



DOI 10.28925/2663-4023.2025.27.766

УДК 004.6:621.396:623.746.7

Довженко Надія Михайлівна

к.т.н., доцент, доцент кафедри інформаційної та кібернетичної безпеки імені професора Володимира Бурячка
Київський столичний університет імені Бориса Грінченка, Київ, Україна
доцент кафедри цифрових технологій в енергетиці
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна
ORCID ID: 0000-0003-4164-0066
n.dovzhenko@kubg.edu.ua

Складанний Павло Миколайович

к.т.н., доцент, завідувач кафедри інформаційної та кібернетичної безпеки імені професора Володимира Бурячка
Київський столичний університет імені Бориса Грінченка, Київ, Україна
ORCID ID: 0000-0002-7775-6039
p.skladannyi@kubg.edu.ua

Іваніченко Євген Вікторович

к.т.н., доцент, заступник декана з науково-методичної та навчальної роботи
Київський столичний університет імені Бориса Грінченка, Київ, Україна
ORCID ID: 0000-0002-6408-443X
y.ivanichenko@kubg.edu.ua

Жильцов Олексій Борисович

к.п.н., професор, проректор з науково-методичної та навчальної роботи
Київський столичний університет імені Бориса Грінченка, Київ, Україна
ORCID ID: 0000-0002-7253-5990
o.zhyltsov@kubg.edu.ua

МОДЕЛЬ ДИНАМІЧНОЇ ВЗАЄМОДІЇ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ІЗ СЕНСОРНОЮ МЕРЕЖЕЮ ДЛЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО МОНІТОРИНГУ

Анотація. Сучасні безпілотні літальні апарати (БПЛА) все більше інтегруються із сенсорними мережами, що дозволяє значно розширити можливості збору, передачі та обробки даних у реальному часі. Така інтеграція є критично важливою для різних галузей, зокрема екологічного моніторингу, управління інфраструктурою розумних міст, сільського господарства та військових операцій. БПЛА забезпечують мобільність та доступ до віддалених і важкодоступних місць, що дозволяє ефективно здійснювати моніторинг в умовах, де звичні мережі є недоступними або ж неефективними. Однак поряд із цими перевагами виникають численні технічні виклики. Це, зокрема, стосується оптимізації маршрутів польотів дронів для забезпечення максимального покриття сенсорних мереж, мінімізації енергоспоживання та розв'язання проблем безпеки даних, включаючи кіберзагрози. Важливим аспектом є також тривалість польотів, що залежить від ємності акумуляторів БПЛА, а також методи енергозбереження для сенсорних вузлів, зокрема через використання альтернативних джерел енергії, таких як сонячні панелі. У дослідженні представлено модель динамічної взаємодії БПЛА з сенсорною мережею, де розглянуто процес збору даних, передачі їх на центральний сервер, а також вплив збільшення кількості сенсорних вузлів на загальний час місії. Запропоновано стохастичну модель для врахування неоднорідностей у середовищі, таких як затримки в передачі даних через перешкоди або зміни швидкості зв'язку. Проведено аналіз впливу цих факторів на ефективність збору даних та оптимізацію маршрутів польоту, зокрема за допомогою алгоритмів динамічного програмування та евристичних методів.

Ключові слова: БПЛА; дрони; сенсорна мережа; архітектура; IoT; вузли; енергоефективність; безпека; надійність; зв'язність; дані.



ВСТУП

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) все частіше застосовуються в різних сферах діяльності людства. Наприклад, у сільському господарстві БПЛА з GPS-навігацією використовуються для обприскування рослин на полях. Використання БПЛА дозволяє значно зекономити ресурси (час та хімікати, наприклад) та забезпечити точну та коректну обробку сільськогосподарських земель у порівнянні з пілотованою авіацією. В деяких країнах Європейського Союзу дрони використовують для доставляння замовлень користувачів. Під час бойових зіткнень та війн БПЛА залучаються до доставлення медикаментів, гуманітарних вантажів та бойових припасів у важкодоступні райони. Окремі моделі дронів також залучають для перевірки ліній електропередач, трансформаторів і трубопроводів.

Державні служби з надзвичайних ситуацій застосовують дрони для моніторингу, прогнозування, а також для контролю за небезпечними об'єктами, що стосується як безпеки, так і охорони навколишнього середовища. Зокрема, БПЛА можуть використовуватися як платформа для метеорологічних вимірювальних комплексів. Вони мають переваги перед БПЛА літакового типу, оскільки висока швидкість останніх не забезпечує достатнього просторового і тимчасового розрізнення для точних вимірювань, а також знижує чутливість до турбулентних процесів.

На сьогодні доступні і відносно недорогі мультикоптери здатні підіймати корисне навантаження вагою 3–5 кг на висоту 2–4 км з тривалістю польоту 30–40 хвилин. Сучасні БПЛА оснащені бортовими системами навігації та керування, що дозволяють виконувати значний обсяг функцій. Наприклад, дронам можуть задаватися певні фіксовані маршрути польотів (за допомогою координат, значень висоти, особливості поворотних пунктів) та зміни маршрутів повернення до точки старту за командою з наземного пункту керування. Крім цього, БПЛА можуть виконувати обльоти вказаних керівником точок, здійснювати збір та передачу телеметричної інформації щодо параметрів польоту та роботи цільового обладнання та програмне управління цільовим обладнанням.

