

ІВАНКОВ Валентин

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0009-0001-9835-8486>

valentyn.ivankov@gmail.com

НОВОТАРСЬКИЙ Михайло

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0000-0002-5653-8518>

novotar@gmail.com

МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕДАЧІ СИГНАЛІВ У РОЇ БПЛА З ВИКОРИСТАННЯМ МЕРЕЖ ПЕТРІ

Робота присвячена дослідженню актуальної проблеми координації безпілотних літальних апаратів (БПЛА) для їх об'єднання в рій із метою виконання різноманітних завдань. Запропонований підхід до координації забезпечує легке масштабування роїв від кількох одиниць до сотень апаратів, зберігаючи при цьому простоту й надійність системи. У межах дослідження розглянуто застосування високорівневих мереж Петрі для моделювання та контролю процесів передачі сигналів у безпілотних авіаційних системах. Проведено аналіз поширених мережевих топологій, які використовуються в роях БПЛА, та розроблено відповідні високорівневі моделі для цих топологій. На основі експериментальних досліджень визначено оптимальні рішення з урахуванням критеріїв простоти й надійності.

Ключові слова: Високорівневі мережі Петрі, дрони, передача сигналу, топологія, ройові системи, відмовостійкість.

IVANKOV Valentyn, NOVOTARSKYI Mykhailo

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

BROADCAST SIGNAL TRANSMISSION MODEL WITHIN DRONE SWARM BASED ON PETRI NETS

The presented research is devoted to one of the most relevant and rapidly developing areas of modern robotics — the coordination and control of unmanned aerial vehicles (UAVs) within swarm systems. The main goal of this work is to develop an effective approach to organizing and managing a large group of UAVs that are capable of performing joint tasks in a coordinated and autonomous manner. The proposed coordination method ensures flexible scalability of UAV swarms — from a few units to hundreds of aerial devices — while maintaining simplicity, robustness, and fault tolerance of the control system.

Particular attention is paid to the use of high-level Petri nets as a mathematical tool for modeling and controlling signal transmission processes within UAV communication networks. Petri nets enable accurate formalization of the interactions between swarm agents, taking into account time delays, synchronization, and potential communication failures. The study includes a detailed analysis of several common network topologies used in UAV swarms, such as centralized, decentralized, hierarchical, and mesh structures. For each topology, corresponding high-level Petri net models were developed to simulate coordination dynamics, information flow, and decision-making processes.

Based on simulation and experimental results, the efficiency of the proposed approach was evaluated according to two primary criteria: system simplicity (ease of implementation, minimal configuration requirements) and reliability (stability of communication and coordination under failure conditions). The findings demonstrate that the developed models allow for optimizing the trade-off between scalability and control accuracy. The research provides a foundation for future applications of Petri nets in multi-agent UAV systems, paving the way for more intelligent, adaptive, and self-organizing aerial swarms capable of performing complex missions in dynamic environments.

Keywords: High level Petri nets, drones, signal transmission, topology, swarm systems, fault tolerance.

Стаття надійшла до редакції / Received 11.07.2025

Прийнята до друку / Accepted 14.08.2025

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Сучасні безпілотні авіаційні системи (БПЛА) набувають дедалі більшого поширення в різних сферах людської діяльності, зокрема в цивільних, науково-дослідницьких, комерційних і навіть військових застосуваннях. Їхня здатність виконувати складні завдання, такі як моніторинг територій, доставка вантажів, аерофотозйомка чи координація рятувальних операцій, значною мірою залежить від ефективної взаємодії між окремими апаратними одиницями в межах групи, відомої як рій.

Однією з ключових передумов успішного функціонування таких систем є створення надійної, стійкої та масштабованої системи комунікації між БПЛА у рої. Ефективна передача сигналів у ройових системах має враховувати низку технічних викликів, таких як затримки в передачі даних, можливі відмови обладнання, дублювання повідомлень через нестабільність каналів зв'язку, а також обмежені ресурси енергоживлення, які є критичними для автономних апаратів. Невдала організація комунікаційних процесів може призвести до

серйозних наслідків, зокрема втрати керованості роєм, виникнення колізій між БПЛА або повного невиконання поставлених завдань.

