

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем
Кафедра телекомунікацій**

До захисту допущено:

В.о.завідувача кафедри

_____ Сергій КРАВЧУК

« ____ » _____ 2026 р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

**за освітньо-професійною програмою «Інженерія та програмування
інфокомунікацій»**

спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

**на тему: «Розгортання мережі на основі БПЛА для тимчасового покриття
територій з пошкодженою інфраструктурою»**

Виконав:

студент IV курсу, групи ТЗ-22

Федорук Андрій Віталійович _____

Керівник:

Доцент кафедри ТК НН ІТС, к.т.н., доцент,

Явіся Валерій Сергійович _____

Рецензент:

Доцент кафедри ІТТ НН ІТС, к.т.н., доцент

Правило Валерій Володимирович _____

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.

Студент _____

Київ – 2026 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем
Кафедра телекомунікацій

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Освітньо-професійна програма «Інженерія та програмування інфокомунікацій»

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о.завідувача кафедри

_____ Сергій КРАВЧУК

« ____ » _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ
на дипломну роботу студенту
Федоруку Андрію Віталійовичу

1. Тема роботи «Розгортання мережі на основі БПЛА для тимчасового покриття територій з пошкодженою інфраструктурою», керівник роботи Явіся Валерій Сергійович, к.т.н., доцент, затверджені наказом по університету від «26» травня 2026 р. № 1912-с.

2. Термін подання студентом роботи 10 червня 20265 р.

3. Вихідні дані до роботи:

- науково-технічні публікації та стандарти у сфері UAV-enabled Communications, Airborne Networks, LTE/5G мереж;
- рекомендації ITU та документи 3GPP щодо використання БПЛА в телекомунікаційних системах;
- сценарій тимчасового покриття території площею 100 км² з пошкодженою інфраструктурою;
- характеристики мультикоптерних БПЛА та телекомунікаційного обладнання;
- програмні засоби моделювання Python.

4. Зміст роботи:

- аналіз сучасних підходів до побудови мереж зв'язку на основі БПЛА;

- дослідження концепцій Airborne Networks та UAV-enabled Communications;
- проектування мережі на основі БПЛА для тимчасового покриття територій з пошкодженою інфраструктурою;
- розрахунок параметрів мережі (висота польоту, радіус покриття, кількість БПЛА, пропускна здатність);
- розробка симуляційної моделі мережі в середовищі Python;
- аналіз енергоспоживання, автономності та ефективності роботи системи;
- оцінка перспектив використання мереж на основі БПЛА в телекомунікаційних системах

5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо):

- Схема використання БПЛА у телекомунікаційній мережі;
- Схема взаємодії UAV-to-UAV та UAV-to-Ground у тимчасовій мережі;
- Схема розміщення БПЛА для покриття території;
- Результат моделювання покриття території мережею БПЛА;
- Розподіл навантаження між БПЛА за результатами моделювання;
- Залежність швидкості на одного користувача від кількості активних користувачів;
- Залежність часу польоту БПЛА від ємності акумулятора

6. Дата видачі завдання 1 жовтня 2025 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Вивчення науково-технічної літератури за тематикою проєкту	05.10.2025	
2.	Формування та узгодження технічного завдання	29.10.2025	
3.	Аналіз сучасних мереж зв'язку на основі БПЛА та існуючих рішень	19.11.2025	
4.	Дослідження архітектур Airborne Networks та UAV-enabled Communications	05.01.2026	
5.	Проектування мережі для тимчасового покриття територій з пошкодженою інфраструктурою	18.03.2026	
6.	Розрахунок параметрів мережі	23.04.2026	
7.	Розробка симуляційної моделі мережі в Python	29.04.2026	

8.	Аналіз результатів моделювання та оцінка ефективності мережі	20.05.2026	
9.	Підготовка графічної частини та презентаційних матеріалів	24.05.2026	
10.	Оформлення пояснювальної записки та документації	04.06.2026	

Студент

Андрій ФЕДОРУК

Керівник

Валерій ЯВІСЯ

РЕФЕРАТ

Робота складається з 73 сторінок, 4 розділів, 8 рисунків, 8 таблиць, 29 використаних джерел і 2 додатків.

Метою роботи є дослідження принципів розгортання мережі на основі безпілотних літальних апаратів для забезпечення тимчасового зв'язку на територіях із пошкодженою інфраструктурою.

Об'єктом дослідження є процес організації тимчасового безпроводового зв'язку на територіях з пошкодженою інфраструктурою.

Предметом дослідження є методи розміщення та використання БПЛА як повітряних комунікаційних вузлів.

У роботі розглянуто архітектури UAV-мереж, принципи взаємодії UAV-to-UAV та UAV-to-Ground, виконано розрахунок параметрів мережі для території 100 км² та розроблено симуляційну модель у Python. За результатами моделювання оцінено покриття користувачів, навантаження на БПЛА, пропускну здатність і час автономної роботи апаратів.

Ключові слова: БПЛА, UAV-мережа, тимчасове покриття, пошкоджена інфраструктура, безпроводовий зв'язок, Python, моделювання.

ABSTRACT

The work consists of 73 pages, 4 chapters, 8 figures, 8 tables, 29 references and 2 appendices.

The aim of the work is to study the principles of deploying a network based on unmanned aerial vehicles to provide temporary communication in areas with damaged infrastructure.

The object of the study is the process of organizing temporary wireless communication in areas with damaged infrastructure.

The subject of the study is the methods of placing and using UAVs as aerial communication nodes.

The work considers UAV network architectures, the principles of UAV-to-UAV and UAV-to-Ground interaction, calculates network parameters for an area of 100 km², and develops a simulation model in Python. Based on the simulation results, user coverage, UAV load, throughput and autonomous operating time of the aircraft were evaluated.

Keywords: UAV, UAV network, temporary coverage, damaged infrastructure, wireless communication, Python, simulation.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПОБУДОВИ МЕРЕЖ ЗВ'ЯЗКУ НА ОСНОВІ БПЛА.....	11
1.1. Роль безпроводових мереж у забезпеченні зв'язку в умовах пошкодженої інфраструктури.....	11
1.2. Концепція Airborne Networks та використання БПЛА у телекомунікаціях	14
1.3. Архітектури UAV-enabled communications: повітряні базові станції, ретранслятори та mesh-мережі	17
1.4. Переваги та обмеження використання БПЛА для тимчасового відновлення зв'язку.....	20
Висновки	23
РОЗДІЛ 2 ПРОЄКТУВАННЯ МЕРЕЖІ НА ОСНОВІ БПЛА ДЛЯ ТИМЧАСОВОГО ПОКРИТТЯ ТЕРИТОРІЇ.....	24
2.1. Аналіз сценарію застосування мережі в умовах кризової ситуації	24
2.2. Вибір типу БПЛА та телекомунікаційного обладнання	26
2.3. Організація взаємодії UAV-to-UAV та UAV-to-Ground у динамічних умовах.....	29
2.4. Розрахунок основних параметрів мережі: висота польоту, радіус покриття, кількість БПЛА та пропускна здатність.....	32
Висновки	37
РОЗДІЛ 3	38
РОЗРОБКА СИМУЛЯЦІЙНОЇ МОДЕЛІ РОЗГОРТАННЯ МЕРЕЖІ	38
3.1. Обґрунтування вибору інструментів для моделювання мережі БПЛА	38
3.2. Побудова моделі розміщення БПЛА для покриття території з пошкодженою інфраструктурою	40
3.3. Моделювання показників якості зв'язку: рівень сигналу, затримка, навантаження та зона покриття	43

3.4. Аналіз енергоспоживання, автономності та ресурсної ефективності БПЛА	47
Висновки	49
РОЗДІЛ 4 ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ, ОБМЕЖЕНЬ ТА ПЕРСПЕКТИВ ВИКОРИСТАННЯ UAV-МЕРЕЖ	51
4.1. Оцінка ефективності запропонованої мережі на основі результатів моделювання	51
4.2. Технічні, природні та організаційні обмеження реалізації мережі	55
4.3. Питання інформаційної безпеки та захисту каналів зв'язку	57
4.4. Перспективи розвитку мереж на основі БПЛА в системах 5G/6G та критичній інфраструктурі	59
Висновки	60
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ	62
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	64
ДОДАТКИ	68

ВСТУП

Телекомунікаційна інфраструктура у сучасних умовах має дуже важливе значення для роботи державних установ, служб реагування, підприємств і звичайних користувачів. Мобільний зв'язок, доступ до мережі Інтернет, передавання службової інформації та координація дій у кризових ситуаціях залежать від стабільної роботи базових станцій, транспортних мереж, енергоживлення та іншого обладнання. Якщо така інфраструктура пошкоджується, ціла територія може залишитися без нормального зв'язку, що особливо небезпечно під час надзвичайних ситуацій, аварій, стихійних лих або воєнних дій.

Традиційне відновлення зв'язку зазвичай потребує часу, техніки, доступу до місця пошкодження та наявності електроживлення. У реальних умовах це не завжди можливо зробити швидко. Саме тому все більш актуальним стає використання тимчасових безпроводових мереж, які можна розгорнути за короткий час і без повної залежності від наземної інфраструктури. Одним із перспективних рішень у цьому напрямі є застосування безпілотних літальних апаратів як повітряних комунікаційних вузлів.

Безпілотні літальні апарати можуть виконувати роль повітряних базових станцій, ретрансляторів або вузлів ad hoc-мережі. Вони здатні швидко переміщуватися, змінювати висоту, адаптуватися до умов місцевості та забезпечувати тимчасове покриття там, де наземна інфраструктура пошкоджена або відсутня. У роботах Mozaffari та співавторів зазначається, що БПЛА можуть бути використані для розширення покриття безпроводових мереж, підвищення їх гнучкості та забезпечення зв'язку у важкодоступних районах [21]. Також у дослідженні Fotouhi та співавторів підкреслюється, що використання БПЛА у стільникових мережах пов'язане не лише з технічними перевагами, а й з питаннями стандартизації, безпеки та регулювання [7].

Актуальність теми бакалаврської роботи полягає в тому, що мережі на основі БПЛА можуть стати ефективним засобом швидкого відновлення зв'язку

на територіях з пошкодженою інфраструктурою. Окрему увагу цьому напрямку приділяє ІТУ, де розглядаються вимоги до аварійних телекомунікаційних сервісів із використанням цивільних БПЛА [11].

Метою бакалаврської роботи є дослідження принципів розгортання мережі на основі безпілотних літальних апаратів для тимчасового покриття територій з пошкодженою телекомунікаційною інфраструктурою.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні **завдання**:

- розглянути теоретичні основи побудови мереж зв'язку на основі БПЛА;
- проаналізувати архітектури UAV-enabled communications та Airborne Networks;
- дослідити особливості взаємодії UAV-to-UAV та UAV-to-Ground;
- визначити основні параметри розгортання мережі, зокрема висоту польоту, радіус покриття, кількість БПЛА та пропускну здатність;
- розробити сценарій розгортання мережі для кризової ситуації;
- оцінити ефективність, енергоспоживання, автономність та обмеження такої системи.

Об'єктом дослідження є процес організації тимчасового безпроводового зв'язку на територіях з пошкодженою інфраструктурою.

Предметом дослідження є методи розгортання, розміщення та використання БПЛА як комунікаційних вузлів для забезпечення тимчасового покриття.

У роботі використовуються методи аналізу наукових джерел, порівняння технічних рішень, розрахунку параметрів покриття, а також елементи моделювання роботи мережі. Практичне значення роботи полягає в тому, що запропонований підхід може бути використаний як основа для побудови тимчасової UAV-мережі у випадках, коли звичайна телекомунікаційна інфраструктура не працює або потребує швидкого резервування.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПОБУДОВИ МЕРЕЖ ЗВ'ЯЗКУ НА ОСНОВІ БПЛА

1.1. Роль безпроводових мереж у забезпеченні зв'язку в умовах пошкодженої інфраструктури

Безпроводові мережі сьогодні є однією з основних складових телекомунікаційної інфраструктури. Вони забезпечують роботу мобільного зв'язку, доступ до Інтернету, передавання даних між пристроями, роботу службових інформаційних систем, відеоспостереження, навігації та інших сервісів. У звичайних умовах користувачі майже не помічають складності цієї інфраструктури, оскільки зв'язок сприймається як постійно доступна послуга. Однак у випадку пошкодження базових станцій, оптичних ліній, вузлів живлення або транспортної мережі проблема відсутності зв'язку стає дуже відчутною.

Особливо критичною така ситуація є під час надзвичайних подій. Якщо певна територія постраждала внаслідок стихійного лиха, техногенної аварії або воєнних дій, то саме зв'язок потрібен для координації дій рятувальників, медичних служб, органів управління та населення. Без стабільного каналу передавання інформації складно швидко оцінити масштаби пошкоджень, передати повідомлення про небезпеку або організувати евакуацію. Тому телекомунікаційна мережа в таких умовах є не просто сервісом для користувачів, а важливим елементом безпеки.

У рекомендаціях ITU щодо національних планів аварійного телекомунікаційного зв'язку зазначається, що підготовка до надзвичайних ситуацій повинна передбачати резервні та швидко розгортані засоби зв'язку [12]. Це означає, що під час проектування сучасних телекомунікаційних систем потрібно враховувати не лише роботу мережі у звичайному режимі, а й можливість її часткового або повного пошкодження. Саме тому все більше уваги

приділяється мобільним, гнучким і тимчасовим рішенням, які можна швидко розгорнути без довгого будівництва наземної інфраструктури.

Традиційні наземні мережі мають багато переваг: високу пропускну здатність, стабільність, можливість обслуговування великої кількості користувачів. Але їхнім слабким місцем є залежність від стаціонарних об'єктів. Базові станції, антенно-щоголові споруди, кабельні лінії та вузли живлення розміщені у конкретних місцях. Якщо ці об'єкти пошкоджуються, то відновлення зв'язку потребує часу, доступу до місця аварії, ремонтних бригад, запасного обладнання та електроживлення. У кризових умовах усі ці фактори можуть бути обмежені.

Безпроводові мережі мають важливу перевагу – вони можуть працювати без прокладання кабельної інфраструктури до кожного користувача. Саме тому вони краще підходять для швидкого розгортання, тимчасового покриття або організації зв'язку у важкодоступних районах. У дослідженні Gupta, Jain і Vaszkun підкреслюється, що мережі на основі БПЛА можуть бути корисними саме там, де потрібно швидко організувати комунікацію без повноцінної наземної інфраструктури [8].

У загальному вигляді для відновлення зв'язку можуть використовуватися різні безпроводові рішення: мобільні базові станції на транспортних платформах, супутниковий зв'язок, радіорелейні лінії, Wi-Fi-системи великої дальності, ad hoc-мережі та мережі на основі БПЛА. Кожне з цих рішень має свої переваги й обмеження. Наприклад, супутниковий зв'язок забезпечує широке покриття, але може мати високу затримку та потребувати спеціального обладнання. Наземні мобільні станції зручні для використання на доступній території, але їх складно доставити у зону руйнувань або на важкодоступну місцевість.

БПЛА у цьому контексті є проміжним і досить гнучким рішенням. Вони можуть бути швидко доставлені до потрібного району, підняті в повітря та використані як вузли зв'язку. Завдяки висоті польоту БПЛА можуть забезпечувати кращу пряму видимість між передавачем і користувачами, ніж наземні вузли. Це особливо важливо у місцевості з перешкодами, складним

рельєфом або частково зруйнованою інфраструктурою. Al-Hourani, Kandeeran і Lardner у своїй роботі показали, що висота розміщення повітряної платформи прямо впливає на площу покриття та якість сигналу [3].

