

Коновалов Д.Г.

<https://orcid.org/0009-0001-6301-4376>
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Яковенко І.В.

<https://orcid.org/0009-0003-7705-4584>
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

МОДЕЛЬ ПРОГНОЗНО-ОРІЄНТОВАНОЇ МАРШРУТИЗАЦІЇ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ ЗАТРИМКО У РОЯХ ДРОНІВ

У статті розглянуто проблему забезпечення ефективної маршрутизації в роєвих бездротових MESH-мережах дронів в умовах високої мобільності та швидкої зміни топології. Показано, що традиційні проактивні протоколи, зокрема OLSR, орієнтуються виключно на поточний стан мережі та не враховують прогнозовану еволюцію взаємного розташування вузлів, що призводить до частих перепобудов маршрутів, зростання затримки та зниження рівня доставки пакетів.

Запропоновано прогнозно-орієнтовану модель маршрутизації, яка інтегрує геометричне прогнозування траєкторій руху дронів, стохастичну оцінку ймовірності збереження міжвузлових каналів і модель прогнозованої чергової затримки на основі М/М/1. Сформовано узагальнену часово-просторову метрику маршруту, що враховує майбутню конфігурацію топології та очікувану якість зв'язку. На відміну від класичних підходів, запропонований алгоритм мінімізує вагу маршруту з урахуванням прогнозованих змін, що дозволяє підвищити стійкість мережі до динамічних впливів і зменшити ймовірність розриву каналу.

Реалізацію моделі виконано у середовищі OMNeT++/INET з подальшим порівнянням із базовим протоколом OLSR. За результатами моделювання встановлено зменшення середньої затримки передачі пакетів на 10–13%, підвищення Packet Delivery Ratio на 7–9% та збільшення частки стабільних маршрутів приблизно на 20% при зростанні швидкості руху дронів. Додатково зафіксовано скорочення середньої довжини маршруту, що знижує навантаження на вузли та підвищує загальну ефективність мережі.

Запропонований підхід не потребує модифікації фізичного або каналного рівня та може бути інтегрований у наявні стек-архітектури маршрутизаторів як нова метрика вибору шляху. Отримані результати підтверджують доцільність використання прогнозно-орієнтованої маршрутизації для побудови високостабільних і низькозатримкових роєвих мереж дронів у сценаріях із підвищеною мобільністю.

Ключові слова: безпілотні літальні апарати, MESH-мережа, рій дронів, якість обслуговування, стохастична модель, маршрутизація, канал зв'язку, затримка, прогнозування руху.

Постановка проблеми. Сучасні бездротові MESH-мережі на основі роєвих груп дронів активно застосовуються у задачах моніторингу, картографування, розвідки та аварійного реагування. Їх ключовою особливістю є висока мобільність вузлів і динамічна зміна топології, що ускладнює підтримання стабільних маршрутів із малою затримкою. Класичні протоколи, зокрема OLSR, орієнтуються лише на поточний стан мережі та не враховують прогнозовані зміни положення дронів і якості каналів, що призво-

дить до зростання затримок, частих перепобудов маршрутів і зниження рівня доставки даних.

За умов високої мобільності важливо не лише реагувати на зміни зв'язків, а й передбачати майбутню структуру мережі. Тому активно розвивається напрям прогнозно-орієнтованої маршрутизації, який враховує часово-просторову еволюцію топології. Водночас більшість підходів зосереджується окремо на прогнозуванні руху або оцінці надійності каналів, тоді як комплексне поєднання прогнозу траєкторій, ста-

більності каналу та очікуваної затримки в єдиній метриці маршруту залишається недостатньо дослідженим.