Окрім цього, сучасні БПЛА активно інтегруються у такі сфери, як екологічний моніторинг, картографування місцевості та будівництво. Дрони також використовують у пошуково-рятувальних операціях та для аналізу стану сільськогосподарських угідь. Завдяки розвитку штучного інтелекту, сенсорних мереж та спрощення мікросхем, автономність і точність польотів значно підвищилися, що робить їх незамінними у багатьох галузях. Усе це дозволяє забезпечити вищу мобільність та оперативність вимірювань при відносно невеликій вартості експлуатації БПЛА [1].

ЕВОЛЮЦІЯ, КЛАСИФІКАЦІЯ ТА СУЧАСНІ ЗАСТОСУВАННЯ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

Дослідження у сфері безпілотних літальних апаратів (БПЛА) мають достатньо плідну та тривалу історію. Фактично вона почалася ще в роки Першої світової війни, в 1917–1918 роках, з розробок США та Великобританії. Kettering Bug або «Жук Кеттерінга» був одним із перших прототипів сучасних крилатих ракет, оснащений відносно простою системою управління, який міг летіти за заданим маршрутом.

Aerial Target був представлений як безпілотний літак, керований за допомогою радіо, і розроблявся як засіб для навчання зенітної артилерії. Хоча проєкт не був



успішним через цілу низку технічних обмежень, Aerial Target заклав основу для подальших досліджень та розробок у сфері літальних апаратів.

В роки Другої світової війни німецька армія використала перший ударний безпілотний літак-снаряд — Фау-1. Пізніше дослідники класифікували зазначений літальний апарат, та й всіх попередників, як крилаті ракети, і не відносили до класичних БПЛА. Варто, однак, зауважити, що їхні характеристики створили гарні передумови для сучасних БПЛА завдяки саме напрацюванням в сегментах автономності та здатності точно досягати цілей без наявності пілота.

В період з 50–70х років було проведено значну кількість наукових досліджень та розробок в сегменті бойових безпілотних літаків та саме таких версій, які були здатні здійснювати польоти на значних висотах, тривалий час перебувати в повітрі та проводити спостереження. Ryan Firebee, AQM-34 Ryan Model 147, Teledyne Ryan AQM-91 Firefly — це були апарати, які не просто використовувалися для розвідувальних і навчальних завдань. Вони представляли собою частину розробок технологій дистанційного управління, які з часом стали повноцінними бойовими платформами.

Новітні дрони використовуються не лише для військових цілей, розвідки і точкових ударів, але й для цивільних завдань, таких як пошуково-рятувальні операції, моніторинг інфраструктури, сільське господарство, екологічний контроль та боротьба з кіберзагрозами. Сучасні БПЛА, такі як RQ-1 Predator, MQ-9 Reaper, DJI Phantom, MQ-25 Stingray, Bayraktar TB2, Hermes 900, Wing Loong II, XQ-58A Valkyrie та інші, значно розширили свої характеристики та можливості завдяки невинному розвитку технологій штучного інтелекту, покращенням в сегменті обчислювальних потужностей та впровадженню сенсорних систем [2].

Аналізуючи наявні різновиди безпілотних літальних апаратів, можна узагальнено їх класифікувати за конструктивними особливостями (рис. 1). Наприклад:

- Малі БПЛА, як правило, побудовані на основі класичних аеродинамічних схем, з варіантами на кшталт «літаючого крила». При цьому, апарати мають високорозташовані крила, часто виконані у формі V з електродвигунами. Можуть мати й більш комплексні конструкції фюзеляжу — від гондол до однофюзеляжних рішень. Вони оснащені поршневыми двигунами та зазвичай здійснюють зліт із спеціально спроектованих пускових установок. Посадка таких БПЛА здійснюється або за допомогою парашута, або за схемами звичайних літаків. Перевага таких дронів в тому, що вони можуть виконувати значно довші та складніші місії, залишаючись у повітрі до 5 годин;
- Середні БПЛА мають важче шасі та складнішу систему зльоту й посадки, що значно схоже на традиційні авіаційні принципи. Такі безпілотники здатні здійснювати тривалі польоти (приблизно до 20 годин), і здатні підійматися на висоти до 6 км;
- Важкі БПЛА реалізовані як «повітряні гіганти» у порівнянні з іншими БПЛА. Здатні досягати висот до 20 км, і при цьому залишатися у повітрі більше ніж 24 години. Конструкція таких БПЛА передбачає наявність достатньо складних, потужних двигунів та шасі, що робить їх ефективними для стратегічних місій і багатофункціональних завдань.

