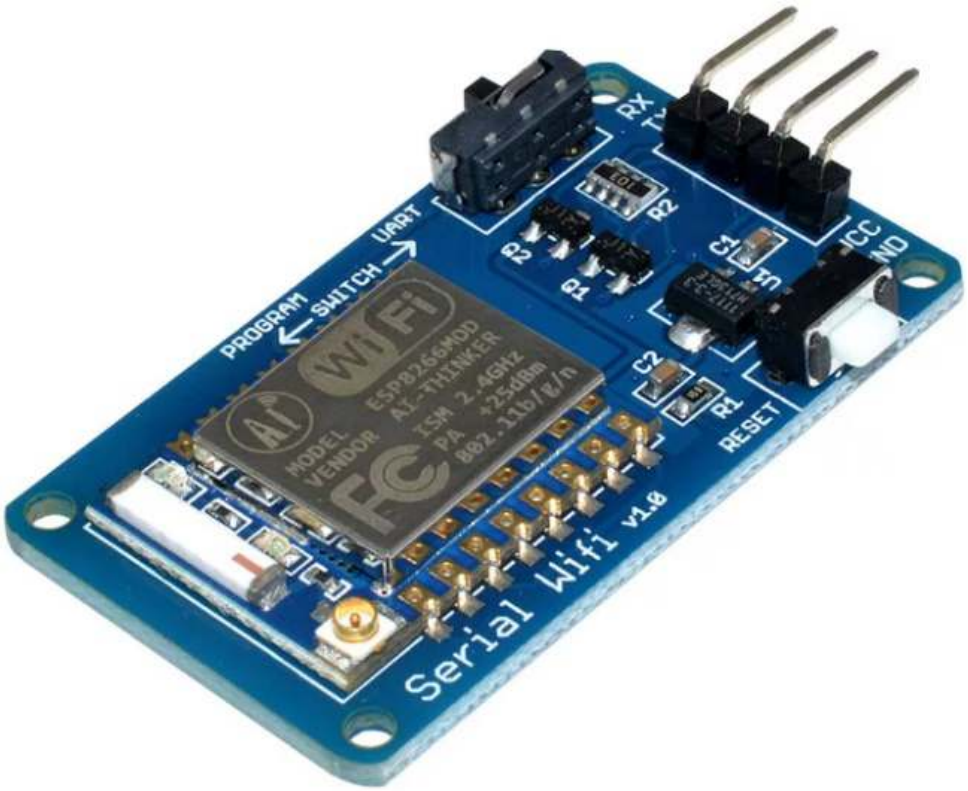

Рисунок 3.5 – Зовнішній вигляд модулю ESP8266

Таблиця 3.4 – Порівняльний аналіз підключення контролерів

Тип інтерфейсу	USB	UART	USB
Опис	Більшість модулів у системі під'єднуються до контролера через USB інтерфейс, що забезпечує швидке та зручне з'єднання.	На відміну від інших модулів, обраний модуль потребує підключення через порт UART, що вимагає додаткового налаштування але забезпечує більшу гнучкість у використанні.	Додатковий модуль також підключається через USB інтерфейс, доповнюючи систему та забезпечуючи додаткові можливості зв'язку.

Перевага використання UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) у порівнянні з іншими інтерфейсами, такими як USB, полягає в наступному:

- простота і надійність. UART є дуже простим у реалізації та експлуатації. Цей інтерфейс не вимагає складних протоколів або мікросхем контролера, як це потрібно для USB, що робить його надійним рішенням для систем, де важлива простота та стабільність;
- низьке споживання енергії. У порівнянні з USB, UART зазвичай має нижче енергоспоживання, що є важливим для пристроїв з обмеженим джерелом живлення, наприклад, для БПЛА;
- вища гнучкість у підключенні. UART дозволяє більш гнучке підключення на фізичному рівні, оскільки може працювати на різних напругах та швидкостях передачі даних. Це дає можливість адаптувати інтерфейс до специфічних потреб системи;
- менше перешкод при великій відстані. UART ефективніше працює на

великих відстанях порівняно з USB, що робить його більш підходящим для використання у системах, де необхідно забезпечити стабільний зв'язок на відстані;

- простота інтеграції з іншими компонентами. Багато мікроконтролерів та інших електронних компонентів мають вбудовані UART інтерфейси, що полегшує їх інтеграцію в різні системи.

У сукупності, ці фактори роблять UART вибором, який забезпечує простоту, ефективність та гнучкість, особливо в системах, де ці якості є вирішальними.

Під час розробки системи, одним з найважливіших завдань є адекватний вибір мікроконтролера. Це рішення має значний вплив на загальну ефективність, функціональність та вартість системи. З метою забезпечення найкращого вибору проведено порівняльний аналіз різних доступних на ринку мікроконтролерів. Враховано ряд критично важливих параметрів, таких як обчислювальна потужність, розмір пам'яті, швидкість обробки даних, фізичні розміри, вагу та вартість кожного мікроконтролера.

Результати аналізу були узагальнені та представлені у вигляді таблиці 3.5. У цій таблиці зібрано важливу інформацію про кожен розглянутий мікроконтролер. Оцінка кожного мікроконтролера включала аналіз його технічних можливостей та вартості, що є важливим чинником в умовах обмеженого бюджету.

Таблиця 3.5 – Результати порівняльного аналізу

Модель Мікроконтролера	Тактова Частота CPU (МГц)	RAM (МБ)	Wi-Fi	Bluetooth	Графічний процесор GPU	Розміри (мм)
Raspberry Pi Zero	1000	512	802.11 b/g/n	4.1, BLE	VideoCore IV (400 МГц)	85,6 × 54

Продовження таблиці 3.5

Модель Мікроконтролера	Тактова Частота CPU (МГц)	RAM (МБ)	Wi-Fi	Bluetooth	Графічний процесор GPU	Розміри (мм)
Arduino Nano 33 IoT	48	32	802.11 b/g/n	4.2	Немає	45×28
Adafruit Feather HUZZAH	80	32	802.11 b/g/n	Немає	Немає	51×23
SparkFun ESP32 Thing	240	32	802.11 b/g/n	4.2, BLE	Немає	68×28

Вибір Raspberry Pi Zero для використання в системі управління безпілотним літальним апаратом (БПЛА) обумовлений декількома ключовими факторами:

- компактність і легкість. Raspberry Pi Zero має дуже малі розміри (65×30×5 мм) та низьку вагу (9 грамів), що є критично важливим для БПЛА. Малий розмір та вага дозволяють інтегрувати цей мікроконтролер у БПЛА без значного збільшення загальної маси або впливу на аеродинамічні характеристики;
- бездротові зв'язки Wi-Fi і Bluetooth. Raspberry Pi Zero оснащений вбудованими модулями Wi-Fi (802.11 b/g/n) та Bluetooth 4.1, що забезпечують зручне та гнучке підключення до мережі та інших пристроїв. Це дозволяє здійснювати дистанційне управління БПЛА та передачу даних без необхідності додаткового обладнання зв'язку;
- обчислювальна потужність. З тактовою частотою процесора 1 ГГц та

512 МБ RAM, Raspberry Pi Zero забезпечує достатньо обчислювальної потужності для обробки даних, управління польотом, а також для виконання додаткових задач, таких як обробка зображень або даних з датчиків;

- низьке споживання енергії. При роботі від мікро USB, Raspberry Pi Zero споживає невелику кількість енергії, що є важливим для забезпечення тривалого часу роботи БПЛА;

- гнучкість розширення. Стандартний 40-піновий роз'єм GPIO дозволяє легко підключати різноманітні додаткові модулі та датчики, розширюючи функціонал БПЛА;

- підтримка спільноти та наявність ресурсів. Raspberry Pi Zero користується широкою підтримкою розробників та має велику кількість документації, прикладів використання та бібліотек, що спрощує процес розробки та інтеграції системи.

Враховуючи ці характеристики, Raspberry Pi Zero є оптимальним вибором для системи БПЛА, який поєднує компактність, потужність, гнучкість та ефективність в одному пристрої.

На рисунку 3.6 можна побачити деталізоване зображення зовнішнього вигляду мікроконтролера Raspberry Pi Zero. Цей рисунок дає уявлення про фізичні характеристики та конструкцію пристрою, що є важливим для розуміння його можливостей і способів використання. На цьому зображенні ви зможете побачити компактні розміри мікроконтролера, його роз'єми та розташування різних компонентів на платі.

Рисунок 3.6 – Зовнішній вигляд контролера Raspberry Pi Zero

Зокрема, на рисунку виділені основні елементи Raspberry Pi Zero, такі як слот для microSD карти, роз'єм Mini HDMI, порт Micro USB для живлення, а також 40-піновий роз'єм GPIO, який забезпечує гнучкість у підключенні додаткових модулів та датчиків. Також на рисунку можна побачити, як розташовані на платі процесор, пам'ять та інші важливі компоненти, що забезпечують функціонування мікроконтролера.

3.4 Оцінка фізичних параметрів системи

При проектуванні нашого пристрою одним з ключових аспектів, що враховуються відповідно до технічного завдання, є габаритні обмеження. Зазначено, що загальні розміри пристрою мають бути не більшими, ніж 70×70×100 мм. Таке обмеження вимагає від нас ретельного планування розташування внутрішніх компонентів, а також врахування товщини стінок корпуса, щоб усе відповідало заданим розмірам.

В процесі розробки ми вирішили розмістити модулі в корпусі таким чином, щоб вони знаходились безпосередньо над мікроконтролером. Таке рішення дозволяє оптимально використовувати доступний простір всередині корпусу, мінімізуючи загальний об'єм пристрою. Крім того, таке розташування компонентів сприятливо впливає на теплообмін: тепло від мікроконтролера та інших модулів розподіляється більш ефективно, знижуючи ризик перегріву.

