

**АНТОНЕНКО АРТЕМ**

Національний університет біоресурсів і природокористування України

<https://orcid.org/0000-0001-9397-1209>e-mail: [artem.v.antonenko@gmail.com](mailto:artem.v.antonenko@gmail.com)**ПОПЛАВСЬКИЙ ДЕНИС**

Державний університет інформаційно-телекомунікаційних технологій

<https://orcid.org/0009-0002-6005-9605>**ГОЛУБЕНКО ОЛЕКСАНДР**

Міжнародний науково-технічний університет ім. академіка Юрія Бугая

<https://orcid.org/0000-0002-1776-5160>**КОНДРАТЮК БОРИС**

Державний університет інформаційно-телекомунікаційних технологій

<https://orcid.org/0009-0000-8548-7863>**ВЕРКО РОМАН**

Державний університет інформаційно-телекомунікаційних технологій

<https://orcid.org/0009-0006-1168-7743>

## ВПРОВАДЖЕННЯ МОДЕЛІ РОЗГОРТАННЯ МЕРЕЖ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ 6-ГО ПОКОЛІННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ БЕЗПЛОТНИКІВ

У статті розглядається можливість впровадження мережі на базі технології мобільного зв'язку 6G, яка наразі знаходиться в активному процесі розробки та створення. Однак у цьому контексті постає значуща проблема - обмежена ємність акумуляторів у безпілотних літальних апаратах (БПЛА), що суттєво обмежує їхні можливості та продуктивність. Така обмеженість енергопостачання призводить до того, що безпілотникам доводиться регулярно сідати на землю для підзарядки, що в свою чергу обмежує тривалість їхніх місій. Пропонується новий підхід до вирішення цієї проблеми шляхом використання тросових безпілотних літальних апаратів (тБПЛА). Основна ідея полягає в створенні мережі, де тБПЛА будуть підтримувати постійне живлення та передачу даних завдяки тросу, який з'єднує їх з наземною станцією (НС). Такий підхід дозволить уникнути втрати зв'язку з тБПЛА під час підзарядки, що забезпечить неперервний моніторинг та контроль. Докладно розглядається концепція підключення тБПЛА до НС за допомогою спеціального тросу, який одночасно подає електроенергію і передає дані. Такий підхід дозволяє безперервно жити тБПЛА та отримувати від них важливу інформацію без необхідності їхнього сильного обмеження через підзарядку. Живлення через трос дозволить тБПЛА залишати зону покриття мережі без сигналу лише на короткий час, наприклад, під час технічного обслуговування та ремонту. Порівняльний аналіз проводиться між тБПЛА і безпілотниками без прив'язки до тросу (БмПЛА). Оцінюються переваги та недоліки кожного підходу з огляду на їхню продуктивність та можливість підтримання безперервного зв'язку в умовах обмеженої енергії. Також проводиться детальний аналіз потенційних застосувань технології, включаючи сценарій Монте-Карло, де розглядається продуктивність тБПЛА та БмПЛА в умовах різного роду покриття. Результати моделювання свідчать, що тБПЛА з тросом довжиною 120 метрів може забезпечити до 30% збільшення ймовірності охоплення в порівнянні з БмПЛА. Розглядаються виклики, які виникають у контексті реалізації запропонованої моделі, а також майбутні напрямки досліджень, які можуть сприяти подальшому розвитку цієї інноваційної технології.

**Ключові слова:** безпілотний літальний апарат, безпілотний неприв'язаний літальний апарат, тросовий безпілотний літальний апарат, базові станції, наземна станція, макробазові станції.

ANTONENKO ARTEM V.

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

POPLAVSKYI DENYS V.

State university of information and communication technology

GOLUBENKO OLEKSANDR I.

Academician Yuri Bugay international science and technical university

KONDRATIUK BORYS O.

State university of information and communication technology

VERKO ROMAN A.

State university of information and communication technology

### IMPLEMENTATION OF A MODEL FOR DEPLOYING 6TH GENERATION MOBILE NETWORKS USING DRONES

This article explores the possibility of implementing a network based on 6G mobile communication technology, which is currently in active development and creation. However, a significant issue in this context is the limited battery capacity of unmanned aerial vehicles (UAVs), which significantly restricts their capabilities and productivity. Such limitations in power supply lead to UAVs having to regularly land for recharging, resulting in interrupted missions. This article proposes a new approach to address this problem by using tethered unmanned aerial vehicles (tUAVs). The main idea is to establish a network where tUAVs are continuously powered and data is transmitted through a tether that connects them to a ground station (GS). This approach would allow avoiding the loss of connectivity with tUAVs during recharging, ensuring uninterrupted monitoring and control. A detailed examination is carried out regarding the concept of connecting tUAVs to the GS using a specialized tether that simultaneously provides power and transmits data. Powering through the tether would enable tUAVs to leave the network coverage area without a signal only for a short time, such as during maintenance and repairs. A comparative analysis is conducted between tUAVs and untethered UAVs (uUAVs). The advantages and disadvantages of each approach are assessed in

terms of their productivity and the ability to maintain continuous communication in conditions of limited energy. A comprehensive analysis of potential applications of the technology is also undertaken, including a Monte Carlo scenario that examines the performance of tUAVs and uUAVs in various coverage scenarios. The modeling results indicate that tUAVs with a 120-meter tether can provide up to a 30% increase in coverage probability compared to uUAVs. Finally, the article discusses the challenges arising in the context of implementing the proposed model, as well as future research directions that may contribute to further development of this innovative technology.