Усе це підкреслює важливість розробки надійних і оптимізованих механізмів передачі сигналів, які здатні забезпечити стабільну роботу рою в динамічних і часто непередбачуваних умовах. У зв'язку з цим виникає потреба у формальному описі та моделюванні процесів передачі сигналів у різних мережних топологіях, що застосовуються в ройових системах.

Для вирішення цього завдання в дослідженні пропонується використання апарату мереж Петрі, який є потужним інструментом для моделювання складних систем. Мережі Петрі дозволяють формально описувати дискретні події, синхронізацію, паралельні процеси та взаємодію компонентів системи. Завдяки своїм властивостям, вони забезпечують не лише створення деталізованих моделей, але й можливість проведення формальної верифікації, що дозволяє перевірити коректність функціонування системи та виявити потенційні проблеми, такі як взаємні блокування чи неоптимальне використання ресурсів.

З наукової точки зору, дослідження спрямоване на поглиблення теоретичних основ моделювання комунікаційних процесів у розподілених багатокомпонентних системах. Воно сприяє розвитку методів, які можуть бути застосовані не лише до роїв БПЛА, але й до інших розподілених систем, таких як мережі IoT (Інтернет речей) чи роботизовані системи.

З практичної точки зору, розроблена модель має високу прикладну цінність. Її можна адаптувати з мінімальними змінами для створення реальних протоколів обміну повідомленнями між БПЛА, що забезпечують ефективну координацію рою в реальних умовах. Така адаптивність робить модель універсальним інструментом для розробників безпілотних систем, які прагнуть забезпечити стабільність і надійність комунікації навіть у складних сценаріях, таких як робота в умовах обмеженого зв'язку чи високої щільності апаратів у рої.

Крім того, запропонований підхід враховує можливість масштабування системи, що є критично важливим для роїв, які можуть складатися як із кількох одиниць, так і з сотень БПЛА. Модель, побудована на основі мереж Петрі, дозволяє гнучко адаптувати топологію комунікаційної мережі до конкретних потреб і умов експлуатації. Наприклад, вона може бути застосована до таких топологій, як зірка, сітка чи ієрархічна структура, кожна з яких має свої переваги та обмеження залежно від поставленого завдання.

У підсумку, дослідження не лише пропонує теоретичну основу для моделювання комунікаційних процесів, але й відкриває шлях до практичного впровадження отриманих результатів у реальних системах. Розроблені моделі та методи можуть бути використані для створення нових стандартів і протоколів, які підвищать ефективність, надійність і безпеку роботи роїв БПЛА в різноманітних сферах застосування.

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Аналіз сучасних наукових досліджень свідчить про значний інтерес до формального моделювання процесів взаємодії в ройових безпілотних авіаційних системах. Особлива увага приділяється застосуванню мереж Петрі для опису поведінки, комунікації та координації безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у рої.

У роботі [1] запропоновано підхід до моделювання поведінки рою з використанням просторово-часових гібридних мереж Петрі. Автори демонструють здатність цього формалізму враховувати дискретні події та безперервні параметри руху кількох БПЛА, а також моделювати багатодронові сценарії з урахуванням синхронізації та часових затримок. Проте недоліком є недостатнє врахування особливостей мережних топологій під час моделювання.

У дослідженні [2] для аналізу процесів інспекції та управління польотами рою використано кольорові мережі Петрі, які дозволяють обробляти різні типи повідомлень і сигнальних подій у межах єдиної моделі. Однак передача сигналів у цій роботі розглядається як безумовна, що обмежує її практичну застосовність. У [3] акцент зроблено на оцінці безпеки польотів і аналізі апаратних відмов, але питання комунікаційних процесів залишилося поза увагою.

Окремий напрям досліджень присвячено комунікаційним топологіям. У [4] проаналізовано стабільність зв'язку в повнозв'язній топології рою БПЛА з урахуванням впливу затримок на ефективність передачі сигналів. Робота [5] зосереджена на безпеці бездротових каналів у mesh-топологіях, підкреслюючи їхню ефективність для обміну даними між БПЛА. У [6] досліджено багаторівневі архітектури, що поєднують різні рівні управління та комунікації. Проте використання стільникових мереж 5G/B5G у цій роботі обмежене через їхню нерівномірну доступність і часткове покриття.