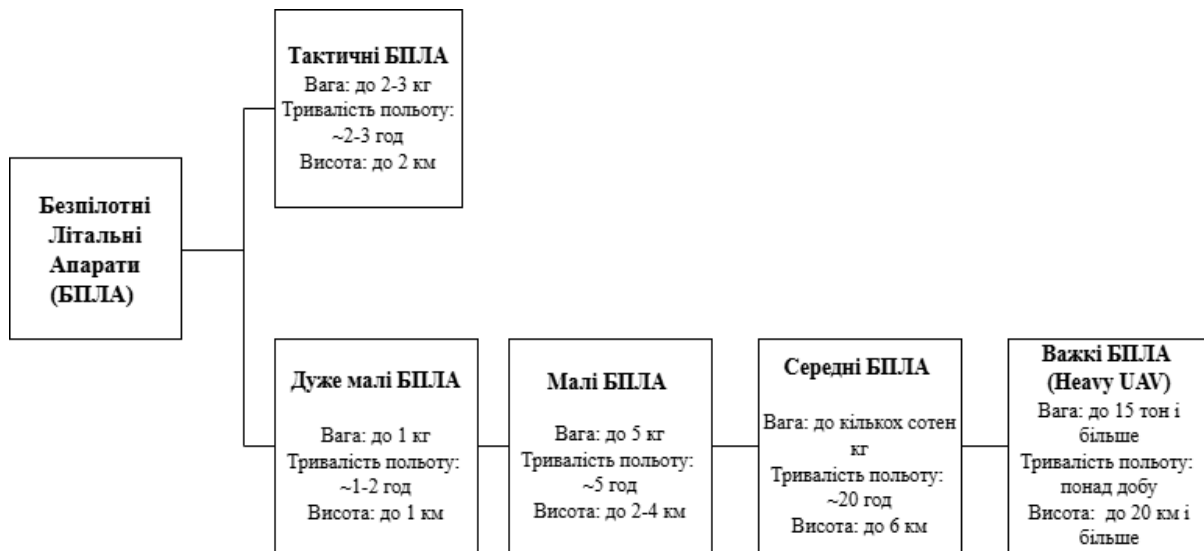


Рис. 1. Ієрархічна класифікація безпілотних літальних апаратів (БПЛА)

Окремо доцільно класифікувати БПЛА за масою, так як це є окремою класифікацією для визначення можливостей таких пристроїв. Малі БПЛА (вага — до 5 кг) можуть виконувати короткочасні розвідувальні місії. Зокрема це може бути виявлення цілей у важкодоступних місцевостях.

Дослідження свідчать про потенційне збільшення ваги важких БПЛА до 15 тонн у найближчі десятиліття. При цьому, такі варіанти будуть здатні виконувати стратегічні функції, поєднуючи можливості розвідки, моніторингу та управління великою кількістю обладнання для різних завдань [3].

ТЕХНІЧНІ АСПЕКТИ ІНТЕГРАЦІЇ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ ТА БПЛА

Світ Інтернету речей (IoT) є широким і багатограним, охоплює різноманітні галузі, кожна з яких має свої особливості та технологічні вимоги. Однак доцільніше розглядати його не як єдиний технологічний домен, а як сукупність різних концепцій, протоколів і технологій, що змінюються залежно від галузі застосування. Сенсорні мережі є ключовою частиною IoT, забезпечуючи моніторинг фізичних параметрів навколишнього середовища. Через обмежені ресурси та роботу в суворих умовах ці мережі часто стикаються з проблемами несправностей вузлів і відмов, що призводить до нових викликів, зокрема масштабування мережі для великої кількості підключених пристроїв, обробки великих обсягів даних і, звичайно, безпеки [4].

Тому логічним кроком у розвитку цих технологій є інтеграції безпілотних літальних апаратів (БПЛА) з сенсорними мережами, що відкриває нові можливості для ефективного збору даних, моніторингу та управління в різних сферах життєдіяльності людини, включаючи розгортання проєктів «розумні» міста, екологічний моніторинг, критичні системи інфраструктури, кібербезпека і навіть військові галузі.



Однією з основних переваг використання БПЛА як мобільних базових станцій є поліпшення зв'язку між сенсорними вузлами та дронами, що дозволяє зменшити втрати сигналу, підвищити ймовірність прямої видимості, а також, що найголовніше, це зменшити енергоспоживання ресурсів сенсорів. Варто підкреслити, що сенсорні мережі складаються з сотень й тисяч вузлів, що збирають дані, первинно обробляють та передають їх до центральних серверів або хмарних платформ з використанням безпроводових протоколів передачі інформації для подальшого аналізу. Тому зменшення енергоспоживання особливо важливо для вузлів із низьким зарядом батареї, оскільки це допомагає продовжити їх роботу [5].

Для забезпечення ефективного збору та передачі даних між БПЛА та сенсорними вузлами використовуються такі технології, як LoRaWAN, Zigbee та 5G. Для порівняння, LoRaWAN і Zigbee забезпечують стабільний зв'язок у складних умовах з низьким енергоспоживанням, що подовжує тривалість роботи сенсорів. Технологія 5G дозволяє передавати великі обсяги даних у режимі реального часу, а також забезпечує низьку затримку, що є критично важливим для виконання завдань, які вимагають негайного реагування (рис. 2).

Крім того, дрони також можуть використовуватися для встановлення сенсорних вузлів у важкодоступних місцях або небезпечних для перебування людини місцях, таких як зони стихійних лих, гірські регіони, сейсмічно активні місцевості або техногенні аварії. При цьому використання БПЛА як мобільних платформ для сенсорних мереж дає можливість адаптувати їх розташування, збирати та первинно опрацьовувати дані із значних територій, забезпечуючи при цьому безперервний моніторинг і дійсно швидке реагування на зміни в реальному часі.

Ще одним ключовим аспектом інтеграції сенсорних мереж та БПЛА є оптимізація траєкторій польоту дронів для забезпечення максимального покриття сенсорних мереж і знову ж мінімізації енергоспоживання. Основними параметрами, що впливають на ефективність збору даних, є швидкість польоту, відстань до сенсорних вузлів, потужність передавачів, висота польоту тощо. Використання динамічного програмування, евристичних алгоритмів та методів машинного навчання дозволяє оптимізувати маршрути дронів у режимі реального часу, підвищуючи продуктивність системи збору даних та зменшуючи ймовірність появи помилок чи збоїв [6].

Однак однією з найбільших проблем залишається обмежена ємність акумуляторів дронів, що визначає їхні можливості та тривалість польотів. Через значну кількість особливостей, літій-іонні батареї залишаються найбільш ефективними, проте проблема обмеженої енергії змушує шукати нові підходи та рішення. Наприклад, для дронів можуть розглядатися нові типи акумуляторів, паливні елементи або гібридні джерела енергії. Для сенсорних вузлів використовуються сонячні панелі, що дозволяє зменшити частоту підзарядок і забезпечити безперервну роботу системи. Також активно досліджуються методи енергозбереження для сенсорних компонентів, такі як адаптивне вимкнення модулів та оптимізація частоти збору даних [7].