Keywords: UAV - unmanned aerial vehicle, uUAV - unmanned untethered vehicle, tUAV - tethered unmanned aerial vehicle, BS - base stations, GS - ground station, MBS - macro base stations.

**Постановка проблеми**

Використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) стає надзвичайно корисним при впровадженні мобільного зв'язку шостого покоління (6G). Перш за все, це дозволяє розгорнути мережу зв'язку в областях, де побудова традиційної інфраструктури була б складною або недоцільною. БПЛА можуть летіти на великій висоті та долати великі відстані, що робить їх ідеальними для покриття великих територій і регіонів з важкодоступною місцевістю. Це особливо важливо для забезпечення зв'язку в рідкісно населених або гірських районах.

Використання БПЛА в мережах 6G може забезпечити швидкий доступ до Інтернету та зв'язку в умовах надзвичайних ситуацій, таких як природні катастрофи або аварії, де існуюча інфраструктура може бути пошкоджена або відсутня. БПЛА можуть бути використані для забезпечення мережевого покриття в густонаселених міських районах, де потрібна велика ємність мережі. Вони можуть надавати додаткову пропускну спроможність та покращувати якість зв'язку, зменшуючи навантаження на існуючу інфраструктуру. Загалом, використання БПЛА у впровадженні мобільного зв'язку 6G розширює можливості мережі і дозволяє забезпечити зв'язок в різних умовах, включаючи важкодоступні області та ситуації надзвичайних подій.

**Аналіз останніх джерел**

Метою оптимізації часу відгуку веб-сервера Apache є підвищення продуктивності та ефективності веб-додатків і сервісів, які використовують цей веб-сервер. Для досягнення цієї мети слід розглянути різні підходи і методи оптимізації часу відгуку веб-серверів Apache, такі як конфігурація сервера, використання кешування, стиснення даних, оптимізація маршрутизації запитів і т.д. Оптимізація часу відгуку сервера Apache може значно підвищити продуктивність і ефективність роботи веб-додатків і сервісів, що призведе до задоволення потреб користувачів і досягнення бізнес-цілей.

Об'єктами дослідження для оптимізації часу відгуку веб-сервера Apache є сам веб-сервер, його конфігураційні параметри та взаємодія між клієнтами і серверними додатками. Дослідження повинно охоплювати такі параметри веб-сервера, як налаштування мережі, конфігурацію операційної системи, налаштування серверних програм, обробку запитів та відправку відповідей.

Предметом дослідження в роботі, присвяченій оптимізації часу відгуку веб-сервера Apache, є процес, за допомогою якого сервер відповідає на запити клієнтів, та його параметри. Завданнями дослідження є швидкість обробки запитів, час відгуку, кількість запитів за одиницю часу, кількість одночасних з'єднань та інші параметри, які можуть впливати на час відгуку сервера.

Метою впровадження мережі по технології мобільного зв'язку 6G на базі БПЛА є забезпечення надійного, вкрай високошвидкісного та ефективного покриття зв'язку в різних умовах та регіонах, включаючи важкодоступні території, надзвичайні ситуації та густонаселені міські області.

Об'єктами дослідження є безпілотні літальні апарати та різні можливості забезпечення тривалості їх роботи.

Предметом дослідження, присвяченого впровадженню мережі на базі технології мобільного зв'язку 6G на базі БПЛА, є розробка та оптимізація інфраструктури, визначення потенційних застосувань в різних сферах, включаючи транспорт, комунікації та надзвичайні ситуації, а також вивчення впливу цієї технології на суспільство і технічні аспекти її впровадження.

Поточні можливості наземної мережі ще далекі від того, щоб задовольнити вимоги 6G для глобального покриття. Потрібна широкомасштабна мережа, яка також може інтегрувати не наземні мережі для підтримки різноманітних застосувань, таких як польоти та мореплавання. Архітектура 6G буде безстієнковою, великою за розмірами та чотирирівневою. Рівні мережі включають космічну, повітряну, наземну та підводну, як показано на рис. 1 [1]. Наприклад, з рівнем космічної мережі послуги космічного Інтернету (які