Для візуалізації та перевірки концепції створено 3D модель корпусу з використанням програмного забезпечення SolidWorks. Це дозволило детально прорахувати розміщення кожного компонента, переконатися в їхній взаємодії та впевнитися, що загальні габарити пристрою відповідають заданим вимогам. Результат цієї роботи можна побачити на рисунку 3.7, де представлено кінцевий варіант розташування компонентів у корпусі.

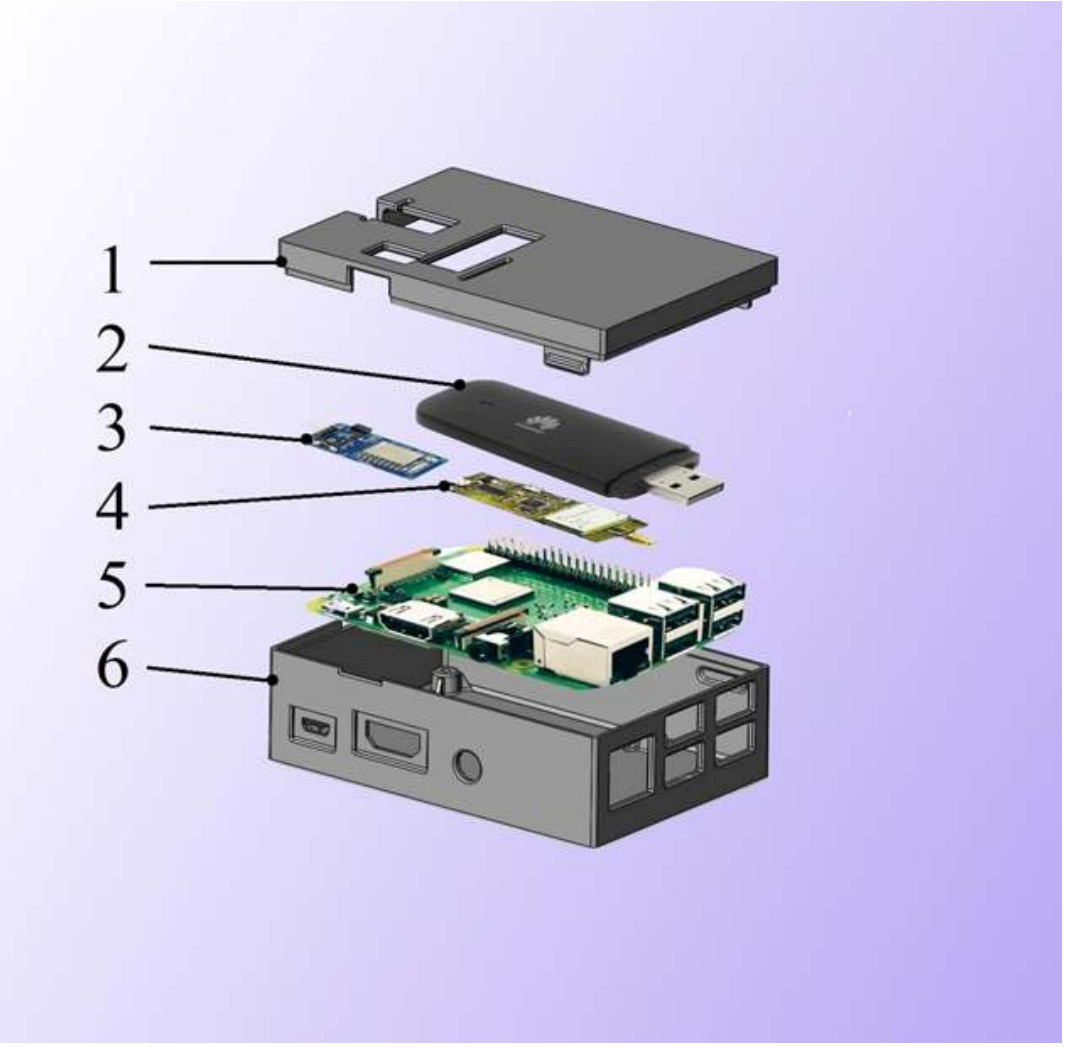

Рисунок 3.7 – Схема розміщення елементів у корпусі

Схема розміщення елементів у корпусі пристрою ретельно спланована, щоб забезпечити ефективне використання простору та оптимальний теплообмін. Розташування ключових компонентів виглядають наступним чином:

- кришка корпусу (1). Верхня частина корпусу, кришка, має важливе значення для доступу до внутрішніх компонентів та забезпечення захисту від зовнішніх факторів;

- LTE модуль (2). LTE модуль розташований таким чином, щоб оптимізувати прийом та передачу сигналу. Його з'єднання з мікроконтролером виконується через порти USB, що забезпечує надійність підключення;

- Wi-Fi модуль (3). Wi-Fi модуль підключений до системи через роз'єм KK 254 UART. Це забезпечує стабільне з'єднання та легкість у обслуговуванні;

- LoRa модуль (4). Модуль LoRa, аналогічно до LTE модуля, розміщений близько до верхньої кришки для забезпечення ефективного зв'язку. Підключення до мікроконтролера також виконується через USB;

- мікроконтролер зв'язку Raspberry Pi (5). Як центральний елемент системи, мікроконтролер зв'язку Raspberry Pi фіксується в нижній частині корпусу. Його розташування дозволяє легко підключати до нього інші модулі;

- корпус (6). Всі компоненти знаходяться всередині міцного та добре захищеного корпусу, який виконує не лише захисну, але й конструктивну функцію.

Монтаж компонентів виконується з високою точністю. Мікроконтролер кріпиться до корпусу за допомогою шурупів розміром 3,5x16 мм, що забезпечує його стабільне розташування. Модулі LTE, Wi-Fi та LoRa кріпляться до верхньої кришки за допомогою спеціальних кліпс, розташованих під нею. Це не тільки полегшує монтаж та демонтаж модулів при необхідності, але й забезпечує надійне їх тримання.

Таке розташування модулів та мікроконтролера в корпусі не тільки відповідає габаритним вимогам, але й оптимізує роботу системи в цілому, забезпечуючи легкий доступ до компонентів та ефективний теплообмін.

На рисунку 3.8 представлена схема, яка ілюструє розташування внутрішніх модулів нашого пристрою. Ця схема є важливим елементом проектування, оскільки вона демонструє, яким чином різні компоненти взаємодіють та розміщуються всередині корпусу пристрою. Особлива увага приділена оптимізації простору, щоб забезпечити максимальну компактність та ефективність розміщення компонентів.

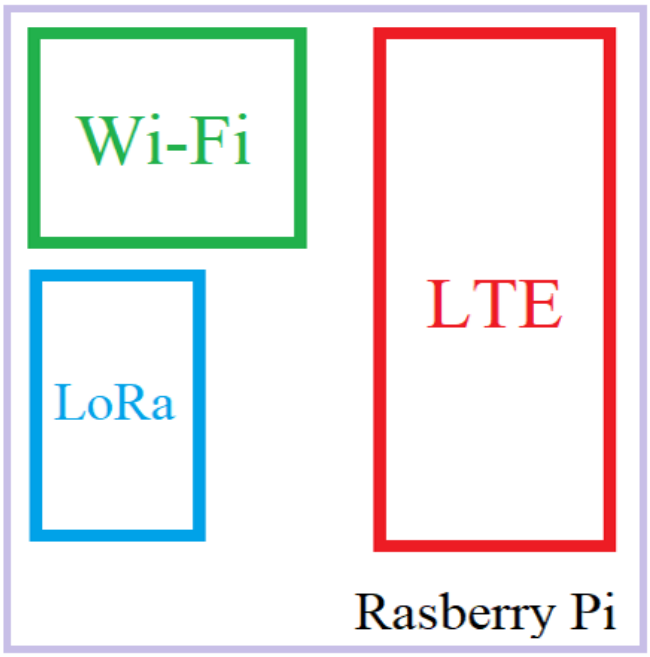

Рисунок 3.8 – Розташування модулів у корпусі

При плануванні розташування компонентів ключовим елементом став мікроконтролер Raspberry Pi, який є найбільшим компонентом в конструкції. Його розміри були взяті за основу при розрахунку довжини та ширини корпусу. Щоб визначити необхідну висоту корпусу, додано висоту мікроконтролера до висоти найвищого модуля зв'язку – LTE модуля. До цієї суми також було додано товщину стінок корпуса та необхідну відстань для надійного кріплення компонентів всередині. Кожен компонент має своє специфічне місце розташування, що забезпечує не тільки ефективне використання простору, але й оптимальний теплообмін та доступність для обслуговування або апгрейду. У таблиці 3.6 наведені лінійні розміри кожного компоненту.

Таблиця 3.6 — Розміри компонентів системи

Компонент	Ширина (мм)	Довжина (мм)	Товщина (мм)
Модуль LTE	78	28	11.5
Модуль Wi-Fi	21.2	16	3

Продовження таблиці 3.6

Компонент	Ширина (мм)	Довжина (мм)	Товщина (мм)
Модуль LoRa	26.7	7.8	3
Контролер зв'язку	85.6	54	17

Цей підхід до розміщення компонентів забезпечує, що кожен елемент системи оптимально використовує доступний простір, водночас дозволяючи зберегти загальні габарити пристрою в межах встановлених технічним завданням вимог.