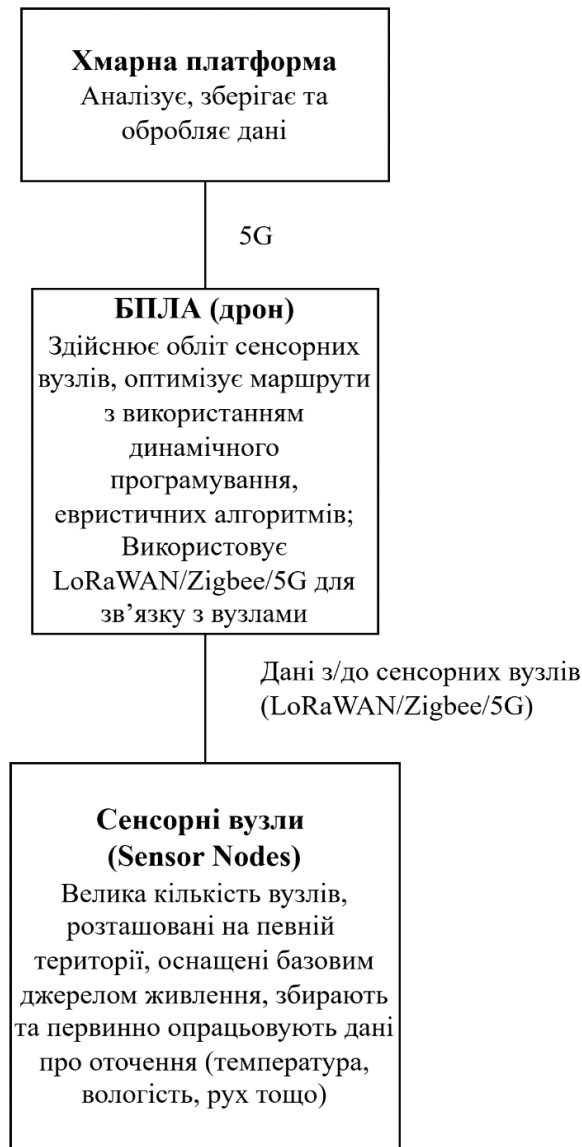


Рис. 2. Архітектурна схема взаємодії БПЛА із сенсорною мережею та хмарною платформою

Окремо, для забезпечення належної синхронізації між сенсорними вузлами і дронами, особливо у складних або динамічних середовищах, використовуються спеціальні алгоритми планування маршрутів та динамічної корекції даних. Надійна синхронізація є критично важливою для запобігання втратам даних та забезпечення стабільної роботи всієї системи.

Також варто зауважити й на захисті від кіберзагроз, що є ще одним ключовим аспектом інтеграції БПЛА та сенсорних мереж. Адже використання сучасних механізмів шифрування та автентифікації допомагає запобігти несанкціонованому доступу до даних, що є особливо важливим для військових та промислових застосувань [8].



МОДЕЛЬ ДИНАМІЧНОЇ ВЗАЄМОДІЇ БПЛА ІЗ СЕНСОРНОЮ МЕРЕЖЕЮ

Інтеграція БПЛА та сенсорних мереж відкриває широкі можливості для підвищення ефективності та безпеки у багатьох галузях, але водночас вимагає вирішення низки технічних викликів для забезпечення стабільної та надійної роботи таких систем [9].

Доцільно розглянути модель динаміки збору даних та взаємодії БПЛА із сенсорною мережею на основі конкретного сценарію. У цьому сценарії дрон здійснює обліт кількох сенсорних вузлів, збираючи дані з них та передаючи їх на центральний сервер. Для моделювання цього процесу розглядається сенсорна мережа, що складається із 50, 100, 200 або 500 вузлів. При цьому враховується час збору даних, передачі даних і обробки команд.

Наприклад, час підльоту до вузлів сенсорної мережі визначається за формулою (1) і залежить від відстані між сенсорними вузлами та від їхньої кількості.

$$t_f = \frac{d_s}{v_d}, \quad (1)$$

d_s — відстань між сенсорними вузлами (наприклад, 100 м), v_d — швидкість дрона (наприклад, 10 м/с).

Якщо кількість вузлів збільшується, але розмір території залишається незмінним, відстань між вузлами пропорційно зменшується. Своєю чергою це вплине й на час підльоту, зменшуючи його, але збільшує кількість вузлів з якими відбувається взаємодія та підключення.

Загальний час взаємодії між сенсорним вузлом та дроном розраховується наступним чином:

$$t_{total} = t_{data\ collection} + t_{data\ transfer} + t_{flight} \quad (2)$$

де $t_{data\ collection}$ — час збору даних з одного вузла, $t_{data\ transfer}$ — час передачі даних з одного вузла, t_{flight} — час підльоту.

Швидкість передачі визначається:

$$t_{data\ transfer} = \frac{R_{data}}{S_t} \quad (3)$$

де R_{data} — обсяг даних з одного вузла (наприклад, 10 Мб), S_t — швидкість передачі (наприклад, 1 Мбіт/с).