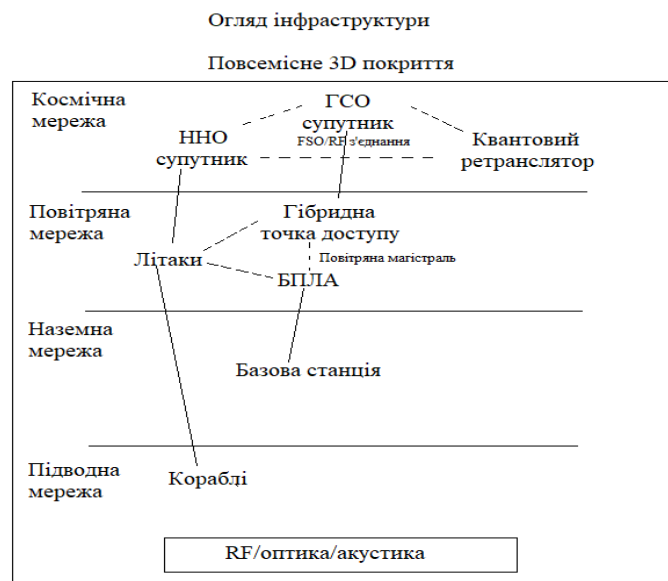


Рис. 1. Архітектура 6G

можуть бути критично важливими для космічних подорожей) будуть у зоні покриття завдяки супутникам [2]. Для наземного рівня буде забезпечена передача даних з терабітною швидкістю для збільшення зони покриття 6G з використанням терагерцових частотних діапазонів. Таким чином, частота буде зростати, викликаючи збільшення втрат на шляху. Діапазон 6G буде меншим, ніж у нинішніх поколінь. У цьому випадку необхідно буде використовувати більшу кількість базових станцій, що зробить мережу 6G значно більш переповненою та щільною.

З використанням 5G, концепція мереж IoT відноситься до мільярдів інтелектуальних пристроїв, які об'єднують системи, людей та інші програми для збору та обміну даними. З 6G ця концепція розшириться та розвинується до контролю та реагуванню в реальному часі, не обмежуючись виявленням з'єднання та зв'язку. «Тактильний Інтернет» описує виявлення в реальному часі, контроль, доступ та роботу віртуальних об'єктів, як визначено стандартом IEEE 1918.1 [3].

Через поточні обмеження ресурсів і детекторів терагерцовий спектральний діапазон використовується не в повній мірі. Фотонні рішення були передовою технологією, які, як очікується, дадуть цьому діапазону частот бути застосованим у різні способи. Фотонні методи є бажаним рішенням для виробництва міліметрових хвиль і ТГц з точки зору енергоефективності, пропускну здатності та діапазону регулювання. Методи генерації частот терагерцових, засновані на методах фотонного гетеродинного змішування, можуть подолати обмеження пропускну здатності електричних компонентів, а також ефективно сприяти бездоганній інтеграції оптоволоконного та бездротового мережевого зв'язку. Це зробить систему потокового зв'язку волоконно-терагерцово-волоконну перспективним вибором [4], [5]. Системи зв'язку у видимому світлі (VLC) важливі для 6G. VLC працює в діапазоні частот від 400 ТГц до 800 ТГц. На відміну від радіочастотних технологій, які використовують антени в діапазоні низьких терагерцових, зв'язок у видимому світлі покладається на джерела світла (зокрема на світлодіоди, датчики зображення або матриці фотодіодів) для зв'язку з трансиверами. У кількох неземних сценаріях, таких як авіація чи морські програми, зв'язок у видимому світлі перевершує радіочастотні технології з точки зору продуктивності розповсюдження.

#### Виклад основного матеріалу

Вважається, що базові станції безпілотників (БС) є невід'ємною частиною стільникової архітектури 6G [6], [7]. Притаманна гнучкість розміщення та відносна легкість розгортання можуть бути корисними для багатьох вимог стільникових мереж наступного покоління, таких як забезпечення покриття в гарячих точках і в районах з дефіцитною інфраструктурою, таких як середовища відновлення після аварій або сільські райони. Висока ймовірність встановлення лінії поширення в прямої видимості (ПвПВ) із наземними користувачами через велику висоту призводить до більш надійних каналів зв'язку та ширшої зони покриття [8], [9]. Потенційні випадки використання бортових БС включають розвантаження макробазових станцій (МБС) у міських і густонаселених районах і забезпечення покриття для сільських районів, які зазвичай страждають від низького стільникового покриття через відсутність стимулів для операторів.

Ці потенційні переваги бортових БС спонукали дослідницьке співтовариство до вивчення багатьох аспектів стільникових мереж із підтримкою БПЛА, таких як характеристики каналу повітря-земля (ПЗ), оптимальне розміщення БПЛА та оптимізацію траєкторії [10]. Крім того, існують дві ключові проблеми при проектуванні систем з підтримкою БПЛА, які будуть розглянуті більш детально у цій статті. По-перше, це обмежені енергетичні ресурси, доступні на борту, що робить час польоту менш ніж однією годиною в більшості комерційно доступних БПЛА [11], [12]. Другою ключовою проблемою проектування є бездротове зворотне з'єднання [13].

Як правило, енергоспоживання БПЛА є подвійним: рушійна енергія, яка є енергією, що споживається БПЛА для польоту та зависання, та енергія корисного навантаження, яка фіксує споживання енергії для зв'язку та обробки на борту. Багато дослідницькі роботи були спрямовані на розробку енергоефективних схем зв'язку для БПЛА з метою подовження терміну їх служби. Однак, оскільки рушійна енергія значно більше ніж енергія корисного навантаження, енергоефективне спілкування не сильно вплине на час польоту. Така коротка тривалість польоту може не бути проблемою для деяких випадків використання, таких як доставка за допомогою дронів між сусідніми місцями або розповсюдження та збір даних із сенсорних мереж. Однак, коли справа доходить до встановлення БПЛА, більший час польоту є життєво важливим для забезпечення стабільного та безперебійного стільникового зв'язку.