Питання кооперативних місій розглянуто в [7], де мережі Петрі застосовуються для планування та синхронізації посадки БПЛА разом із наземними транспортними засобами. Однак надійність передачі сигналів не була детально досліджена. У [8] автори зосередилися на оптимізації енергоефективності в бездротових мережах, але аналіз стосувався передачі даних між БПЛА та наземними станціями, а не між самими апаратами в рої.

Таким чином, проаналізовані дослідження підтверджують активний інтерес до моделювання комунікаційних процесів у ройових системах БПЛА. Водночас більшість робіт не повною мірою враховують

надійність і особливості передачі сигналів у різних топологіях, що відкриває перспективи для подальших досліджень.

ВИДІЛЕННЯ НЕДОСЛІДЖЕНИХ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Незважаючи на значну кількість досліджень, присвячених моделюванню ройових безпілотних авіаційних систем, низка ключових аспектів залишається недостатньо опрацьованою. Більшість робіт зосереджуються на окремих моделях або специфічних сценаріях, не надаючи комплексного аналізу різних топологій передачі сигналів. Зокрема, бракує глибокого порівняльного аналізу ефективності топологій з точки зору масштабованості, відмовостійкості та енергоефективності.

Крім того, недостатньо уваги приділено інтеграції стохастичних факторів, таких як ймовірність відмови під час передачі сигналу, що є критично важливим для забезпечення надійності ройових систем у реальних умовах. Розробка моделей, які враховуватимуть ці аспекти, може значно підвищити практичну цінність досліджень і сприяти створенню універсальних рішень для координації та комунікації в роях БПЛА.

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Метою статті є порівняльний аналіз поширених мережевих топологій та розробка високорівневих моделей процесів передачі сигналів у ройових безпілотних авіаційних системах із застосуванням апарату мереж Петрі для забезпечення ефективної координації та надійності комунікації.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Надійна система комунікації є критично важливою для забезпечення ефективного виконання колективних завдань роями безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Під час спільного польоту дрони мають не лише синхронізувати свої траєкторії та координувати дії, але й забезпечувати безперервний обмін інформацією щодо їхнього стану, позиції та команд управління. Цей процес ускладнюється динамічною природою ройових систем: кількість апаратів може змінюватися, можливі відмови окремих одиниць, а радіоканали зазнають впливу перешкод і зовнішніх факторів, таких як погодні умови чи електромагнітні завади.

Для формального аналізу та верифікації властивостей різних підходів до передачі сигналів у роях використано апарат мереж Петрі. Цей інструмент забезпечує моделювання дискретних подій, синхронізації та паралельних процесів, що дозволяє створювати точні та перевірені моделі комунікаційних систем. У межах дослідження розроблено моделі для трьох базових топологій роя: mesh, ієрархічної та лінійної (див. рисунок 1). Кожна з цих топологій характеризується унікальним балансом між масштабованістю, надійністю, енергоефективністю та простотою реалізації, що дає змогу оцінити їхню придатність для різних сценаріїв застосування.

