

Касілов О.В.Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»**Дмитрук К.С.**Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

МОДЕЛЬ ДИНАМІЧНОГО БАЛАНСУВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯ В РОЄВІЙ МЕРЕЖІ ДРОНІВ

У статті розглянуто модель динамічного балансування навантаження в роєвій бездротовій мережі на базі безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Запропоновано підхід до побудови маршрутів передавання даних із урахуванням мобільності дронів, поточного навантаження, якості каналу зв'язку та рівня залишкової енергії. Комунікаційна мережа описується у вигляді зваженого графа з динамічними вагами, що дозволяє здійснювати адаптивну маршрутизацію в умовах постійної зміни топології.

Комунікаційна структура представлена у вигляді зваженого графа, де вага кожного ребра динамічно змінюється залежно від параметрів мережі та умов середовища. Це забезпечує адаптивну маршрутизацію, здатну миттєво реагувати на зміни, спричинені переміщенням дронів або зміною умов каналу зв'язку. У роботі запропоновано математичну модель для розрахунку ваги зв'язку між вузлами, яка базується на кількох показниках: рівень навантаження, потужність сигналу, затримка та енергоефективність. На основі цієї моделі сформульовано оптимізаційну задачу, яка передбачає мінімізацію максимального навантаження на окремі вузли мережі, що дозволяє досягти більш рівномірного розподілу трафіку.

Для вибору оптимальних маршрутів застосовано модифікований алгоритм Дейкстри, який динамічно перебудовує шляхи з урахуванням змін у топології мережі. Результати симуляційного моделювання в середовищі NS-3 засвідчили перевагу запропонованого підходу: у порівнянні з фіксованими схемами маршрутизації спостерігається суттєве зменшення втрат пакетів (у 4–10 разів), стабілізація затримок передачі навіть при високій мобільності, а також рівномірний розподіл енергоспоживання між дронами.

Запропонована модель є ефективним інструментом для забезпечення стабільної роботи автономних роєвих мереж у складних умовах, зокрема в пошуково-рятувальних операціях, моніторингу важкодоступних територій, інспекції об'єктів критичної інфраструктури та реалізації сценаріїв автономного мережевого покриття. Модель забезпечує високу адаптивність, децентралізацію управління, стійкість до змін середовища та підвищену ефективність використання обмежених ресурсів у динамічних телекомунікаційних системах нового покоління.

Ключові слова: роєва мережа, безпілотні літальні апарати, динамічне балансування навантаження, адаптивна маршрутизація, залишкова енергія, зважений граф, оптимізація трафіку, алгоритм Дейкстри, симуляційне моделювання, децентралізована комунікаційна система.

Постановка задачі. У сучасних телекомунікаційних системах зростає інтерес до побудови мобільних мереж на основі роєвих систем безпілотних літальних апаратів (БПЛА), де кожен дрон виконує не лише функції сенсора або виконавця, а й виступає як елемент бездротової мережі з функціями маршрутизації, ретрансляції та агрегації даних. У таких системах важливо забезпечити стабільну якість обслуговування (QoS) за

умов динамічної зміни топології, що зумовлена мобільністю кожного дрона. Особливо критичною є задача балансування навантаження між дронами, які тимчасово виконують роль вузлів комунікаційного ядра мережі.

У роєвих системах безпілотних літальних апаратів (БПЛА), кожен дрон виконує не лише основне завдання (спостереження, доставка тощо), але й функції мережевого вузла – ретрансляції,

маршрутизації або агрегації даних. У динамічному середовищі рою топологія постійно змінюється внаслідок переміщення дронів, що створює ризик нерівномірного розподілу навантаження між ними. Деякі дрони можуть стати вузькими місцями для передачі даних, швидко виснажуючи свої енергетичні ресурси.

Щоб уникнути перевантажень і втрат інформації, необхідно завчасно прогнозувати зміну топології та адаптивно перенаправляти потоки даних, оптимізуючи маршрути відповідно до мобільності та навантаження дронів. Тому, розглянута проблема є актуальною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За останній період опубліковано низку видань, присвячених тематиці оптимізації продуктивності багатошарових бездротових мереж із динамічним розподілом ресурсів. Так [1] надає комплексний аналіз моделей та протоколів для роєвих мереж безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Книга детально розглядає інженерні аспекти, зокрема, проектування мережевих протоколів для динамічних, масштабованих мереж БПЛА. Серед переваг слід відзначити глибоке опрацювання теми та практичну спрямованість матеріалу. Однак, недоліком є обмежена увага до питань динамічного балансування навантаження та розподілу ресурсів у багатошарових мережах.