Для розуміння місця безпроводових рішень у системі аварійного зв'язку доцільно подати їх порівняння. У таблиці 1.1 наведено основні варіанти, які можуть застосовуватися для тимчасового відновлення зв'язку на пошкоджених територіях.

Таблиця 1.1

Порівняння рішень для тимчасового відновлення зв'язку

Рішення	Основна перевага	Основне обмеження	Доцільність використання
Мобільна наземна базова станція	Висока якість зв'язку та сумісність із мобільними мережами	Потребує доступу транспорту до місця встановлення	Для територій, куди можна швидко доставити обладнання
Супутниковий зв'язок	Велика зона покриття	Вища вартість, спеціальне обладнання, можлива затримка	Для віддалених районів і резервного зв'язку
Ad hoc-мережа	Може працювати без централізованої інфраструктури	Обмежена зона дії та складність маршрутизації	Для локальної взаємодії між пристроями
Мережа на основі БПЛА	Швидке розгортання, мобільність, краща пряма видимість	Обмежений час польоту та залежність від погодних умов	Для тимчасового покриття кризових або важкодоступних територій

Як видно з таблиці 1.1, мережі на основі БПЛА не замінюють повністю всі інші засоби зв'язку, але можуть ефективно доповнювати їх. Їхня головна перевага полягає у швидкості розгортання та можливості змінювати положення вузлів мережі відповідно до ситуації. У випадку пошкодженої інфраструктури це особливо важливо, оскільки обстановка може швидко змінюватися: частина користувачів переміщується, виникають нові зони потреби у зв'язку, а окремі ділянки можуть ставати недоступними.

Безпроводові мережі дають змогу створити тимчасове покриття без повної залежності від стаціонарних об'єктів. Серед таких рішень особливе місце

займають мережі на основі БПЛА, оскільки вони поєднують мобільність, швидкість розгортання та можливість працювати над територією, де наземна інфраструктура тимчасово не функціонує.

1.2. Концепція Airborne Networks та використання БПЛА у телекомунікаціях

Концепція Airborne Networks передбачає використання повітряних платформ як елементів мережевої інфраструктури. Якщо у традиційних телекомунікаційних мережах основні вузли розміщуються на землі, то в Airborne Networks частина вузлів переноситься у повітряний простір. Такими вузлами можуть бути літаки, аеростати, висотні платформи або безпілотні літальні апарати. Для нашої роботи найбільший інтерес становлять саме БПЛА, оскільки вони є відносно доступними, мобільними та придатними для швидкого розгортання.

Ідея використання БПЛА у телекомунікаціях полягає в тому, що дрон може не лише виконувати функції спостереження або доставки, а й бути повноцінним комунікаційним вузлом. На ньому може розміщуватися обладнання для передавання й приймання сигналу, антени, модулі маршрутизації, засоби обробки даних і канали зв'язку з наземною мережею. У такому випадку БПЛА може забезпечувати зв'язок між користувачами, ретранслювати сигнал або працювати як тимчасова базова станція.

Mozaffari та співавтори розглядають БПЛА як перспективний елемент безпроводових мереж, який може використовуватися для розширення покриття, підтримки користувачів у важкодоступних районах і підвищення гнучкості мережі [21]. Це особливо актуально для ситуацій, коли наземна інфраструктура не може швидко забезпечити потрібну якість зв'язку. На відміну від звичайної базової станції, БПЛА може змінювати своє положення, висоту та зону обслуговування.

У телекомунікаціях БПЛА можуть виконувати декілька основних функцій. По-перше, вони можуть бути повітряними базовими станціями. У цьому випадку БПЛА напряду обслуговує користувачів на землі, забезпечуючи їм доступ до мережі. По-друге, БПЛА може бути ретранслятором, тобто передавати сигнал між наземною станцією та користувачами або між окремими сегментами мережі. По-третє, декілька БПЛА можуть утворювати повітряну ad hoc або mesh-мережу, у якій кожен апарат є окремим вузлом.

Важливою особливістю Airborne Networks є наявність третього виміру для планування мережі. У звичайних наземних мережах основна увага приділяється розміщенню базових станцій на площині. У випадку БПЛА потрібно враховувати не тільки координати на місцевості, а й висоту польоту. З одного боку, збільшення висоти може покращити пряму видимість і збільшити зону покриття. З іншого боку, занадто велика висота збільшує відстань до користувачів і може призвести до додаткових втрат сигналу. Саме тому вибір оптимальної висоти є окремим важливим завданням [3].

У дослідженнях Zeng, Zhang і Lim підкреслюється, що використання БПЛА у безпроводових мережах створює нові можливості, але водночас потребує вирішення питань енергоспоживання, траєкторії польоту, каналного моделювання та керування ресурсами [27]. Тобто БПЛА не можна розглядати просто як «антену в повітрі». Це рухомий вузол мережі, який має обмежений запас енергії, залежить від погоди, потребує керування та повинен підтримувати стабільний канал зв'язку.

Окреме значення має інтеграція БПЛА з існуючими мобільними мережами. У документах 3GPP розглядаються питання підтримки БПЛА у мобільних мережах, зокрема використання LTE для повітряних апаратів [1; 2]. Це показує, що тема вже вийшла за межі окремих наукових експериментів і розглядається на рівні стандартизації. Для практичного застосування це важливо, тому що БПЛА-мережі мають бути сумісними з реальними телекомунікаційними системами, а не існувати лише як окрема модель.

У роботі Fotouhi та співавторів наголошується, що UAV cellular communications пов'язані не тільки з технічними перевагами, а й зі складними питаннями стандартизації, безпеки, регуляторних обмежень і практичної експлуатації [7]. Наприклад, при використанні БПЛА як повітряної базової станції потрібно враховувати частотний ресурс, інтерференцію з наземними мережами, безпеку польоту та захист даних. Це означає, що побудова такої мережі вимагає комплексного підходу.

На рисунку 1.1 подано узагальнену схему використання БПЛА у телекомунікаційній мережі. Вона показує, що БПЛА може взаємодіяти як із користувачами на землі, так і з іншими БПЛА та наземним вузлом керування.

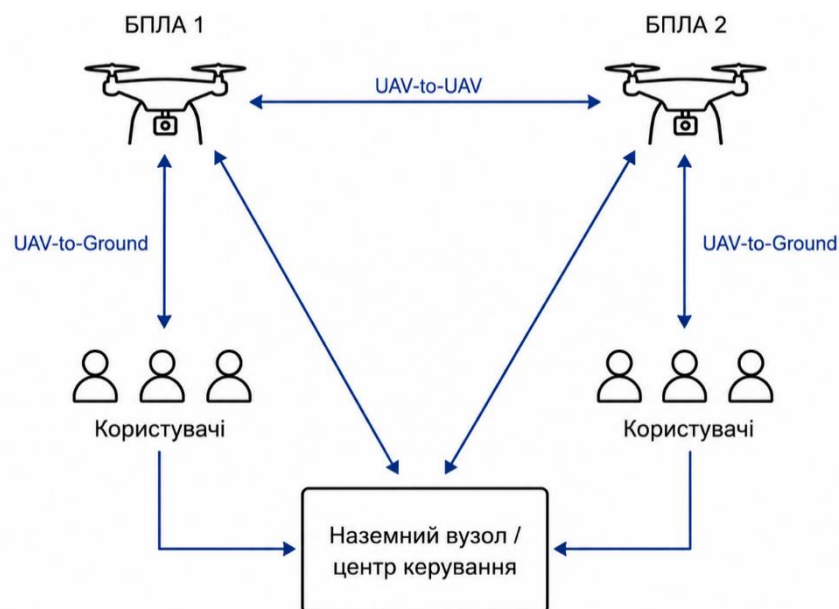


Рис. 1.1 – Узагальнена схема використання БПЛА у телекомунікаційній мережі

Як видно з рисунка, мережа на основі БПЛА може мати декілька рівнів взаємодії. Зв'язок UAV-to-Ground використовується для обслуговування наземних користувачів, а UAV-to-UAV потрібен для взаємодії між самими апаратами. Якщо один БПЛА не має прямого каналу до наземного вузла, він може передавати дані через інший апарат.

Концепція Airborne Networks дозволяє розглядати повітряні платформи не як допоміжні пристрої, а як активні елементи телекомунікаційної інфраструктури.

1.3. Архітектури UAV-enabled communications: повітряні базові станції, ретранслятори та mesh-мережі

UAV-enabled communications – це напрям, у якому БПЛА використовуються для забезпечення або покращення безпроводового зв'язку. У таких системах дрони можуть бути різними за призначенням: одні працюють як базові станції, інші – як ретранслятори, ще інші – як вузли самоорганізованої мережі. Вибір архітектури залежить від задачі, площі покриття, кількості користувачів, наявності наземної інфраструктури та вимог до якості зв'язку.

Найпростішим варіантом є використання БПЛА як повітряної базової станції. У такій архітектурі апарат розміщується над певною територією та обслуговує користувачів, які знаходяться в зоні його покриття. Перевага такого підходу полягає в тому, що базова станція може бути швидко переміщена в потрібне місце. Крім того, завдяки висоті польоту покращується ймовірність прямої видимості між передавачем і приймачем. Mozaffari та співавтори зазначають, що повітряні базові станції можуть бути корисними для тимчасового покриття, розвантаження наземних мереж і роботи в умовах аварій [21].

Архітектура повітряної базової станції є зручною для локального відновлення зв'язку. Наприклад, якщо на певній території пошкоджено наземну базову станцію, БПЛА може тимчасово зайняти її роль. Він не обов'язково повністю замінить стаціонарну інфраструктуру, але може забезпечити базовий рівень зв'язку для служб реагування або користувачів. При цьому потрібно враховувати пропускну здатність каналу, кількість одночасних підключень і тривалість польоту апарата.

Другий варіант – використання БПЛА як ретранслятора. У цьому випадку дрон не обов'язково сам обслуговує користувачів, а передає сигнал між двома або кількома вузлами. Така архітектура корисна тоді, коли між наземною

станцією та користувачами немає прямої видимості або коли відстань між ними занадто велика. БПЛА у повітрі може стати проміжною ланкою, яка покращує якість каналу. У дослідженнях Khuwaja та співавторів розглядаються особливості канального моделювання для UAV-комунікацій, де важливими факторами є висота, відстань, умови поширення сигналу та наявність перешкод [15].

Ретрансляційна архітектура може бути особливо корисною в гірській місцевості, у місті з високою забудовою або на територіях, де частина наземної інфраструктури зруйнована. Наприклад, якщо зберігся один вузол зв'язку, але він не може напряму обслуговувати всіх користувачів, БПЛА може передавати сигнал у потрібну зону. У такому випадку головним завданням є правильне розміщення апарата, щоб він одночасно мав стабільний канал із наземним вузлом і зоною користувачів.

Третім варіантом є mesh-мережа або повітряна ad hoc-мережа на основі БПЛА. У такій архітектурі декілька апаратів взаємодіють між собою, утворюючи розподілену мережу. Кожен БПЛА може бути не тільки джерелом або приймачем даних, а й проміжним вузлом для маршрутизації трафіку. Bekmezci, Sahingoz і Temel описують такі мережі як FANETs, тобто flying ad hoc networks, де вузли є рухомими, а топологія мережі може швидко змінюватися [4].

FANET відрізняється від звичайної ad hoc-мережі тим, що її вузли рухаються у тривимірному просторі та можуть мати вищу швидкість переміщення. Це створює додаткові складнощі для маршрутизації, підтримки стабільного каналу та синхронізації. Водночас така архітектура є дуже гнучкою. Якщо один БПЛА виходить із ладу або змінює положення, мережа може перебудувати маршрути передачі даних через інші вузли. Для тимчасового покриття пошкодженої території це важливо, оскільки умови роботи можуть бути нестабільними.

Окремим напрямом є багаторівневі drone-cell архітектури. Bor-Yaliniz і Yanikomeroglu розглядають концепцію multi-tier drone-cells, де дрони можуть доповнювати наземну радіомережу та формувати новий рівень гетерогенної

RAN-архітектури [5]. У такому випадку БПЛА не працюють ізольовано, а стають частиною ширшої системи, яка може включати наземні базові станції, малі соти, супутникові канали та інші елементи. Це дає змогу ефективніше розподіляти навантаження між різними рівнями мережі.

Sekander, Tabassum і Hossain також звертають увагу на багаторівневу архітектуру дронів для 5G/B5G-мереж [23]. Такий підхід є перспективним, тому що майбутні мережі повинні бути не тільки швидкими, а й дуже гнучкими. Вони мають підтримувати різні сценарії: від звичайного мобільного зв'язку до аварійних сервісів, Інтернету речей, промислових систем і критичної інфраструктури. БПЛА у такій системі можуть виконувати роль тимчасового або допоміжного рівня покриття.

Порівняння основних архітектур UAV-enabled communications подано у вигляді таблиці 1.2.

Таблиця 1.2

Основні архітектури мереж зв'язку на основі БПЛА

Архітектура	Суть роботи	Переваги	Обмеження
БПЛА як повітряна базова станція	Дрон напряму обслуговує користувачів на землі	Просте розгортання, швидке покриття певної зони	Обмежена кількість користувачів і час польоту
БПЛА як ретранслятор	Дрон передає сигнал між вузлами мережі	Можна подолати перешкоди та збільшити дальність зв'язку	Потрібне точне розміщення апарата
Mesh/FANET-мережа	Кілька БПЛА утворюють самоорганізовану мережу	Висока гнучкість і стійкість до відмов	Складніша маршрутизація і керування
Multi-tier drone-cell	БПЛА працюють як додатковий рівень мобільної мережі	Добра інтеграція з 5G/B5G та наземними мережами	Складність стандартизації та координації

З таблиці 1.2 видно, що кожна архітектура має своє призначення. Для невеликої території з обмеженою кількістю користувачів може вистачити одного БПЛА як повітряної базової станції. Якщо потрібно передати сигнал через

перешкоди або збільшити дальність, доцільно використовувати ретрансляцію. Якщо ж територія більша або умови роботи змінюються, краще підходить mesh-мережа з декількох апаратів.

Важливим питанням для всіх архітектур є взаємодія UAV-to-Ground та UAV-to-UAV. Зв'язок UAV-to-Ground забезпечує обслуговування користувачів і взаємодію з наземними вузлами. Зв'язок UAV-to-UAV потрібен для координації між апаратами, передавання службових даних і маршрутизації трафіку. У випадку drone swarms може також використовуватися Massive MIMO, що дає змогу покращити якість зв'язку між групами БПЛА та користувачами [6].

Архітектури UAV-enabled communications можуть бути різними за складністю та призначенням. Для нашої кваліфікаційної роботи найбільш важливими є повітряні базові станції, ретранслятори та mesh-мережі, оскільки саме вони можуть застосовуватися для тимчасового відновлення покриття на пошкоджених територіях.

1.4. Переваги та обмеження використання БПЛА для тимчасового відновлення зв'язку

Використання БПЛА для тимчасового відновлення зв'язку має ряд суттєвих переваг. Перша з них – швидкість розгортання. Якщо наземну базову станцію потрібно встановлювати, підключати до живлення, налаштовувати та з'єднувати з транспортною мережею, то БПЛА можна підготувати й підняти в повітря значно швидше. У кризовій ситуації це може мати вирішальне значення, оскільки навіть короткочасна відсутність зв'язку ускладнює роботу служб реагування.