В умовах відкритого середовища при відсутності значних перешкод можна використати модель поширення сигналу у вільному просторі. Потужність отриманого сигналу P_r (dBm) від передавача, що розміщується на БПЛА, можна описати рівнянням:

$$P_r = P_t + G_t + G_r - 20\log_{10}(d) - 20\log_{10}(f) - 92.45, \quad (4)$$

де P_t — потужність передавача (dBm), G_t, G_r — коефіцієнти підсилення антен (дБ), d — відстань між БПЛА та вузлом (км), f — частота сигналу (ГГц). Зазвичай величину d обчислюють з урахуванням горизонтальної відстані між дроном і сенсором, а також висоти польоту h . Тоді ефективна відстань у тривимірному просторі може бути розрахована:

$$d = \sqrt{r^2 + h^2}, \quad (5)$$

де r — горизонтальна відстань між дроном і сенсорним вузлом. Отже, збільшення висоти польоту призводить до збільшення d , що може підвищувати втрати сигналу через зростання $20\log_{10}(d)$.

Водночас при більшому h вище ймовірність забезпечення прямої видимості (LoS) та зменшення впливу наземних перешкод (споруди, дерева тощо).

Тому існує певна оптимальна висота, де з одного боку вдається знизити ризик перекриття сигналу об'єктами, а з іншого — уникнути надмірного ослаблення через занадто велику відстань [10].

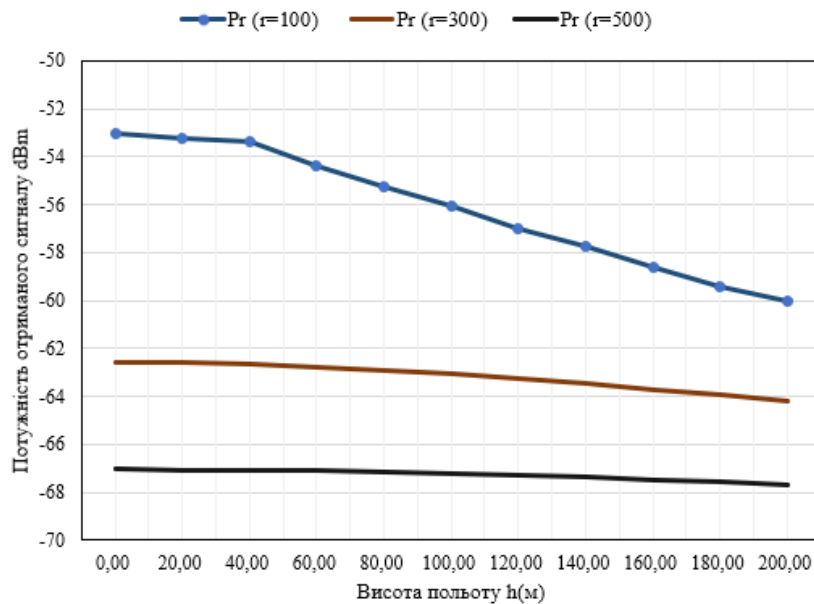


Рис.3. Залежність потужності отриманого сигналу P_r (дБм) від висоти польоту дрона для різних горизонтальних відстаней r

На графіку (рис. 3) видно, що при меншій горизонтальній відстані ($r = 100$ м) початковий рівень сигналу вищий (приблизно $-52 \dots -53$ дБм), але з збільшенням висоти польоту він суттєво знижується (до ~ -62 дБм на 200 м). При більшій відстані ($r = 300$ і $r = 500$ м) потужність сигналу з самого початку є нижчою, однак динаміка її падіння з висотою менш стрімка. Ефект зниження P_r найбільш помітний саме для відносно малих значень r , коли підйом дрона істотно впливає на відстань. Фактично, чим більша відстань, тим нижчим є рівень отриманого сигналу, і зростання висоти збільшує загальну відстань від дрона до сенсора, що призводить до додаткового ослаблення сигналу.

Однак для формулювання математичної моделі взаємодії сенсорних вузлів з БПЛА (дронами) у такому сценарії можна використовувати систему рівнянь, яка описує процес збору, передачі та обробки даних із сенсорів з урахуванням дискретних моментів часу. Модель ґрунтуватиметься на концепціях стохастичних процесів для моделювання випадкових затримок, неоднорідностей [11].

Модель для збору та передачі даних дрона можна описати як дискретний процес, що визначає зміну стану системи в момент часу t_n , коли дрон переміщується між сенсорами та збирає інформацію:

$$X_{i,n+1} = X_{i,n} + \mu_{i,n} L_{i,n}(X_{i,n} \xi_{i,n}) \quad (6)$$

де $X_{i,n}$ — обсяг зібраних даних на момент часу t_n , $\mu_{i,n}$ — параметр кроку дискретизації, який регулює зміни стану даних, $L_{i,n}(X_{i,n} \xi_{i,n})$ — функція, що описує процес збору і передачі даних з сенсорного вузла i за певних умов, $\xi_{i,n}$ — моделює певні випадкові затримки або інші зміни в системі.

Для системи з N сенсорними вузлами загальний час збору даних буде визначено:

$$T_G = N * t_{total}, \quad (7)$$

де N — кількість сенсорів, t_{total} — загальний час взаємодії з одним сенсорним вузлом.

Загальний час взаємодії дрона з сенсорною мережею зростає майже лінійно зі збільшенням кількості сенсорних вузлів, що відображено на рис. 4.

Кожен додатковий сенсорний вузол збільшує загальний час місії через час підльоту, збору даних та передачі цих даних на шлюз або сервер. При значному збільшенні кількості сенсорних вузлів необхідно розглянути оптимізаційні стратегії, такі як паралельне використання декількох дронів, розподілення зон відповідальності, або використання більш швидких каналів передачі даних [12].