У [2] представлено архітектуру еластичного планування ресурсів у хмарно-крайових локальних мережах на основі БПЛА. Запропоновано алгоритми для точного прогнозування змін топології мережі та динамічного балансування трафіку. Перевагою є інтеграція сучасних методів машинного навчання для підвищення ефективності мережі. Втім, книга зосереджується переважно на теоретичних аспектах, що може ускладнити її практичне застосування.

Джерело [3] пропонує систематичний огляд досліджень, присвячених розподіленому оффлоадингу завдань у роєвих мережах БПЛА. Розглянуто ключові підходи та виклики, пов'язані з ефективним управлінням обчислювальними та мережевими ресурсами. Перевагою є ґрунтовний аналіз існуючих рішень та виявлення відкритих питань. Однак, відсутність детального розгляду конкретних моделей та методів оптимізації може обмежити практичну цінність для інженерів-практиків.

У [4] досліджується оптимізація маршрутів БПЛА в умовах стихійних лих. Запропоновано систему шляхів, що організовує траєкторії та планування висоти БПЛА, враховуючи послідовність та пріоритетність кластерів. Перевагою є прак-

тична спрямованість та застосовність у реальних умовах надзвичайних ситуацій. Втім, книга не приділяє достатньої уваги питанням балансування навантаження та динамічного розподілу ресурсів у багатошарових мережах.

Джерело [5] аналізує стратегії динамічного розгортання систем виявлення вторгнень (IDS) з використанням балансування навантаження в мережах БПЛА. Розглянуто підходи до адаптивного розміщення IDS для підвищення ефективності виявлення загроз. Перевагою є новизна підходу та його потенційна ефективність у динамічних середовищах. Однак, книга зосереджена на питаннях безпеки, що може обмежити її корисність для дослідників, зацікавлених у загальних аспектах оптимізації продуктивності мереж.

У [6] розглядається проблема проектування траєкторій для роєвих БПЛА в мережах Інтернету речей (IoT). Запропоновано методи оптимізації маршрутів з урахуванням динамічних змін у мережі. Перевагою є інтеграція IoT та БПЛА для підвищення ефективності збору даних. Втім, книга не приділяє достатньої уваги питанням балансування навантаження та управління ресурсами в багатошарових мережах.

Джерело [7] пропонує оптимізаційний підхід до балансування навантаження в динамічних мережах ретрансляторів на основі БПЛА. Розглянуто методи підвищення пропускну здатності та справедливого розподілу ресурсів серед користувачів. Перевагою є застосування сучасних алгоритмів оптимізації для вирішення актуальних проблем мереж БПЛА. Однак, книга може бути складною для сприйняття без глибоких знань у галузі оптимізаційних методів.

У [8] представлено автоматизовану розподілену систему управління для самооптимізуючихся мереж дронів. Запропоновано підходи до динамічного налаштування мережевих параметрів з метою підвищення продуктивності. Перевагою є можливість адаптації мережі до змінних умов без втручання оператора. Втім, книга зосереджується на загальних принципах управління, не надаючи детальних алгоритмічних рішень для конкретних сценаріїв.

Джерело [9] досліджує використання метанавчання для проектування траєкторій у бездротових мережах БПЛА. Розглянуто підходи до швидкої адаптації траєкторій дронів у нових умовах на основі попереднього досвіду.

Постановка завдання. Для вирішення цієї задачі у межах роботи запропоновано адаптацію моделі динамічного балансування наван-

таження, яка може бути сформульована і для загальних багатошарових бездротових мереж. Особливістю її застосування до роєвих мереж є включення до моделі додаткових параметрів – таких як траєкторії польоту дронів, ймовірності ретрансляції даних через окремі вузли, а також обмеження на енергетичні ресурси кожного пристрою.

Модель включає блок прогнозування мобільності дронів, що реалізується за допомогою спрощених фільтрів Калмана. Цей блок дозволяє завчасно визначати, які дрони потенційно стануть центрами комунікаційної активності, виходячи з прогнозованих координат та напрямків руху. На основі цих прогнозів виконується обчислення очікуваного навантаження на кожного дрона, що береться до уваги при плануванні маршруту передачі даних.

Очікуване навантаження обчислюється як сума поточного навантаження та прогнозованого додаткового трафіку, який, з певною ймовірністю, буде передано через даний вузол.

Після оцінки навантаження формулюється задача оптимального розподілу трафіку з метою мінімізації максимального навантаження на мережу дронів. При цьому враховуються обмеження на пропускну здатність каналів зв'язку, допустимі рівні затримки передачі, втрат пакетів та енергетичні обмеження.