На відміну від наземних базових станцій, які мають дротові канали зв'язку (зазвичай з використанням оптоволоконних кабелів), БПЛА покладаються на бездротові канали зв'язку. Порівняно з дротовими з'єднаннями бездротові зворотні з'єднання чутливі до вищої затримки, перешкод і нижчої досяжної швидкості передачі даних. Отже, важливо знайти найкращу технологію для встановлення бездротового зворотного зв'язку на БПЛА [14]. Доступні рішення в статті включає в себе: супутниковий зв'язок, зв'язок на міліметрових хвилях, оптичний зв'язок у вільному просторі (ОЗВП) і внутрішньосмуговий транзитний зв'язок. Кожне з цих чотирьох рішень має свої переваги і недоліки. Наприклад, супутниковий зв'язок забезпечує більш надійний транзитний зв'язок, але страждає від більшої затримки. З іншого боку, міліметрові хвилі і ОЗВП забезпечують набагато вищу швидкість передачі даних порівняно з внутрішньосмуговим зв'язком. Однак, обидва рішення мають високу вразливість до блокування і є надійними лише на невеликих відстанях. В сучасній літературі найбільше уваги приділяється використанню внутрішньосмугового транзитного зв'язку. Це рішення має меншу затримку порівняно з супутниковим

бекхаузом. Воно не потребує каналу ПвПВ для ефективного зв'язку, як міліметрові хвилі або ОЗВП. Проте, через велику висоту польоту БПЛА, він страждає від більш високих рівнів перешкод, що може значно знизити досяжну швидкість транзитного зворотного зв'язку. У цій статті пропонується налаштування системи на основі прив'язаних БПЛА (тБПЛА). Запропонована технологія вирішує дві технічні проблеми, описані вище: короткий час польоту через обмежену бортову енергію та встановлення надійного зворотного зв'язку. Інтерфейс між БС і тБПЛА складається з двох компонентів: енергопостачання та каналу передачі даних. Енергопостачання здійснюється від БС до тБПЛА через дротове з'єднання, що дозволяє тБПЛА підтримувати набагато більший час польоту. Подібним чином канал передачі даних між БС і тБПЛА також є фізичним за допомогою оптоволоконного зв'язку, що забезпечує надійний зв'язок на високій швидкості передачі даних між тБПЛА і базаовою станцією. Як дріт для живлення, так і даних об'єднані всередині прив'язки. Наразі наявні у продажу БПЛА можуть залишатися в повітрі безперервно протягом кількох днів, маючи доведену здатність витримувати суворі погодні умови. Через свою вагу довжина троса зазвичай обмежена і становить від 80 м до 150 м [14]. Недавній випадок у Пуерто-Ріко розгорнули БПЛА для забезпечення стільникового зв'язку для постраждалих регіонів після урагану Марія [15].

Основним недоліком тБПЛА є обмежена довжина троса, що обмежує мобільність і гнучкість переміщення безпілота. Таким чином, природньо виникає компроміс між БмПЛА і тБПЛА, який виглядає наступним чином. З одного боку, тБПЛА має набагато більший час польоту порівняно з БмПЛА завдяки стабільному живленню через трос. Однак він може зависати або переміщатися лише в обмеженому просторі, визначеному довжиною тросу і оточенням об'єкта спостереження. З іншого боку, БмПЛА має повну свободу переміщатися в будь-якому місці, щоб максимізувати продуктивність мережі. Однак, через обмежену ємність бортового акумулятора, він змушений регулярно переривати свою роботу, щоб підзарядити або замінити батарею. На жаль, сьогодні ми не маємо технології, яка може забезпечити тривалий час польоту при збереженні вільної мобільності.

Запропонована система складається з трьох основних компонентів:

- БПЛА,
- трос,
- БС.