Отже, актуальною є розробка маршрутизатора, що враховує як поточні, так і прогнозовані параметри мережі. Це дасть змогу формувати стійкі до змін топології маршрути, зменшувати затримку та підвищувати QoS у роєвих мережах дронів, особливо за умов інтенсивного трафіку та жорстких вимог до часу реакції.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика маршрутизації в роєвих бездротових мережах UAV активно досліджується в європейській та українській наукових школах у зв'язку зі зростанням вимог до мобільності, адаптивності й стійкості комунікацій. Більшість робіт зосереджена на забезпеченні якості зв'язку в MANET-і MESH-мережах за умов швидкого переміщення вузлів. У працях Mohapatra S. та Rani A. [1–2], проаналізовано вплив мобільності на OLSR, AODV та інші класичні протоколи; показано зниження стабільності маршрутів і зростання затримки при високих швидкостях UAV. Наголошено, що традиційні проактивні алгоритми не враховують майбутню топологію, тому їх ефективність суттєво падає за динамічних змін мережі.

Останні дослідження орієнтовані на прогнознi підходи. У роботах Sun K. та Ben Samuel K. [3–4], запропоновано оцінювання майбутніх позицій UAV на основі моделей Gauss–Markov і ARIMA для підвищення надійності маршрутів. Урахування траєкторних даних зменшує частоту перепобудови шляхів, однак не охоплює чергові затримки та стохастичні характеристики каналу. У [5] Shumeye Lakew D. та Dao N. -N. використали прогноз RSSI, проте без формування узагальненої метрики маршрутизації й мінімізації майбутньої затримки.

Поширеним є застосування просторово-часових функцій зв'язності. У роботах [6–7] Касілова О.В., Дмитрука К.С., Пустовойтова П.Є. та Компанійця В.О., подано моделі прогнозованої якості каналу для роєвих систем на основі геометричних і стохастичних параметрів руху. Показано підвищення стабільності маршруту до 15–20%, але здебільшого без урахування чергових затримок і динамічного навантаження.

Українські дослідження [8–9] Пустовойтова П.Є., Савченко М.В. спрямовані на адаптивний вибір метрики з урахуванням енергетичних параметрів і ваги каналів, проте не використовують прогноз руху UAV. У [10] запропоновано ML-підхід до вибору маршрутів, однак без фор-

мальної аналітичної моделі та аналізу прогнозованих характеристик каналу.

Отже, існуючі підходи охоплюють окремі аспекти задачі: класичні протоколи не враховують прогноз руху; позиційні моделі ігнорують затримки й стохастичну каналу; RSSI- та енергетичні методи не забезпечують мінімізації чергової затримки; ML-рішення часто позбавлені строгого математичного обґрунтування. Водночас відсутня комплексна прогнозно-орієнтована модель, що одночасно враховує майбутню часово-просторову топологію, імовірність збереження каналу, прогнозовану чергову затримку та узагальнену метрику маршрутизації. Усунення цієї прогалини становить основу запропонованої в статті моделі.

Постановка завдання. Аналіз підходів до маршрутизації в роєвих MESH-мережах показує недостатню ефективність традиційних протоколів за умов високої мобільності вузлів. Зокрема, OLSR враховує лише поточну топологію, тоді як у мережах дронів вирішальним є прогноз майбутнього стану: очікувані відстані між вузлами, стійкість каналів і прогнозована чергова затримка. Відсутність інтегрованої прогнозної метрики призводить до зростання затримки та зниження рівня доставки пакетів.

Метою дослідження є розроблення прогнозно-орієнтованої моделі маршрутизації для роєвих MESH-мереж дронів, що забезпечує зменшення середньої затримки та підвищення стабільності маршрутів завдяки врахуванню часово-просторової динаміки та стохастичних характеристик каналів.

Для досягнення мети передбачено: формування математичної моделі прогнозування руху дронів за навігаційними параметрами; побудову моделі прогнозованої чергової затримки з урахуванням навантаження та часу життя з'єднання; синтез узагальненої метрики маршруту, що поєднує затримку й імовірність збереження каналу; розроблення алгоритму вибору оптимального маршруту в умовах динамічної топології; реалізацію підходу в середовищі OMNeT++/INET та порівняльне моделювання з OLSR за показниками середньої затримки, Packet Delivery Ratio, стабільності й довжини маршрутів.

Виконання цих задач дозволяє обґрунтувати ефективність прогнозно-орієнтованого маршрутизатора для сучасних роєвих систем дронів.