Друга перевага – мобільність. БПЛА може змінювати своє положення залежно від потреб мережі. Наприклад, якщо користувачі переміщуються з однієї зони в іншу, апарат може бути переміщений ближче до них. Якщо в певній частині території збільшується навантаження, можна додати ще один БПЛА або змінити розміщення вже наявних апаратів. Нан у своєму огляді звертає увагу на

те, що розміщення та траєкторія БПЛА є важливими чинниками ефективності безпроводової мережі [9].

Третя перевага полягає у покращенні умов поширення сигналу. Завдяки розміщенню передавача в повітрі можна зменшити кількість фізичних перешкод між передавачем і користувачем. Це особливо корисно у місцевості зі складним рельєфом або частково зруйнованою забудовою. Водночас якість каналу все одно залежить від висоти польоту, відстані, частоти, антенної системи та умов середовища. Yan, Fu, Zhang і Wang у своєму дослідженні показують, що моделювання каналу для UAV-комунікацій є окремим складним завданням, оскільки повітряні канали відрізняються від звичайних наземних [25].

Ще однією перевагою є можливість автономної або напівавтономної роботи. БПЛА можуть бути частиною системи, де оператор задає основні параметри, а апарати самостійно підтримують положення, обмінюються даними та коригують маршрути. У перспективі такі системи можуть використовувати елементи штучного інтелекту для аналізу навантаження, вибору оптимального розміщення та керування ресурсами. Zhou та співавтори розглядають використання штучного інтелекту в UAV-enabled wireless networks як один із сучасних напрямів розвитку таких систем [28].

Окремо слід відзначити можливість використання прив'язаних БПЛА. На відміну від звичайних апаратів, вони можуть отримувати живлення через кабель від наземної станції. Це значно збільшує тривалість роботи в повітрі. Khemiri, Kishk і Alouini розглядають гібридну систему, у якій можуть поєднуватися прив'язані та неpriv'язані БПЛА [14]. Для тимчасового відновлення зв'язку це досить корисно, оскільки одна з головних проблем звичайних дронів – обмежений час польоту.

Разом із перевагами існує низка обмежень, які потрібно враховувати. Найбільш очевидне обмеження – енергоспоживання. БПЛА має жити не тільки двигуни, а й телекомунікаційне обладнання, системи керування, навігації та передачі даних. Через це тривалість польоту може бути обмеженою. Zeng і Zhang у роботі про енергоефективний UAV-зв'язок показують, що траєкторія польоту

та режим передавання даних мають великий вплив на витрати енергії [26]. Тому при проєктуванні мережі потрібно враховувати не лише покриття, а й можливість безперервної роботи.

Друге обмеження пов'язане з погодними умовами. Сильний вітер, дощ, сніг або низька видимість можуть ускладнювати політ БПЛА. Для наземної базової станції ці фактори менш критичні, а для дрона вони можуть прямо впливати на стабільність положення, безпеку польоту та якість зв'язку. Через це використання БПЛА як елементів мережі потребує додаткового планування й оцінки умов експлуатації.

Третє обмеження – регуляторні вимоги. БПЛА працюють у повітряному просторі, тому їх використання не може бути повністю вільним. Потрібно враховувати правила польотів, дозволені висоти, зони обмеження, вимоги до операторів і безпеки. Для України важливим джерелом у цьому питанні є інформація Державної авіаційної служби України [29]. У реальному проєкті такі вимоги можуть впливати на вибір висоти польоту, маршруту та місць розгортання системи.

Четверте обмеження – інформаційна безпека. Оскільки мережа на основі БПЛА використовує безпроводові канали, вона може бути вразливою до перехоплення, підміни сигналів, атак на канал керування або несанкціонованого доступу. Mekdad та співавтори розглядають питання безпеки й приватності БПЛА як одну з важливих проблем для практичного застосування [17]. У кризовій ситуації це особливо важливо, бо через таку мережу можуть передаватися службові або критичні дані.

П'яте обмеження пов'язане з пропускнуою здатністю та кількістю користувачів. Один БПЛА не може повністю замінити повноцінну наземну мережу на великій території. Його можливості залежать від встановленого обладнання, смуги частот, антенної системи та каналу підключення до основної мережі. Якщо користувачів багато, може виникнути перевантаження. У такому випадку потрібно використовувати декілька БПЛА, правильно розподіляти навантаження та планувати перекриття зон покриття.

Незважаючи на ці обмеження, БПЛА залишаються перспективним інструментом для тимчасового відновлення зв'язку. Їх не варто розглядати як повну заміну стаціонарної інфраструктури. Більш правильно сприймати їх як швидко розгортаний резервний або допоміжний засіб, який дозволяє забезпечити зв'язок у перші години або дні після пошкодження основної мережі. Саме в цей період потреба у зв'язку часто є найбільш критичною.

Висновки

У першому розділі було розглянуто теоретичні основи побудови мереж зв'язку на основі безпілотних літальних апаратів. Встановлено, що безпроводові мережі мають важливе значення для забезпечення зв'язку в умовах пошкодженої інфраструктури, оскільки вони можуть працювати без повної залежності від кабельних ліній і стаціонарних об'єктів.

Було визначено, що концепція Airborne Networks передбачає використання повітряних платформ як активних елементів телекомунікаційної інфраструктури. У межах цієї концепції БПЛА можуть виконувати функції повітряних базових станцій, ретрансляторів або вузлів самоорганізованої мережі.

Розглянуто основні архітектури UAV-enabled communications. Найбільш доцільними для роботи є архітектури з використанням БПЛА як повітряних базових станцій, ретрансляторів та елементів mesh/FANET-мереж. Кожна з них має свої переваги: базова станція забезпечує просте локальне покриття, ретранслятор дозволяє подолати перешкоди, а mesh-мережа забезпечує вищу гнучкість і стійкість до відмов.

До переваг належать швидке розгортання, мобільність, можливість зміни положення у просторі, покращення прямої видимості та використання у важкодоступних районах. Основними обмеженнями є час автономної роботи, енергоспоживання, вплив погодних умов, регуляторні вимоги, питання безпеки та обмежена пропускна здатність.

РОЗДІЛ 2

ПРОЄКТУВАННЯ МЕРЕЖІ НА ОСНОВІ БПЛА ДЛЯ ТИМЧАСОВОГО ПОКРИТТЯ ТЕРИТОРІЇ

2.1. Аналіз сценарію застосування мережі в умовах кризової ситуації

У межах цієї роботи розглядається кризова ситуація, у якій на певній території частково або повністю пошкоджена телекомунікаційна інфраструктура. Наприклад, можуть бути виведені з ладу наземні базові станції мобільного зв'язку, порушені канали передавання даних, пошкоджені оптичні лінії або відсутнє стабільне електроживлення. У такому випадку стандартна мережа не може забезпечувати нормальне покриття, тому потрібно швидко створити тимчасовий канал зв'язку.

У рекомендаціях ITU щодо аварійних телекомунікаційних сервісів із використанням цивільних БПЛА зазначається, що такі системи можуть застосовуватися для підтримки зв'язку під час надзвичайних ситуацій, коли традиційна інфраструктура не працює або її недостатньо [11]. Це добре відповідає темі цієї роботи, оскільки головна задача полягає не в побудові постійної мережі, а саме в організації тимчасового покриття на період відновлення основної інфраструктури.

Для розрахунків у роботі приймається умовний сценарій: є територія площею близько 100 км², на якій необхідно забезпечити базове безпроводове покриття. Така територія може відповідати невеликому населеному пункту, частині міста, промисловій зоні або району, який постраждав після аварії чи бойових дій. Основними користувачами мережі можуть бути працівники служб реагування, медичні бригади, місцеві органи управління та частина населення, яка потребує доступу до зв'язку.

У такому сценарії не ставиться завдання забезпечити повну якість зв'язку на рівні звичайної міської мобільної мережі. Основна мета – створити мінімально необхідне покриття для передавання голосових повідомлень, службових даних,

координат, коротких текстових повідомлень, фото або іншої оперативної інформації. У кризових умовах важливішими стають не максимальна швидкість, а стабільність, доступність і можливість швидкого запуску системи.

Особливістю такого сценарію є те, що користувачі можуть бути розміщені нерівномірно. Частина людей може перебувати біля пунктів допомоги, лікарень, тимчасових штабів або місць евакуації. Інша частина може переміщуватися територією. Через це мережа повинна бути гнучкою. БПЛА мають перевагу перед стаціонарними вузлами, оскільки їх можна переміщувати залежно від зміни ситуації. У роботах Нап наголошується, що розміщення і траєкторія руху БПЛА мають значний вплив на ефективність безпроводової мережі [9].

Під час аналізу сценарію потрібно враховувати і рельєф місцевості. У відкритій місцевості сигнал поширюється краще, оскільки між БПЛА та користувачами частіше є пряма видимість. У міських умовах ситуація складніша, бо будівлі, конструкції, дерева та інші перешкоди можуть погіршувати якість сигналу. Khuwaja та співавтори зазначають, що для UAV-комунікацій важливими є умови поширення сигналу, висота платформи, наявність прямої видимості та особливості каналу [15].

Також потрібно враховувати часовий фактор. Тимчасова мережа на основі БПЛА повинна бути розгорнута швидко. Якщо на це потрібно багато часу, то перевага такого рішення зменшується. У реальному сценарії доцільно мати підготовлений комплект обладнання: кілька БПЛА, телекомунікаційні модулі, наземну станцію керування, джерела живлення, антени та програмне забезпечення для моніторингу. Тоді після прибуття на місце можна відносно швидко підняти апарати в повітря та почати тестування покриття.

У межах цієї роботи мережа розглядається як тимчасова система, що складається з декількох БПЛА, наземного вузла керування та користувачів на території. БПЛА виконують функції повітряних базових станцій або ретрансляторів. Наземний вузол може забезпечувати підключення до зовнішньої мережі, обробку трафіку та керування апаратами. Якщо зовнішнього каналу

немає, мережа може працювати в локальному режимі для обміну даними між користувачами й службами реагування.

Основні умови прийнятого сценарію подано в таблиці 2.1. Дані цієї таблиці дають нам змогу виконати розрахунок параметрів мережі не абстрактно, а на основі заданих вихідних даних.

Таблиця 2.1

Вихідні умови сценарію тимчасового покриття території

Параметр	Прийняте значення	Пояснення
Тип ситуації	кризова / аварійна	часткове пошкодження телекомунікаційної інфраструктури
Орієнтовна площа території	100 км ²	умовна територія для розрахунку
Основні користувачі	служби реагування, місцеві органи, населення	користувачі, яким потрібен базовий зв'язок
Основні сервіси	голос, повідомлення, службові дані, координати	сервіси з помірними вимогами до швидкості
Тип мережі	тимчасова UAV-мережа	мережа працює до відновлення основної інфраструктури
Основні вимоги	швидке розгортання, стабільність, покриття	пріоритет не максимальна швидкість, а доступність зв'язку

Як видно з таблиці 2.1, сценарій передбачає використання UAV-мережі як резервного або тимчасового рішення. Така мережа не повинна повністю замінювати стаціонарну телекомунікаційну систему, але має забезпечити базову можливість обміну інформацією. Саме для цього доцільно використовувати БПЛА, оскільки вони можуть швидко змінювати положення, покривати складні ділянки та працювати там, де наземні вузли тимчасово недоступні.

2.2. Вибір типу БПЛА та телекомунікаційного обладнання

Від вибору типу БПЛА залежить висота польоту, час автономної роботи, корисне навантаження, стабільність положення в повітрі та можливість

встановлення телекомунікаційного обладнання. Для мереж тимчасового покриття можуть використовуватися різні типи БПЛА, але найчастіше розглядають мультикоптери, БПЛА літакового типу та прив'язані БПЛА.

Мультикоптери є зручними для локального покриття, оскільки можуть зависати над заданою точкою. Це важливо, якщо БПЛА повинен працювати як повітряна базова станція або ретранслятор. Такі апарати можуть виконувати вертикальний зліт і посадку, не потребують злітної смуги та мають високу маневреність. Їхнім основним недоліком є обмежений час польоту, оскільки значна частина енергії витрачається на утримання апарата в повітрі.

БПЛА літакового типу мають більшу тривалість польоту та можуть покривати значні території. Вони краще підходять для протяжних маршрутів або спостереження за великими районами. Але для задачі тимчасової повітряної базової станції вони менш зручні, тому що не можуть довго зависати в одній точці. Для забезпечення стабільного покриття їм потрібно рухатися за певною траєкторією, а це ускладнює планування каналу зв'язку.

Прив'язані БПЛА є окремим цікавим варіантом. Вони з'єднуються з наземною станцією кабелем, через який можуть отримувати живлення та передавати дані. Це дозволяє значно збільшити час роботи в повітрі. Khemiri, Kishk і Alouini розглядають гібридну систему, у якій можуть поєднуватися прив'язані та неpriv'язані БПЛА, що дає змогу підвищити стабільність повітряної комунікаційної системи [14]. Для кризового зв'язку це важливо, оскільки обмежений час польоту є однією з головних проблем звичайних дронів.

Для цієї роботи найбільш доцільним є використання мультикоптерів або прив'язаних БПЛА. Мультикоптери підходять для швидкого розгортання, а прив'язані БПЛА – для довшої роботи в одній точці. Якщо потрібне короткочасне покриття на кілька годин, можна використовувати ротацію мультикоптерів. Якщо потрібно стабільне покриття важливої точки, наприклад штабу, лікарні або пункту зв'язку, краще підходить прив'язаний БПЛА.

Телекомунікаційне обладнання, яке встановлюється на БПЛА, повинно бути достатньо легким, енергоефективним і сумісним із вибраною архітектурою

мережі. До основних елементів такого обладнання можна віднести радіомодуль, антенну систему, маршрутизатор або бортовий обчислювальний модуль, систему живлення та канал зв'язку з наземною станцією. У разі інтеграції з мобільними мережами можуть використовуватися LTE/5G-рішення, а для локального покриття – Wi-Fi або спеціалізовані радіосистеми.

Документи 3GPP розглядають питання підтримки БПЛА в мобільних мережах, зокрема в контексті LTE та подальших удосконалень для UAV [1; 2]. Це підтверджує, що БПЛА можуть бути не тільки окремими радіовузлами, а й частиною стандартизованих мобільних систем. Для практичного застосування це важливо, тому що сумісність із існуючими технологіями спрощує підключення користувачів і взаємодію з наземною мережею.

Антенна система має велике значення для якості покриття. Якщо використовувати всеспрямовану антену, сигнал поширюється в різні боки, що зручно для загального покриття території. Якщо застосовувати спрямовану антену, можна покращити якість сигналу в конкретному напрямку, але тоді потрібно точніше керувати положенням БПЛА. У випадку більш складних мереж можуть застосовуватися технології формування променя та MIMO. Chandhar, Danev і Larsson розглядають можливість використання Massive MIMO для комунікацій із роями дронів [6], що є перспективним для майбутніх систем.

Для вибору обладнання також потрібно враховувати пропускну здатність. У кризовому сценарії не обов'язково забезпечувати всім користувачам високу швидкість доступу до Інтернету. Достатньо надати стабільний канал для критичних повідомлень, голосу, координат і службових даних. Тому основними вимогами до обладнання є не максимальна швидкість, а надійність, простота розгортання, низьке енергоспоживання та стабільність роботи.

Для проєктованої мережі найкраще використовувати комбінований підхід. Основу можуть становити мультикоптери, які швидко розгортаються над потрібними зонами. Для ключового вузла зв'язку можна використати прив'язаний БПЛА або наземну станцію з підключенням до зовнішнього каналу. Така схема дозволяє поєднати мобільність і тривалішу роботу в одній точці.