При проектуванні корпусу нашого пристрою ми взяли до уваги габаритні розміри основних компонентів, щоб забезпечити достатній простір для їх розміщення та ефективного функціонування. Найбільшим компонентом у нашій конструкції є мікроконтролер Raspberry Pi з розмірами: 85,6 × 54 × 17 мм. Також важливим компонентом є LTE модуль, який має розміри 78 × 28 × 11.5 мм і є найтовстішим серед інших елементів, що залишилися.

При розрахунку зовнішніх габаритів корпусу ми врахували також товщину стінок корпусу, яку визначили як 1 мм, та додатковий простір між компонентами — 5 мм, який необхідний для вентиляції та забезпечення безпечної експлуатації компонентів. Окрім цього, ми вирішили залишити невеликий простір у 0.5 мм між краями плати та стінками корпусу, щоб запобігти їхньому щільному приляганню та забезпечити додаткову вільну циркуляцію повітря.

На основі цих розрахунків визначено розрахункову довжину корпусу як 89.6 мм, яка складається з довжини мікроконтролера та сумарної товщини стінок і простору для вільного розміщення: 85,6 + (1,5 + 0,5) * 2. Аналогічно, розрахункова ширина корпусу складає 57,98 мм: 53,98 + (1.5 + 0.5) * 2. Товщина корпусу розрахована як 33,5 мм, враховуючи висоту

мікроконтролера, LTE модуля та потрібний простір між ними: 17 + 11,5 + 5 *3.

При проектуванні корпусу для мікроконтролера Raspberry Pi особлива увага була звернена на необхідність його адаптації до раніше визначених масогабаритних характеристик. Для цього розроблено конструкцію корпусу, яка не лише забезпечує достатньо простору для розміщення самого мікроконтролера, але й враховує необхідність кріплення додаткових модулів (рисунок 3.9).

Рисунок 3.9 – Зовнішній вигляд корпусу

Важливою частиною дизайну корпусу є інтеграція додаткових стійок, кліпс та шурупів, які надають надійність кріплення мікропроцесора та інших модулів. Ці елементи кріплення забезпечують стабільність компонентів всередині корпусу та гарантують, що вони залишаться на місці навіть при високих вібраціях або інших динамічних навантаженнях, які можуть виникати під час експлуатації БПЛА.

Габаритні розміри корпусу, які складають 96 мм в довжину, 70 мм в ширину та 35 мм в висоту, були розраховані таким чином, щоб вони

відповідали вимогам, вказаним у технічному завданні. Ці розміри дозволяють розмістити всі необхідні компоненти в корпусі, не перевищуючи допустимих габаритних обмежень. Окрім того, такі розміри корпусу забезпечують достатньо місця для вентиляції та доступу до компонентів для обслуговування чи модифікації.

Ретельне планування та продуманий дизайн корпусу дозволяють оптимально використовувати внутрішній простір, забезпечуючи ефективність та функціональність розміщення мікроконтролера Raspberry Pi та додаткових модулів, водночас відповідаючи всім технічним вимогам.

Корпус має сім технологічних отворів, спеціально розроблених для різних з'єднань та роз'ємів, що забезпечують легкий доступ до основних функцій пристрою. Додатково, конструкція передбачає два опціональні отвори, які можуть бути легко сформовані шляхом видавлювання пластин у боковій стінці корпусу при необхідності. Це дозволяє додаткову гнучкість у кастомізації пристрою в залежності від специфічних потреб використання.

Для визначення загальної ваги пристрою ми провели розрахунки, сумувавши вагу всіх внутрішніх компонентів, включно з корпусом. Крім того, ми додали 10% до цієї суми, щоб врахувати вагу елементів кріплення та з'єднувальних проводів. Таким чином, вага компонентів (0,05 + 0,02 + 0,003 + 0.064 кг) разом з додатковими 10% складає 0,146 кг. Розрахункова вага нашого пристрою становить 146 грамів, що на 164 грами менше максимально допустимої ваги згідно з технічним завданням.

Ця ретельна розробка та розрахунки гарантують, що наш пристрій не лише відповідає всім технічним вимогам, але й є оптимізованим за розміром та вагою, забезпечуючи високу мобільність та зручність використання.

3.5 Вибір методів електричної інтеграції та дизайн корпусу

Для забезпечення надійного та стабільного функціонування нашого пристрою, особливу увагу слід приділити з'єднанням всередині системи.

Ключовим аспектом є використання спеціалізованих роз'ємів для мікроконтролера, які оснащені фіксуючими елементами, такими як «лапка», для запобігання їх випадкового роз'єднання. Такі роз'єми забезпечують додаткову надійність підключення, особливо в умовах, де пристрій може зазнавати вібрацій або рухів, як це часто відбувається в безпілотних літальних апаратах.

Під час під'єднання обраних компонентів необхідно слідувати рекомендованій структурній схемі (рисунок 3.10). Ця схема розроблена таким чином, щоб оптимізувати як електричні з'єднання, так і фізичне розташування елементів всередині корпусу. Вона враховує такі фактори, як довжина проводів, необхідність уникнення перехрещення кабелів, а також забезпечення достатнього простору між компонентами для вентиляції та теплового розсіювання.

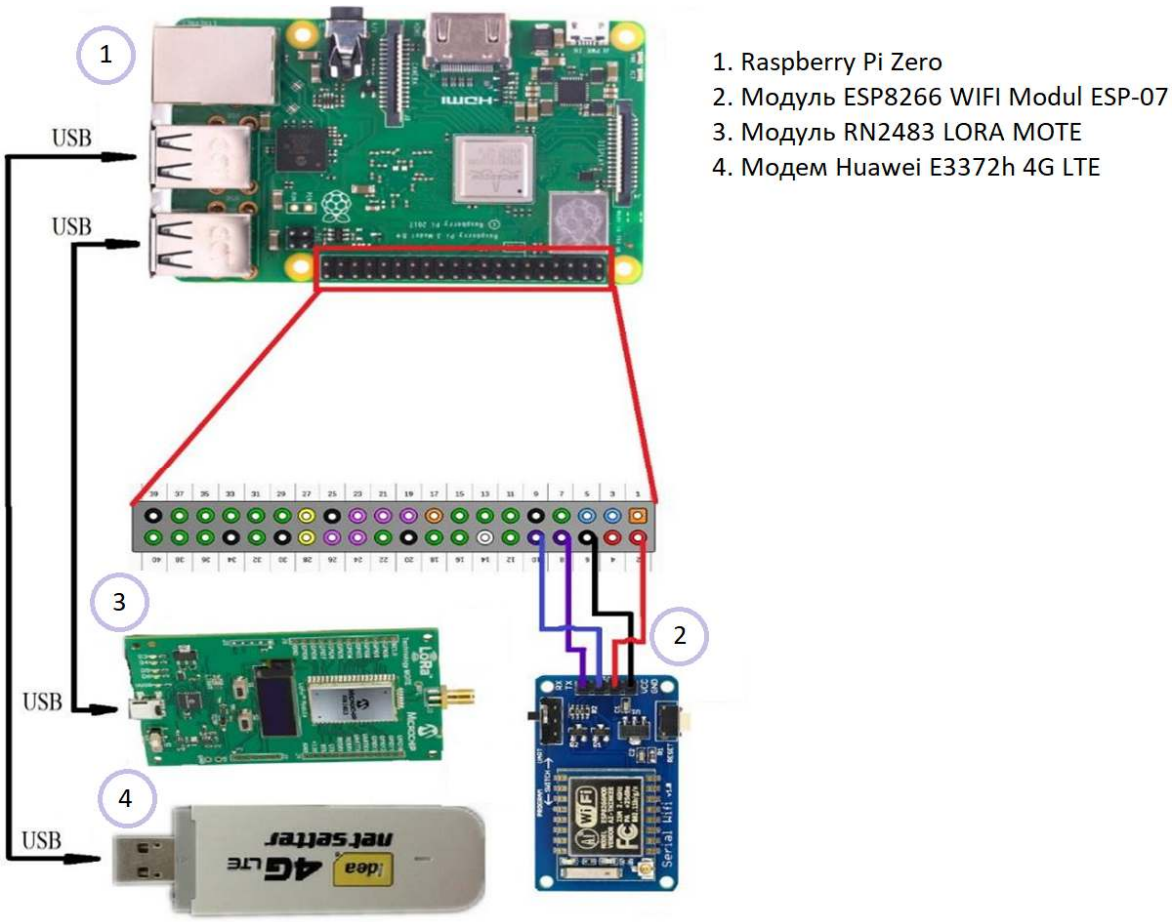

Рисунок 3.10 – Структурна схема модулів БПЛА

У конструкції пристрою використано три різні типи роз'ємів для забезпечення надійного та ефективного з'єднання різних компонентів системи. Кожен з цих роз'ємів був обраний відповідно до специфічних потреб та функціональності відповідних компонентів:

- штирьовий роз’єм KK 254 з кроком контактів 2,54мм. Цей тип роз'єму використовується для з'єднання мікроконтролера з модулем Wi-Fi. Штирьові роз'єми KK 254 ідеально підходять для цієї мети, оскільки вони забезпечують надійне механічне з'єднання та хорошу електричну провідність. Крок контактів у 2,54 мм є стандартним і забезпечує легку сумісність із різноманітними платами та компонентами;

- Micro USB роз’єм. Для електричного з'єднання модуля LoRa з мікроконтролером було використано micro USB роз’єм. Цей роз’єм є компактним, що дозволяє економити простір всередині корпусу, а також надійним, що забезпечує стабільне з'єднання;

- USB Type A роз’єм. Для з'єднання модуля LTE з контролером використовується роз'єм USB Type A. Цей роз'єм є широко розповсюдженим та надійним, забезпечуючи високу якість передачі даних та легкість у використанні.