Виклад основного матеріалу. *Формалізація математичного апарату прогнозно-орієнтованої маршрутизації.*

Створення ефективного маршрутизатора для роєвих MESH-мереж потребує формалізації руху

дронів, оцінки їх майбутньої топології та характеристики якості міжвузлових каналів. У мобільних роєвих системах топологія змінюється швидко, тому алгоритм має враховувати саме прогнозовану конфігурацію мережі, а не лише поточну. Почнемо з побудови математичного апарату, що описує майбутнє положення вузлів і дає можливість оцінити стабільність каналу завчасно.

Положення дрона i у момент часу $t + \Delta t$ оцінюється на основі навігаційних параметрів поточного моменту. Найпростіший варіант прогнозування реалізується лінійною екстраполяцією:

$$\hat{r}_i(t + \Delta t) = r_i(t) + v_i(t)\Delta t, \quad (1)$$

де $r_i(t)$ – поточний вектор положення, $v_i(t)$ – вектор швидкості, а Δt – горизонт прогнозу. Такий підхід є базовим для дронів зі слабким маневруванням. Для реальних роєвих груп, де часто відбуваються активні зміни курсу, бажано використовувати уточнену модель, що враховує прискорення:

$$\Delta t) = r_i(t) + v_i(t)\Delta t + \frac{1}{2}a_i(t)\Delta t^2, \quad (2)$$

де $a_i(t)$ – оцінка прискорення, яка дозволяє підвищити точність прогнозування траєкторії.

Після того як прогнозовані координати визначені, можна обчислити прогнозовану майбутню відстань між вузлами i та j . З цією метою використовується евклідова метрика:

$$d_{ij}(t + \Delta t) = \|\hat{r}_i(t + \Delta t) - \hat{r}_j(t + \Delta t)\|. \quad (3)$$

Відстань є ключовим параметром, що визначає, чи буде збережений радіоканал між вузлами. У роєвих бездротових мережах доступність каналу істотно змінюється в часі, тому необхідний підхід, який пов'язує геометрію руху з імовірністю зв'язку. Це приводить до введення функції збереження каналу, що згасає із збільшенням відстані:

$$P_{ij}^{link}(t + \Delta t) = \exp\left(-\frac{d_{ij}(t + \Delta t)}{R}\right), \quad (4)$$

де R – характерний радіус зв'язку. Чим більше прогнозована відстань, тим менше значення P_{ij}^{link} , що фізично узгоджується зі зменшенням SNR та збільшенням ймовірності розриву з'єднання.

Однак якість майбутнього каналу визначається не лише відстанню, а й тенденцією руху вузлів. Тому вводиться оцінка залишкового часу життя каналу:

$$T_{ij}^{life} = \frac{R - d_{ij}(t)}{\dot{d}_{ij}(t)}, \quad (5)$$

де $\dot{d}_{ij}(t)$ – швидкість збільшення або зменшення відстані між вузлами. Позитивне значення означає, що вузли віддаляються, а канал скоро розірветься; негативне – що вони наближаються. Ця

величина дозволяє кількісно враховувати стабільність з'єднання.

Оцінка прогнозованої затримки передавання даних через один канал формується шляхом поєднання стандартної чергової затримки та штрафу за нестабільність каналу. Чергова складова описується узагальненою моделлю M/M/1:

$$D_{ij} = D_0 + \frac{1}{\mu - \lambda_{ij}}, \quad (6)$$

де D_0 – початкова радіозатримка, μ – пропускна здатність каналу, а λ_{ij} – інтенсивність потоку пакетів. Проте якщо канал буде розірвано раніше, ніж пакет завершить доставку, його затримка фактично зростає. Саме тому вводиться прогнозована затримка:

$$\hat{D}_{ij} = D_{ij} + \beta \frac{1}{T_{ij}^{life}}, \quad (7)$$

де β – ваговий коефіцієнт, що встановлює, наскільки сильно нестабільність каналу впливає на вибір маршруту.

Для інтеграції впливу прогнозованої затримки та прогнозованої стійкості зв'язку формується узагальнена вага ребра графа маршрутизації:

$$w_{ij}(t) = \frac{\hat{D}_{ij}}{P_{ij}^{link}(t + \Delta t)}. \quad (8)$$

Низьке значення $w_{ij}(t)$ відповідає якісному, стабільному і малозатратному щодо затримок каналу. Такий підхід дозволяє забезпечити перевагу тим маршрутам, які не лише короткі, але й мають високу ймовірність збереження у найближчому майбутньому.