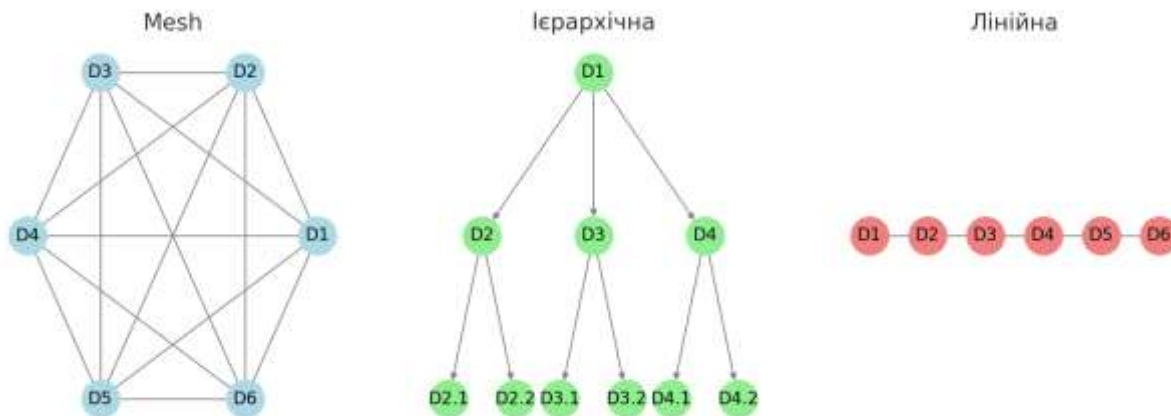


Рис. 1. Можливі мережеві топології рою БПЛА

Для проведення кількісного аналізу ефективності мережевих топологій у ройових системах БПЛА введено низку ключових метрик. Зокрема, однією з основних є **діаметр топології (D)**, який визначає максимальну довжину найкоротшого шляху між будь-якими двома вузлами в мережі. Ця метрика безпосередньо впливає на час поширення сигналу в системі, що є критично важливим для забезпечення швидкої та надійної комунікації. Діаметр топології обчислюється за такою формулою:

$$D(G) = \max_{u,v \in V} d(u, v) \quad (1)$$

Для оцінки ефективності мережевих топологій ройових систем БПЛА введено додаткові метрики. По-друге, **кількість зв'язків (E)** відображає складність реалізації топології та впливає на загальне навантаження мережі. Більша кількість зв'язків підвищує вимоги до апаратного забезпечення та енергоспоживання. По-третє, **ймовірність успішної доставки сигналу (P)** залежить від надійності окремих каналів зв'язку та характеризує стійкість системи до збоїв чи перешкод.

Для **mesh-топології** характерним є мінімальний діаметр, який дорівнює одиниці, оскільки кожен дрон має пряме з'єднання з усіма іншими в рої. Це забезпечує максимальну швидкість передачі сигналів, але може ускладнювати масштабування через значну кількість зв'язків.

$$E(N) = \frac{N(N-1)}{2} \quad (2)$$

У **mesh-топології** надійність передачі сигналів наближається до одиниці навіть за умов часткових відмов завдяки прямому з'єднанню між усіма дронами. Однак масштабованість цієї топології обмежена через квадратичне зростання кількості зв'язків, що підвищує складність реалізації та енергоспоживання при збільшенні розміру рою.

Ієрархічна топологія моделюється у вигляді дерева з глибиною h . Діаметр топології приблизно пропорційний подвоєній висоті дерева, що відображає максимальну відстань між вузлами через ієрархічну структуру. Це забезпечує кращу масштабованість порівняно з mesh-топологією, але може знижувати надійність через залежність від ключових вузлів верхнього рівня.

$$D(N, h) = 2h \quad (3)$$

$$E(N) = N - 1 \quad (4)$$

Дана топологія є добре масштабованою та організованою, але має вразливість до втрати ключових вузлів верхніх рівнів. Ймовірність доставки сигналу визначається успішністю проходження сигналу по рівнях дерева:

$$P(N, h) = p^h, \quad (5)$$

де p – ймовірність успішної передачі через вузол.

Для лінійної топології, де дрони утворюють ланцюг, діаметр і кількість зв'язків вираховується за наступними формулами:

$$D(N) = N - 1 \quad (6)$$

$$E(N) = N - 1 \quad (7)$$

Така структура є найпростішою у реалізації, але характеризується високими затримками при зростанні кількості дронів та низькою відмовостійкістю. Ймовірність успішної доставки сигналу до останнього вузла визначається як:

$$P(N) = p^{N-1} \quad (8)$$

Порівняльний аналіз ключових характеристик мережевих топологій дає змогу теоретично оцінити їхні переваги та недоліки, а також визначити придатність для різних сценаріїв використання в ройових системах безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Основними критеріями оцінки є масштабованість, надійність, енергоефективність і простота реалізації.

Mesh-топологія вирізняється максимальною надійністю завдяки надмірності каналів зв'язку, що забезпечує стабільну передачу сигналів навіть у разі часткових відмов. Однак її масштабованість обмежена через квадратичне зростання кількості зв'язків, що призводить до високого навантаження на мережу та підвищеного енергоспоживання. Ця топологія є оптимальною для роїв із невеликою кількістю БПЛА, що перебувають на малих відстанях один від одного.

Ієрархічна топологія, структурована у вигляді дерева, забезпечує високу організованість і гнучкість при розширенні рою. Вона ефективна для великих систем, але її надійність залежить від стійкості ключових вузлів. Втрата таких вузлів, наприклад лідера підгрупи, вимагає додаткових механізмів для забезпечення безперебійної роботи, таких як алгоритми перепризначення лідера.