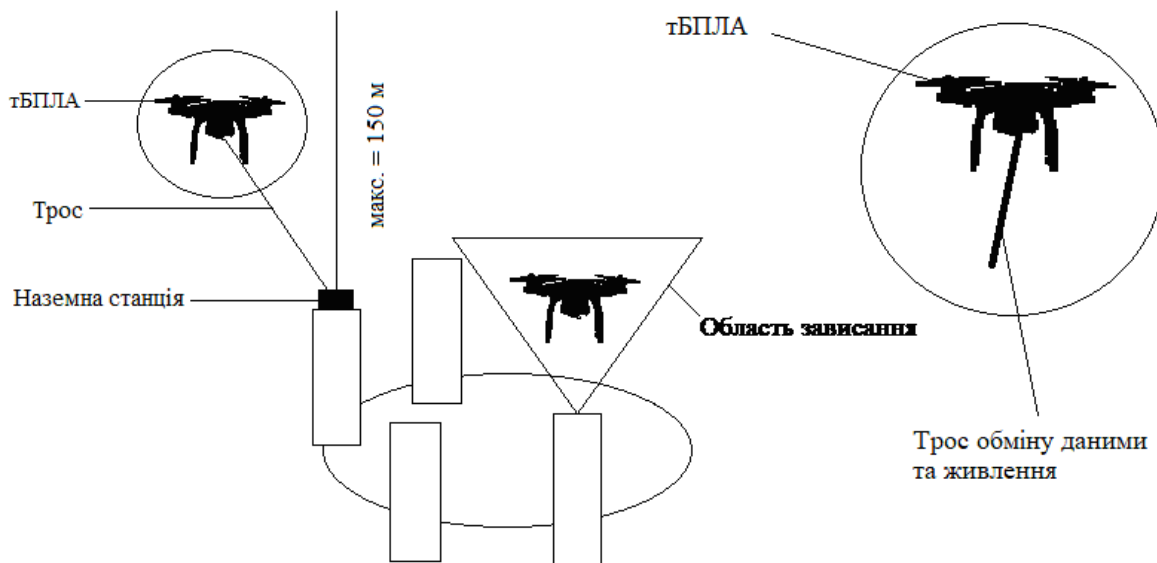


Рис. 2. тБПЛА в міських умовах

БПЛА розміщується в ретельно обраному місці, яке задовольняє двом умовам: має надійне з'єднання з основною мережею і має стабільне джерело живлення, наприклад, під'єднання до мережі або генератор. Ці два з'єднання (джерело живлення та основна мережа) простягаються до БПЛА за допомогою троса. Таким чином, трос забезпечує безперебійне енергопостачання БПЛА, що дозволяє йому залишатися в робочому стані зі значно більшим часом польоту. Крім того, трос також з'єднує БПЛА з основною мережею за допомогою дротового з'єднання, забезпечуючи стабільний, надійний і безпечний зворотний зв'язок. БПЛА може зависати лише в межах певного діапазону, який в основному залежить від довжини троса. Якщо припустити, що БС, яка є точкою запуску тБПЛА, розміщена на даху, то тБПЛА може зависати навколо даху в межах усіченої півсфери радіусом, еквівалентним довжині троса, з центром на даху, як показано на рис. 2. Загальна область, в якій може зависати БПЛА, обмежена висотою сусідніх будівель. Для визначення досяжних тривимірних (3D) локацій для даного середовища можуть бути застосовані методи планування руху [16]. Далі в цій статті ця область буде зватися областю зависання. тБПЛА несе на собі антени і набір обчислювальних блоків. Ці обчислювальні блоки з'єднані з БС через оптичне волокно, що передає дані вздовж троса. Хоча антени і процесорні блоки вважаються важкими компонентами для типових БПЛА, сучасні комерційні системи здатні нести до 60 кг додаткового корисного навантаження [17]. БПЛА повинен

зависати в межах області зависання і знаходити оптимальне 3D-розташування, яке максимізує покриття стільникового зв'язку для наземних користувачів. Окрім свого основного завдання - забезпечення з'єднання з основною мережею та енергоресурсом, НС відповідає за контроль троса. Зокрема, НС повинен контролювати натяг троса і гарантувати, що він завжди натягнутий. Під час руху тБПЛА НС повинна відчувати чи потребує тБПЛА випускання троса більшої довжини для того, щоб досягти місця призначення, або втягування додаткової довжини для забезпечення натягу троса [18], [19]. З наведених вище міркувань зрозуміло, що розумний вибір місця розташування НС має велике значення для продуктивності системи тБПЛА. Наприклад, розміщення НС на даху, оточеному з усіх боків високими будівлями, зменшить область його зависання майже до області над власним дахом. Менша зона зависання призводить до більш складної проблеми 3D-розміщення БПЛА і обмежує мобільність БПЛА. Процес вибору місця розташування НС повинен враховувати багато аспектів, таких як просторовий розподіл попиту на трафік і наявність необхідної інфраструктури. Крім продуктивності, при проектуванні системи БПЛА слід враховувати економічну ефективність. Існують певні відмінності з точки зору капітальних витрат (КВ) і операційних витрат (ОВ) між тБПЛА і БмПЛА. Капітальні інвестиції, які існують лише в системах тБПЛА, в основному пов'язані з тросом і його механічним контролером і наземною станцією. У той же час, капітальні інвестиції, які існують лише в БмПЛА, пов'язані з зарядними станціями, необхідними для підзарядки/заміни акумуляторів БмПЛА. З іншого боку, операційні витрати, які існують лише в системах тБПЛА, в основному пов'язані з орендою дахів, які використовуються для розміщення наземної станції.

За допомогою моделювання Монте-Карло буде показано, компроміс між тБПЛА та БмПЛА з точки зору необмеженої мобільності з обмеженим часом польоту для БмПЛА та обмеженої мобільності з необмеженим польотом час для тБПЛА. Спочатку будуть розглянуті налаштування системи, що складається з МБС, кластера користувачів і БПЛА, розгорнутого для обслуговування цього кластера користувачів і розвантаження МБС. Розташування користувачів рівномірно розподілено всередині кластера радіусом 100 м. У разі використання БмПЛА ми припускаємо, що він зависає в центрі кластера для максимального покриття. Однак, через обмеження батареї, БмПЛА має залишити місце розташування в повітрі та летіти назад до зарядної станції, щоб зарядити/замінити батарею. Протягом цього часу користувачі обслуговуються лише МБС. Отже, ми представляємо доступність БмПЛА як частку часу, коли він фактично працює. З іншого боку, у разі використання тБПЛА ми припускаємо, що він має необмежений час польоту. Однак його рухливість обмежена тросом з'єднавши його з МБС довжиною 120 м, аналогічно специфікаціям тБПЛА [20]. Отже, тут ми припускаємо, що НС тБПЛА є МБС. На рис. 6 ми спостерігаємо, що у випадку наявності безпілотної з доступністю 1 ми матимемо найкраще можливе покриття.