Для маршруту, що складається з послідовності вузлів $p = \{i_1, i_2, \dots, i_k\}$, сумарна прогнозована затримка передавання визначається як:

$$D(p) = \sum_{m=1}^{k-1} \hat{D}_{i_m i_{m+1}}. \quad (9)$$

Аналогічно формується узагальнена якість маршруту:

$$Q(p) = \sum_{m=1}^{k-1} w_{i_m i_{m+1}}. \quad (10)$$

Саме функціонал $Q(p)$ виступає критерієм оптимальності, за яким обирається найкращий маршрут у прогнозованій топології. Тоді задача визначення оптимального шляху формально записується як:

$$p^* = \arg \min_{p \in P} Q(p), \quad (11)$$

де P – множина всіх допустимих маршрутів у MESH-топології роєвої мережі.

Таким чином, отримана модель прогнозно-орієнтованої маршрутизації базується на комбінації геометричного прогнозування, стохастичної оцінки зв'язності та оцінки майбутніх затримок. Центральними є зв'язки між (1)–(4), що визначають майбутнє положення вузлів; формулами (5)–(7), що вимірюють стабільність і затримку каналів; та узагальненим критерієм (8)–(11), який формує глобальну оптимізаційну задачу.

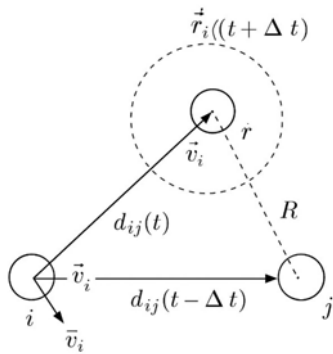


Рис. 1. Геометрія прогнозування положення дронів та оцінки майбутньої зв'язності

На рисунку 1 показано принцип прогнозування топології MESH-мережі. Дрони i та j мають відомі поточні положення $r_i(t)$ і $r_j(t)$, а також вектори швидкості. Метод екстраполяції дозволяє оцінити їх прогнозовані координати $\hat{r}_i(t + \Delta t)$ і $\hat{r}_j(t + \Delta t)$, на основі яких обчислюється майбутня відстань $d_{ij}(t + \Delta t)$. У зоні навколо прогнозованого положення позначено радіус можливого зв'язку R , що дозволяє визначити ймовірність збереження каналу. Така геометрична інтерпретація безпосередньо відповідає формальним залежностям (1)–(4) і є основою для оцінки стабільності маршруту в динамічних роєвих мережах.

Моделювання та дослідження запропонованої моделі.

Ефективність прогнозно-орієнтованої моделі маршрутизації оцінено шляхом моделювання в OMNeT++ 6.0 з використанням INET 4.x та MANET-модулів. Метою було визначити вплив урахування прогнозованої топології та стійкості каналів на середню затримку, стабільність маршрутів і загальну якість функціонування MESH-мережі дронів. Запропонований протокол порівнювався з класичним OLSR.

OLSR – проактивний протокол стану ліній зв'язку, що підтримує таблиці маршрутизації через періодичний обмін службовими повідомленнями. Механізм Multipoint Relays (MPR) зменшує обсяг службового трафіку за рахунок вибору мінімального набору ретрансляторів.

Однак у високомобільних роєвих мережах OLSR має обмеження: він враховує лише поточний стан зв'язків і не прогнозує зміни топології. Це спричиняє швидку втрату актуальності маршрутів, зростання затримки, втрати пакетів і часті перебудови, що обґрунтовує його використання як базового протоколу для порівняння.