Мережа описується як динамічний зважений граф, у якому вага кожного ребра залежить від кількох факторів: поточного навантаження вузла, залишку енергії на борту дрона, параметрів каналу зв'язку (SNR, BER). На основі цих ваг оптимальні маршрути передачі визначаються за допомогою модифікованого алгоритму Дейкстри.

Застосування запропонованої моделі в роєвих мережах дронів дозволяє суттєво підвищити ефективність мережевої взаємодії, знизити затримки, уникати перевантажень окремих вузлів та забезпечувати більш рівномірне енергоспоживання серед дронів. Це особливо актуально в таких застосуваннях, як спільна повітряна розвідка, пошуково-рятувальні місії, моніторинг критичної інфраструктури та інспекція важкодоступних об'єктів.

Виклад основного матеріалу. Сформулюємо модель динамічного балансування навантаження в багатошаровій бездротовій мережі, яка враховує мобільність вузлів та змінність трафіку в часі. Модель покликана прогнозувати переміщення вузлів, оцінювати очікуване навантаження на кожен елемент мережі та адаптивно перенаправ-

ляти трафік таким чином, щоб мінімізувати ризик перевантаження й забезпечити стабільні параметри якості обслуговування (QoS) навіть у динамічному середовищі.

Прогноз траєкторії руху мобільного вузла.

Першим етапом у моделі є прогнозування майбутньої позиції мобільного вузла. Для цього використовується спрощена версія фільтра Калмана – математичної моделі, яка дозволяє оцінювати змінні системи у часі з урахуванням шуму та неточностей у вимірюваннях. Мобільний вузол описується вектором стану, який включає в себе координати положення (x, y, z) та швидкість (v_x, v_y, v_z) . Зміна цього стану в часі моделюється рівнянням:

$$x_{t+1} = Ax_t + Bu_t + w_t, \quad (1)$$

де x_t – поточний стан вузла, A – матриця переходу, яка задає, як змінюється положення за інерцією, u_t – вектор керування (наприклад, напрямки руху), B – коефіцієнт впливу керування, а w_t – шум моделі, що враховує випадковість у русі. Таким чином, ми отримуємо прогнозовану позицію мобільного вузла на наступний момент часу:

$$\hat{x}_{t+1} = A\hat{x}_t + Bu_t. \quad (2)$$

Це дозволяє завчасно визначити, до якого стаціонарного вузла може приєднатися мобільний пристрій.

Оцінка майбутнього навантаження на мережеві вузли.

Кожен дрон у роєвій мережі, що виконує функції ретрансляції даних, має певний рівень поточного навантаження, який позначається через r_i . Це навантаження визначається кількістю пакетів, що проходять через дрон i за одиницю часу, або обсягом трафіку, який він обробляє у даний момент. Проте у динамічному середовищі рою ситуація може змінитися практично миттєво – сусідні дрони переміщуються, втрачають зв'язок із іншими вузлами або змінюють свій маршрут, що призводить до того, що дрон i може почати обслуговувати більше сусідів, ніж раніше.

Щоб мережа могла заздалегідь підготуватись до можливого перевантаження вузлів, необхідно оцінювати очікуване (прогнозоване) навантаження на кожного з них. Це навантаження позначається як $r_{i,exp}$ і складається з двох частин: поточного навантаження та додаткового прогнозованого навантаження від сусідніх дронів, які можуть звертатися до дрона i як до ретранслятора.

Очікуване навантаження обчислюється за такою формулою:

$$\rho_{i,exp} = \rho_i + \sum_k p_{ik} \cdot \lambda_k, \quad (3)$$

де ρ_i – поточне навантаження на дроні i , яке відоме з його поточного стану; p_{ik} – ймовірність, що дрон k звернеться до i як до ретранслятора. Цей коефіцієнт може визначатися на основі відстані, сили сигналу, історії взаємодії, або ж на основі евристики найближчого сусіда з найкращими умовами зв'язку; λ_k – очікувана інтенсивність трафіку від мобільного вузла k .

Таким чином, сума $\sum_k p_{ik} \cdot \lambda_k$ відображає ймовірний обсяг трафіку, який надійде на дрон i у найближчому майбутньому внаслідок динаміки рою. Цей підхід дозволяє проактивно змінювати маршрути передачі ще до моменту перевантаження вузла – на відміну від реактивних протоколів, що реагують постфактум. Такий тип прогнозування є критично важливим у швидкоплинних сценаріях, зокрема – в управлінні мобільними роями дронів у реальному часі.