Для оптимізації маршруту між сенсорними вузлами можна використовувати графовий підхід або задачу комівояжера, де дрон повинен знайти найбільш ефективний маршрут, що мінімізує відстань між вузлами.

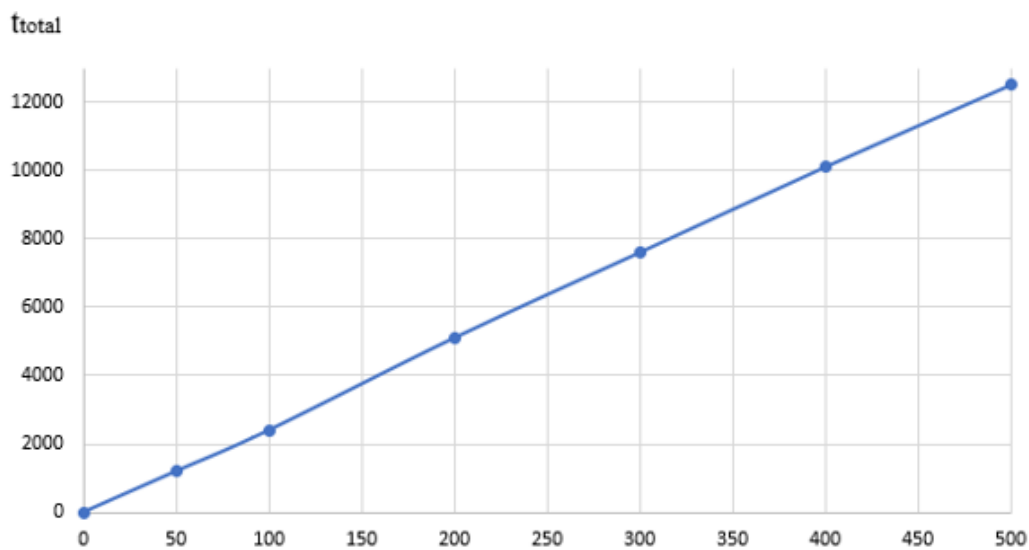


Рис. 4. Залежність загального часу збору даних від кількості сенсорних вузлів

З рис. 4. можна зазначити, що із збільшенням кількості сенсорів загальний час збільшується лінійно, оскільки дрону потрібно більше часу для обльоту всіх сенсорів, збору даних та їх передачі на сервер. Однак, приведені розрахунки не завжди відображають реалістичні сценарії.

У реальних умовах можуть виникати неоднорідності, такі як: затримки через перешкоди (наприклад, дерева, будівлі або інші об'єкти можуть уповільнювати дрон або викликати додаткові витрати енергії), зміни у швидкості передачі даних (іноді швидкість передачі може змінюватися через завади, відстань між дронами та сервером тощо), зміна часу на обліт через різні відстані між сенсорами (сенсори можуть бути розташовані не рівномірно) тощо [13].

Для врахування таких неоднорідностей, можна додати випадкові затримки або змінні до часу обльоту, збору даних і передачі інформації, наприклад:

$$t_f = \frac{d_s}{v_d} + \epsilon_f, \quad (8)$$

де ϵ_f — випадкове значення затримки або зміни, що створюють неоднорідність.

На рис. 5 представлено враховані неоднорідності в часі обльоту, збору та передачі даних. Можна стверджувати, що оскільки додані випадкові зміни в часі, що імітують реальні умови, де можуть виникати затримки через перешкоди або зміни у швидкості передачі даних [14].

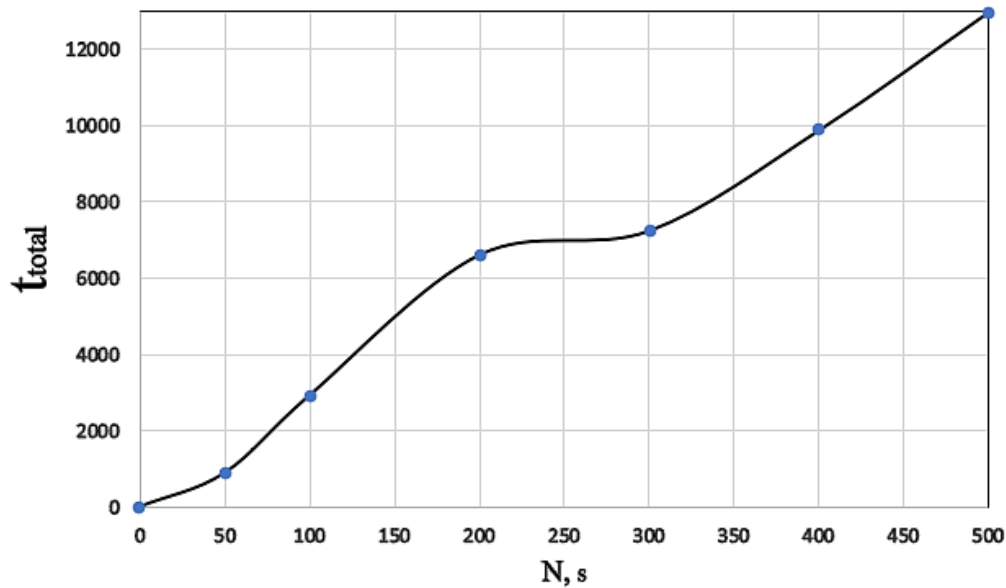


Рис. 5. Залежність загального часу збору даних від кількості сенсорних вузлів із врахуванням неоднорідності в часі обльоту, збору та передачі даних

ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Інтеграція безпілотних літальних апаратів (БПЛА) із сенсорними мережами відкриває нові можливості для ефективного збору та передачі даних у різних галузях, особливо у віддалених і важкодоступних місцях. Результати, приведені в дослідженні, показують, що така інтеграція суттєво підвищує якість моніторингу та управління процесами в режимі реального часу.