Оскільки реалізація моделі вимагає оцінювання майбутньої топології, у симуляційному середовищі було задіяно кілька моделей мобільності: Gauss–Markov для згладжених траєкторій, Random Waypoint для хаотичного переміщення та Spline-based Mobility для сценаріїв з керованими траєкторіями дронів. Прогнозна метрика маршрутизації була інтегрована у модуль RoutingTableParser шляхом модифікації функції обчислення ваги ребер графа, що дозволило маршрутизатору використовувати узагальнену метрику $w_{ij}(t)$, описану раніше. Вхідними даними для моделювання були траєкторії дронів, параметри каналу, інтенсивність трафіку, площа покриття, а також характеристики рухомих вузлів, що дозволило відтворити динаміку роєвої мережі з різними рівнями мобільності.

Для забезпечення відтворюваності експерименту було сформовано таблицю основних параметрів моделювання.

Оцінювання ефективності маршрутизації здійснювалося за кількома ключовими метриками. Першою і основною метрикою була середня затримка пакетів, що визначається як

$$D_{avg} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N D(p_k), \quad (12)$$

де N – кількість доставлених пакетів, а $D(p_k)$ – затримка доставки k -го пакета за маршрутом p_k . Другою метрикою була частка стабільних маршрутів, тобто таких, що не зазнали розриву протягом передачі трафіку. Важливою характеристикою була також середня довжина маршруту за кількістю переходів, що дозволяє порівняти структуру побудованих шляхів між протоколами. Для комплексної оцінки якості функціонування мережі використовувалася метрика Packet Delivery Ratio (PDR), яка відображає частку успішно доставлених пакетів, а також частота перепобудови маршрутів – показник, що ілюструє, наскільки часто протокол вимушений змінювати шлях через рухливість вузлів.

Результати моделювання подано у вигляді графічних залежностей. Графік на рис. 2 відображає зміну середньої затримки залежно від швидкості руху дронів, де запропонований протокол демон-

Основні параметри моделювання MESH-мережі дронів

Параметр	Значення	Коментар
Кількість дронів	30	Росва MESH-конфігурація
Площа симуляції	1000 × 1000 м	Відкрита територія
Моделі мобільності	Gauss–Markov, Random Waypoint, Spline-based	Перевірка стабільності
Радіус зв'язку R	200 м	Фізичний рівень INET
Горизонт прогнозу Δt	0,3 с	Оптимально для UAV
Швидкість дронів	5–20 м/с	Низька та висока мобільність
Трафік	UDP, 512 байт, 10 pkt/s	Односпрямований потік
Протоколи порівняння	OLSR, Proposed	Базовий та прогнозний
Тривалість симуляції	300 с	Статистично достатньо
Кількість повторів	10	Усереднення результатів

струє зменшення затримки на 10–13% порівняно з OLSR, особливо у зонах високої мобільності.

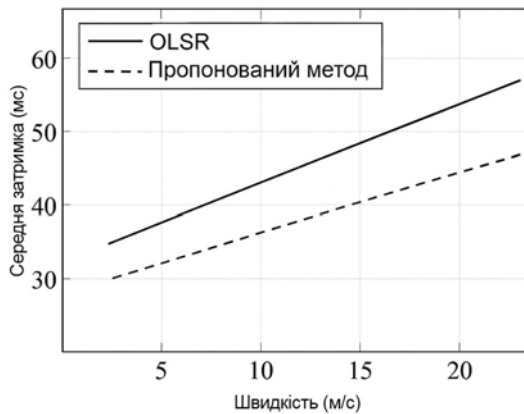


Рис. 2. Графік залежності середньої затримки від швидкості дронів у порівнянні двох методів

Графік на рис. 3. представляє залежність Packet Delivery Ratio від швидкості переміщення, що показує збереження PDR на рівні 92–95% для прогнозного маршрутизатора проти 84–88% для OLSR.

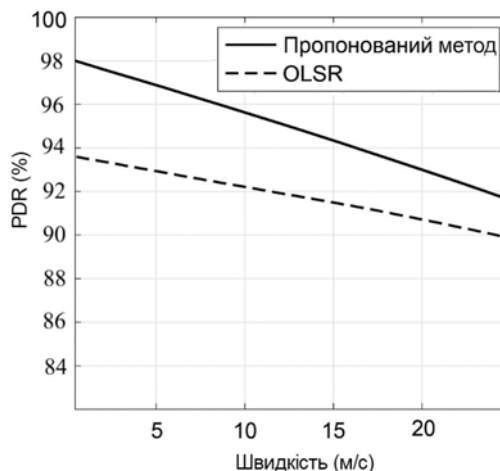


Рис. 3. Packet Delivery Ratio при різних швидкостях руху дронів для запропонованого методу та OLSR

Графік на рис. 4. ілюструє частку стабільних маршрутів, яка зростає майже на 20% завдяки прогнозуванню топології.