Отже, для подальшого розрахунку приймається, що мережа складається з декількох мультикоптерів, які працюють як повітряні базові станції або ретранслятори. Телекомунікаційне обладнання повинно підтримувати безпроводове з'єднання з користувачами на землі, обмін даними між БПЛА та зв'язок із наземним вузлом. Такий вибір є найбільш логічним для тимчасового покриття території площею близько 100 км².

2.3. Організація взаємодії UAV-to-UAV та UAV-to-Ground у динамічних умовах

Після вибору типу БПЛА та обладнання потрібно визначити, як саме будуть взаємодіяти елементи мережі. Для мереж на основі БПЛА важливими є два основні типи зв'язку: UAV-to-Ground та UAV-to-UAV. Перший тип означає взаємодію між БПЛА і наземними користувачами або наземною станцією. Другий тип означає обмін даними між самими БПЛА.

Зв'язок UAV-to-Ground є основним для забезпечення покриття території. Саме через нього користувачі отримують доступ до тимчасової мережі. Якщо БПЛА працює як повітряна базова станція, то він напряму обслуговує користувачів у своїй зоні. Якщо БПЛА працює як ретранслятор, то він передає сигнал від наземної станції до користувачів або навпаки. У будь-якому випадку якість цього каналу залежить від висоти польоту, відстані до користувача, частоти, антени та умов поширення сигналу [15; 22; 25].

Зв'язок UAV-to-UAV потрібен тоді, коли в мережі використовується кілька БПЛА. Він дозволяє апаратам обмінюватися службовою інформацією, координувати розміщення, передавати трафік і створювати багатоланкову мережу. Наприклад, якщо один БПЛА не має прямого з'єднання з наземним вузлом, він може передавати дані через сусідній апарат. Такий принцип характерний для mesh-мереж і FANET. Bekmezci, Sahingoz і Temel описують FANET як мережі, у яких повітряні вузли можуть швидко змінювати положення, тому маршрутизація має бути адаптивною [4].

У динамічних умовах топологія мережі може змінюватися. БПЛА може трохи зміщуватися через вітер, змінювати висоту, переходити в іншу зону або повертатися для заміни акумулятора. Користувачі також можуть переміщуватися. Через це мережа повинна мати механізми перебудови маршрутів. Якщо один канал погіршується, система повинна мати можливість використати інший БПЛА або змінити розміщення апаратів.

Для організації взаємодії в такій мережі можна використати централізований, децентралізований або гібридний підхід. У централізованому варіанті всі рішення приймає наземний вузол керування. Він отримує інформацію про положення БПЛА, рівень сигналу, навантаження та стан каналів, після чого задає команди. Такий підхід простіший для контролю, але залежить від роботи центрального вузла.

У децентралізованому варіанті БПЛА самі обмінюються інформацією та приймають частину рішень. Це підвищує стійкість мережі, бо вона не повністю залежить від одного центру. Але така схема складніша, оскільки потребує алгоритмів маршрутизації, синхронізації та координації. У гібридному варіанті основні параметри задає наземний центр, а частину локальних рішень БПЛА можуть приймати самостійно. Для кризової мережі саме гібридний підхід виглядає найбільш зручним.

На рисунку 2.1 показано спрощену схему взаємодії UAV-to-UAV та UAV-to-Ground у тимчасовій мережі.

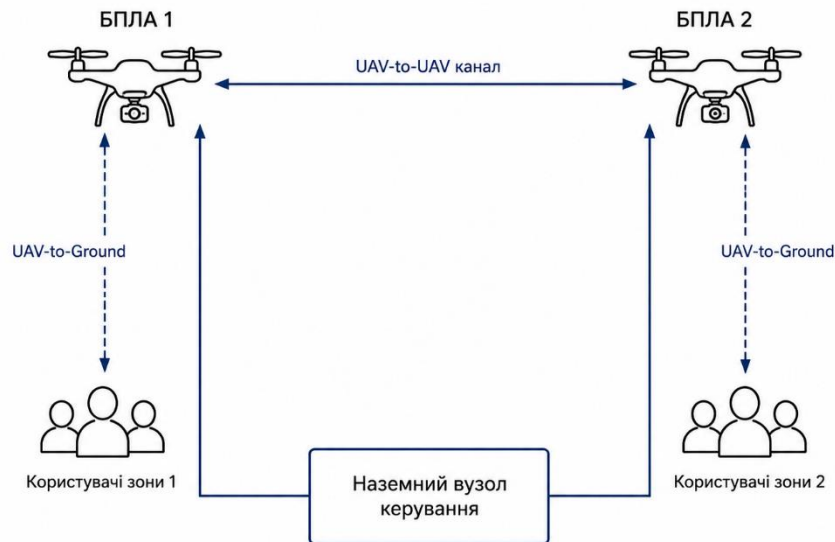


Рис 2.1 – Схема взаємодії UAV-to-UAV та UAV-to-Ground у тимчасовій мережі

Як видно з рисунка 2.1, БПЛА можуть одночасно підтримувати зв'язок із користувачами на землі та між собою. Наземний вузол керування може збирати інформацію про стан мережі, а також забезпечувати підключення до зовнішньої інфраструктури, якщо воно доступне. Якщо зовнішній канал відсутній, мережа може працювати локально між користувачами, БПЛА та штабом реагування.

Під час організації UAV-to-Ground каналу потрібно враховувати зону покриття одного БПЛА. Якщо зона покриття занадто мала, потрібно більше апаратів. Якщо вона занадто велика, може знизитися якість сигналу на краях зони. Тому важливо забезпечити часткове перекриття зон покриття сусідніх БПЛА.

Для UAV-to-UAV каналу важливими є стабільність, мінімальна затримка та достатня пропускна здатність для службового трафіку і передавання даних. Якщо між БПЛА передається лише службова інформація, вимоги до швидкості можуть бути помірними. Якщо ж через UAV-to-UAV канал проходить користувацький трафік, тоді потрібна вища пропускна здатність і якісніше планування маршруту. У роботах про UAV-комунікації зазначається, що такі мережі потребують окремої уваги до керування ресурсами та каналами зв'язку [21; 27].

Також потрібно враховувати безпеку каналів. Оскільки UAV-to-UAV і UAV-to-Ground є безпроводовими, вони можуть бути вразливими до перешкод

або несанкціонованого доступу. Mekdad та співавтори відносять питання безпеки та приватності до ключових проблем використання БПЛА [17; 20]. Тому в практичній системі необхідно передбачити шифрування даних, захист каналу керування та контроль доступу користувачів.

Отже, організація взаємодії UAV-to-UAV та UAV-to-Ground є основою роботи мережі на базі БПЛА. Для обраного сценарію доцільно використовувати гібридну схему, у якій наземний вузол керування координує роботу мережі, а БПЛА підтримують зв'язок із користувачами та між собою. Це дозволяє забезпечити гнучкість, стійкість і можливість перебудови мережі в динамічних умовах.

2.4. Розрахунок основних параметрів мережі: висота польоту, радіус покриття, кількість БПЛА та пропускна здатність

Розрахунок параметрів мережі потрібен для того, щоб визначити, скільки БПЛА необхідно для покриття заданої території та які приблизні характеристики повинна мати система. Основними параметрами є висота польоту, радіус покриття одного БПЛА, кількість апаратів і пропускна здатність.

Першим параметром є висота польоту. Вона впливає на площу покриття та якість сигналу. Якщо БПЛА знаходиться занадто низько, зона покриття буде меншою, а перешкоди на місцевості можуть сильніше впливати на сигнал. Якщо апарат знаходиться занадто високо, збільшується відстань до користувачів, що може призвести до втрат сигналу. Al-Hourani, Kandeepan і Lardner у роботі про оптимальну висоту повітряної платформи показують, що існує певний компроміс між висотою та площею ефективного покриття [3].

Для проєктованої мережі приймається робоча висота польоту БПЛА в межах 150–300 м. Такий діапазон дозволяє забезпечити достатню пряму видимість і водночас не створює надмірного збільшення відстані до користувачів. Для подальшого розрахунку приймається середнє значення висоти 200 м. Це умовне значення, яке може змінюватися залежно від рельєфу, забудови та вимог регулятора.

Другим параметром є радіус покриття одного БПЛА. Він залежить від потужності передавача, антени, частоти, висоти польоту та умов поширення сигналу. Для спрощеного розрахунку приймається, що один БПЛА забезпечує радіус покриття приблизно 3 км. Це не максимальне можливе значення, але воно є більш обережним для кризового сценарію, де можуть бути перешкоди, нерівномірне навантаження і потреба в перекритті зон покриття.

Площа покриття одного БПЛА може бути наближено розрахована як площа кола за формулою 2.1.

$$S = \pi \cdot R^2 \quad (2.1)$$

де S – площа покриття одного БПЛА, км²;

R – радіус покриття одного БПЛА, км.

При радіусі покриття $R = 3$ км отримаємо:

$$S = 3,14 \cdot 3^2 = 28,26 \text{ км}^2.$$

Отже, один БПЛА за спрощеним розрахунком може покрити приблизно 28,26 км². Якщо задана територія має площу 100 км², то мінімальна кількість БПЛА без урахування перекриття визначається за формулою 2.2.

$$N = \frac{S_0}{S} \quad (2.2)$$

де N – кількість БПЛА;

S_0 – площа заданої території;

S – площа покриття одного БПЛА.

$$N = \frac{100}{28,26} = 3,54.$$

Оскільки кількість БПЛА має бути цілим числом, мінімально потрібно 4 БПЛА. Але в реальній мережі зони покриття повинні частково перекриватися. Це потрібно для уникнення зон без сигналу та підвищення стійкості мережі. Тому вводиться коефіцієнт перекриття. Для нашої роботи приймається коефіцієнт $k = 1,2$.

Скоригована кількість БПЛА (2.3):

$$N_k = N \cdot k \quad (2.3)$$

$$N_k = 4 \cdot 1,2 = 4,8$$

Отже, для покриття території площею 100 км^2 доцільно прийняти 5 БПЛА. Така кількість дозволяє не тільки покрити територію, а й забезпечити часткове перекриття зон. Це відповідає підходу, який розглядається в роботах Mozaffari та співавторів щодо ефективного розміщення декількох БПЛА для оптимального безпроводового покриття [18; 19].

Результати розрахунку наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2

Розрахунок основних параметрів мережі на основі БПЛА

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця виміру
Площа території	S_0	100	км^2
Прийнята висота польоту	H	200	м
Радіус покриття одного БПЛА	R	3	км
Площа покриття одного БПЛА	S	28,26	км^2
Мінімальна кількість БПЛА	N	4	од.
Коефіцієнт перекриття	K	1,2	—
Скоригована кількість БПЛА	N_k	5	од.

Як видно з таблиці, для прийнятого сценарію потрібно використовувати 5 БПЛА. Один із них може виконувати роль резервного або забезпечувати посилення покриття в зоні з підвищеним навантаженням. Інші можуть розміщуватися над основними частинами території. Якщо мережа працює в умовах міської забудови, кількість БПЛА може бути збільшена, оскільки будівлі та перешкоди зменшують ефективну зону покриття.

Наступним параметром є пропускна здатність. Вона визначає, скільки даних може передавати мережа за одиницю часу. У реальних системах це залежить від стандарту зв'язку, смуги частот, модуляції, рівня сигналу, кількості користувачів і навантаження. У межах цієї роботи можна виконати спрощену оцінку. Припустимо, що один БПЛА забезпечує ефективну пропускну здатність близько 50 Мбіт/с для користувачів у своїй зоні. Це значення є умовним і використовується для демонстрації принципу розрахунку.

Якщо в мережі працює 5 БПЛА, то сумарна теоретична пропускна здатність обчислюється за формулою:

$$C_{\text{заг}} = C_1 \cdot N \quad (2.4)$$

де $C_{\text{заг}}$ – загальна пропускна здатність мережі;

C_1 – пропускна здатність одного БПЛА;

N – кількість БПЛА.

$$C_{\text{заг}} = 50 \cdot 5 = 250 \frac{\text{Мбіт}}{\text{с}}.$$

Однак у реальних умовах уся ця швидкість не буде повністю доступна користувачам. Частина ресурсу витрачається на службовий трафік, взаємодію UAV-to-UAV, повторну передачу пакетів, маршрутизацію та втрати через перешкоди. Тому доцільно прийняти коефіцієнт ефективного використання ресурсу, наприклад 0,7.

Тоді ефективна пропускна здатність:

$$C_{\text{еф}} = C_{\text{заг}} \cdot 0,7 \quad (2.5)$$

$$C_{\text{еф}} = 250 \cdot 0,7 = 175 \frac{\text{Мбіт}}{\text{с}}.$$

Якщо в мережі одночасно працює близько 100 активних користувачів, то середня доступна швидкість на одного активного користувача буде:

$$C_{\text{кор}} = \frac{175}{100} = 1,75 \frac{\text{Мбіт}}{\text{с}}.$$

Це не є високою швидкістю для звичайного користування Інтернетом, але для кризового сценарію її може бути достатньо для передавання повідомлень, координат, голосу, службових даних і обмеженого доступу до інформаційних ресурсів. Якщо кількість користувачів збільшується, потрібно або зменшувати навантаження, або додавати нові БПЛА, або обмежувати сервіси за пріоритетами.

У практичній мережі доцільно передбачити пріоритезацію трафіку. Наприклад, службові повідомлення, голосовий зв'язок рятувальників і координати повинні мати вищий пріоритет, ніж звичайний користувацький трафік. Це дозволяє зберігати працездатність мережі навіть при перевантаженні. У документах ІТУ щодо аварійних телекомунікацій підкреслюється важливість планування зв'язку для надзвичайних ситуацій та визначення пріоритетних сервісів [12; 16].

Виконаний розрахунок показує, що для умовної території площею 100 км² доцільно використати 5 БПЛА з радіусом покриття приблизно 3 км кожен і частковим перекриттям зон. Робоча висота польоту може становити близько 200 м, але в реальній ситуації вона повинна уточнюватися з урахуванням рельєфу, забудови, вимог безпеки та нормативних обмежень. Орієнтовна ефективна

пропускна здатність мережі може бути достатньою для базових аварійних сервісів, але не для повної заміни звичайної мобільної інфраструктури.

Висновки

У другому розділі було виконано проєктування мережі на основі БПЛА для тимчасового покриття території з пошкодженою інфраструктурою. Спочатку було розглянуто кризовий сценарій, у якому традиційна телекомунікаційна мережа частково або повністю не працює. Для такого сценарію основною задачею є не створення повноцінної постійної мережі, а швидке забезпечення базового зв'язку для служб реагування, місцевих органів управління та населення.

Було визначено, що для такого сценарію найбільш доцільним є використання мультикоптерів або прив'язаних БПЛА. Мультикоптери зручні завдяки можливості зависання в одній точці та швидкому запуску, а прив'язані БПЛА можуть забезпечувати тривалішу роботу за рахунок живлення від наземної станції. Для проєктованої мережі прийнято використання декількох БПЛА, які можуть виконувати функції повітряних базових станцій або ретрансляторів.

Окремо було розглянуто організацію взаємодії UAV-to-UAV та UAV-to-Ground. Встановлено, що канал UAV-to-Ground потрібен для обслуговування користувачів і зв'язку з наземним вузлом, а канал UAV-to-UAV – для координації між БПЛА та передавання трафіку між повітряними вузлами. Для динамічних умов найбільш доцільною є гібридна схема керування, у якій наземний вузол координує мережу, а БПЛА підтримують взаємодію між собою.