У цьому моделюванні, розглядається один круговий кластер користувачів, причому користувачі рівномірно розподілені всередині диска радіусом 100 м. Доступність БмПЛА визначає частину часу, протягом якого БмПЛА працює, а решту часу він заряджає/замінює батарею. БПЛА з'єднаний з МБС через

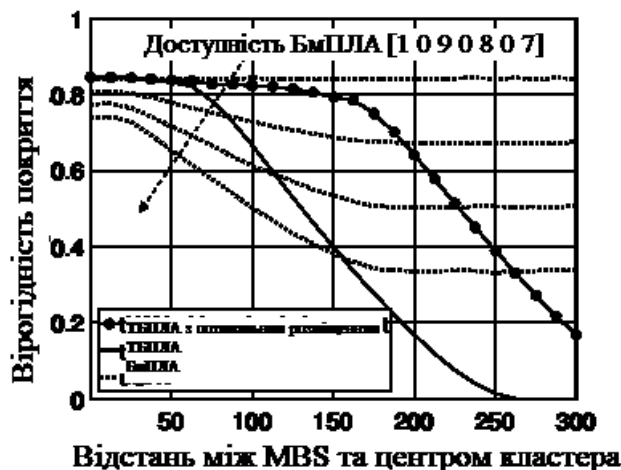


Рис. 3. Імовірність покриття при використанні тБПЛА або БмПЛА для різних значень відстані між МБС і центром кластера

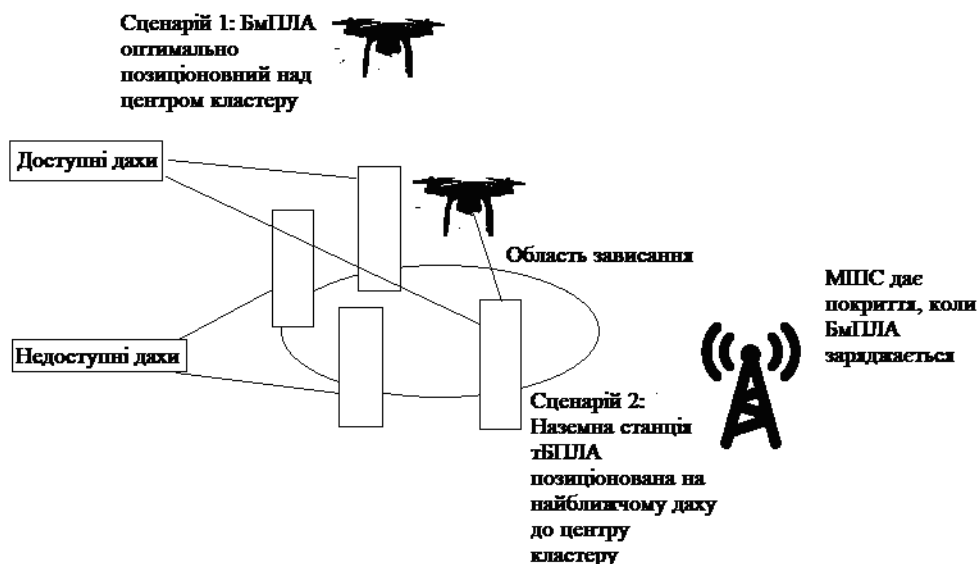


Рис. 4. Налаштування системи

трос довжиною 120 м [20]. Порівнюються 3 сценарії: сценарій 1, коли використовується БмПЛА і основним обмеженням є його доступність, сценарій 2, коли використовується тБПЛА та розміщується в оптимальному місці в області зависання і сценарій 3, це коли БПЛА розміщено безпосередньо над його НС (оптимальне розміщення не розглядається).

У цьому моделюванні, як показано на рис. 4, вивчається охоплення рівномірно розподілених користувачів в межах диску радіусом 100 м. МБС знаходиться в 160 м від диску-центра. НС тБПЛА розміщується на найближчому доступному даху до центра диску. Доступність дахів визначає частку будівель, де дозволено розгортати НС. Щільність забудови 500 будівель/км<sup>2</sup>. Порівнюються 2 сценарії: сценарій 1, коли використовується БмПЛА і основним обмеженням є його доступність, сценарій 2, коли використовується тБПЛА, а БС розміщується на найближчому доступному даху до центра кластера [21].

У разі готовності 0,8 тБПЛА перевершує БмПЛА, якщо відстань між МБС і центром кластера менше 193 м. Цей поріг збільшується, коли доступність БмПЛА зменшується.