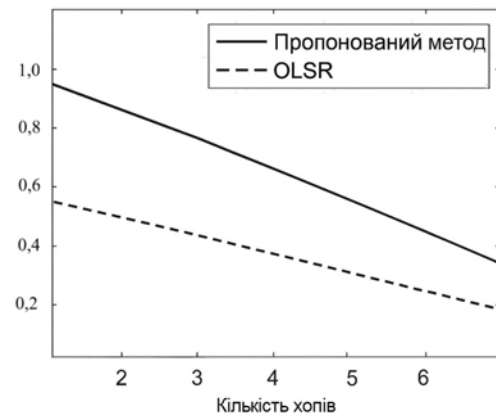


Рис. 4. Частка стабільних маршрутів залежно від кількості хопів

Окремо на рис. 5. проаналізовано середню довжину маршруту, де протокол демонструє оптимальні рішення з меншим числом переходів, що зменшує навантаження на вузли і знижує ймовірність розриву.

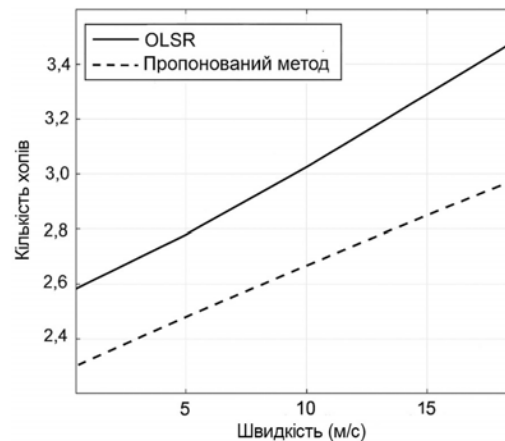


Рис. 5. Середня довжина маршруту (hop-count) при різних швидкостях дронів

Результати моделювання підтверджують, що запропонована модель покращує ключові характеристики мережі: підвищує стабільність маршрутів, зменшує середню затримку та загальну навантаженість. Перевагою є відсутність змін на фізичному рівні – удосконалюється лише метрика маршрутизації. Це забезпечує адаптивність і ефективність у динамічних UAV-сценаріях та свідчить про практичну придатність підходу.

Висновки. У роботі запропоновано прогнозно-орієнтовану модель маршрутизації для роєвих MESH-мереж дронів, що враховує майбутню часово-просторову конфігурацію та стохастичні характеристики каналів зв'язку. На відміну від традиційних алгоритмів, які спираються лише на поточну топологію, підхід використовує прогноз траєкторій руху та ймовірність збереження між-

вузлових з'єднань, що забезпечує формування більш стабільних маршрутів.

Метрика маршрутизації поєднує оцінку стійкості каналу й прогнозовану якість шляху, надаючи пріоритет маршрутам із високою ймовірністю збереження працездатності після зміни топології. Моделювання в середовищі OMNeT++/INET показало зменшення середньої затримки на 10–13% порівняно з OLSR, підвищення Packet Delivery Ratio на 7–9% та зростання частки стабільних маршрутів приблизно на 20%. Також спостерігається зменшення середньої довжини маршрутів (hop-count).

Запропонований метод інтегрується як нова метрика без змін фізичного чи каналного рівнів і може застосовуватись у високодинамічних роєвих мережах дронів для підвищення стабільності та зниження затримок.