Було виконано спрощений розрахунок основних параметрів мережі. Для території площею 100 км² прийнято радіус покриття одного БПЛА 3 км, що дає площу покриття приблизно 28,26 км². З урахуванням перекриття зон покриття визначено, що для такої території доцільно використати 5 БПЛА. Також було оцінено орієнтовну пропускну здатність мережі, яка може бути достатньою для базових аварійних сервісів.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА СИМУЛЯЦІЙНОЇ МОДЕЛІ РОЗГОРТАННЯ МЕРЕЖІ

3.1. Обґрунтування вибору інструментів для моделювання мережі БПЛА

Для перевірки запропонованої мережі на основі БПЛА доцільно використати симуляційне моделювання. Це дозволяє ще до практичного розгортання оцінити, яку територію може покрити мережа, як змінюється рівень сигналу, скільки користувачів може обслуговувати система та як на роботу впливають обмеження за енергією. Достатньо побудувати зрозумілу розрахункову модель, яка показує основні залежності.

Для моделювання можна розглядати декілька інструментів: MATLAB, Python, NS-3 або OMNeT++. MATLAB є зручним середовищем для інженерних розрахунків, побудови графіків і роботи з матрицями. Його часто використовують у телекомунікаційних задачах, зокрема для аналізу сигналів і моделювання радіоканалів. Однак основним недоліком MATLAB є те, що це комерційне програмне забезпечення, яке не завжди доступне студенту на власному комп'ютері.

NS-3 і OMNeT++ є більш спеціалізованими інструментами для мережевого моделювання. Вони дозволяють будувати складні сценарії, враховувати протоколи, маршрутизацію, трафік і поведінку вузлів. Проте для бакалаврської роботи їх використання може бути надмірним, оскільки налаштування таких середовищ потребує багато часу. Крім того, у роботі основний акцент робиться не на глибокому протокольному моделюванні, а на оцінці покриття, розміщення БПЛА, якості зв'язку та енергоспоживання.

Найбільш доцільним інструментом для цієї роботи є Python. Його перевага полягає в тому, що він безкоштовний, доступний, має простий синтаксис і багато бібліотек для розрахунків та побудови графіків. Для моделювання можна використати бібліотеки NumPy, Matplotlib і Pandas. За допомогою NumPy можна

виконувати математичні розрахунки, Matplotlib – будувати графіки покриття, рівня сигналу, навантаження та енергоспоживання, а Pandas – оформлювати результати у вигляді таблиць.

Крім того, Python легше пояснити на захисті. Якщо викладач запитає, як саме виконувалося моделювання, можна просто пояснити, що була задана територія, координати БПЛА, радіус покриття, кількість користувачів і базові формули для оцінки сигналу та навантаження. Такий підхід є достатнім для бакалаврської роботи, оскільки він демонструє логіку проєктування мережі, а не просто описує її теоретично.

У наукових роботах з тематики UAV-мереж часто зазначається, що для таких систем важливими є задачі розміщення БПЛА, оптимізації траєкторії, моделювання каналу та оцінки енергоефективності [9; 15; 26]. Саме ці показники можна відобразити у спрощеній моделі на Python. При цьому модель не претендує на повну точність реальної телекомунікаційної системи, але дозволяє отримати зрозумілі результати для аналізу.

Порівняння можливих інструментів моделювання наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Порівняння інструментів для моделювання мережі БПЛА

Інструмент	Переваги	Недоліки	Доцільність для роботи
MATLAB	Зручний для інженерних розрахунків і графіків	Потребує ліцензії	Можна використовувати, але менш доступний
Python	Безкоштовний, простий, має бібліотеки для графіків і розрахунків	Потребує самостійного написання моделі	Найбільш доцільний варіант
NS-3	Підходить для детального мережевого моделювання	Складний для швидкого освоєння	Надмірний для нашої роботи
OMNeT++	Дозволяє будувати складні мережеві сценарії	Потребує значного часу на налаштування	Доцільний для глибших досліджень

Як видно з таблиці 3.1, найкраще підходить Python. Він дозволяє створити просту, зрозумілу і достатньо наочну симуляційну модель. У подальшому саме

Python приймається як основний інструмент для побудови моделі розміщення БПЛА, оцінки зони покриття, рівня сигналу, навантаження та енергоспоживання.

3.2. Побудова моделі розміщення БПЛА для покриття території з пошкодженою інфраструктурою

Для побудови симуляційної моделі приймається умовна територія розміром 10×10 км, тобто загальна площа становить 100 км^2 . Такий розмір відповідає розрахункам, виконаним у другому розділі. Територія розглядається як квадратна ділянка, на якій необхідно забезпечити тимчасове покриття за допомогою БПЛА. У реальних умовах форма території може бути іншою, але для базового моделювання квадратна модель є зручною і зрозумілою.

У моделі використовується 5 БПЛА, оскільки в попередньому розділі було визначено, що саме така кількість апаратів потрібна для покриття території 100 км^2 з урахуванням часткового перекриття зон. Кожен БПЛА має умовний радіус покриття 3 км. Висота польоту приймається на рівні 200 м, що відповідає прийнятому раніше компромісному значенню між площею покриття та якістю сигналу. Питання оптимальної висоти повітряної платформи розглядається в роботі Al-Hourani, Kandeepan і Lardner [3].

Розміщення БПЛА у моделі виконується так, щоб їхні зони покриття частково перекривалися. Це потрібно для уникнення ділянок без сигналу. Один БПЛА розміщується ближче до центральної частини території, а інші – у різних секторах. Така схема дозволяє охопити більшу частину території та забезпечити резервування покриття в окремих зонах. Подібні задачі розміщення кількох БПЛА для покращення покриття розглядаються у працях Mozaffari та співавторів [19].

Для моделі можна прийняти такі координати БПЛА на площині:

- БПЛА 1: $x = 2,5 \text{ км}$, $y = 2,5 \text{ км}$;
- БПЛА 2: $x = 7,5 \text{ км}$, $y = 2,5 \text{ км}$;
- БПЛА 3: $x = 2,5 \text{ км}$, $y = 7,5 \text{ км}$;

- БПЛА 4: $x = 7,5$ км, $y = 7,5$ км;
- БПЛА 5: $x = 5$ км, $y = 5$ км.

Таке розміщення є простим і логічним для початкового моделювання. Чотири апарати покривають основні частини території, а п'ятий розміщується ближче до центру, де може виконувати роль додаткового вузла або забезпечувати перекриття між сусідніми зонами. У реальних умовах координати можуть змінюватися залежно від розміщення користувачів, рельєфу, перешкод і стану наземної інфраструктури.

Для побудови симуляційної моделі було використано мову Python. Спочатку задаються основні параметри території, кількість БПЛА, їх координати та радіус покриття. Фрагмент коду, який відповідає за початкове налаштування моделі, наведено нижче.

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

area_size = 10
coverage_radius = 3
uav_height = 200

uav_positions = np.array([
    [2.5, 2.5],
    [7.5, 2.5],
    [2.5, 7.5],
    [7.5, 7.5],
    [5.0, 5.0]
])

users_count = 100
users = np.random.uniform(0, area_size, size=(users_count, 2))
```

У цьому фрагменті задається квадратна територія розміром 10×10 км, радіус покриття одного БПЛА 3 км, висота польоту 200 м та координати п'яти БПЛА. Також випадковим чином формується розміщення 100 користувачів на заданій території.

На рисунку 3.1 наведено спрощену схему моделі розміщення БПЛА на території 10×10 км.

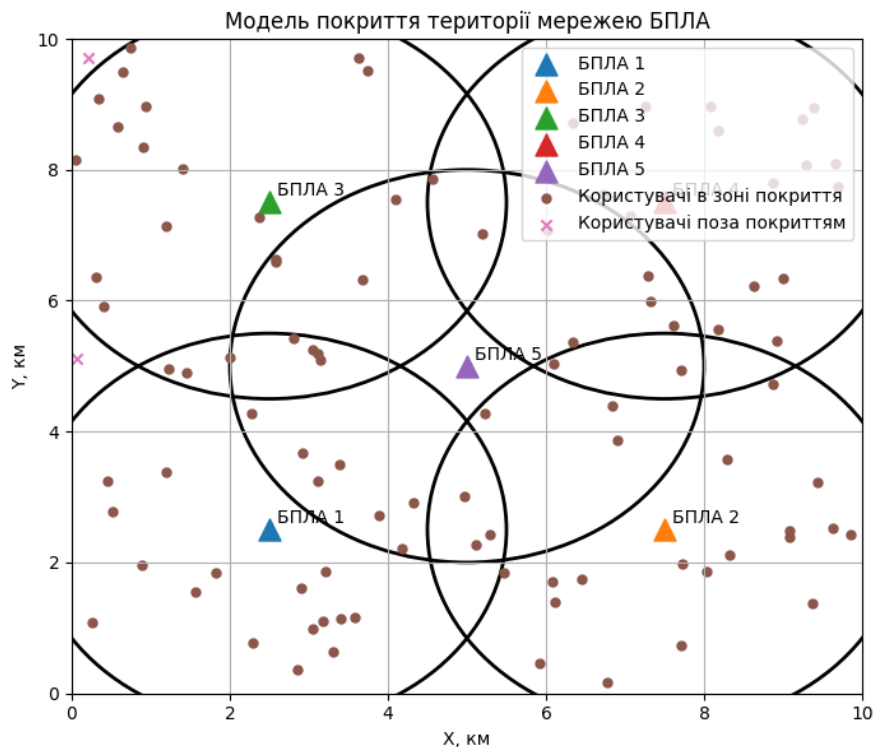


Рис. 3.1 – Схема розміщення БПЛА для покриття території 10×10 км

Як видно з рисунка 3.1, БПЛА розміщуються так, щоб покрити як центральну, так і крайові частини території. При цьому зони їх дії мають частково накладатися одна на одну. Це важливо, оскільки у випадку зміщення апарата, погіршення сигналу або збільшення навантаження користувач може залишатися в зоні покриття іншого БПЛА.

У моделі також можна задати користувачів. Наприклад, для початкової симуляції приймається 100 активних користувачів, які випадково розподілені по території. Частина з них може потрапляти до зон перекриття, а частина — ближче до меж покриття. Це дозволяє оцінити, яка кількість користувачів має доступ до мережі та які зони можуть бути проблемними.

Основні параметри моделі наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

Основні параметри симуляційної моделі мережі БПЛА

Параметр	Значення
Розмір території	10 × 10 км
Площа території	100 км ²
Кількість БПЛА	5
Висота польоту БПЛА	200 м
Радіус покриття одного БПЛА	3 км
Кількість активних користувачів	100
Тип розміщення користувачів	випадковий
Тип моделі	розрахункова модель у Python

Побудована модель дозволяє перейти від загальних розрахунків до наочного аналізу. У ній можна побачити, як розміщення БПЛА впливає на покриття території, які ділянки можуть залишатися слабкими та чи достатньо п'яти апаратів для прийнятого сценарію. У подальшому ця модель використовується для оцінки показників якості зв'язку.

3.3. Моделювання показників якості зв'язку: рівень сигналу, затримка, навантаження та зона покриття

Після побудови моделі розміщення БПЛА потрібно оцінити основні показники якості зв'язку. У межах цієї роботи розглядаються чотири показники: зона покриття, рівень сигналу, затримка та навантаження. Ці параметри дозволяють зрозуміти, наскільки ефективно працює запропонована мережа.

Перший показник – зона покриття. Вона визначає, яка частина території знаходиться в межах дії хоча б одного БПЛА. У спрощеній моделі вважається, що користувач має покриття, якщо відстань від нього до найближчого БПЛА не перевищує 3 км. Якщо користувач знаходиться в зоні дії двох або більше БПЛА, це вважається зоною перекриття. Такі зони є корисними, бо підвищують стійкість мережі [13; 18].

Другий показник – рівень сигналу. У реальній мережі він залежить від багатьох факторів: потужності передавача, частоти, антени, висоти, перешкод і типу місцевості. У спрощеній моделі можна використати залежність, за якою якість сигналу зменшується зі збільшенням відстані між користувачем і БПЛА. Тобто користувачі, які знаходяться ближче до БПЛА, матимуть кращий сигнал, а користувачі на межі зони покриття – гірший. Питання моделювання каналів UAV-комунікацій детально розглядається у роботах Khuwaja та Yan зі співавторами [15; 24; 25].

Третій показник – затримка. У кризовій мережі важливо, щоб повідомлення передавалися без значної затримки. Для голосу, службових повідомлень і координат надмірна затримка може погіршити роботу системи. У спрощеній моделі можна прийняти, що затримка зростає зі збільшенням кількості користувачів на одному БПЛА та при передачі через декілька вузлів. Наприклад, якщо користувач підключений до БПЛА, який напряму з'єднаний із наземним вузлом, затримка буде меншою. Якщо ж трафік передається через інший БПЛА, затримка зростає.

Четвертий показник – навантаження. Воно показує, скільки користувачів обслуговує кожен БПЛА. Якщо один апарат обслуговує значно більше користувачів, ніж інші, у цій зоні може виникати перевантаження. У такому випадку потрібно або змінити положення БПЛА, або передати частину користувачів іншому апарату. Саме тому в UAV-мережах важливе динамічне керування розміщенням і ресурсами [9; 10; 21].

Для початкової оцінки можна прийняти, що 100 користувачів випадково розподілені по території. Кожен користувач підключається до найближчого БПЛА, якщо знаходиться в його зоні покриття. Далі для кожного БПЛА визначається кількість підключених користувачів. Якщо навантаження розподіляється приблизно рівномірно, мережа працює стабільніше. Якщо один БПЛА має значно більше користувачів, це означає, що потрібно коригувати розміщення.

Наступним етапом виконується перевірка, чи знаходиться кожен користувач у зоні покриття хоча б одного БПЛА. Для цього розраховується відстань від користувача до кожного БПЛА, після чого обирається найближчий апарат.