Лінійна топологія є найпростішою в реалізації, але характеризується значними затримками сигналу та низькою відмовостійкістю. Вихід із ладу одного БПЛА або помилка в передачі сигналу може повністю порушити комунікацію в ланцюжку, що робить цю топологію менш придатною для складних сценаріїв.

Результати порівняння узагальнено в таблиці 1. Основні критерії — масштабованість, надійність, енергоефективність і простота реалізації — слугують основою для подальшого моделювання процесів передачі сигналів у середовищі мереж Петрі. Це дасть змогу провести практичну перевірку властивостей топологій і розробити рекомендації для їх оптимального використання в ройових системах БПЛА.

Для оцінки надійності мережевих топологій у ройових системах БПЛА застосовано імітаційне моделювання на основі мереж Петрі з використанням бібліотеки Snakes для Python. Ця бібліотека забезпечує врахування стохастичних факторів, таких як ймовірність відмови передачі сигналу, і дозволяє швидко адаптувати моделі до реальних протоколів комунікації без значних змін у коді завдяки використанню виключно Python.

У розроблених моделях кожен БПЛА представлено як вузол мережі Петрі, а процес передачі сигналу змодельовано через переходи (див. рисунок 2) Початкові токени відповідають сигналам, які необхідно поширити по всьому рою. Кожен крок моделювання відображає спрацювання переходу, що відповідає успішній передачі сигналу між вузлами. Для спрощення аналізу ймовірність успішної передачі між вузлами була встановлена однаковою для всіх з'єднань.

Таблиця 1

Топологія	Масштабованість	Надійність	Ефективність	Складність
Mesh	Середня: зі збільшенням кількості дронів кількість зв'язків росте квадратично	Висока: множинні маршрути знижують ризик втрати сигналу	Висока при невеликих масштабах, але падає через перевантаження при великій кількості вузлів	Середня: потребує маршрутизації але легшою за ієрархічну
Ієрархічна	Висока: додаються рівні та групи без значного зростання кількості зв'язків	Середня: відмова лідера чи ключового вузла може порушити роботу підлеглих	Висока: централізоване управління забезпечує швидку трансляцію	Висока: потрібна організація ролей і ієрархії
Лінійна	Низька: із зростанням кількості дронів час трансляції різко збільшується	Низька: відмова одного вузла розриває комунікацію	Низька: сигнал проходить послідовно через усі вузли	Низька: проста структура та легкість реалізації

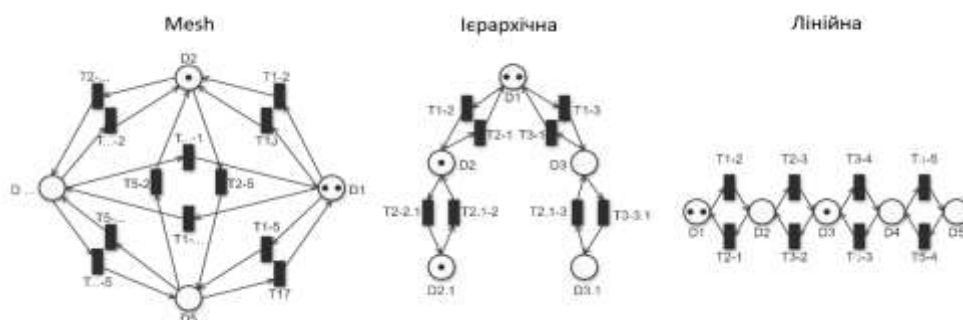


Рис. 2. Мережі Петрі для передачі сигналів у топологіях

Для лінійної топології діаметр мережі прямо пропорційний кількості дронів, оскільки сигнал передається послідовно від першого до останнього БПЛА. Це призводить до значних затримок і зниження відмовостійкості.

Mesh-топологія має найменший діаметр завдяки прямому з'єднанню між усіма парами дронів, що забезпечує високу швидкість передачі та ймовірність успішної трансляції, близьку до одиниці, незалежно від кількості вузлів. Однак це супроводжується високою складністю реалізації через велику кількість зв'язків.