Кожен з цих роз'ємів виконує важливу роль у забезпеченні функціональності та надійності системи. Їх правильний вибір та використання в конструкції пристрою є ключовими для забезпечення ефективності роботи та легкості обслуговування. Особлива увага приділяється якості цих з'єднань, оскільки вони мають витримувати різні умови експлуатації, включаючи вібрації та зміни температури.

3.6 Опції кріплення на аеродинамічну платформу

У світі БПЛА існує велика різноманітність моделей, кожна з яких має свої унікальні масогабаритні характеристики, конструкції, форми корпусів та використовувані матеріали. Враховуючи це розмаїття, надзвичайно

важливим є розробка універсального методу закріплення нашого пристрою на різні типи дронів. Це дозволить нашому пристрою бути сумісним із широким спектром безпілотних літальних апаратів, що значно розширює потенціал його застосування.

Для розробки такого універсального кріплення ми взяли за приклад одну з найпоширеніших на даний момент моделей БПЛА — Dji mavic (рисунок 3.11). Цей безпілотник, виготовлений з міцного пластику, включає у свою конструкцію сенсори висоти та перешкод, розміщені знизу. Важливою умовою при розробці кріплення для нашого пристрою є необхідність уникнення перекриття цих сенсорів, що могло б негативно вплинути на функціональність дрона.

Рисунок 3.11 – Зовнішній вигляд модель Dji mavic

Враховуючи ці аспекти, ми розробили кріплення, яке забезпечує легке та надійне приєднання пристрою до БПЛА, мінімізуючи ризик впливу на важливі компоненти дрона, такі як сенсори. Кріплення розроблено таким чином, щоб воно могло бути легко адаптовано до різних моделей БПЛА, не вимагаючи значних змін в конструкції самого дрона або пристрою.

БПЛА на який зроблено акцент при розробці нашого пристрою, представляє собою сучасний агрегат, виготовлений з міцного пластику. Однією з його ключових особливостей є наявність сенсорів висоти та

перешкод, розташованих в нижній частині корпусу. При проектуванні системи кріплення для пристрою враховано необхідність забезпечення вільного доступу до цих сенсорів, щоб не перешкоджати їх функціонуванню.

Розміри цього БПЛА у розкладеному стані складають 322 мм у довжину, 242 мм у ширину та 84 мм у висоту, тоді як розміри самого "тіла" становлять 214 мм в довжину, 91 мм в ширину та 84 мм в висоту. Ці габаритні характеристики важливі для визначення оптимального способу кріплення нашого пристрою до БПЛА.

Після аналізу різних варіантів кріплення ми вирішили використовувати стяжки, оскільки вони є універсальними, міцними та займають мінімум простору. Цей метод кріплення дозволить надійно закріпити наш пристрій на БПЛА, не займаючи зайвого місця та не впливаючи на аеродинаміку або функціональність дрона.

Розрахунок довжини стяжки базується на периметрі спряжених корпусів, корпусу БПЛА та корпусу розробленого нами пристрою. Враховуючи розміри обох корпусів, ми отримуємо периметр 399 мм (91+84×2+70+35×2). Серед стандартних розмірів стяжок доступний варіант із максимальним периметром охвату 45 см та максимальним робочим навантаженням 35 кг. Хоча таке робоче навантаження може здатися надмірним для наших потреб, це найменше навантаження, яке доступне для стяжок такої довжини, що робить їх ідеальним вибором для нашого застосування.

Використання таких стяжок не лише забезпечить міцне та надійне кріплення нашого пристрою, але й гарантує, що воно не буде перешкоджати роботі сенсорів або іншим функціям БПЛА.

Щоб забезпечити максимальну надійність кріплення пристрою до БПЛА, важливо використовувати ефективну стратегію закріплення, яка запобігає його сповзанню під час польоту. Оптимальним рішенням у цьому випадку є використання трьох стяжок: двох по краях та однієї у центрі

пристрою. Це дозволяє рівномірно розподілити навантаження і забезпечити стабільне кріплення.

Для підвищення ефективності цього методу кріплення пропонується використовувати резинову прокладку товщиною від 1 до 2 мм, розміщену між пристроєм і поверхнею БПЛА. Така прокладка не тільки покращує прилягання пристрою до поверхні БПЛА, але й допомагає зменшити вібраційний вплив під час польоту, що є важливим для забезпечення стабільності та надійності пристрою.

У випадку, якщо БПЛА виготовляється власноруч, рекомендується передбачити спеціальний відсік для компонентів системи передачі даних від БПЛА до серверу. Це забезпечить додатковий захист компонентів та дозволить інтегрувати систему передачі даних без необхідності зовнішнього кріплення. В іншому випадку, слід планувати закріплення нашого розробленого корпусу з урахуванням особливостей конструкції БПЛА.

На прикладі БПЛА Dji mavic показано оптимальне розміщення стяжок для закріплення пристрою (рисунок 3.12).

Рисунок 3.12 – Розміщення стяжок для закріплення розробленого пристрою на БПЛА

Ця схема відображає точні позиції, де слід розмістити стяжки, щоб забезпечити надійне кріплення, не перешкоджаючи при цьому роботі вбудованих сенсорів та інших важливих компонентів БПЛА. Використання такої схеми допоможе ефективно закріпити пристрій, забезпечуючи його стабільність і безпеку під час польотів.

3.7 Процедурна логіка пристрою

Одним з ключових завдань магістерської роботи є розробка ефективної системи для забезпечення неперервного зв'язку дрону під час польоту. Це завдання вимагає особливого підходу та врахування унікальних викликів, з якими може зіткнутися дрон у різних умовах. Одним із способів досягнення цієї мети є використання багатоканальної системи зв'язку, яка включає різні технології.

В контексті даної роботи прийнято рішення використовувати три основні технології зв'язку: LTE, Wi-Fi та LoRa. Кожна з цих технологій базується на своїх унікальних принципах роботи та оперує на різних радіочастотах, що забезпечує додаткову надійність та гнучкість системи. Вибір конкретної технології зв'язку в залежності від умов польоту дозволяє адаптуватися до різних дальностей комунікації та специфічних радіоумов, з якими може зіткнутися дрон.

Реалізація такої багатоканальної системи зв'язку вимагає складної інтеграції та координації між різними технологіями. Автоматичний вибір оптимального варіанту зв'язку (LTE, Wi-Fi, LoRa) виконується за допомогою мікроконтролера, який аналізує поточні умови радіообстановки та вибирає найбільш підходящий канал зв'язку. Це забезпечує неперервність зв'язку під час різних фаз польоту та в різноманітних середовищах.

Для створення ефективної системи зв'язку безпілотного літального апарата було уважно обрано три ключові технології: Wi-Fi, LTE та LoRa. Цей вибір базується на аналізі характеристик частот, що є актуальними для

регіону експлуатації дрону, яким є, наприклад, центральна частина України. Важливим було також врахування функціональних параметрів цих технологій, які включають швидкість передачі даних, методи кодування та ефективність покриття території.

Загалом, використання цих трьох технологій дає можливість створити багатофункціональну, адаптивну систему зв'язку для безпілотних літальних апаратів, яка здатна вибрати найоптимальніший варіант зв'язку в залежності від умов та радіообстановки, що забезпечує надійне та ефективне спілкування між дроном і сервером в різних умовах.

На рисунку 3.13 представлено блок-схему адаптивної системи зв'язку для безпілотних літальних апаратів.

Рисунок 3.13 – Схема роботи розробленого пристрою

Схема роботи пристрою розпочинається з ініціалізації, коли пристрій вмикається. Наступним етапом є ініціалізація модулів, включаючи LTE, Wi-Fi, LoRa, для забезпечення їх готовності до роботи. Далі система перевіряє стан кожного модуля. Якщо всі модулі працюють належним чином, процес переходить до встановлення зв'язку. В іншому випадку, якщо виявлено проблеми з будь-яким із модулів, виводиться повідомлення про помилку, і процес завершується.

Після успішної ініціалізації та перевірки модулів система встановлює зв'язок. У разі стабільного зв'язку розпочинається процес передачі даних. Якщо зв'язок нестабільний, система автоматично переключається на інший канал зв'язку, вибираючи між LTE, Wi-Fi та LoRa в залежності від умов, і продовжує передачу даних.

Під час передачі даних система постійно моніторить стан зв'язку. Якщо зв'язок залишається стабільним, процес передачі даних триває без перешкод. У випадку втрати зв'язку або його нестабільності система здійснює аварійне переключення на інший канал або активує аварійний протокол. Така міра забезпечує постійну готовність системи до реагування на зміни умов зв'язку.

Процес завершується, коли передача даних була завершена або виникає потреба у завершенні роботи пристрою (наприклад, через низький рівень заряду батареї). В таких випадках пристрій автоматично вимикається. Ця блок-схема діяльності демонструє послідовність кроків, які пристрій виконує для забезпечення надійного та стабільного зв'язку, включаючи ініціалізацію, моніторинг, аварійне переключення та завершення роботи.

3.8 Характеристика програмного забезпечення

Основною стратегією роботи пристрою є автоматичне перемикання між каналами зв'язку для забезпечення надійної та стабільної передачі даних. Цей принцип діє на основі моніторингу стану зв'язку та відповідає на будь-які перебої у з'єднанні шляхом переходу на альтернативний канал зв'язку.

При розробці програмного алгоритму враховуються різні потреби у швидкості передачі даних. Для відправки телеметричних даних зазвичай достатньо швидкості близько 30 кбіт/сек. Однак, коли справа доходить до більш складних завдань, таких як керування польотом та трансляція відео в якості 480p, необхідно мати з'єднання з сервером на швидкості не менше 2 Мбіт/с.