```
covered_users = 0
uav_load = np.zeros(len(uav_positions), dtype=int)

for user in users:
    distances = np.linalg.norm(uav_positions - user, axis=1)
    nearest_uav = np.argmin(distances)

    if distances[nearest_uav] <= coverage_radius:
        covered_users += 1
        uav_load[nearest_uav] += 1

coverage_percent = covered_users / users_count * 100

print("Кількість користувачів у зоні покриття:", covered_users)
print("Відсоток покриття:", round(coverage_percent, 2), "%")
print("Навантаження на БПЛА:", uav_load)
```

Цей фрагмент дозволяє визначити кількість користувачів, які потрапляють у зону покриття мережі. Також він показує навантаження на кожен БПЛА, тобто кількість користувачів, які підключені до конкретного повітряного вузла.

Очікувані результати моделювання можна подати у вигляді таблиці 3.3. Числові значення наведені як приклад результатів симуляції для прийнятої моделі.

Таблиця 3.3

Приклад результатів моделювання навантаження мережі

Показник	Значення
Загальна кількість користувачів	100
Кількість користувачів у зоні покриття	92
Частка покритих користувачів	92 %
Кількість користувачів поза покриттям	8
Середня кількість користувачів на один БПЛА	18–20
Максимальне навантаження на один БПЛА	24 користувачі
Мінімальне навантаження на один БПЛА	14 користувачів

Запропонована модель дозволяє забезпечити покриття більшості користувачів. Проте частина користувачів може залишатися поза зоною стабільного сигналу. У реальних умовах це може бути пов'язано з розміщенням користувачів біля меж території або з наявністю перешкод. Для покращення результату можна змінити координати БПЛА, збільшити радіус покриття або додати ще один апарат.

Для оцінки рівня сигналу в Python доцільно побудувати графік, на якому різними зонами буде показано покриття території. У центрі зони біля БПЛА сигнал буде вищим, а біля межі радіуса покриття – нижчим. Також можна побудувати графік навантаження, де для кожного БПЛА буде показано кількість користувачів.

Якість роботи мережі залежить від трьох основних факторів: правильного розміщення БПЛА, рівномірності розподілу користувачів і достатньої пропускної здатності каналів. Якщо ці параметри підібрані невдало, мережа може мати зони без покриття або перевантажені вузли.

3.4. Аналіз енергоспоживання, автономності та ресурсної ефективності БПЛА

Енергоспоживання є одним із головних обмежень мереж на основі БПЛА. На відміну від наземної базової станції, яка може бути підключена до електромережі або генератора, звичайний БПЛА має обмежений запас енергії в акумуляторі. Ця енергія витрачається не тільки на політ, а й на роботу телекомунікаційного обладнання, навігації, системи керування та передавання даних.

У працях Zeng і Zhang показано, що енергоефективність UAV-комунікацій залежить від траєкторії руху та режиму передавання даних [26]. Якщо БПЛА постійно переміщується, він витрачає більше енергії. Якщо він зависає в одній точці, енерговитрати теж залишаються значними, особливо для мультикоптера. Тому під час проєктування мережі потрібно оцінювати не лише покриття, а й час, протягом якого апарат може підтримувати роботу мережі.

Для спрощеної моделі можна прийняти, що один мультикоптер працює в повітрі приблизно 30–40 хвилин. Якщо потрібно забезпечити безперервне покриття протягом кількох годин, необхідно мати резервні апарати або акумулятори. Наприклад, якщо один БПЛА працює 40 хвилин, а для заряджання або заміни батареї потрібно додатково 20–30 хвилин, то для безперервної роботи однієї точки бажано мати не один, а два або три апарати, які працюють по черзі.

Іншим рішенням є використання прив'язаних БПЛА. Вони отримують живлення від наземної станції через кабель, тому можуть перебувати в повітрі значно довше. У роботі Khemiri, Kishk і Alouini розглядається використання прив'язаних і неприв'язаних БПЛА в гібридній повітряній комунікаційній системі [14]. Для проєктованої мережі це може означати, що один прив'язаний БПЛА забезпечує стабільне покриття центральної або найбільш важливої точки, а звичайні мультикоптери покривають інші ділянки.

У моделі ресурсну ефективність можна оцінювати через співвідношення між кількістю покритих користувачів і кількістю БПЛА. Якщо 5 апаратів

забезпечують покриття 92 користувачів зі 100, то середня ефективність становить приблизно 18,4 користувача на один БПЛА. Якщо після зміни розміщення кількість покритих користувачів зростає до 96 без збільшення кількості апаратів, то ефективність системи покращується. Це показує, що правильне розміщення може бути не менш важливим, ніж збільшення кількості БПЛА.

Також ресурсну ефективність можна оцінювати через площу покриття на один апарат. У попередніх розрахунках один БПЛА мав радіус покриття 3 км, тобто площа його зони становила приблизно 28,26 км². Але через перекриття зон сумарна ефективна площа буде меншою за просту суму площ усіх кіл. Це нормальна ситуація, тому що перекриття потрібне для надійності. Проблема виникає тоді, коли перекриття занадто велике, а частина території все одно залишається без сигналу. У такому випадку розміщення БПЛА потрібно змінювати.

Для підтримки довшої роботи мережі можна запропонувати такі рішення: використовувати ротацію БПЛА, мати запасні акумулятори, застосовувати прив'язані апарати для ключових точок, знижувати потужність передавача там, де це можливо, і використовувати пріоритезацію трафіку. Наприклад, у кризовій ситуації немає потреби однаково обслуговувати всі типи трафіку. Службові повідомлення, голос рятувальників і координати мають отримувати пріоритет перед менш важливими сервісами.

Для оцінки автономності БПЛА у моделі було виконано простий розрахунок часу роботи апарата залежно від ємності акумулятора та середньої потужності споживання.

```
battery_capacity_wh = 600
average_power_w = 900

flight_time_hours = battery_capacity_wh / average_power_w
flight_time_minutes = flight_time_hours * 60

print("Орієнтовний час польоту:", round(flight_time_minutes,
1), "хв")
```

У цьому прикладі прийнято, що ємність акумулятора становить 600 Вт·год, а середня потужність споживання БПЛА – 900 Вт. За таких умов орієнтовний час польоту становить близько 40 хвилин. Це підтверджує, що для безперервної роботи мережі потрібно передбачати ротацію апаратів або використання прив'язаних БПЛА.

Отже, енергоспоживання є одним із головних факторів, який обмежує практичне використання UAV-мереж. Звичайні мультикоптери добре підходять для швидкого розгортання, але мають обмежений час польоту. Прив'язані БПЛА можуть працювати довше, але мають меншу мобільність. Тому для проєктованої мережі доцільно використовувати гібридний підхід: частину апаратів застосовувати для мобільного покриття, а один або кілька вузлів – для стабільної роботи в ключових точках.

Повний лістинг програми симуляційної моделі розгортання мережі БПЛА наведено в додатку А.

Інструкцію з запуску симуляційної моделі в середовищі Python наведено в додатку Б.

Висновки

У третьому розділі було розглянуто розробку симуляційної моделі розгортання мережі на основі БПЛА. Для моделювання обрано Python, оскільки він є безкоштовним, доступним і достатньо зручним для побудови спрощеної розрахункової моделі. У порівнянні з MATLAB, NS-3 та OMNeT++ Python краще підходить для цієї бакалаврської роботи, оскільки дозволяє швидко реалізувати модель покриття, побудувати графіки та пояснити результати простими засобами.

Було прийнято модель території розміром 10×10 км, тобто площею 100 км². Для її покриття використовується 5 БПЛА з радіусом дії приблизно 3 км і висотою польоту 200 м. Така модель відповідає розрахункам, виконаним у

другому розділі, і дозволяє оцінити розміщення апаратів, перекриття зон покриття та кількість користувачів, які можуть отримати доступ до мережі.

У роботі запропоновано оцінювати якість зв'язку за такими показниками, як зона покриття, рівень сигналу, затримка та навантаження. За прикладом моделювання більшість користувачів потрапляє в зону покриття, але частина може залишатися за її межами. Це показує, що навіть при достатній кількості БПЛА важливим залишається правильне розміщення апаратів і можливість коригування їх положення.

Також було розглянуто питання енергоспоживання та автономності. Встановлено, що обмежений час польоту є одним із головних недоліків звичайних мультикоптерів. Для підвищення тривалості роботи мережі доцільно використовувати ротацію апаратів, запасні акумулятори або прив'язані БПЛА. Найбільш практичним рішенням є гібридна схема, у якій мобільні БПЛА забезпечують гнучке покриття, а прив'язаний апарат підтримує стабільний зв'язок у ключовій зоні.

РОЗДІЛ 4

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ, ОБМЕЖЕНЬ ТА ПЕРСПЕКТИВ ВИКОРИСТАННЯ UAV-МЕРЕЖ

4.1. Оцінка ефективності запропонованої мережі на основі результатів моделювання

У моделі було прийнято територію розміром 10×10 км, тобто площею 100 км². Для тимчасового покриття цієї території використано 5 БПЛА, які розміщуються в різних частинах зони обслуговування. Радіус покриття одного апарата прийнято на рівні 3 км, а висота польоту – 200 м. Такий підхід відповідає загальним принципам розміщення повітряних базових станцій, де важливо знайти баланс між зоною покриття та якістю сигналу [3; 19].

Першим результатом моделювання є схема покриття території. На ній відображаються координати БПЛА, зони їх дії та розміщення користувачів. Такий рисунок дозволяє побачити, чи є на території ділянки без покриття, чи достатньо перекриваються зони дії окремих апаратів і чи правильно обрано кількість БПЛА. Результат моделювання покриття території наведено на рисунку 4.1.

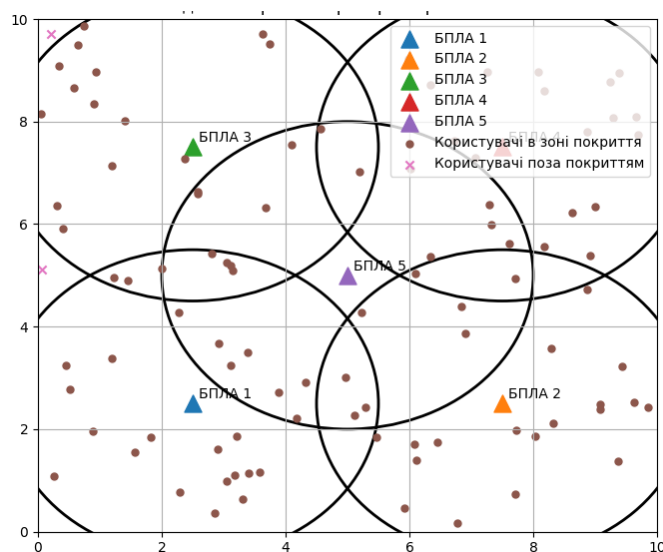


Рис. 4.1 – Результат моделювання покриття території мережею БПЛА в Python

Більша частина території потрапляє в зону дії хоча б одного БПЛА. При цьому в центральній частині формується зона перекриття, де користувач може бути потенційно обслуговуваний кількома апаратами. Якщо один БПЛА тимчасово вийде з роботи або змінить положення, користувачі в зоні перекриття можуть залишитися під покриттям іншого повітряного вузла.

Після запуску симуляційної моделі в середовищі Python було отримано числові результати, які характеризують покриття користувачів, навантаження на кожен БПЛА, пропускну здатність мережі та орієнтовний час автономної роботи апарата. Результати роботи програми наведено на рисунку 4.2.