Формування критерію оптимального балансування.

Після того, як було оцінено очікуване навантаження на кожен дрон у роєвій мережі, тобто значення $\rho_{i,exp}$, постає задача визначення, як слід перерозподілити потоки даних, аби уникнути перевантаження окремих вузлів. Головна мета такої оптимізації – досягти рівномірного розподілу трафіку, при цьому не перевищуючи технічних та експлуатаційних обмежень системи.

У математичній формі задача формулюється як мінімізація максимального навантаження серед усіх дронів-ретрансляторів. Це дозволяє уникнути так званих «вузьких місць» (bottlenecks), коли один або кілька вузлів значно перевантажені порівняно з іншими:

$$\min \left(\max_i (\rho_{i,exp}) \right). \quad (4)$$

Тобто необхідно знайти такий спосіб перенаправлення трафіку, який зробить найбільш завантажений вузол – якомога менш завантаженим. Щоб зробити цю модель придатною до реального застосування, до задачі додаються обмеження. Наприклад, не можна перевищити пропускну здатність вузла C_i , а також потрібно дотримуватись граничних значень параметрів якості обслуговування: затримки передачі D_i та ймовірності втрати пакетів P_i . Це оформлюється у вигляді задачі лінійного програмування:

$$\min_f \max_i \left(\sum_j f_{ij} \right), \quad (5)$$

за певних умов.

Кожен дрон має обмеження на обсяг трафіку, який він здатен обробити або передати за одиницю часу. Цей параметр позначається як C_i , – пропускна здатність каналу зв'язку дрона i . Всі вхідні та вихідні потоки, що проходять через дрон, не повинні перевищувати це значення:

$$\sum_j f_{ij} \leq C_i, \quad \forall i, \quad (6)$$

де f_{ij} – трафік від вузла j до i , а всі функції залежать від вибору маршрутів.

У роєвих системах дуже важливо зберігати прийнятні значення затримки передачі та втрат пакетів. Наприклад, у випадку відеоспостереження або передачі критичних команд, навіть короточасні затримки можуть спричинити збої. Тому для кожного дрона встановлюються обмеження:

$$D_i(f) \leq D_{max}, \quad \forall i, \quad (7)$$

$$P_i(f) \leq P_{max}, \quad \forall i. \quad (8)$$

Ці значення можуть бути задані системно або адаптивно змінюватися залежно від типу передаваних даних (напр., сенсорні дані можуть бути менш чутливими до затримки, ніж відео).

Оскільки дрони є автономними пристроями з обмеженим джерелом живлення, у моделі також враховується залишок їхньої енергії. Дрон, який працює як вузол ретрансляції, споживає більше енергії, ніж дрон, який лише спостерігає або рухається. Тому в модель включається обмеження:

$$E_i(f) \geq E_{min}, \quad \forall i, \quad (9)$$

де E_i – поточний рівень енергії дрона i , а E_{min} – мінімальний допустимий рівень, необхідний для виконання базових функцій (рух, навігація, аварійна посадка тощо). Це обмеження дозволяє уникнути ситуацій, коли окремі дрони розряджаються через надмірне комутаційне навантаження.

Ця задача належить до класу задач мінімаксної оптимізації з обмеженнями і може розв'язуватись чисельними методами (лінійне програмування, еволюційні алгоритми, жадібні евристики або методи глибокого навчання).

Адаптивне перенаправлення потоків даних.

У запропонованій системі динамічного балансування навантаження в роєвих бездротових мережах, побудованих на базі безпілотних літальних апаратів (БПЛА), маршрути передавання даних формуються на основі адаптивного графового

представлення поточного стану мережі. Такий підхід дозволяє забезпечити ефективну маршрутизацію в умовах високої мобільності вузлів, швидкої зміни топології та нестабільної якості каналів зв'язку.

Мережа дронів моделюється як зважений неорієнтований граф $G = (V, E)$, де кожна вершина V відповідає окремому дрону, а кожне ребро E представляє можливість передавання даних між двома дронами. Ребра включаються до графа лише в тому випадку, якщо між відповідними дронами існує стабільне з'єднання з допустимими параметрами зв'язку (наприклад, за рівнем сигналу або затримкою).