Для вибору найефективнішого каналу зв'язку, алгоритм оцінює швидкість кожного з доступних каналів. Це відбувається за допомогою відправки одиночних перевірочних пакетів даних на сервер і вимірювання часу, необхідного для їх передачі. На основі цих вимірювань алгоритм визначає, який канал зв'язку на даний момент є найшвидшим і тому найбільш підходящим для передачі даних.

Ця стратегія забезпечує, що пристрій завжди використовує найкращий доступний канал зв'язку для відправки та отримання даних, що є критично важливим для підтримки безперебійної роботи безпілотного літального апарату. Такий підхід дозволяє оптимізувати використання ресурсів та забезпечує високу якість зв'язку, адаптовану до конкретних потреб та умов польоту.

3.9 Серверна інфраструктура

Сервер у системі є ключовим елементом, який відіграє вирішальну роль у забезпеченні зв'язку та контролю за БПЛА. Це пристрій являє собою комп'ютер, який має постійне підключення до інтернету і призначену статичну IP-адресу. Така конфігурація дозволяє забезпечити стабільний та надійний доступ до сервера з будь-якої точки світу.

На сервері встановлено програмний комплекс Ardupilot Ground Control Station (GCS) (рисунок 3.14). Ardupilot GCS — це спеціалізоване програмне забезпечення, яке використовується для моніторингу та управління польотами БПЛА. Ця програма дозволяє здійснювати налаштування

параметрів польоту дрона, включаючи налаштування поведінки у разі втрати з'єднання з сервером, різні режими польоту та параметри передачі телеметричних даних.

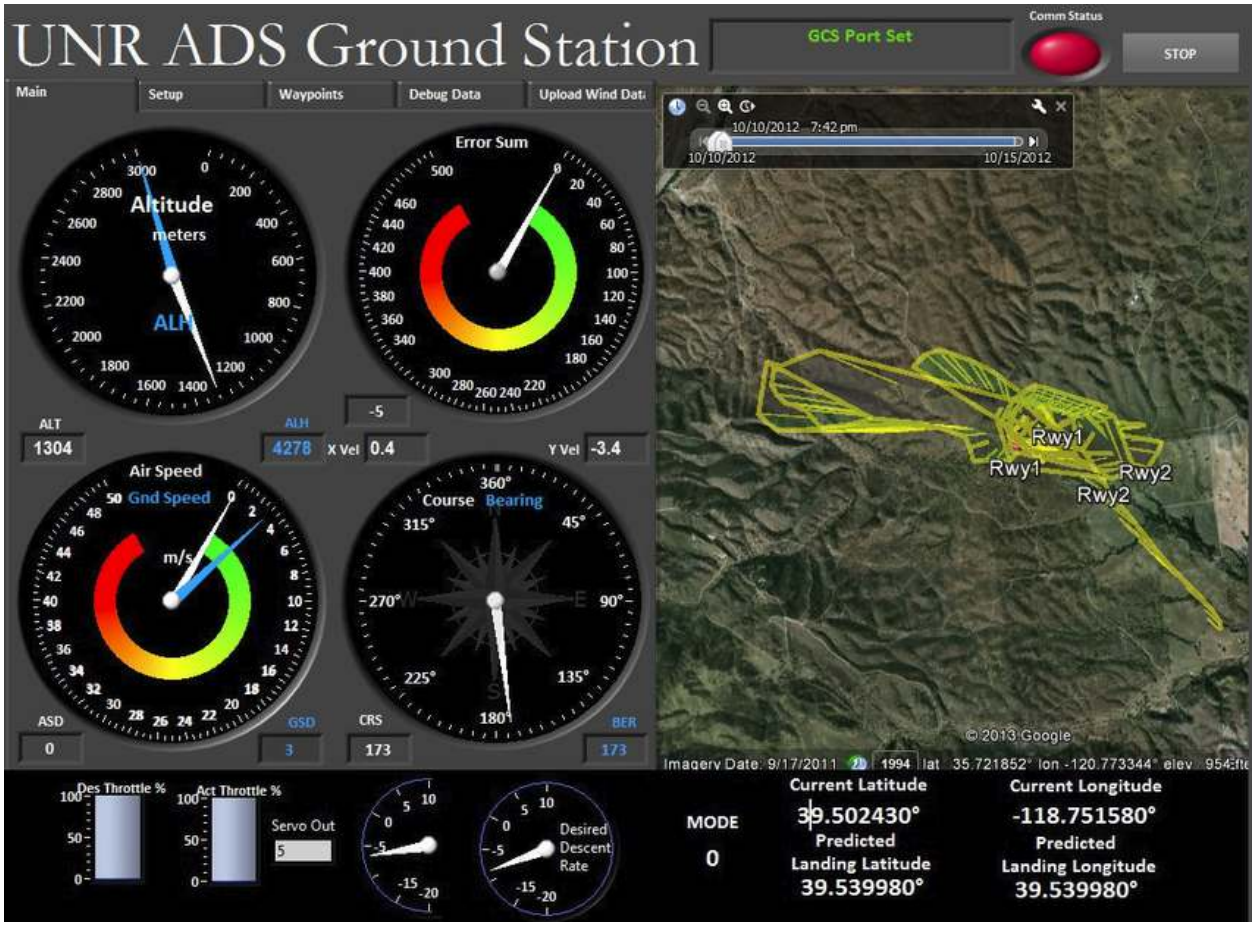

Рисунок 3.14 – Приклад інтерфейсу програми «Ardupilot»

На мікроконтролері БПЛА встановлена програма Ardupilot, яка є частиною цієї інтегрованої системи управління. Ardupilot — це високоефективне програмне забезпечення для автономного управління БПЛА, яке дозволяє налаштовувати польоти та поведінку дрона в різних ситуаціях.

Інтерфейс програми Ardupilot GCS на сервері надає користувачам широкі можливості для спостереження за польотом БПЛА в реальному часі. Користувачі можуть бачити зображення, яке передається з бортової відеокамери дрона, що дозволяє їм візуально контролювати стан і положення

БПЛА. Ця функціональність є особливо важливою для забезпечення безпеки польотів і ефективного виконання завдань.

Таким чином, система забезпечує комплексний контроль за польотом БПЛА, використовуючи сучасні технології зв'язку та програмне забезпечення. Це дозволяє ефективно управляти БПЛА, виконувати різноманітні задачі та забезпечувати високий рівень безпеки польотів.

3.10 Аналіз теплового стану та оцінка вібраційної стійкості

Для забезпечення надійної та стабільної роботи пристрою необхідно провести ретельний розрахунок його працездатності. Це включає аналіз теплового режиму пристрою та оцінку його витривалості при впливі вібраційних навантажень та ударів. Такий комплексний підхід до розрахунків дозволяє забезпечити високу надійність пристрою в різноманітних умовах експлуатації.

Розрахунки здійснюються за допомогою спеціалізованих комп'ютерних програм, які дозволяють врахувати численні параметри та фактори, що впливають на роботу пристрою. Для визначення коефіцієнта витривалості при вібраційних навантаженнях і ударах необхідно врахувати механічні характеристики матеріалу, з якого виготовлено пристрій, а також загальну масу пристрою з усіма встановленими на ньому елементами.

Особливу увагу слід приділити способу кріплення плати в корпусі, оскільки це впливає на загальну витривалість пристрою при вібраційних навантаженнях. Аналіз положення кожного з елементів на платі та їх вплив на розподіл навантажень є критично важливим. Параметри механічних впливів, такі як частота і амплітуда вібрацій, а також формування ударного імпульсу, його тривалість та ударне перевантаження, також мають бути детально проаналізовані.

У таблиці 3.7 представлено детальний опис параметрів, які визначають характеристики механічних впливів, на які може бути підданий пристрій.

Вібраційні впливи описані за такими параметрами, як частота, амплітуда, віброперевантаження та тривалість впливу. Ударні імпульси характеризуються тривалістю, амплітудою, кількістю ударів та формою імпульсу. Ця інформація є важливою для розуміння та аналізу витривалості пристрою під час його експлуатації.

Таблиця 3.7 — Розміри компонентів системи

№	Тип впливу	Параметр	Значення
1	Вібрація	Частота	70 Гц
2		Амплітуда	0,1 мм
3		Віброперевантаження	2 g
4		Тривалість	30 хв (0,5 год)
5	Ударний Імпульс	Тривалість	20 мс
6		Амплітуда	1 g
7		Число ударів	5
8		Форма імпульсу	Прямокутна

В контексті механічних характеристик особливо значущим є власна частота плати, яка в даному випадку становить 112 Гц. Це важливий параметр, оскільки він визначає, наскільки ефективно плата може витримувати вібраційні навантаження без ризику пошкодження. Аналіз показує, що мінімальний коефіцієнт запасу витривалості матеріалу плати є достатньо високим, становлячи 24 при вібраційних навантаженнях, що значно перевищує межу витривалості 33 МПа. Це гарантує, що плата зможе витримати інтенсивні вібрації, не втрачаючи своєї функціональності. При ударних навантаженнях коефіцієнт запасу витривалості становить 19, що також є доволі високим показником, забезпечуючи надійний захист від можливих механічних ушкоджень.

Щодо теплових характеристик, під час теплового розрахунку було приділено значну увагу аналізу тепловіддачі компонентів, особливо тих, що

мають найбільшу тепловіддачу. Правильне врахування цього аспекту є критично важливим для забезпечення стабільної роботи пристрою і запобігання перегріву. Всі розрахунки теплового режиму та оцінка надійності роботи пристрою докладно описані в додатку Б. Згідно з цими розрахунками, імовірність безвідмовної роботи пристрою протягом 100 000 годин складає 0,96. Це підтверджує високий рівень надійності та довговічності пристрою, гарантуючи його стабільну функціональність протягом тривалого часу.