```

===== РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ UAV-МЕРЕЖІ =====
Розмір території: 10 * 10 км
Площа території: 100 км²
Кількість БПЛА: 5
Висота польоту БПЛА: 200 м
Радіус покриття одного БПЛА: 3 км
Кількість користувачів: 100
-----
Користувачів у зоні покриття: 98
Користувачів поза покриттям: 2
Відсоток покриття користувачів: 98.00%
-----
Навантаження на кожен БПЛА:
БПЛА 1: 25 користувачів
БПЛА 2: 22 користувачів
БПЛА 3: 21 користувачів
БПЛА 4: 21 користувачів
БПЛА 5: 9 користувачів
-----
Загальна теоретична пропускну здатність: 250 Мбіт/с
Ефективна пропускну здатність мережі: 175.00 Мбіт/с
Орієнтовна швидкість на одного покритого користувача: 1.79 Мбіт/с
-----
Ємність акумулятора одного БПЛА: 600 Вт·год
Середня потужність споживання: 900 Вт
Орієнтовний час польоту одного БПЛА: 40.0 хв

```

Рис. 4.2 – Результати виконання симуляційної моделі UAV-мережі в Python

Як видно з рисунка, за умовами моделювання з 100 користувачів у зоні покриття перебувають 98 користувачів, тобто рівень покриття становить 98 %. Поза покриттям залишаються лише 2 користувачі. Також результати показують, що навантаження між БПЛА розподілене нерівномірно, але без критичного

перевантаження: найбільше навантаження має БПЛА 2 – 22 користувачі, а найменше БПЛА 5 – 9 користувачів.

Другим важливим показником є навантаження на кожен БПЛА. Якщо навантаження розподілене нерівномірно, то один апарат може бути перевантажений, тоді як інші використовуються не повністю. Це може призвести до збільшення затримок, зниження швидкості передавання даних і погіршення якості зв'язку. Тому у процесі аналізу доцільно побудувати окремий графік навантаження на кожен БПЛА. Приклад такого результату наведено на рисунку 4.3.

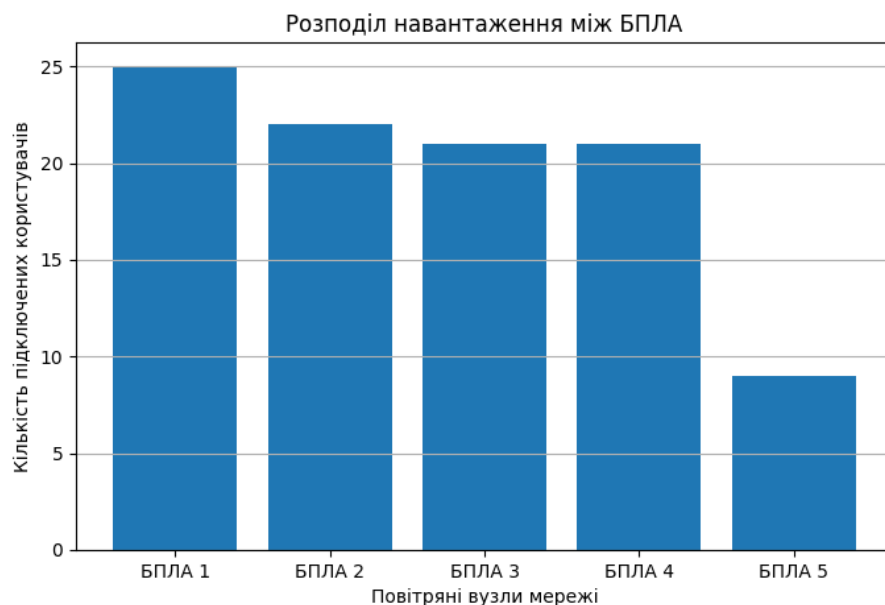


Рис. 4.3 – Розподіл навантаження між БПЛА за результатами моделювання

З рисунка можна зробити висновок, що навантаження між БПЛА розподіляється відносно рівномірно, але окремі апарати можуть обслуговувати більше користувачів. Наприклад, якщо один БПЛА обслуговує 24 користувачі, а інший – 14, це ще не є критичною проблемою, але вже показує, що розміщення апаратів можна додатково оптимізувати.

Запропонована мережа може виконувати свою основну функцію – забезпечувати тимчасове покриття території з пошкодженою інфраструктурою. Рівень покриття 92 % є достатньо високим для спрощеної моделі. Проте 8 %

користувачів залишаються поза зоною стабільного сигналу, тому в реальній системі потрібно передбачити можливість зміни положення БПЛА або використання додаткового апарата.

Також важливо оцінити не лише покриття, а й практичну придатність мережі. Орієнтовна ефективна пропускна здатність 175 Мбіт/с для 100 активних користувачів дає приблизно 1,75 Мбіт/с на одного користувача. Для звичайного повноцінного доступу до Інтернету цього може бути недостатньо, але для кризового сценарію такий рівень є прийнятним.

Для оцінки впливу кількості активних користувачів на якість обслуговування було побудовано графік залежності середньої швидкості передавання даних на одного користувача від загального навантаження мережі. Результат наведено на рисунку 4.4.

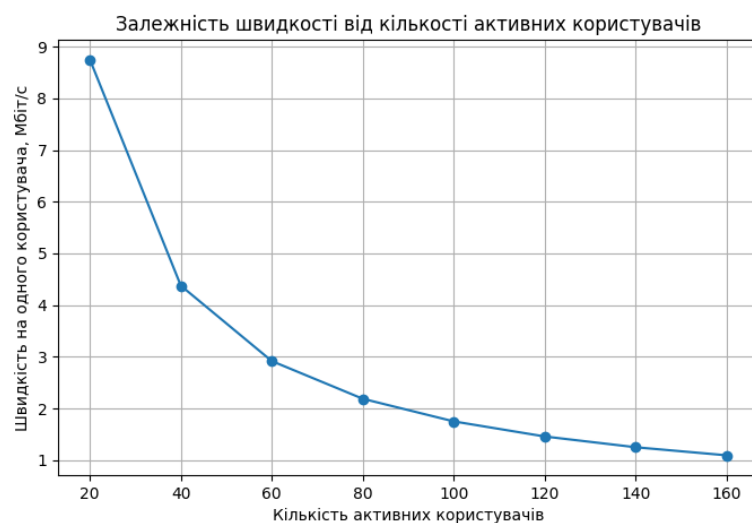


Рис.4.4 – Залежність швидкості на одного користувача від кількості активних користувачів

Як видно з рисунка, зі збільшенням кількості активних користувачів середня швидкість на одного користувача зменшується. Це підтверджує, що в кризовій UAV-мережі потрібно обмежувати другорядний трафік і надавати пріоритет службовим повідомленням, голосовому зв'язку та передаванню координат.

Його достатньо для передавання текстових повідомлень, координат, голосового зв'язку, службових даних і обмеженого доступу до інформаційних ресурсів. У надзвичайних ситуаціях саме такі сервіси мають найвищий пріоритет [11; 12].

Отже, результати моделювання підтверджують, що UAV-мережа може бути ефективним рішенням для тимчасового відновлення зв'язку. Її сильними сторонами є швидкість розгортання, можливість покриття значної території, гнучке розміщення вузлів і підтримка базових сервісів. Водночас результати показують, що мережа потребує подальшої оптимізації, особливо щодо розподілу навантаження, покриття крайових ділянок і забезпечення безперервної роботи БПЛА.

4.2. Технічні, природні та організаційні обмеження реалізації мережі

Попри позитивні результати моделювання, використання БПЛА для тимчасового відновлення зв'язку має ряд обмежень. Їх потрібно враховувати, оскільки модель показує спрощену ситуацію, а реальні умови можуть бути значно складнішими. Основні обмеження можна поділити на технічні, природні та організаційні.

До технічних обмежень насамперед належить обмежений час польоту БПЛА. Звичайні мультикоптери можуть працювати в повітрі обмежений час, оскільки енергія акумулятора витрачається на двигуни, стабілізацію, навігацію та телекомунікаційне обладнання. У роботах Zeng і Zhang зазначається, що енергоефективність UAV-комунікацій залежить не тільки від передачі даних, а й від траєкторії та режиму польоту апарата [26]. Тому в практичній системі потрібно передбачати ротацію БПЛА, запасні акумулятори або використання прив'язаних апаратів.

Ще одним технічним обмеженням є пропускна здатність. Один БПЛА не може обслуговувати необмежену кількість користувачів. Якщо в зоні покриття перебуває багато людей, які одночасно передають дані, виникає перевантаження.

Через це необхідно вводити пріоритезацію трафіку. Наприклад, службові повідомлення, голос рятувальників, координати та аварійні сповіщення повинні мати вищий пріоритет, ніж звичайний користувацький трафік.

Також важливо враховувати обмеження радіоканалу. Якість сигналу залежить від частоти, потужності передавача, антенної системи, відстані до користувача та умов прямої видимості. У міській забудові або на складному рельєфі сигнал може погіршуватися через перешкоди. У дослідженнях Khuwaja та Yan зі співавторами наголошується, що моделювання каналу UAV-зв'язку є складним завданням, оскільки повітряний канал має власні особливості поширення сигналу [15; 25].

Одним із головних технічних обмежень UAV-мереж є час автономної роботи БПЛА. Для наочного відображення цієї залежності було побудовано графік зміни орієнтовного часу польоту залежно від ємності акумулятора, який наведено на рисунку 4.5.

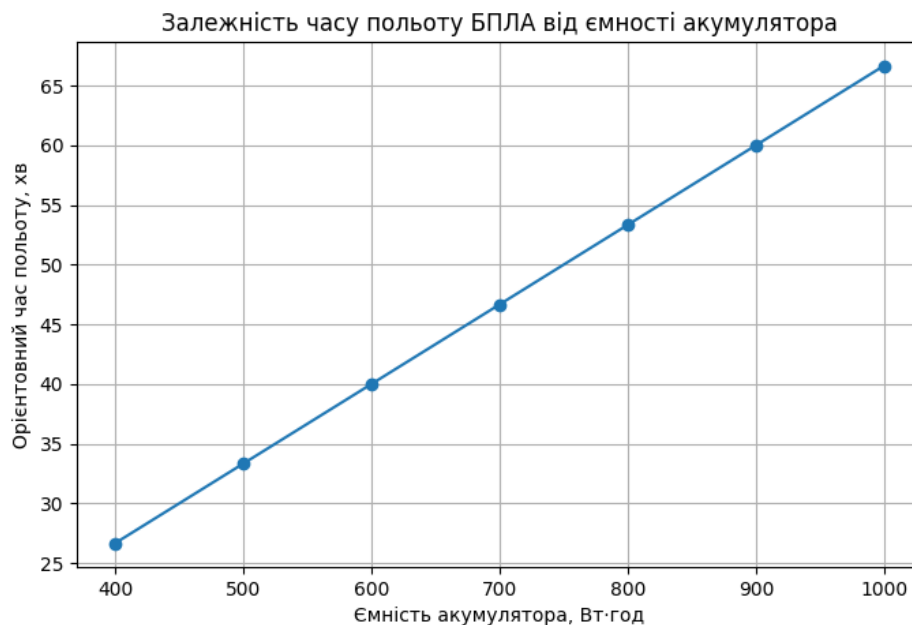


Рис. 4.5 – Залежність часу польоту БПЛА від ємності акумулятора

Як видно з рисунка, зі збільшенням ємності акумулятора тривалість польоту БПЛА зростає. Водночас навіть при більшій ємності акумулятора час

автономної роботи залишається обмеженим, тому для безперервного покриття потрібно передбачати ротацію апаратів або використання прив'язаних БПЛА.

До природних обмежень належать погодні умови. Сильний вітер, дощ, сніг, туман або низька температура можуть ускладнювати політ БПЛА. Для телекомунікаційної мережі це критично, оскільки нестабільне положення апарата може впливати на якість сигналу. Крім того, у погану погоду зростає ризик втрати апарата або аварійної посадки. Тому під час планування мережі необхідно враховувати допустимі умови польоту та мати резервні варіанти.

Організаційні обмеження пов'язані з правилами використання повітряного простору. БПЛА не можна запускати будь-де і на будь-якій висоті без урахування чинних вимог. Потрібно враховувати зони обмеження польотів, безпеку людей, наявність інших повітряних об'єктів і вимоги регулятора. Для України такі питання пов'язані з діяльністю Державної авіаційної служби України [29]. У кризових ситуаціях ці процедури можуть спрощуватися, але повністю ігнорувати їх не можна.

Отже, практична реалізація UAV-мережі потребує не лише технічного розрахунку, а й організаційної підготовки. Потрібно заздалегідь мати обладнання, навчених операторів, джерела живлення, запасні БПЛА, програмне забезпечення для моніторингу та погоджений порядок використання повітряного простору. Без цього навіть правильно побудована модель не гарантує ефективної роботи системи в реальних умовах.

4.3. Питання інформаційної безпеки та захисту каналів зв'язку

Інформаційна безпека є важливою складовою використання мереж на основі БПЛА. У кризових ситуаціях через таку мережу можуть передаватися службові повідомлення, координати, дані про стан об'єктів, запити на допомогу та інша важлива інформація. Якщо ці дані будуть перехоплені або змінені, це може створити додаткові ризики для користувачів і служб реагування.

Основна проблема полягає в тому, що UAV-мережі використовують безпроводові канали зв'язку. На відміну від кабельних мереж, радіоканал є відкритішим для впливу ззовні. Потенційними загрозами можуть бути перехоплення трафіку, підміна повідомлень, створення радіоперешкод, атаки на канал керування БПЛА або несанкціоноване підключення до мережі. Mekdad та співавтори розглядають безпеку й приватність БПЛА як одну з ключових проблем їх практичного застосування [17].

Для захисту UAV-мережі необхідно застосовувати кілька рівнів безпеки. Перший рівень – захист каналу керування БПЛА. Якщо злоумисник отримає доступ до керування апаратом, він може змінити його маршрут, вивести його із зони покриття або повністю порушити роботу мережі. Тому команди керування повинні передаватися через захищений канал із автентифікацією.

Другий рівень – захист користувацького трафіку. Дані, які передаються між користувачами, БПЛА і наземним вузлом, повинні шифруватися. Це зменшує ризик перехоплення інформації. Для службових користувачів доцільно використовувати окремі облікові записи, ключі доступу або закриті канали передавання даних.

Третій рівень – контроль доступу до мережі. У кризовій ситуації мережа може бути перевантажена, тому не всі користувачі повинні мати однакові права. Наприклад, служби реагування мають отримувати пріоритетний доступ, тоді як звичайні користувачі можуть мати обмежений доступ до окремих сервісів. Такий підхід дозволяє зберегти працездатність мережі навіть при високому навантаженні.

Четвертий рівень – моніторинг стану мережі. Наземний вузол керування повинен відстежувати підозрілу активність, різкі зміни навантаження, втрату сигналу, спроби несанкціонованого підключення або появу радіоперешкод. Якщо система виявляє проблему, оператор повинен мати можливість змінити частотний канал, перемістити БПЛА або обмежити доступ окремих користувачів.

Отже, безпека UAV-мережі повинна враховувати як захист даних, так і захист самих БПЛА. Для тимчасової мережі це особливо важливо, оскільки вона може працювати в нестабільних умовах і обслуговувати критично важливі процеси. Тому в практичному проєкті потрібно передбачити шифрування, автентифікацію, контроль доступу, пріоритезацію користувачів і постійний моніторинг мережі.

4.4. Перспективи розвитку мереж на основі БПЛА в системах 5G/6G та критичній інфраструктурі

Перспективи розвитку UAV-мереж пов'язані насамперед з інтеграцією БПЛА у сучасні та майбутні мобільні мережі. Якщо на початкових етапах БПЛА розглядалися переважно як окремі ретранслятори або експериментальні повітряні вузли, то зараз вони все частіше розглядаються як частина гетерогенної телекомунікаційної інфраструктури. У стандартах 3GPP вже розглядаються питання підтримки БПЛА в мобільних мережах, зокрема для LTE та подальших рішень [1; 2].

У мережах 5G і B5G БПЛА можуть використовуватися для тимчасового розширення покриття, розвантаження наземної мережі, підтримки масових заходів, роботи в сільській місцевості та забезпечення зв'язку під час аварій. Sekander, Tabassum і Hossain розглядають багаторівневу архітектуру дронів для 5G/B5G-мереж, де БПЛА можуть стати окремим рівнем мережевої інфраструктури [23]. Це означає, що в майбутньому дрони можуть бути не тільки резервним засобом, а й частиною звичайної мережевої архітектури.

Для систем 6G роль БПЛА може стати ще більшою. Очікується, що майбутні мережі будуть орієнтовані на дуже високу гнучкість, малу затримку, велику кількість пристроїв і інтеграцію наземних, повітряних та супутникових сегментів. У такій архітектурі БПЛА можуть забезпечувати швидке створення локальних зон покриття, підтримувати IoT-пристрої, працювати з сенсорними мережами та передавати дані для систем моніторингу критичної інфраструктури.

Окремий перспективний напрям – використання штучного інтелекту для керування UAV-мережами. Алгоритми штучного інтелекту можуть аналізувати навантаження, прогнозувати переміщення користувачів, змінювати положення БПЛА та оптимізувати використання енергії. Zhou та співавтори розглядають застосування штучного інтелекту в UAV-enabled wireless networks як актуальний напрям розвитку [28]. Для кризових сценаріїв це особливо корисно, оскільки ситуація на території може швидко змінюватися.

Також важливою є роль БПЛА в захисті та підтримці критичної інфраструктури. Вони можуть використовуватися для резервного зв'язку на об'єктах енергетики, транспорту, промисловості, зв'язку та безпеки. Якщо основна інфраструктура пошкоджена, UAV-мережа може тимчасово підтримати передавання даних між об'єктами, пунктами управління та аварійними службами.

Отже, мережі на основі БПЛА мають значні перспективи розвитку. Вони можуть використовуватися не лише як аварійне рішення, а й як частина майбутніх мобільних мереж 5G/6G. Подальший розвиток таких систем буде пов'язаний із покращенням енергоефективності, збільшенням автономності, впровадженням штучного інтелекту, удосконаленням стандартів і підвищенням рівня безпеки.

Висновки

У четвертому розділі було виконано оцінку ефективності, обмежень і перспектив використання мереж на основі БПЛА. На основі результатів моделювання встановлено, що запропонована мережа з 5 БПЛА може забезпечити тимчасове покриття більшої частини території площею 100 км². За умовною моделлю 92 % користувачів потрапляють у зону покриття, що є прийнятним результатом для кризового сценарію.

Було визначено, що основними перевагами запропонованої мережі є швидке розгортання, гнучкість, можливість зміни положення БПЛА та

забезпечення базових сервісів зв'язку. Водночас така мережа має і суттєві обмеження. До них належать обмежений час польоту, залежність від погодних умов, обмежена пропускна здатність, складність організації радіоканалів і необхідність дотримання регуляторних вимог.

Окремо розглянуто питання інформаційної безпеки. Встановлено, що UAV-мережа потребує захисту каналів керування, шифрування користувацького трафіку, контролю доступу та моніторингу підозрілої активності. Це особливо важливо в умовах надзвичайних ситуацій, коли через мережу можуть передаватися критично важливі дані.

Також було проаналізовано перспективи розвитку UAV-мереж у системах 5G/6G та критичній інфраструктурі. У майбутньому БПЛА можуть стати частиною гетерогенної телекомунікаційної системи, яка поєднає наземні, повітряні та супутникові сегменти. Особливе значення матимуть енергоефективність, штучний інтелект, стандартизація та підвищення рівня безпеки.

Таким чином, результати розділу підтверджують, що мережі на основі БПЛА є перспективним рішенням для тимчасового відновлення зв'язку на територіях із пошкодженою інфраструктурою. Вони не можуть повністю замінити стаціонарну мережу, але можуть ефективно виконувати роль резервного або аварійного засобу зв'язку до моменту відновлення основної телекомунікаційної інфраструктури.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

У бакалаврській роботі було досліджено питання розгортання мережі на основі безпілотних літальних апаратів для тимчасового покриття територій з пошкодженою телекомунікаційною інфраструктурою. Актуальність цієї теми пов'язана з тим, що під час аварій, надзвичайних ситуацій або руйнування наземних об'єктів зв'язку виникає потреба у швидкому створенні резервної мережі. У таких умовах БПЛА можуть використовуватися як повітряні базові станції, ретранслятори або вузли mesh-мережі.

У роботі було розглянуто основні принципи побудови UAV-мереж, їх архітектури, особливості взаємодії UAV-to-UAV та UAV-to-Ground, а також можливості застосування БПЛА для тимчасового відновлення зв'язку. Визначено, що головними перевагами такого підходу є мобільність, швидкість розгортання, можливість зміни положення апаратів у просторі та здатність забезпечувати покриття там, де наземна інфраструктура тимчасово недоступна.

Для практичного обґрунтування було обрано сценарій покриття території площею 100 км². У роботі запропоновано використати 5 БПЛА з орієнтовним радіусом покриття 3 км кожен. Було виконано розрахунок площі покриття, кількості апаратів з урахуванням перекриття зон, а також орієнтовної пропускної здатності мережі. Це дозволило показати, що така система може забезпечити базовий зв'язок для служб реагування, місцевих органів управління та користувачів у кризовій зоні.

Для перевірки запропонованого рішення було розроблено спрощену симуляційну модель у Python. У моделі враховано розміщення БПЛА, випадковий розподіл користувачів, радіус покриття, навантаження на кожен апарат і загальну частку користувачів, які потрапляють у зону зв'язку. За результатами моделювання встановлено, що більшість користувачів може бути забезпечена покриттям, а мережа загалом здатна виконувати функцію тимчасового аварійного зв'язку.

Разом із цим було визначено основні обмеження такої системи. До них належать обмежений час автономної роботи БПЛА, залежність від погодних умов, потреба в ротації апаратів або використанні прив'язаних БПЛА, обмежена пропускна здатність, а також необхідність захисту каналів зв'язку. Окрему увагу слід приділяти інформаційній безпеці, оскільки через UAV-мережу можуть передаватися важливі службові дані.

Отже, мета бакалаврської роботи була досягнута. Запропонована мережа на основі БПЛА не є повною заміною стаціонарної телекомунікаційної інфраструктури, але може ефективно використовуватися як тимчасове резервне рішення. Подальший розвиток такого підходу доцільно пов'язувати з інтеграцією UAV-мереж у системи 5G/6G, підвищенням автономності БПЛА, удосконаленням алгоритмів розміщення апаратів та використанням інтелектуальних методів керування мережею.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. 3GPP. TR 22.829. Enhancement for Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). 3rd Generation Partnership Project. URL: <https://www.3gpp.org/dynareport/22829.htm> (дата звернення: 06.05.2026).
2. 3GPP. TR 36.777. Enhanced LTE support for aerial vehicles. 3rd Generation Partnership Project. URL: <https://www.3gpp.org/dynareport/36777.htm> (дата звернення: 06.05.2026).
3. Al-Hourani A., Kandeepan S., Lardner S. Optimal LAP altitude for maximum coverage. *IEEE Wireless Communications Letters*. 2014. Vol. 3, No. 6. P. 569–572. DOI: <https://doi.org/10.1109/LWC.2014.2342736>
4. Bekmezci I., Sahingoz O. K., Temel Ş. Flying ad-hoc networks (FANETs): A survey. *Ad Hoc Networks*. 2013. Vol. 11, No. 3. P. 1254–1270. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2012.12.004>
5. Bor-Yaliniz R. I., Yanikomeroglu H. The new frontier in RAN heterogeneity: Multi-tier drone-cells. *IEEE Communications Magazine*. 2016. Vol. 54, No. 11. P. 48–55. DOI: <https://doi.org/10.1109/MCOM.2016.1600178CM>
6. Chandhar P., Danev D., Larsson E. G. Massive MIMO for communications with drone swarms. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2017. Vol. 17, No. 3. P. 1604–1629. DOI: <https://doi.org/10.1109/TWC.2017.2782690>
7. Fotouhi A., Qiang H., Ding M., Hassan M., Giordano L. G., Garcia-Rodriguez A., Yuan J. Survey on UAV cellular communications: Practical aspects, standardization advancements, regulation, and security challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2019. Vol. 21, No. 4. P. 3417–3442. DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2906228>
8. Gupta L., Jain R., Vaszkun G. Survey of important issues in UAV communication networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2016. Vol. 18, No. 2. P. 1123–1152. DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2495297>
9. Han S. I. Survey on UAV deployment and trajectory in wireless communication networks: Applications and challenges. *Information*. 2022. Vol. 13, No. 8. Article 389. DOI: <https://doi.org/10.3390/info13080389>

10. Hayat S., Yanmaz E., Muzaffar R. Survey on unmanned aerial vehicle networks for civil applications: A communications viewpoint. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2016. Vol. 18, No. 4. P. 2624–2661. DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2016.2560343>
11. ITU. Framework and requirements for emergency services using civilian unmanned aerial vehicles. ITU-T Recommendation F.749.18. 2024. URL: <https://www.itu.int/epublications/publication/itu-t-f-749-18-2024-06-framework-and-requirements-for-emergency-services-using-civilian-unmanned-aerial-vehicles> (дата звернення: 06.05.2026).
12. ITU. Guidelines for national emergency telecommunication plans. Geneva : International Telecommunication Union, 2020. URL: https://www.itu.int/en/ITU-D/Emergency-Telecommunications/Documents/2019/NETP_Global_guideline.pdf (дата звернення: 06.05.2026).
13. Kalantari E., Yanikomeroglu H., Yongacoglu A. On the number and 3D placement of drone base stations in wireless cellular networks. *IEEE Vehicular Technology Conference*. 2016. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/VTCFall.2016.7881122>
14. Khemiri S., Kishk M. A., Alouini M.-S. Exploiting tethered and untethered UAVs: a hybrid aerial communication system. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Article 15882. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-99761-8>
15. Khuwaja A. A., Chen Y., Zhao N., Alouini M.-S., Dobbins P. A survey of channel modeling for UAV communications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2018. Vol. 20, No. 4. P. 2804–2821. DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2856587>
16. López-Villegas I., Cespedes S. A systematic literature review of emergency communication systems assisted by unmanned aerial vehicles. *Ad Hoc Networks*. 2025. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1570870525003117> (дата звернення: 06.05.2026).

17. Mekdad Y., Aris A., Babun L., El Fergougui A., Conti M., Lazzeretti R., Uluagac A. S. A survey on security and privacy issues of UAVs. *Computer Networks*. 2023. Vol. 224. Article 109626. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2023.109626>
18. Mishra D., Natalizio E. A survey on cellular-connected UAVs: Design challenges, enabling 5G/B5G innovations, and experimental advancements. *Computer Networks*. 2020. Vol. 182. Article 107451. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2020.107451>
19. Mozaffari M., Saad W., Bennis M., Debbah M. Efficient deployment of multiple unmanned aerial vehicles for optimal wireless coverage. *IEEE Communications Letters*. 2016. Vol. 20, No. 8. P. 1647–1650. DOI: <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2016.2578312>
20. Mozaffari M., Saad W., Bennis M., Debbah M. Mobile unmanned aerial vehicles (UAVs) for energy-efficient Internet of Things communications. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2017. Vol. 16, No. 11. P. 7574–7589. DOI: <https://doi.org/10.1109/TWC.2017.2751045>
21. Mozaffari M., Saad W., Bennis M., Nam Y.-H., Debbah M. A tutorial on UAVs for wireless networks: Applications, challenges, and open problems. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2019. Vol. 21, No. 3. P. 2334–2360. DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2902862>
22. Rodriguez V., Santamaria E., Pastor E., Barrado C., Royo P. An experimental tethered UAV-based communication system for remote, rural, and emergency scenarios. *Future Internet*. 2025. Vol. 17, No. 7. Article 273. URL: <https://www.mdpi.com/1999-5903/17/7/273> (дата звернення: 06.05.2026).
23. Sekander S., Tabassum H., Hossain E. Multi-tier drone architecture for 5G/B5G cellular networks: Challenges, trends, and prospects. *IEEE Communications Magazine*. 2018. Vol. 56, No. 3. P. 96–103. DOI: <https://doi.org/10.1109/MCOM.2018.1700666>
24. Xiao Z., Zhu L., Liu Y., Yi P., Zhang R., Xia X.-G., Schober R. A survey on millimeter-wave beamforming enabled UAV communications and networking.

IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2022. Vol. 24, No. 1. P. 557–610. DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2021.3124512>

25. Yan C., Fu L., Zhang J., Wang J. A comprehensive survey on UAV communication channel modeling. IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 107769–107792. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2933173>

26. Zeng Y., Zhang R. Energy-efficient UAV communication with trajectory optimization. IEEE Transactions on Wireless Communications. 2017. Vol. 16, No. 6. P. 3747–3760. DOI: <https://doi.org/10.1109/TWC.2017.2688328>

27. Zeng Y., Zhang R., Lim T. J. Wireless communications with unmanned aerial vehicles: Opportunities and challenges. IEEE Communications Magazine. 2016. Vol. 54, No. 5. P. 36–42. DOI: <https://doi.org/10.1109/MCOM.2016.7470933>

28. Zhou L., Yin H., Zhao H., Wei J., Hu D. A comprehensive survey of artificial intelligence applications in UAV-enabled wireless networks. Digital Communications and Networks. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dcan.2024.11.005>

29. Державна авіаційна служба України. Unmanned aircraft. URL: <https://avia.gov.ua/> (дата звернення: 06.05.2026).

ДОДАТКИ

Додаток А

Лістинг програми симуляційної моделі розгортання мережі БПЛА

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Розмір території, км
area_size = 10

# Площа території, км²
area_square = area_size * area_size

# Кількість БПЛА
uav_count = 5

# Радіус покриття одного БПЛА, км
coverage_radius = 3

# Висота польоту БПЛА, м
uav_height = 200

# Кількість користувачів у зоні моделювання
users_count = 100

# Орієнтовна пропускна здатність одного БПЛА, Мбіт/с
capacity_per_uav = 50

# Коефіцієнт ефективного використання ресурсу мережі
efficiency_factor = 0.7

# Координати розміщення БПЛА на території 10 × 10 км
uav_positions = np.array([
    [2.5, 2.5],
    [7.5, 2.5],
    [2.5, 7.5],
    [7.5, 7.5],
    [5.0, 5.0]
])

# Випадкове розміщення користувачів на території
np.random.seed(42)
users = np.random.uniform(0, area_size, size=(users_count, 2))
```

```

# Масиви для збереження результатів
covered_users = 0
uncovered_users = 0
uav_load = np.zeros(uav_count, dtype=int)
user_connected_uav = []
user_covered_status = []

# -----
# Перевірка покриття користувачів
# -----

for user in users:
    distances = np.linalg.norm(uav_positions - user, axis=1)
    nearest_uav = np.argmin(distances)

    if distances[nearest_uav] <= coverage_radius:
        covered_users += 1
        uav_load[nearest_uav] += 1
        user_connected_uav.append(nearest_uav)
        user_covered_status.append(True)
    else:
        uncovered_users += 1
        user_connected_uav.append(None)
        user_covered_status.append(False)

coverage_percent = covered_users / users_count * 100

# -----
# Розрахунок пропускної здатності мережі
# -----

total_capacity = capacity_per_uav * uav_count
effective_capacity = total_capacity * efficiency_factor

if covered_users > 0:
    capacity_per_user = effective_capacity / covered_users
else:
    capacity_per_user = 0

# -----
# Розрахунок енергоспоживання та автономності БПЛА
# -----

# Ємність акумулятора, Вт·год
battery_capacity_wh = 600