Запропонована математична модель описує лінійне збільшення загального часу місії зі зростанням кількості сенсорних вузлів, що підтверджує необхідність оптимізації маршрутів польоту БПЛА, що дозволить зменшити час взаємодії з сенсорними вузлами та підвищити ефективність збору даних.

Також в роботі досліджено впровадження альтернативних джерел живлення, таких як сонячні панелі для сенсорних вузлів та гібридні акумулятори для БПЛА. Такі кроки позитивно вплинуть на час безперервної роботи системи та тривалість польотів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Dovzhenko, N., Ivanichenko, Y., Skladannyi, P., & Zhylytsov, O. (2024). Research of UAV and sensor network integration features for routing optimization and energy consumption reduction. In *Cybersecurity Providing in Information and Telecommunication Systems II*, vol. 3826, 236–241.
2. Choi, C. W. (2024). Tessellation-Based Construction of Air Route for Wireless Sensor Networks Employing UAV. *Sensors*, 24, 3867. <https://doi.org/10.3390/s24123867>
3. Fang, X., & Xinyu, Z. (2025). Intelligent Energy Efficiency Maximization for Wirelessly-Powered UAV-Assisted Secure Sensor Network. *Sensors*, 25, 1534. <https://doi.org/10.3390/s25051534>
4. Dovzhenko, N., Haidur, H., Brzhevskaya, Z., Ivanichenko, Y., & Nesterova, O. (2023). Method of Sensor Network Functioning under the Redistribution Condition of Requests between Nodes. In *Cybersecurity Providing in Information and Telecommunication Systems*, vol. 3421, 278–283.
5. Openko, P., Dovzhenko, N., Orikhovskiy, P., & Ikaiev, D. (2024). Ensuring reliability and security in modern wireless sensor networks based on the implementation of the RSSI metric. *Air power of Ukraine*, 1(6), 131–136. <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2024-1-6-131-136>



6. Rahman, S., Akter, S., & Yoon, S. (2024). A Deep Q-Learning Based UAV Detouring Algorithm in a Constrained Wireless Sensor Network Environment. *Electronics*, 14. <https://doi.org/10.3390/electronics14010001>
7. Sushyn, I., Ivashchev, D., & Lysenko, O. (2024). Evaluating the functioning effectiveness of sensor ground-to-air network using multiple uavs layers and directional antennas. *Information and Telecommunication Sciences*, 32–38. <https://doi.org/10.20535/2411-2976.22024.32-38>
8. Soltani, K., Corò, F., & Das, S. (2024). Optimizing UAV-Assisted Data Collection in IoT Sensor Networks Using Dual Cluster Head Strategy. *IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems (MASS)*, 279–287. <https://doi.org/10.1109/MASS62177.2024.00045>
9. Song, E. Y., FitzPatrick, G. J., & Lee, K. B. (2017). Smart Sensors and Standard-Based Interoperability in Smart Grids. *IEEE Sensors Journal*, 17(23), 1–1. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2017.2729893>
10. Barabash, O., Ausheva, N., Skladannyi, P., Ivanichenko, Y., & Dovzhenko, N. (2024). Technical aspects of building a fault-tolerant sensor network infrastructure. *Electronic Professional Scientific Journal "Cybersecurity: Education, Science, Technique"*, 4(24), 185–195. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2024.24.185195>
11. Beard, R. W., & McLain, T. W. (2012). *Small Unmanned Aircraft: Theory and Practice*. Princeton, NJ, USA: Princeton Univ. Press. <https://doi.org/10.1515/9781400840601>
12. Ahmad, B., Ahmed, M., Anjum, N., Rehman, M., & Ramzan, N. (2023). Energy efficient gateway based routing with maximized node coverage in a UAV assisted wireless sensor network. *PLOS ONE*, 18, e0295615. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0295615>
13. Xiong, J., Li, Z., Li, H., Tang, L., & Zhong, S. (2023). Energy-Constrained UAV Data Acquisition in Wireless Sensor Networks with the Age of Information. *Electronics*, 12, 1739. <https://doi.org/10.3390/electronics12071739>
14. Barabash, O., Ausheva, N., Dovzhenko, N., Obidin, D., Musienko, A., & Fedchuk, T. (2023). Development of a hybrid network traffic load management mechanism using smart components. *2023 IEEE 7th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC)*, 38–41.

**Nadiia Dovzhenko**

PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Information and Cyber Security named after Professor Volodymyr Buryachok
Borys Grinchenko Kyiv Metropolitan University, Kyiv, Ukraine
Associate Professor of the Department of Digital Technologies in Energy
National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine
ORCID ID: 0000-0003-4164-0066
n.dovzhenko@kubg.edu.ua

Pavlo Skladannyi

PhD, Associate Professor, Head of the Department of Information and Cyber Security named after Professor Volodymyr Buryachok
Borys Grinchenko Kyiv Metropolitan University, Kyiv, Ukraine
ORCID ID: 0000-0002-7775-6039
p.skladannyi@kubg.edu.ua

Yevhen Ivanichenko

PhD, Associate Professor,
Deputy Dean for Scientific-Methodological and Educational Work
Borys Grinchenko Kyiv Metropolitan University, Kyiv, Ukraine
ORCID ID: 0000-0002-6408-443X
y.ivanichenko@kubg.edu.ua