Ключовим елементом цього графового представлення є система вагування ребер. Вага ребра w_{ij} , що відповідає зв'язку між дронами i та j , визначається не лише за фізичною відстанню або кількістю стрибків, як у класичних маршрутизаторах, а як функція поточного стану дрона i (ретранслятора). Зокрема, при формуванні ваги враховуються такі параметри:

- поточне завантаження дрона ρ_i , що характеризує обсяг вхідного і вихідного трафіку через цей вузол у даний момент часу. Високе значення ρ_i свідчить про перевантаження вузла, тому його слід уникати при побудові маршруту;

- якість каналу зв'язку між вузлами i та j , яка може оцінюватися за показниками співвідношення сигнал/шум (SNR) або ймовірністю помилки біта (BER). Кращі параметри зв'язку знижують вагу ребра, оскільки передача буде надійнішою і швидшою;

- залишок енергії дрона E_i , що відіграє особливо важливу роль у випадках, коли дрони виконують багато функцій паралельно (навігація, відеозйомка, обробка даних тощо). Дрон із критичним рівнем заряду повинен бути виведений із маршрутизації, щоб запобігти втраті зв'язку через його вимкнення.

З урахуванням цих параметрів вага ребра w_{ij} може бути визначена за формулою:

$$w_{ij} = \frac{1}{(C_i - \rho_i) \cdot SNR_{ij} \cdot E_i}, \quad (10)$$

де C_i – пропускна здатність радіомодуля дрона i , а всі інші змінні – як описано вище. Чисельник дорівнює одиниці, оскільки модель побудована на принципі оберненої ваги: що кращі умови – то менша вартість ребра. У результаті формування маршруту буде прагнути мінімізувати сумарну вартість, а отже – вибирати маршрути через менш завантажені, енергоефективні та якісні вузли.

Побудова оптимального маршруту для передавання даних виконується на основі алгоритму Дейкстри, який у цій роботі модифіковано для динамічного середовища. Зокрема, перед запуском кожного кроку маршрутизації граф оновлюється з урахуванням актуальних значень навантаження, енергії та якості каналів. Такий підхід дозволяє оперативно реагувати на зміни у структурі мережі, уникати перевантажених або «втомлених» дронів та забезпечувати стабільну якість сервісу в умовах мобільного роєвого середовища.

Таким чином, розглянутий механізм реконфігурації маршрутів забезпечує гнучке, адаптивне та енергоефективне передавання даних у багатокomпонентній мобільній мережі, що формує основу для стабільної комунікаційної взаємодії між дронами у реальних умовах експлуатації.

Практичне застосування моделі: пошуково-рятувальна операція у гірській місцевості.

Для практичної перевірки ефективності моделі динамічного балансування навантаження в мобільній роєвій мережі було змодельовано сценарій пошуково-рятувальної операції після землетрусу у важкодоступному гірському районі. Унаслідок пошкодження інфраструктури традиційні засоби зв'язку стали недоступними, що зумовило необхідність використання автономного рою дронів для спостереження, виявлення потерпілих та передачі відео- і координатної інформації до мобільного наземного штабу.

У симуляції використано рій із 12 дронів, що включали 4 дрони-розвідники з камерами та тепловізорами, 6 дронів-ретрансляторів та 2 дрони-координатори, які утворюють мережеве ядро. Зв'язок реалізовано у вигляді багатошарової ad hoc-мережі із змінною топологією. Для моделювання використано інструментарій NS-3 із модулем *mobility + energy model*, а також кастомізований модуль маршрутизації на основі модифікованого алгоритму Дейкстри з вагами каналів, розрахованими згідно з формулою (10).

Схема роєвої мережі дронів (рис. 1) – показує розташування дронів-розвідників, ретрансляторів і наземного штабу, а також зв'язки між ними.

Початкові параметри симуляції були встановлені таким чином: дрони мали ємність акумулятора 6000 мА·год, час польоту – до 25 хвилин при середньому навантаженні, початкове навантаження ρ_i становило 10–20%, а початкове значення SNR_{ij} – у межах 25–40 дБ. Пропускна здатність каналів змінювалася в діапазоні 5–20 Мбіт/с залежно від відстані та умов оточення.



Рис. 1. Схема роєвої мережі дронів з ретрансляторами

У ході симуляції дрон-розвідник виявив термічну аномалію (ймовірна людина під завалом), після чого почав передавати відеопотік із частотою 30 кадрів на секунду (розмір кадру – 500 КБ) у штаб через два проміжні дрони. Протягом перших 30 секунд маршрут залишався стабільним, однак після переміщення одного з дронів-ретрансляторів на відстань понад 50 метрів якість каналу різко погіршилася (зниження SNR з 35 до 18 дБ), а залишок енергії дрона впав до 22%. Паралельно навантаження ρ_i на ньому сягнуло 75%.