На рис. 3 також порівнюється продуктивність тБПЛА для двох сценаріїв розгортання: тБПЛА зависає точно над НС з максимально розтягнутим тросом і тБПЛА розміщено в оптимальному місці в межах своєї зони зависання, що максимізує ймовірність покриття. Результати показують важливість оптимального розміщення тБПЛА. Проблема оптимізації розміщення тБПЛА відрізняється від типових проблем 3D розміщення БмПЛА, які описуються у статті. В основному це пов'язано з обмеженою мобільністю тБПЛА, що зменшує його доступність у 3D-локаціях. Зауважте, що ця проблема розміщення відрізняється від сценарію встановлення максимально допустимої висоти для БмПЛА. Для останнього БмПЛА може зависати будь-де, якщо він підтримує свою висоту нижче заданого значення, чого не можна сказати про тБПЛА.

Як зазначалося раніше, НС не обов'язково має бути МБС. Він може бути дахом будь-якої будівлі, якщо він має доступ до стабільного енергоресурсу та надійне з'єднання з основною мережею. Очевидно, що цим умовам не завжди задовольняє будь-яка навмання вибрана будівля. Крім того, не кожна будівля, що задовольняє ці умови, надасть оператору доступ для розгортання своєї НС на даху. Отже, для заданої щільності будівель вводиться доступність дахів як відношення будівель, які задовольняють вищезгаданим умовам і готові надати доступ до своїх дахів. Розглядається схожа установка, як на рис. 6, з розгортанням НС на найближчому доступному даху до центра кластера, замість того, щоб розгортати його на МБС. Крім того, фіксується відстань між МБС і центром кластера 160 м. Моделюється розташування будівель за допомогою процесу точки Пуассона (ППП) із щільністю 500 будівель/км<sup>2</sup>, що є типовою щільністю забудови в міських районах. На рис. 8 порівнюються характеристики тБПЛА та БмПЛА для різних значень доступності дахів. Спостерігається, що мінімально необхідна доступність на даху, щоб тБПЛА перевершив БмПЛА, зменшується, коли збільшується довжина тросу. Наприклад, коли доступність становить 0,9, необхідна доступність дахів зменшується з 0,25 до 0,05, оскільки збільшується максимальна довжину тросу з 80 м до 120 м. Цей результат показує вплив максимальної довжини тросу на продуктивність системи. З огляду на те, що доступність дахів становить важливу частину капітальних витрат системи, ці результати показують, що збільшення максимальної довжини тросу дійсно важливо для економічно ефективного розгортання тБПЛА.

Ускладнення з моделлю розгортання тБПЛА заключаються у наступному. По перше повітряні системи зв'язку загалом потребують нової регуляторної політики, то системи тБПЛА можуть потребувати деяких особливих міркувань. Наприклад, нові правила безпеки повинні бути впроваджені для зон, де дозволено простягати троси. Запас міцності навколо будівель і над землею навколо будівель і над землею, щоб уникнути нещасних випадків через заплутування або будь-яких зловмисних спроб переплутати трос.

По-друге, на відміну від типових досліджень з оптимізації розміщення БмПЛА, проблема розміщення тБПЛА відрізняється. Під час роботи кожен тБПЛА повинен бути фізично з'єднаний з НС на даху за допомогою тросу. Отже, проблема є більш обмеженою і потребує ретельного вивчення. Проблема вибору даху може бути вирішена за допомогою різних підходів в залежності від основних цілей оператора з точки зору якості обслуговування. На додаток до міркувань, пов'язаних з покриттям стільникового зв'язку, слід також враховувати економічну ефективність під час процесі вибору даху.

По-третє, з огляду на місце, вибране для розміщення НС, важливо точно знати, як виглядає область зависання. Враховуючи обмеження, пов'язані з тим, щоб не зачепити сусідні будівлі, забезпечити достатню віддаленість від громадського доступу та створити запас міцності над усіма навколишніми будівлями для забезпечення безпеки, зона зависання на кожному даху є насправді унікальною. Наприклад, якщо дах з усіх боків оточений нижчими будівлями, він матиме більшу зону польоту, а отже, більшу свободу пересування для тБПЛА. Зона зависання залежить від відстані до навколишніх будівель та їх відносної висоти. Для того,

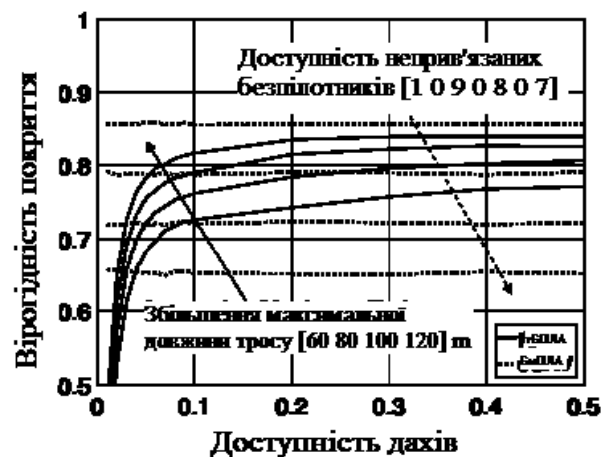


Рис. 5. Ймовірність покриття для різних значень доступності БмПЛА, максимальної довжини тросу та доступності дахів

щоб розв'язати задачу 3D оптимізації розміщення тБПЛА, спочатку необхідно отримати аналітичну модель для області зависання. спочатку потрібно отримати аналітичну модель області зависання.