Oleksii Zhyltsov

PhD in Pedagogical Sciences, Professor,
Vice-Rector for Academic and Educational Affairs
Borys Grinchenko Kyiv Metropolitan University, Kyiv, Ukraine
ORCID ID: 0000-0002-7253-5990
o.zhyltsov@kubg.edu.ua

A DYNAMIC INTERACTION MODEL OF UNMANNED AERIAL VEHICLES WITH A SENSOR NETWORK FOR ENERGY-EFFICIENT MONITORING

Abstract. Modern unmanned aerial vehicles (UAVs) are increasingly integrated with sensor networks, which significantly expands the possibilities for data collection, transmission, and real-time processing. This integration is critically important for various sectors, including environmental monitoring, smart city infrastructure management, agriculture, and military operations. UAVs provide mobility and access to remote and hard-to-reach locations, enabling efficient monitoring in conditions where conventional networks are unavailable or ineffective. However, numerous technical challenges arise along with these advantages. They concern, in particular, the optimization of drone flight routes to ensure maximum sensor network coverage, the minimization of energy consumption, and the resolution of data security problems, including cyber threats. Another key aspect is flight duration, which depends on UAV battery capacity, as well as energy-saving approaches for sensor nodes, such as the use of alternative energy sources like solar panels. This study presents a dynamic interaction model of UAVs and a sensor network, examining the data collection process, the transmission of these data to a central server, and how increasing the number of sensor nodes affects the total mission time. A stochastic model is proposed to account for environmental heterogeneities such as data transmission delays caused by interference or variations in connection speed. An analysis is carried out regarding the impact of these factors on data collection efficiency and on the optimization of flight routes, particularly through the use of dynamic programming and heuristic methods.

Keywords: UAVs; drones; sensor network; architecture; IoT; nodes; energy efficiency; security; reliability; connectivity; data.



REFERENCES (TRANSLATED AND TRANSLITERATED)

1. Dovzhenko, N., Ivanichenko, Y., Skladannyi, P., & Zhylytsov, O. (2024). Research of UAV and sensor network integration features for routing optimization and energy consumption reduction. In *Cybersecurity Providing in Information and Telecommunication Systems II*, vol. 3826, 236–241.
2. Choi, C. W. (2024). Tessellation-Based Construction of Air Route for Wireless Sensor Networks Employing UAV. *Sensors*, 24, 3867. <https://doi.org/10.3390/s24123867>
3. Fang, X., & Xinyu, Z. (2025). Intelligent Energy Efficiency Maximization for Wirelessly-Powered UAV-Assisted Secure Sensor Network. *Sensors*, 25, 1534. <https://doi.org/10.3390/s25051534>
4. Dovzhenko, N., Haidur, H., Brzhevskaya, Z., Ivanichenko, Y., & Nesterova, O. (2023). Method of Sensor Network Functioning under the Redistribution Condition of Requests between Nodes. In *Cybersecurity Providing in Information and Telecommunication Systems*, vol. 3421, 278–283.
5. Openko, P., Dovzhenko, N., Orikhovskiy, P., & Ikaiev, D. (2024). Ensuring reliability and security in modern wireless sensor networks based on the implementation of the RSSI metric. *Air power of Ukraine*, 1(6), 131–136. <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2024-1-6-131-136>
6. Rahman, S., Akter, S., & Yoon, S. (2024). A Deep Q-Learning Based UAV Detouring Algorithm in a Constrained Wireless Sensor Network Environment. *Electronics*, 14. <https://doi.org/10.3390/electronics14010001>
7. Sushyn, I., Ivashchev, D., & Lysenko, O. (2024). Evaluating the functioning effectiveness of sensor ground-to-air network using multiple uavs layers and directional antennas. *Information and Telecommunication Sciences*, 32–38. <https://doi.org/10.20535/2411-2976.22024.32-38>
8. Soltani, K., Corò, F., & Das, S. (2024). Optimizing UAV-Assisted Data Collection in IoT Sensor Networks Using Dual Cluster Head Strategy. *IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems (MASS)*, 279–287. <https://doi.org/10.1109/MASS62177.2024.00045>
9. Song, E. Y., FitzPatrick, G. J., & Lee, K. B. (2017). Smart Sensors and Standard-Based Interoperability in Smart Grids. *IEEE Sensors Journal*, 17(23), 1–1. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2017.2729893>
10. Barabash, O., Ausheva, N., Skladannyi, P., Ivanichenko, Y., & Dovzhenko, N. (2024). Technical aspects of building a fault-tolerant sensor network infrastructure. *Electronic Professional Scientific Journal "Cybersecurity: Education, Science, Technique"*, 4(24), 185–195. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2024.24.185195>
11. Beard, R. W., & McLain, T. W. (2012). *Small Unmanned Aircraft: Theory and Practice*. Princeton, NJ, USA: Princeton Univ. Press. <https://doi.org/10.1515/9781400840601>
12. Ahmad, B., Ahmed, M., Anjum, N., Rehman, M., & Ramzan, N. (2023). Energy efficient gateway based routing with maximized node coverage in a UAV assisted wireless sensor network. *PLOS ONE*, 18, e0295615. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0295615>
13. Xiong, J., Li, Z., Li, H., Tang, L., & Zhong, S. (2023). Energy-Constrained UAV Data Acquisition in Wireless Sensor Networks with the Age of Information. *Electronics*, 12, 1739. <https://doi.org/10.3390/electronics12071739>
14. Barabash, O., Ausheva, N., Dovzhenko, N., Obidin, D., Musienko, A., & Fedchuk, T. (2023). Development of a hybrid network traffic load management mechanism using smart components. *2023 IEEE 7th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC)*, 38–41.