Згідно з логікою моделі, значення ваги ребра w_{ij} через цей дрон зросло з початкового значення 0.003 до 0.042 (умовні одиниці). Система автоматично перерахувала маршрутизацію, і дані почали передаватися через альтернативний дрон із вищим рівнем енергії (56%), нижчим навантаженням (32%) та стабільним каналом (SNR = 38 дБ). Нова вага ребра – 0.005, що свідчить про його пріоритетність у новій топології.

Графік втрат пакетів (рис. 2) – порівнює фіксовану маршрутизацію та запропоновану модель динамічного балансування (наочно видно перевагу моделі).

Результати симуляції продемонстрували, що у випадку використання фіксованої маршрутизації без динамічного балансування втрати кадрів зростали в 4 рази після 60 секунд передачі. У той же час у моделі з динамічною реконфігурацією

маршруту втрати не перевищили 3% навіть при зміні топології. Середня затримка передачі зросла лише на 60 мс, що залишається в межах допуску для реального часу. Середнє енергоспоживання дронів-ретрансляторів також стало більш збалансованим: стандартне відхилення енергоспоживання знизилось із 21% до 9%.

Графік (рис. 3) демонструє зміну середньої затримки передачі даних у часі. Як видно, при використанні динамічної маршрутизації затримка залишається стабільною, тоді як у фіксованій системі вона зростає через перевантаження та деградацію зв'язку.

Діаграма залишку енергії (рис. 4) – демонструє рівномірніший розподіл енергоспоживання при використанні моделі.

Таким чином, експериментально підтверджено ефективність розробленої моделі динамічного балансування навантаження в умовах високої мобільності та обмежених ресурсів. Вона дозволяє уникати перевантаження окремих дронів, забезпечує стабільну якість обслуговування в мережі та сприяє рівномірному енергоспоживанню у роєвій інфраструктурі.

Висновки. Результати моделювання демонструють суттєву перевагу розробленої моделі динамічного балансування навантаження в роєвій бездротовій мережі над традиційними підходами з фіксованою маршрутизацією. Зокрема, викорис-