### Висновки

У роботі було розглянуто потенціал тБПЛА для покриття стільникового зв'язку та збільшення потужності. Запропоновану установку можна розглядати як компроміс, який має на меті замінити поточні обмеження продуктивності БмПЛА через обмежену бортову енергію обмеженнями мобільності через тросове з'єднання. Було показано, що системи тБПЛА мають багатообіцяючі переваги порівняно з БмПЛА, незважаючи на обмеження мобільності, пов'язані з тросом. Були описані деякі потенційні випадки використання та додатки, де БС, встановлена на тБПЛА, буде мати велику користь, наприклад, збільшення пропускної здатності в міських районах, розширення покриття в сільській місцевості та ущільнення мережі. Нарешті, були описані деякі відкриті проблеми та дослідницькі проблеми, які необхідно ретельно дослідити, щоб краще зрозуміти обмеження продуктивності запропонованої установки.

### References

1. Zhang Z., Xiao Y., Ma Z., Xiao M., Ding Z., Lei X. 6G wireless networks: vision, requirements, architecture, and key technologies IEEE Veh. Technol. Mag., 2019. (14).
2. J. Liu, Y. Shi, Z.M. Fadlullah, N. Kato Space-air-ground integrated network: a survey IEEE Commun. Surv. Tutorials, 2018. (20).
3. X. You, C.-X. Wang, J. Huang, X. Gao, Z. Zhang, M. Wang, et al. Towards 6G wireless communication networks: vision, enabling technologies, and new paradigm shifts Sci. China Information Sci., 2021. (64).
4. W. Saad, M. Bennis, and M. Chen, "A vision of 6G wireless systems: Applications, trends, technologies, and open research problems," IEEE Network, vol. 34, 2020. (3).
5. Tverdokhleba A. O., Korotin D. S., Antonenko A. V. Efficiency of functioning of computer systems using blockchain technology and databases. Taurida Scientific Herald. 2022. (6).
6. Tsvyk O.S. Analiz i osoblyvosti prohramnoho zabezpechennia dlia kontroliu trafiku. Herald of Khmelnytskyi National University, 2023, (1)/
7. Novichenko Ye.O. Aktualni zasady stvorennia alhorytmiv obrobky informatsii dlia lohistrychnykh tsestriv. Tavriyskyi naukovyi visnyk. Seriya: Tekhnichni nauky, 2023 (1)
8. Zaitsev Ye.O. Smart zasoby vyznachennia avariynykh staniv u rozpodilnykh elektrychnykh merezhakh mist. Tavriyskyi naukovyi visnyk. Seriya: Tekhnichni nauky, 2022, (5)
9. S. Dang, O. Amin, B. Shihada, and M.-S. Alouini, "What should 6G be?" Nature Electronics, vol. 3, 2020. (1).
10. Y. Zeng, R. Zhang, and T. J. Lim, "Wireless communications with unmanned aerial vehicles: Opportunities and challenges," IEEE Communications Magazine, vol. 54, 2016. (5).
11. I. Bor-Yaliniz and H. Yanikomeroglu, "The new frontier in RAN heterogeneity: Multi-tier drone-cells," IEEE Communications Magazine, vol. 54, 2016. (1).
12. Q. Wu, L. Liu, and R. Zhang, "Fundamental trade-offs in communication and trajectory design for UAV-enabled wireless network," IEEE Wireless Communications, vol. 26, 2019. (1)
13. B. Galkin, J. Kibilda, and L. A. DaSilva, "UAVs as mobile infrastructure: Addressing battery lifetime," IEEE Communications Magazine, vol. 57, 2019. (6)
14. T. Long, M. Ozger, O. Cetinkaya, and O. B. Akan, "Energy neutral internet of drones," IEEE Communications Magazine, vol. 56, 2018. (1)
15. M. Alzenad, M. Z. Shakir, H. Yanikomeroglu, and M.-S. Alouini, "FSO-based vertical backhaul/fronthaul framework for 5G+ wireless networks," IEEE Communications Magazine, vol. 56, 2018. (1)
16. AT&T, "AT&T's First Official Deployment of Cell On Wings In Puerto Rico", 2017. [https://about.att.com/inside\\_connections\\_blog/flying\\_cow\\_puertori](https://about.att.com/inside_connections_blog/flying_cow_puertori).
17. X. Xiao, J. Dufek, M. Suhail, and R. Murphy, "Motion planning for a UAV with a straight or kinked tether," in 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2018,
18. Performance studies of narrow-beam trisector cellular systems. <https://ieeexplore.ieee.org/document/683677>.
19. M. M. Nicotra, R. Naldi, and E. Garone, "Taut cable control of a tethered UAV," IFAC Proceedings Volumes, vol. 47, 2014. (3)
20. L. Zikou, C. Papachristos, and A. Tzes, "The power-over-tether system for powering small UAVs: Tethering-line tension control synthesis," in 2015 23rd Mediterranean Conference on Control and Automation (MED). 2015.
21. Tethered UAV, "Feasibility study for the propulsion system of a tethered UAV", 2018-2019. <https://webthesis.biblio.polito.it/11352/1/tesi.pdf>