У ієрархічній топології сигнал поширюється від лідера до нижніх рівнів структури. Глибина передачі моделюється як логарифм від кількості вузлів, що відображає зростання висоти дерева при збільшенні розміру рою. Це забезпечує кращу масштабованість, але надійність залежить від стійкості ключових вузлів.

Такий підхід дозволяє оцінити ефективність і надійність топологій у різних сценаріях, а також створює основу для подальшої розробки реальних комунікаційних протоколів для роїв БПЛА.

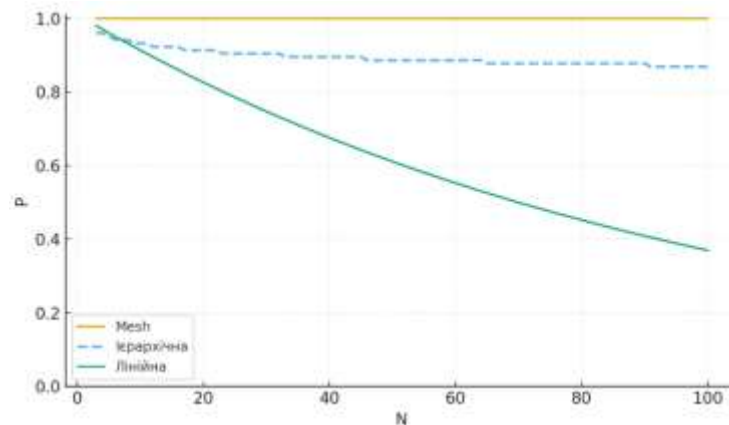


Рис. 3. Ймовірність успішної трансляції сигналу в залежності від кількості БПЛА

Графік відображає залежність ймовірності успішної доставки сигналу (P) до всіх дронів рою від кількості вузлів (N). Результати чітко ілюструють відмінності між трьома основними мережевими топологіями, застосованими в ройових системах безпілотних літальних апаратів (БПЛА), з точки зору надійності, масштабованості та ефективності.

Mesh-топологія забезпечує майже ідеальну надійність передачі сигналів незалежно від розміру рою завдяки прямим з'єднанням між усіма дронами. Така структура дозволяє швидко поширювати сигнали, мінімізуючи затримки та забезпечуючи стійкість до часткових відмов. Однак підтримка цієї топології ускладнена через значну кількість зв'язків, яка зростає квадратично з кількістю вузлів. Це робить її менш ефективною для великих роїв або сценаріїв, де дрони розташовані на значних відстанях, через високі вимоги до енергоспоживання та апаратного забезпечення.

Лінійна топологія вирізняється простотою реалізації, що робить її привабливою для невеликих систем із обмеженими ресурсами. Проте її надійність різко знижується навіть при невеликій кількості дронів, оскільки сигнали передаються послідовно через усі вузли. Відмова будь-якого дрона або збій у передачі сигналу призводить до повного розриву комунікаційного ланцюга, що робить цю топологію вразливою та непридатною для складних або динамічних сценаріїв.

Ієрархічна топологія займає проміжну позицію між двома крайніми варіантами. Її багаторівнева структура забезпечує швидшу доставку сигналів до підлеглих вузлів порівняно з лінійною топологією, що сприяє кращій масштабованості. Однак надійність залежить від стійкості ключових вузлів верхнього рівня, таких як лідери підгруп. Ймовірність успішної доставки сигналу поступово зменшується зі збільшенням кількості дронів, але залишається в межах між показниками mesh- і лінійної топологій, що робить її компромісним рішенням.

Результати моделювання підтверджують теоретичні припущення: **mesh-топологія** гарантує найвищу відмовостійкість, але її складність реалізації обмежує використання у великих роях або на значних відстанях; **лінійна топологія** має найнижчу надійність через послідовний характер передачі сигналів, що робить її придатною лише для простих сценаріїв; **ієрархічна топологія** забезпечує оптимальний баланс між надійністю, масштабованістю та енергоефективністю, що робить її універсальним вибором для різноманітних застосувань ройових систем БПЛА, особливо в умовах динамічних змін або обмежених ресурсів.

Ці висновки створюють основу для подальшого вдосконалення комунікаційних протоколів і вибору оптимальної топології залежно від конкретних вимог до рою, таких як розмір, відстань між дронами та критичність завдань.