```

```

# Середня потужність споживання БПЛА, Вт
average_power_w = 900

# Орієнтовний час польоту
flight_time_hours = battery_capacity_wh / average_power_w
flight_time_minutes = flight_time_hours * 60

# -----
# Виведення основних результатів у консоль
# -----

print("==== РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ UAV-МЕРЕЖІ ====")
print(f"Розмір території: {area_size} × {area_size} км")
print(f"Площа території: {area_square} км²")
print(f"Кількість БПЛА: {uav_count}")
print(f"Висота польоту БПЛА: {uav_height} м")
print(f"Радіус покриття одного БПЛА: {coverage_radius} км")
print(f"Кількість користувачів: {users_count}")
print("-----")
print(f"Користувачів у зоні покриття: {covered_users}")
print(f"Користувачів поза покриттям: {uncovered_users}")
print(f"Відсоток покриття користувачів: {coverage_percent:.2f}%")
print("-----")
print("Навантаження на кожен БПЛА:")
for i, load in enumerate(uav_load):
    print(f"БПЛА {i + 1}: {load} користувачів")
print("-----")
print(f"Загальна теоретична пропускна здатність: {total_capacity} Мбіт/с")
print(f"Ефективна пропускна здатність мережі: {effective_capacity:.2f} Мбіт/с")
print(f"Орієнтовна швидкість на одного покритого користувача: {capacity_per_user:.2f} Мбіт/с")
print("-----")
print(f"Ємність акумулятора одного БПЛА: {battery_capacity_wh} Вт·год")
print(f"Середня потужність споживання: {average_power_w} Вт")
print(f"Орієнтовний час польоту одного БПЛА: {flight_time_minutes:.1f} хв")

# -----
# Побудова графіка покриття території
# -----

```

```

fig, ax = plt.subplots(figsize=(8, 8))

ax.set_xlim(0, area_size)
ax.set_ylim(0, area_size)
ax.set_xlabel("X, км")
ax.set_ylabel("Y, км")
ax.set_title("Модель покриття території мережею БПЛА")

# Зони покриття БПЛА
for i, position in enumerate(uav_positions):
    circle = plt.Circle(position, coverage_radius, fill=False,
linewidth=2)
    ax.add_patch(circle)

    ax.scatter(position[0], position[1], marker="^", s=150,
label=f"БПЛА {i + 1}")
    ax.text(position[0] + 0.1, position[1] + 0.1, f"БПЛА {i +
1}")

# Користувачі в зоні покриття та поза нею
covered_points = users[np.array(user_covered_status)]
uncovered_points = users[~np.array(user_covered_status)]

ax.scatter(covered_points[:, 0], covered_points[:, 1], s=25,
label="Користувачі в зоні покриття")
ax.scatter(uncovered_points[:, 0], uncovered_points[:, 1],
s=35, marker="x", label="Користувачі поза покриттям")

ax.grid(True)
ax.legend(loc="upper right")

plt.savefig("uav_coverage_model.png", dpi=300)
plt.show()

# -----
# Побудова графіка навантаження на БПЛА
# -----

uav_labels = [f"БПЛА {i + 1}" for i in range(uav_count)]

plt.figure(figsize=(8, 5))
plt.bar(uav_labels, uav_load)
plt.xlabel("Повітряні вузли мережі")
plt.ylabel("Кількість підключених користувачів")
plt.title("Розподіл навантаження між БПЛА")
plt.grid(axis="y")

```

```

plt.savefig("uav_load_distribution.png", dpi=300)
plt.show()

# -----
# Побудова графіка автономності БПЛА
# -----

battery_values = np.array([400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000])
flight_times = battery_values / average_power_w * 60

plt.figure(figsize=(8, 5))
plt.plot(battery_values, flight_times, marker="o")
plt.xlabel("Ємність акумулятора, Вт·год")
plt.ylabel("Орієнтовний час польоту, хв")
plt.title("Залежність часу польоту БПЛА від ємності акумулятора")
plt.grid(True)

plt.savefig("uav_flight_time.png", dpi=300)
plt.show()

# -----
# Побудова графіка ефективної пропускної здатності
# -----

users_range = np.arange(20, 161, 20)
capacity_per_user_range = effective_capacity / users_range

plt.figure(figsize=(8, 5))
plt.plot(users_range, capacity_per_user_range, marker="o")
plt.xlabel("Кількість активних користувачів")
plt.ylabel("Швидкість на одного користувача, Мбіт/с")
plt.title("Залежність швидкості від кількості активних користувачів")
plt.grid(True)

plt.savefig("uav_capacity_per_user.png", dpi=300)
plt.show()

```

Додаток Б

Інструкція запуску через IDLE Python

Встановити Python 3.10 або новіший.

Відкрити програму IDLE Python через меню Пуск.

У IDLE натиснути:

File → New File

У нове вікно вставити код програми.

Зберегти файл:

File → Save As

Назва файлу:

uav_model.py

Запустити програму:

Run → Run Module

або натиснути клавішу:

F5

Результати з'являться у вікні Python Shell.

Графіки автоматично зберуться в папці з програмою:

uav_coverage_model.png

uav_load_distribution.png

uav_flight_time.png

uav_capacity_per_user.png