Висновок до розділу

У цьому розділі детально розглянуто ключові аспекти та рішення, які були прийняті під час конструювання пристрою. Основним вибором став контролер Raspberry Pi, обраний через його високу адаптивність та гнучкість. Використання Raspberry Pi дозволяє легко налаштовувати систему під різноманітні завдання, забезпечуючи можливість додавання додаткових модулів для розширення функціональності.

Вага пристрою виявилася на 167 грамів легшою, ніж максимально дозволено за технічним завданням, що є важливим фактором для зменшення навантаження на двигуни БПЛА та подовження часу його польоту. Це дозволяє використовувати пристрій більш ефективно, збільшуючи ефективність та продуктивність БПЛА.

Ключовою перевагою є універсальний метод кріплення пристрою до БПЛА, який значно розширює спектр моделей дронів, з якими сумісна розроблена система. Такий підхід забезпечує високу гнучкість та широке застосування пристрою.

Розроблений програмний алгоритм, який відповідає за взаємодію компонентів і систем пристрою, забезпечує автономний безперервний зв'язок із сервером. Ця функція істотно відрізняється від інших аналогічних систем,

доступних на ринку, завдяки своїй здатності автоматично переключати протоколи зв'язку без потреби в ручному втручанні оператора.

В результаті проведених розрахунків вібраційних та ударних навантажень, а також теплового режиму, було встановлено, що пристрій відповідає вимогам технічного завдання. Однак, з огляду на постійні вібраційні впливи від двигунів БПЛА, рекомендується включити в конструкцію віброзахисну прокладку між БПЛА та бортовим пристроєм системи зв'язку. Це забезпечить додатковий захист від механічних впливів та сприятиме подальшому підвищенню надійності та ефективності роботи системи.

4 РЕАЛІЗАЦІЯ СТАРТАП-КОНЦЕПЦІЇ

4.1 Презентація концептуальної ідеї

Основна ідея проекту полягає у розробці передової системи передачі даних для БПЛА. Ця система має на увазі інтеграцію високотехнологічних рішень для дистанційного керування дронами через інтернет, а також запобігання зіткненням дронів у повітряному просторі.

Таблиця 4.1 — Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Система передачі даних для безпілотного літального апарата	Виробництво, наука	Можливість керувати дронами через інтернет, запобігання зіткнення дронів
Розширені функції автоматизації	Логістика, сільське господарство	Ефективне управління ресурсами, оптимізація логістичних процесів

Аналізуючи ідею, особливу увагу слід приділити можливим напрямкам застосування такої системи. Вона може виявитися корисною як у виробничому секторі, так і в наукових дослідженнях. Однією з ключових переваг системи є здатність керувати дронами дистанційно через інтернет, що відкриває нові можливості для автоматизації та дистанційного управління.

Порівнюючи розроблюваний проект із існуючими аналогами, такими як пакет програмного забезпечення "Диспетчерська система UAS Traffic Management", можна відзначити деякі відмінності. Хоча UAS Traffic Management виконує схожі функції, важливою перевагою розроблюваної

системи є можливість прямого керування дроном без використання пульта дистанційного керування. Це не лише спрощує процес управління, але й підвищує гнучкість і оперативність управління дронами.

4.2 Вивчення техніко-економічних аспектів

Оновлена ідея проекту включає розвиток системи, яка дозволяє підключати безпілотні літальні апарати (БПЛА) до інтернет-мережі без прямого втручання пілота дрону. Така інновація забезпечує високий рівень автоматизації польотів, відкриваючи нові можливості для дистанційного керування та моніторингу. Ця ключова особливість проекту дозволяє знизити залученість людського фактора у процесі польоту, що, у свою чергу, може підвищити ефективність використання дронів у різних сферах, таких як моніторинг, логістика, сільське господарство та навіть у наукових дослідженнях.

Таблиця 4.2 — Опис ідеї стартап-проекту

№ з/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	Мій проект W (слабка сторона)	Конкурент N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
1	Простота		✔	
2	Дешевизна	✔		✔
3	Швидкодія	✔		✔
4	Автоматизація процесів		✔	
5	Безпека польотів	✔		✔

У таблиці вище наведено аналіз сильних, слабких та нейтральних характеристик проекту, що дозволяє глибше зрозуміти його конкурентні

переваги. Простота використання, дешевизна реалізації, швидкодія системи, а також забезпечення високої безпеки польотів є ключовими факторами, що визначають потенціал проекту на ринку. Ці характеристики відображають унікальні особливості розробки, які вирізняють її від конкурентів та пропонують значні переваги для кінцевих користувачів.

4.3 Оцінка технологічної виправданості

У цьому розділі виконується детальний аудит технології, що необхідна для реалізації ідеї проекту, який передбачає розробку системи передачі даних для безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Основна мета полягає у виборі найбільш підходящої мови програмування або середовища програмування, яке дозволить ефективно реалізувати заплановані функціональні можливості.

Таблиця 4.3 — Технологічна реалізація проекту

Мова програмування	Особливості	Переваги	Недоліки
Python	Інтерпретована, об'єктно-орієнтована, підтримка модульності	Модульність, повторне використання коду	Потребує інтерпретатора
C++	Високорівнева, підтримка кількох парадигм	Гнучкість, ефективність	Складність синтаксису
JavaScript	Динамічна, для сценаріїв веб-сторінок, взаємодія з користувачем	Інтерактивність, асинхронність	Обмеження браузера
Ruby	Об'єктно-орієнтована, динамічна, зручна для	Швидкість розробки,	Менш популярна

Продовження таблиці 4.3

Мова програмування	Особливості	Переваги	Недоліки
Java	Інтерпретована, багатоплатформенна, об'єктно-орієнтована	Переносимість, безпека	Потребує JVM (Java Virtual Machine)

Обрання JavaScript для розробки програмного забезпечення даного проекту може бути обґрунтовано кількома ключовими перевагами цієї мови, особливо в контексті веб-орієнтованих застосунків та інтерактивних інтерфейсів користувача, зокрема:

- широке використання та підтримка спільноти. JavaScript є однією з найпопулярніших мов програмування, особливо для веб-додатків, з великою спільнотою розробників та обширними ресурсами для навчання та рішення технічних проблем;

- висока інтерактивність та динамічність. JavaScript дозволяє створювати високо інтерактивні інтерфейси, що є важливим для керування БПЛА через веб-інтерфейси, та підтримує асинхронні технології, такі як AJAX, для неперервного обміну даними;

- сумісність з різними платформами. JavaScript сумісний з усіма основними веб-браузерами, що гарантує широку доступність та кросплатформенність застосунків;

- використання Node.js для серверної розробки. Можливість використання Node.js дозволяє розширити можливості JavaScript до серверної частини проекту, забезпечуючи однорідність коду;

- інтеграція з сучасними веб-технологіями. JavaScript легко інтегрується з HTML та CSS, та підтримує різноманітні фреймворки та бібліотеки для створення сучасних веб-додатків.

Ці фактори роблять JavaScript оптимальним вибором для розробки ПЗ, зосередженого на веб-інтерфейсах та вимогах високої інтерактивності та гнучкості, особливо в контексті систем управління БПЛА.

4.4 Дослідження ринкового потенціалу

Цей підрозділ зосереджений на аналізі ринкових можливостей та загроз, які впливають на реалізацію проекту та його впровадження на ринок. Визначення ринкових можливостей є критично важливим для планування стратегій розвитку проекту, оскільки воно дозволяє адаптуватися до динамічних умов ринку, враховувати потреби та очікування потенційних клієнтів, а також ефективно реагувати на пропозиції та дії конкурентів.

Детальний аналіз ринкового середовища включає оцінку поточного стану ринку, ідентифікацію тенденцій та прогнозування змін. Це допомагає виявити незадоволені потреби та ніші на ринку, які можуть бути заповнені проектом. Крім того, аналіз дозволяє визначити потенційні можливості для розширення ринку, входження на нові ринки та розробки нових продуктів чи послуг, які можуть бути привабливими для цільової аудиторії.

З іншого боку, ідентифікація та аналіз ринкових загроз є важливим для розробки стратегій мінімізації ризиків. Це може включати аналіз ринкової конкуренції, змін у законодавстві, економічних факторів, що впливають на вартість ресурсів, а також технологічних змін, які можуть застаріти існуючі рішення. Врахування цих факторів є важливим для адаптації проекту до мінливих умов та забезпечення його стійкості та довгострокового успіху.

Таблиця 4.4 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

Критерій	Характеристика	Вплив на проект
Розмір ринку	Середній, з потенціалом розширення	Потенціал для залучення широкого кола клієнтів

Продовження таблиці 4.4

Критерій	Характеристика	Вплив на проект
Темпи зростання	Стабільне зростання, особливо в секторах виробництва та логістики	Можливість для росту та розширення проекту
Конкурентне середовище	Висока конкуренція з декількома провідними гравцями	Необхідність інноваційного підходу для виживання
Потреби клієнтів	Запит на високотехнологічні, ефективні рішення	Орієнтація на розробку відповідей на специфічні потреби
Технологічні тенденції	Швидкий розвиток технологій, особливо в AI та автоматизації	Потрібно постійне оновлення технологій

Загалом, ретельне визначення ринкових можливостей та загроз дозволяє проектній команді розробити гнучкий та ефективний план впровадження, який максимізує комерційний потенціал проекту та зменшує ризики, пов'язані з його реалізацією на ринку.