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШОГО РОЗВИТКУ У ДАНОМУ НАПРЯМІ

У межах проведеного дослідження проаналізовано особливості передачі сигналів у ройових безпілотних авіаційних системах (БПЛА) із застосуванням апарату мереж Петрі. Розроблено концептуальні моделі для трьох основних мережеских топологій — mesh, ієрархічної та лінійної. Це дозволило формально описати механізми поширення сигналів, ідентифікувати потенційні точки затримок і ризики втрати інформації, а також оцінити переваги й обмеження кожної топології. Результати підтверджують важливість урахування специфіки топологій під час моделювання сценаріїв роботи роїв БПЛА та доцільність використання мереж Петрі для формалізації й верифікації комунікаційних процесів, що забезпечує точний аналіз і перевірку їхньої надійності.

Для подальшого розвитку дослідження пропонується зосередитися на кількох ключових напрямках:

По-перше, для врахування стохастичних факторів необхідно розширити моделі, включивши такі аспекти, як відмови обладнання, перешкоди в каналах зв'язку та варіації в доступності ресурсів (наприклад,

енергії чи обчислювальних потужностей). Це підвищить реалістичність моделей і їхню відповідність реальним умовам експлуатації.

По-друге, інтеграція з іншими моделями, оскільки важливим є поєднання моделей передачі сигналів із суміжними аспектами, такими як алгоритми маршрутизації, планування польотних місій або координація траєкторій. Це сприятиме створенню комплексних рішень для управління роями БПЛА.

У практичному плані результати дослідження можуть стати основою для розробки відмовостійких протоколів зв'язку та створення симуляційних середовищ для тестування роботи роїв у складних умовах, наприклад, за наявності перешкод чи динамічних змін у складі рою. Реалізація цих перспектив сприятиме підвищенню ефективності, надійності та безпеки використання ройових систем БПЛА в різних сферах, зокрема в цивільних, комерційних і науково-дослідницьких застосуваннях.

References

1. Wang, X., Guo, Y., Lu, N., & He, P. (2023). UAV Cluster Behavior Modeling Based on Spatial-Temporal Hybrid Petri Net. *Applied Sciences*, 13(2), 762. <https://doi.org/10.3390/app13020762>
2. A. Fedorova, V. Beliautou, & A. Zimmermann. "Colored Petri Net Modelling and Evaluation of Drone Inspection Methods for Distribution Networks". *Sensors*, vol. 22(9), pp. 3418–3438, 2022 <https://doi.org/10.3390/s22093418>
3. Gonçalves, P., Sobral, J., & Ferreira, L. A. (2017). Unmanned aerial vehicle safety assessment modelling through Petri Nets. *Reliability Engineering & System Safety*, 167, 383–393. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2017.06.021>
4. Zeng, T., Mozaffari, M., Semiari, O., Saad, W., Bennis, M., & Debbah, M. (2018). Wireless communications and control for swarms of cellular-connected UAVs. *arXiv*, <https://doi.org/10.48550/arXiv.1812.00743>
5. Andreoni Lopez, M., Baddeley, M., Lunardi, W. T., Pandey, A., & Giacalone, J.-P. (2021). Towards secure wireless mesh networks for UAV swarm connectivity: Current threats, research, and opportunities. *arXiv (Cornell University)*, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2108.13154>
6. Sekander, S., Tabassum, H., & Hossain, E. (2017). Multi-tier drone architecture for 5G/B5G cellular networks: Challenges, trends, and prospects. *arXiv (Cornell University)*, <https://doi.org/10.48550/arXiv.1711.08407>
7. A. Bertolaso, M. Raciassi, A. Farinelli, R. Muradore, "Using Petri Net Plans for Modeling UAV–UGV Cooperative Landing" *Frontiers in Artificial Intelligence and Applications*, vol. 285, pp.1720–1721, 2016, <https://doi.org/10.3233/978-1-61499-672-9-1720>
8. Qin, H., Zhao, B., Xu, L., & Bai, X. (2021). Petri-Net Based Multi-Objective Optimization in Multi-UAV Aided Large-Scale Wireless Power and Information Transfer Networks. *Remote Sensing*, 13(13), 2611. <https://doi.org/10.3390/rs13132611>