Список літератури:

1. Mohapatra S., Kanungo P. Performance analysis of AODV, DSR, OLSR and DSDV Routing Protocols using NS2 Simulator. *Procedia Engineering*. 2012. Vol. 30. P. 69-76. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.835>
2. Rani A., Bhardwaj V. Performance Analysis of Routing Protocols for FANETs. 2024 15th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT), Kamand, India. 2024. P. 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICCCNT61001.2024.10724067>
3. Sun K., Liu M., Yin C., Wang Q. Adaptive Extended Kalman Prediction-Based SDN-FANET Segmented Hybrid Routing Scheme. *Sensors*. 2025. Vol. 25, no. 5:1417. DOI: <https://doi.org/10.3390/s25051417>
4. Ben Samuel K., Wolthusen S. D., Sansa Otim J., Nyongarwizi Akol R., Nsabagwa M. Routing Protocols and Mobility Predictions for UAV Data Collection From Agricultural Sites: A Survey. *IEEE Access*. 2025. Vol. 13. P. 108626-108640. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3582163>
5. Shumeye Lakew D., Sa'ad U., Dao N. -N., Na W., Cho S. Routing in Flying Ad Hoc Networks: A Comprehensive Survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2020. Vol. 22, no. 2. P. 1071-1120. DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2020.2982452>
6. Касілов О.В., Дмитрук К.С. Модель динамічного балансування навантаження в роєвій мережі дронів. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2025. Т. 36(75), № 4. С. 53-61. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.4.1/07>
7. Компанієць В. О., Пустовойтов П. Є. Модель масштабування мережі на основі стохастичних процесів за умов самоподібного трафіку. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2025. Т. 36(75), № 3. С. 71-79. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/10>
8. Пустовойтов П.Є., Воронець О.М. Метод забезпечення оптимальної маршрутизації з урахування QoS та енергозбереження. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Інформатика і моделювання*. 2025. Т. 1, № 1(13). С. 64-79. DOI: <https://doi.org/10.20998/2411-0558.2025.01.05>
9. Савченко М.В., Шиман М.В., метод аналізу завантаження вузлів кластеру mesh-мережі на основі математичної моделі мереж Джексона. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2025. Т. 1, № 79. С. 201-204. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2025.1.201-204>
10. Mughal U. A., Hassler S. C, Ismail M. Machine Learning-Based Intrusion Detection for Swarm of Unmanned Aerial Vehicles. 2023 IEEE Conference on Communications and Network Security (CNS), Orlando, FL, USA. 2023. P. 1-9. DOI: <https://doi.org/10.1109/CNS59707.2023.10288962>

Konovalov D.H., Yakovenko I.V. A PREDICTION-ORIENTED ROUTING MODEL FOR DELAY REDUCTION IN DRONE SWARMS

The article considers the problem of ensuring effective routing in drone swarm wireless MESH networks under conditions of high mobility and rapid topology change. It is shown that traditional proactive protocols, in particular OLSR, are focused exclusively on the current state of the network and do not take into account the predicted evolution of the mutual location of nodes, which leads to frequent route reconstructions, increased delay and reduced packet delivery.

A prediction-oriented routing model is proposed that integrates geometric prediction of drone movement trajectories, stochastic estimation of the probability of preserving inter-node channels and a model of predicted next delay based on M/M/1. A generalized time-space route metric is formed, which takes into account the future topology configuration and the expected quality of communication. Unlike classical approaches, the proposed algorithm minimizes the route weight taking into account the predicted changes, which allows to increase the network's resistance to dynamic influences and reduce the probability of channel breakage.

The model implementation was performed in the OMNeT++/INET environment with subsequent comparison with the basic OLSR protocol. According to the simulation results, a decrease in the average packet transmission delay by 10–13%, an increase in the Packet Delivery Ratio by 7–9%, and an increase in the share of stable routes by approximately 20% with an increase in the speed of drones were established. Additionally, a reduction in the average route length was recorded, which reduces the load on nodes and increases the overall network efficiency.

The proposed approach does not require modification of the physical or link layer and can be integrated into existing router stack architectures as a new path selection metric. The results obtained confirm the feasibility of using predictive routing for building highly stable and low-latency drone swarm networks in scenarios with increased mobility.

Keywords: *unmanned aerial vehicles, MESH network, drone swarm, quality of service, stochastic model, routing, communication channel, delay, traffic forecasting.*

Дата першого надходження статті до видання: 24.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті 11.05.2026