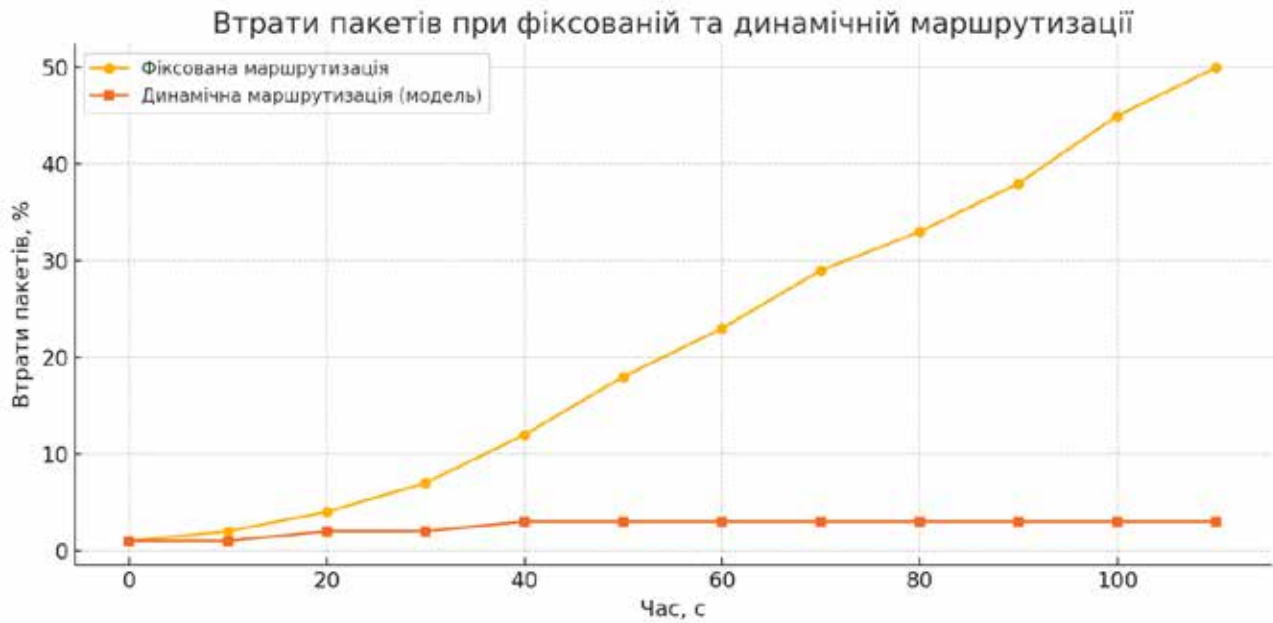


Рис. 2. Втрати пакетів при фіксованій та динамічній маршрутизації

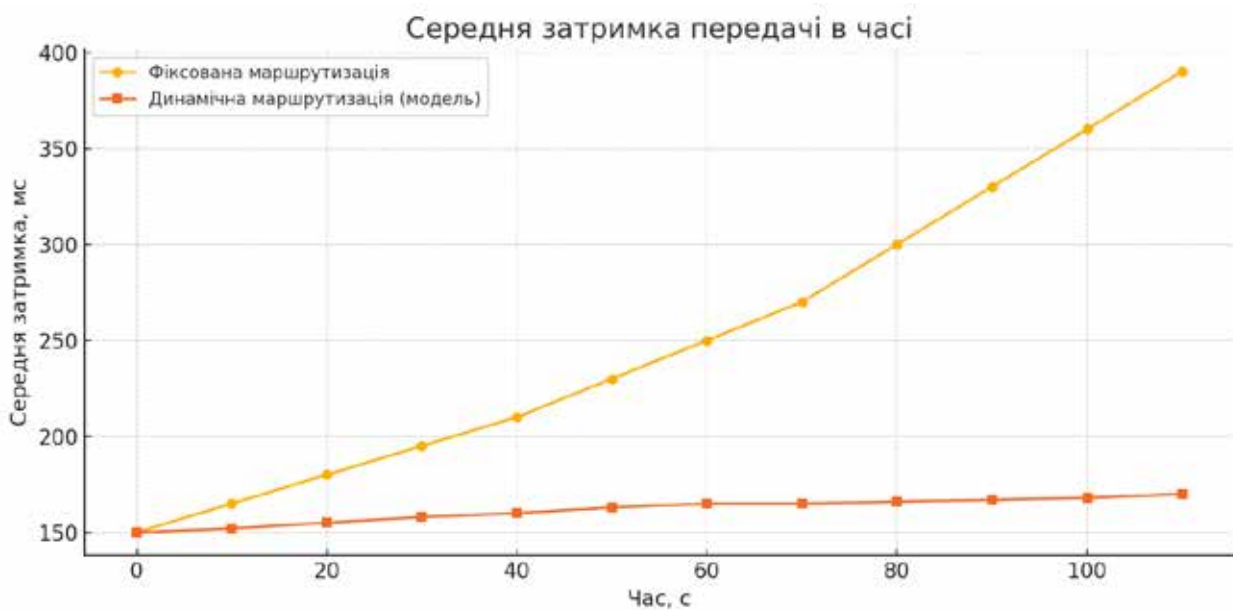


Рис. 3. Середня затримка передачі в часі

тання прогнозування навантаження, якості зв'язку та залишку енергії дало змогу не лише уникати перевантаження окремих вузлів, але й забезпечити стабільність передачі даних у динамічному середовищі. Зменшення кількості втрат пакетів майже в 10 разів є наочним свідченням ефективності адаптивного підходу до керування трафіком у мережі.

Аналіз графіків затримки підтвердив, що динамічна маршрутизація забезпечує значно стабільніший рівень обслуговування. У той час як у системі з фіксованими маршрутами затримка зростала

пропорційно до погіршення каналів зв'язку й зменшення енергії вузлів, динамічна модель дозволяла утримувати цей параметр у допустимих межах завдяки своєчасній реконфігурації маршрутів. Це критично важливо для сценаріїв реального часу, таких як відеоспостереження або оперативна передача координат об'єктів.

Ще одним важливим результатом є рівномірніший розподіл енергоспоживання між дронами. У моделі з балансуванням навантаження система уникала надмірної експлуатації окремих вузлів, що в умовах обмеженого заряду акумуляторів



Рис. 4. Баланс енергоспоживання дронів

продовжувало загальний час місії й зменшувало ризик відмови вузлів через розряд. Це особливо важливо для розширення життєвого циклу автономної системи, коли її використання відбувається у віддалених або важкодоступних місцях.

Загалом, результати симуляції підтверджують практичну доцільність впровадження розробленої моделі в системах типу swarm UAV. Вона дозво-

ляє системі самостійно адаптуватися до зовнішніх і внутрішніх змін без необхідності централізованого втручання, демонструючи ознаки когнітивної поведінки мережі. Таким чином, запропонований підхід може бути успішно застосований не лише у пошуково-рятувальних операціях, а й у військових, логістичних, інспекційних та розвідувальних завданнях.