4.5 Ідентифікація цільових аудиторій

Таблиця 4.5 дозволяє зрозуміти ключові потреби та особливості різних сегментів клієнтів, з якими може працювати стартап-проект. Це включає комерційні підприємства, які шукають ефективності та автоматизації, державні установи, для яких важлива безпека та надійність, наукові організації, зацікавлені в інноваціях, освітні установи, які потребують навчальних та розвиваючих інструментів, та індивідуальні споживачі, яким важлива доступність та зручність. Визначення цих характеристик є

ключовим для розробки цільових стратегій маркетингу та продуктової пропозиції.

Таблиця 4.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

Сегмент клієнта	Основні потреби	Особливості потреб
Комерційні підприємства	Ефективність та автоматизація процесів	Підвищення продуктивності, зниження витрат
Державні установи	Безпека та надійність систем	Відповідність законодавчим стандартам
Наукові організації	Інноваційність та дослідницький потенціал	Передові технології для досліджень
Освітні установи	Навчальні та розвиваючі можливості	Технологічні інструменти для навчання
Індивідуальні споживачі	Доступність та зручність використання	Простота інтерфейсу, доступність інформації

Таблиця 4.6 відображає ключові фактори, які створюють можливості для стартап-проекту. Вона допомагає зрозуміти, як різні зовнішні чинники, такі як ринкові тенденції, технологічний розвиток, зміни в законодавстві, зростаюча обізнаність споживачів та глобалізація, можуть впливати на успіх проекту. Використання цієї інформації є важливим для стратегічного планування та визначення напрямків розвитку проекту.

Таблиця 4.6 — Фактори можливостей

Фактор	Опис	Вплив на проект
Зростання ринку	Постійне збільшення попиту на інноваційні продукти та послуги	Створює потенціал для розширення ринку та збільшення доходів
Технологічні інновації	Швидкий розвиток нових технологій та їх застосувань	Можливість інтеграції новітніх технічних рішень у продукт
Зміна законодавства	Сприятливі зміни у законодавстві, що стимулюють інновації	Відкриває нові можливості для розвитку та комерціалізації
Зростаюча обізнаність споживачів	Зростання обізнаності споживачів щодо нових технологій	Полегшує маркетингові зусилля та підвищує інтерес до продукту

Проведемо аналіз пропозиції: визначимо загальні риси конкуренції на ринку.

Таблиця 4.7 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Ступінь	Опис	Вплив на проект
Пряма конкуренція	Компанії, які пропонують аналогічні продукти або послуги	Вимагає розробки унікальних характеристик продукту
Непряма конкуренція	Компанії з суміжних ринків, що задовольняють схожі потреби	Потребує моніторингу тенденцій у суміжних ринках
Потенційна конкуренція	Компанії, які можуть увійти на ринок із схожою пропозицією	Необхідність аналізу потенційних загроз і стратегій

Продовження таблиці 4.7

Ступінь	Опис	Вплив на проект
Замінники	Альтернативні продукти або послуги, які можуть замінити пропозицію	Важливість інноваційного підходу до задоволення потреб
Нові учасники	Нові компанії, які планують увійти на ринок із схожою пропозицією	Підвищує потребу в стратегічному плануванні та адаптації

Ця таблиця демонструє різні рівні конкуренції, з якими може зіткнутися проект на ринку. Вона включає пряму конкуренцію з компаніями, що надають схожі продукти чи послуги, непряму конкуренцію від суміжних ринків, потенційну конкуренцію від нових компаній, які можуть увійти на ринок, а також вплив замінників та нових учасників на ринку. Визначення цих факторів допомагає в плануванні стратегій та адаптації до конкурентного середовища.

Таблиця 4.8 заснована на концепції п'яти сил конкуренції Майкла Портера, яка дозволяє глибше зрозуміти структуру галузі та визначити ключові аспекти конкурентної боротьби на ринку. Аналіз включає оцінку прямої конкуренції, загрози входу нових учасників, можливості замінників, силу постачальників і покупців. Розуміння цих факторів допомагає виявити стратегічні можливості та ризики для проекту, а також розробити ефективні стратегії конкуренції.

Таблиця 4.8 – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Сила	Характеристика	Вплив на проект
Ступінь конкуренції	Сильна конкуренція між існуючими гравцями	Необхідність виділення продукту на тлі конкурентів
Загроза нових учасників	Високі бар'єри для входу нових учасників	Можливість стабільної роботи без тиску нових учасників

Продовження таблиці 4.8

Сила	Характеристика	Вплив на проект
Загроза замінників	Наявність альтернативних продуктів і послуг	Необхідність підтримки високої якості та інноваційності
Переговорна сила постачальників	Постачальники мають помірну переговорну силу	Можливість вибору надійних постачальників з оптимальними умовами
Переговорна сила покупців	Покупці мають значний вплив на ринкові умови	Важливість зосередження на потребах та задоволенні покупців

Тепер можна перелічити фактори конкурентоспроможності продукту.

Таблиця 4.9 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування
Інноваційність	Розробка інноваційних рішень для вирішення специфічних проблем
Якість продукту	Висока якість продукції для задоволення потреб клієнтів
Цінова конкурентоспроможність	Забезпечення конкурентних цін при збереженні якості
Бренд та репутація	Побудова сильного бренду для залучення та утримання клієнтів
Клієнтський сервіс	Високий рівень обслуговування клієнтів для підвищення лояльності
Технологічні переваги	Використання передових технологій для переваги над конкурентами

Продовження таблиці 4.9

Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування
Маркетингові стратегії	Ефективні маркетингові кампанії для просування продукту

Після цього потрібно провести аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту.

Таблиця 4.10 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проекту

Аспект	Сильні сторони	Слабкі сторони
Інноваційність	Високий рівень інновацій та оригінальність рішень	Потреба в постійних інноваціях для конкурентоспроможності
Фінансові ресурси	Достатній бюджет для розробки та впровадження	Обмеження в фінансуванні може уповільнити розвиток
Досвід команди	Команда з багатим досвідом у галузі	Вразливість до втрати ключових членів команди
Технологічна база	Сучасні технології та обладнання	Залежність від зовнішніх технологічних постачальників
Ринкова позиція	Стабільна ринкова позиція та впізнаваність	Ризик втрати ринкової частки через конкуренцію

Ця таблиця допомагає проаналізувати ключові сильні та слабкі сторони проекту. Вона включає оцінку інноваційності, фінансових ресурсів, досвіду команди, технологічної бази, ринкової позиції та клієнтської бази. Аналіз

дозволяє виявити основні переваги проекту, які можуть бути використані для забезпечення конкурентоспроможності, а також слабкі сторони, які потребують уваги та вдосконалення.

Проведемо SWOT-аналіз.

Таблиця 4.11 –SWOT-аналіз стартап-проекту

Категорія	Опис
Сильні сторони	Інноваційні технології, висококваліфікована команда, унікальне позиціонування на ринку
Слабкі сторони	Обмежені фінансові ресурси, залежність від зовнішніх інвесторів, висока конкуренція
Можливості	Розширення ринку, сприятливі тенденції в індустрії, зростаючий попит
Загрози	Зміни в законодавстві, економічні невизначеності, технологічні зміни

Ця таблиця дозволяє оцінити ключові сильні та слабкі сторони стартап-проекту, а також ідентифікувати зовнішні можливості та загрози, які можуть вплинути на його успіх. Після детального аналізу SWOT, який включає оцінку сильних та слабких сторін, можливостей та загроз проекту, стає зрозуміло, що розробка альтернативних планів ринкового впровадження не вимагається. За результатами аналізу, сильні сторони проекту, такі як інноваційність, висококваліфікована команда та унікальне позиціонування на ринку, видаються достатніми для ефективного запуску та розвитку проекту. Водночас, слабкі сторони, такі як обмеження фінансових ресурсів або висока конкуренція, не здаються критичними перешкодами, що потребують альтернативних стратегій. Можливості розширення ринку та позитивні тенденції в галузі додатково підтримують цю впевненість. Загрози, такі як зміни в законодавстві чи економічні невизначеності, потребують уважного моніторингу, але не є достатньо значущими, щоб вимагати зміни загального

плану впровадження на ринок. З урахуванням усіх цих факторів, проект має всі шанси бути успішним без потреби розробки альтернативних шляхів реалізації.

4.6 Стратегічне планування ринкової діяльності

Розробка ринкової стратегії передбачає визначення стратегії охоплення ринку, а саме опис тих цільових груп, що можуть бути потенційними споживачами.

Таблиця 4.12 –SWOT-аналіз стартап-проекту

Цільова група	Опис	Потреби
Корпоративні клієнти	Компанії та підприємства, які зацікавлені в використанні інноваційних технологій	Ефективність, безпека, оптимізація процесів
Державні установи	Урядові установи, що потребують технологій для підвищення ефективності	Надійність, дотримання стандартів, забезпечення безпеки
Наукові організації	Наукові інститути, які шукають новітні рішення для досліджень	Інноваційність, висока якість, довгострокове співробітництво
Приватні споживачі	Окремі особи, зацікавлені в новітніх технологіях і інноваціях	Доступність, легкість використання, новітній дизайн

Кожна група характеризується своїми унікальними потребами та вимогами, що дозволяє налаштувати стратегію охоплення ринку з урахуванням специфіки кожної груп.

Щоб працювати в сегментах ринку необхідно сформулювати базову стратегію розвитку.