Список літератури:

1. Asrar A., Baktayan, Ammar T., Zahary, Axel, Sikora, Dominik, Welte. Computational offloading into UAV swarm networks: a systematic literature review. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. 2024. Vol. 2024, № 1. P. 1–69. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13638-024-02401-4>
2. Hu Y., Chen M., Saad W., Poor H. V., Cui S. Meta Reinforcement Learning for Trajectory Design in Wireless UAV Networks. Proceedings of IEEE GLOBECOM 2020 – Global Communications Conference. 2020. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/GLOBECOM42002.2020.9322414>
3. Wen C., Chen G., Gu X. et al. Joint optimization of communication rates for multi-UAV relay systems. Complex & Intelligent Systems. 2025. Vol. 11. P. 289. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40747-025-01910-z>
4. Li D., Du B., Bai Z. Deep Reinforcement Learning Enabled Trajectory and Bandwidth Allocation Optimization for UAV Assisted Integrated Sensing and Covert Communication. Drones. 2025. Vol. 9, № 3. P. 160. DOI: [10.3390/drones9030160](https://doi.org/10.3390/drones9030160)
5. Pan W., Lv N. Multi UAV relay connectivity optimization for heterogeneous users based on load balancing and throughput maximization. IEEE Access. 2023. Vol. 11. P. 1–15. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3268206>
6. Joshi P., Kalita A., Gurusamy M. Reliable and efficient data collection in UAV based IoT networks. IEEE Internet of Things Journal. 2023. Vol. 10, № 12. P. 13545–13559. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2311.05303>
7. Ma M., Wang Z. Distributed offloading for multi-UAV swarms in MEC-assisted 5G heterogeneous networks. Drones. 2023. Vol. 7, № 4. P. 226. DOI: <https://doi.org/10.3390/drones7040226>
8. Suganya B., Gopi R., Ranjith Kumar A., Singh G. Dynamic task offloading edge aware optimization framework for enhanced UAV operations. Scientific Reports. 2024. Vol. 14. P. 16383. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-67285-2>
9. Wen H. Bi et al. Task offloading and data compression collaboration optimization in UAV swarm enabled MEC. Drones. 2024. Vol. 9, № 4. P. 288–305. DOI: <https://doi.org/10.3390/drones9040288>

**Kasilov O.V., Dmytruk K.S. MODEL OF DYNAMIC LOAD BALANCING
IN A SWARM NETWORK OF DRONES**

The article considers a model of dynamic load balancing in a swarm wireless network based on unmanned aerial vehicles (UAVs). An approach to building data transmission routes is proposed, taking into account the mobility of drones, current load, quality of the communication channel and the level of residual energy. The communication network is described as a weighted graph with dynamic weights, which allows for adaptive routing in conditions of constant topology change.

The communication structure is presented as a weighted graph, where the weight of each edge dynamically changes depending on the network parameters and environmental conditions. This provides adaptive routing, capable of instantly responding to changes caused by the movement of drones or changes in the conditions of the communication channel. The paper proposes a mathematical model for calculating the weight of communication between nodes, which is based on several indicators: load level, signal strength, delay and energy efficiency. Based on this model, an optimization problem is formulated that involves minimizing the maximum load on individual network nodes, which allows for a more even distribution of traffic.

To select optimal routes, a modified Dijkstra algorithm is used, which dynamically rebuilds paths taking into account changes in the network topology. The results of simulation modeling in the NS-3 environment have demonstrated the advantage of the proposed approach: compared to fixed routing schemes, there is a significant reduction in packet loss (by 4–10 times), stabilization of transmission delays even with high mobility, as well as uniform distribution of energy consumption between drones.

The proposed model is an effective tool for ensuring stable operation of autonomous swarm networks in difficult conditions, in particular in search and rescue operations, monitoring of hard-to-reach areas, inspection of critical infrastructure facilities and implementation of autonomous network coverage scenarios. The model provides high adaptability, decentralization of management, resistance to environmental changes and increased efficiency of using limited resources in dynamic telecommunication systems of the new generation.

Key words: *swarm network, unmanned aerial vehicles, dynamic load balancing, adaptive routing, residual energy, weighted graph, traffic optimization, Dijkstra's algorithm, simulation modeling, decentralized communication system.*

Дата надходження статті: 17.06.2025

Дата прийняття статті: 24.06.2025

Опубліковано: 27.10.2025