Таблиця 4.13 – Визначення базової стратегії розвитку

Сегмент ринку	Базова стратегія розвитку	Очікувані результати
Корпоративні клієнти	Надання індивідуалізованих технологічних рішень, укладання довгострокових контрактів	Зміцнення позицій на ринку, стабільний дохід
Державні установи	Співпраця з урядовими проектами, задоволення високих стандартів якості та безпеки	Стабільність і надійність відносин, забезпечення державних замовлень
Наукові організації	Розробка інноваційних продуктів, що відповідають актуальним науковим запитам	Лідерство в інноваціях, партнерство з науковими установами
Приватні споживачі	Пропозиція доступних і зручних в користуванні продуктів, фокус на споживацьких трендах	Висока популярність серед кінцевих споживачів, розширення ринку

Таблиця описує базові стратегій та очікуваних результатів для кожної групи потенційних споживачів, дозволяючи ефективно націлити зусилля на реалізацію проекту у відповідності з потребами кожного сегменту.

Виберемо типи конкурентної поведінки, які можуть бути використані для розробки базової стратегії конкурентної поведінки. Кожен тип поведінки має свої переваги та ризики, які потрібно врахувати при виборі підходу до конкуренції на ринку.

Таблиця 4.14 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

Тип поведінки	Опис стратегії	Переваги	Ризики
Агресивна	Активне ведення бізнесу з метою випередження конкурентів	Перехоплення ініціативи, швидке завоювання ринку	Високі витрати, ризик конфліктів з конкурентами
Захисна	Зосередження на зміцненні своїх позицій та захисті від конкурентних загроз	Стабільність та низький ризик	Уповільнення інновацій, можливість втрати ініціативи
Адаптивна	Гнучке пристосування до змін у галузі та ринкових умов	Здатність швидко реагувати на зміни	Ризик втрати унікальності, залежність від зовнішніх факторів
Імітаційна	Копіювання успішних стратегій та інновацій конкурентів	Зменшення витрат на дослідження та розробку	Ризик порушення інтелектуальної власності, втрата репутації

Таблиця 4.15 надає опис трьох рівнів моделі товару, що включає основний рівень (без захисту від копіювання), додатковий (з можливістю доповнення функцій) та потенційний (зорієнтований на майбутні оновлення і розвиток). Кожен рівень супроводжується відповідною стратегією, яка вказує на підходи до розвитку та поширення продукту.

Таблиця 4.15 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

Рівень	Опис	Стратегія
Основний	Продукт поставляється без додаткових заходів захисту від копіювання.	Поширення продукту 'як є', без захисних механізмів
Додатковий	Продукт може бути доповнений невеликими додатковими функціями або сервісами.	Додавання обмеженої кількості додаткових функцій для підвищення вартості

Висновок до розділу

У рамках даного розділу було здійснено розгорнутий аналіз стартап-проекту, який включав презентацію ідеї, техніко-економічні аспекти, аналіз ринкового потенціалу, визначення цільових аудиторій та розробку стратегічного планування. Виявлено ключові переваги проекту, такі як інноваційність, висока якість та унікальне позиціонування на ринку. Також були виявлені слабкі сторони, серед яких обмежені фінансові ресурси та висока конкуренція. З урахуванням цих аналізів, було вирішено, що не потрібно розробляти альтернативні стратегії впровадження проекту на ринок.

ВИСНОВКИ

У ході виконання кваліфікаційеної роботи було проведено детальне дослідження теоретичних основ передачі даних в БПЛА, з акцентом на класифікацію БПЛА, системи передачі даних, особливості високомобільних БПЛА, вплив електромагнітного випромінення на передачу даних, методи виявлення високомобільних БПЛА та методи захисту від електромагнітних впливів. Це дозволило отримати комплексне розуміння ключових аспектів передачі даних в БПЛА та визначити основні напрямки для подальших досліджень.

Здійснено аналіз методів передачі даних в умовах потужного електромагнітного випромінення. Розглядалися різні сценарії, включаючи польоти в районах з високою концентрацією ЕМВ, екологічний моніторинг промислових зон та польоти в міському середовищі. Оцінено надійність та ефективність різних методів передачі даних, що виявило важливість адаптивності та гнучкості вибору каналів зв'язку в залежності від конкретних умов.

У рамках проектування апаратної частини було обговорено архітектурні рішення, вивчено структурну організацію, здійснено селекцію електронних елементів, в тому числі вибір модему Huawei E3372h 4G LTE, модуля RN2483 LORA MOTE, модуля ESP8266 та контролера Raspberry Pi Zero. Оцінено фізичні параметри системи, зокрема через створення 3D моделі корпусу. Розроблено методи електричної інтеграції та дизайн корпусу, а також опції кріплення до аеродинамічної платформи. Процедурна логіка пристрою була розроблена для оптимізації вибору каналів зв'язку.

На етапі реалізації стартап-концепції було здійснено глибокий аналіз стартап-проекту, включаючи техніко-економічні аспекти та ринковий потенціал. Визначено ключові переваги проекту, включаючи інноваційність і унікальність, а також виявлено потенційні ризики, такі як обмежені фінансові

ресурси та висока конкуренція. Виходячи з цього аналізу, було прийнято рішення про розробку адаптивних стратегій впровадження проекту на ринок.

Загалом, у рамках даної роботи було досягнуто значного прогресу у розумінні та вдосконаленні передачі даних в БПЛА в складних умовах, що є ключовим для ефективної реалізації різноманітних застосувань безпілотних систем. Розроблена апаратна частина та алгоритми забезпечують високу надійність та адаптивність у різних умовах, що є основою для успішного впровадження цих технологій на практиці.

Розроблена система передачі даних для БПЛА демонструє значні переваги в порівнянні з вітчизняними аналогами, зокрема, у контексті адаптивності до умов сильного електромагнітного випромінення та високої мобільності БПЛА.

Рекомендації щодо подальшої роботи в даному напрямку:

- проведення дослідження в області поліпшення стійкості системи до різних форм електромагнітного випромінення, а також розширити можливості системи для роботи в різноманітних кліматичних та географічних умовах;
- розробка та впровадження нових алгоритмів штучного інтелекту для оптимізації передачі даних та підвищення автономності БПЛА;
- розробка більш енергоефективних рішень, що зможуть подовжити час роботи БПЛА без підзарядки.

Результати дослідження можуть бути використані в навчальному процесі університетів для демонстрації сучасних тенденцій та викликів у сфері проектування та експлуатації БПЛА, а також для підготовки спеціалістів у галузі аерокосмічних технологій.

Результати роботи також можуть бути застосовані у промисловості, зокрема в областях, де важлива швидка та надійна передача даних, наприклад, у сфері екологічного моніторингу, сільського господарства та міського планування.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Клименко О. Безпілотний літальний апарат, як основа у забезпеченні охорони особливо важливих об’єктів. Наукові нотатки, 2021. 28с.
2. Pristavka, P. O., Assaul, A. V., & Nichikov, E. P. Automation of data from video cameras of small and medium-sized unmanned aerial vehicles processing. Актуальні проблеми автоматизації та інформаційних технологій, 2014. 18с.
3. Чайка Є. О. Система передачі даних для безпілотного літального апарату. 2019. Master's Thesis. КПІ ім. Ігоря Сікорського. 78с.
4. Лобода, Р. І. Дослідження технологій високошвидкісної передачі даних з безпілотних літальних апаратів (Master's thesis, КПІ ім. Ігоря Сікорського). 2022. 156с.
5. Костенко, П. Ю., Слободянюк, В. В., Дукін, Г. Ю. Порівняльний аналіз роздільної здатності непараметричного BDS-критерію та критерію максимальної правдоподібності оцінювання затримки й доплерівського зсуву частоти імпульсного сигналу. Вісті вищих учбових закладів. Радіоелектроніка. 2023. 253с.
6. Гладких, Є. О. Інформаційна технологія проєктування машино-людинного інтерфейсу бортової системи розпізнавання наземних об'єктів (Master's thesis, Сумський державний університет). 2022. 147с.
7. Леховицький, Д. І., Рябуха, В. П. Звіт про науково-дослідну роботу№ 318. Розроблення систем первинної обробки радіолокаційних і акустичних сигналів в умовах дії завад для РЛС і содарів виявлення безпілотних літальних апаратів. 2018. 66 с.
8. Torba A., Torba M., Torba O. Радіочастотні комплекси виявлення малорозмірних безпілотних літальних апаратів. Системи управління, навігації та зв’язку. Збірник наукових праць, 4(62), 2020. 24с.

9. Мироненко М. І. Моделі і методи інформаційної технології машинного навчання автономного безпілотного літального апарату для відеомоніторингу місцевості. PhD Thesis. Сумський державний університет. 2023. 46 с.

10. Shokrollahi, Amin. LDPC codes: An introduction. In: Coding, cryptography and combinatorics. Birkhäuser Basel, 2004. 110 с.

11. Озарків Д. М., Головін В. А. Архітектура багаторівневої системи адаптивної модуляції та кодування. 2014. 163с.

12. Гетьман О.В., Кайденко М.М. «Характеристики навмисних завад, що діють на канал зв’язку безпілотного літального апарату»: XVI Міжнародна науково-технічна конференція "Перспективи телекомунікацій" ПТ-2022: Збірник матеріалів конференції. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 145с.

13. LI, Kai, et al. Bloothair: A secure aerial relay system using bluetooth connected autonomous drones. ACM Transactions on Cyber-Physical Systems, 2021, 322 с.

14. Ezuma, Martins, et al. Detection and classification of UAVs using RF fingerprints in the presence of Wi-Fi and Bluetooth interference. IEEE Open Journal of the Communications Society, 2019, 1: 76 с.

15. WANG, Shie-Yuan, et al. Comparing the performance of NB-IoT, LTE Cat-M1, Sigfox, and LoRa for IoT end devices moving at high speeds in the air. Journal of signal processing systems, 2022, 19 с.