

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-78-41>

УДК 629.8:621.3

ТЕРЕНИК Дмитро

Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»  
[d.terenik@student.csn.khai.edu](mailto:d.terenik@student.csn.khai.edu)

ХАРЧЕНКО Вячеслав

Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»  
<https://orcid.org/0000-0001-5352-077X>  
[v.kharchenko@csn.khai.edu](mailto:v.kharchenko@csn.khai.edu)

## КЛАСИФІКАЦІЯ СТРАТЕГІЙ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЛІТАЮЧОЇ МЕРЕЖІ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КОМУНІКАЦІЙ В УМОВАХ РУЙНУВАНЬ

У статті наведено огляд публікацій за такими напрямками: загальний аналіз галузі БПЛА; аналіз комунікаційних технологій, які реалізуються з використанням БПЛА (літаючих мереж) для різних застосувань; аналіз варіантів розгортання літаючих мереж для забезпечення комунікацій у надзвичайних ситуаціях; аналіз проблем і методів забезпечення надійності (безвідмовності та готовності) літаючих мереж.

Було розроблено класифікацію стратегій розгортання літаючої мережі, яка служить для забезпечення оптико-бездротових комунікацій (LiFi) між джерелами і отримувачами інформації.

Розроблено класифікатор таких стратегій. Визначено класифікаційні ознаки та сформовано множину стратегій розгортання мережі. Надано приклад роботи з класифікатором для побудови стратегій за заданими критеріями.

Запропоновано кодування стратегій.

Ключові слова: рій БПЛА, стратегія розгортання, забезпечення надійності, літаюча LiFi мережа, класифікаційна ознака.

TERENYK Dmytro, KHARCHENKO Vyacheslav  
National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine

## CLASSIFICATION OF RELIABILITY STRATEGIES FOR FLYING NETWORKS TO ENSURE COMMUNICATIONS IN DISRUPTION CONDITIONS

The use of UAVs (unmanned aerial vehicles) is becoming more and more intensive in various spheres of human activity. This can be traced even by the dynamics of the number of publications on the use of UAVs, which is steadily increasing every year. The development of unmanned technologies creates new opportunities for various applications. By reducing risks for users, these technologies become even more relevant and almost indispensable during natural disasters such as earthquakes, floods, hurricanes, man-made accidents, as well as war, making many processes safer and more efficient.

Flying networks based on UAVs can provide communication in such conditions, which is critical for coordinating rescue operations and ensuring people's safety. In war zones and major disasters, traditional communication networks can be destroyed or damaged. Flying networks can quickly re-establish communication between military units, which is crucial for operational management and strategic actions. In remote or hard-to-reach areas where there is no developed infrastructure, flying networks can become the only way to provide communications. This is especially important for maintaining communications at critical facilities that are part of mining infrastructure or remote scientific stations. The use of flying networks can be a more cost-effective and fast way of deploying communication infrastructure compared to traditional ones and does not require the construction of towers and the laying of cables.

The article provides a review of publications in the following areas: general analysis of the UAV industry; analysis of communication technologies implemented using UAVs (flying networks) for various applications; analysis of deployment options for flying networks to ensure communications in emergency situations; and analysis of issues and methods for ensuring the reliability (fault tolerance and readiness) of flying networks.

A classification of deployment strategies for flying networks has been developed to ensure optical wireless communications (LiFi) between sources and receivers of information.

A classifier for such strategies has been created. Classification features have been identified, and a set of network deployment strategies has been formed. An example of working with the classifier is provided to build strategies based on given criteria.

A coding scheme for the strategies is proposed.

Keywords: UAV swarm, deployment strategy, reliability insuring, flying LiFi network, classification feature.

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

Використання БПЛА (безпілотних літальних апаратів) стає все більш інтенсивним у різноманітних сферах діяльності людей. Це можна відстежити навіть за динамікою кількості публікацій про застосування БПЛА [1], що невпинно зростає з кожним роком. Розвиток безпілотних технологій створює нові можливості для різних застосувань. Завдяки зниженню ризиків для користувачів ці технології стають ще більш актуальними і майже безальтернативними під час природних катастроф, таких як землетруси, повені, урагани, техногенних аварій, а також воєнних дій, роблячи багато процесів безпечнішими та ефективнішими.

Літаючі мережі на базі БПЛА [2] можуть забезпечити зв'язок у таких умовах, що є критично важливим для координації рятувальних операцій та забезпечення безпеки людей. У зонах бойових дій та великих аварій традиційні комунікаційні мережі можуть бути зруйновані або пошкоджені. Літаючі мережі можуть швидко відновлювати зв'язок між військовими підрозділами, що є вирішальним для оперативного управління та стратегічних дій. У віддалених або важкодоступних районах, де немає розвинутої інфраструктури, літаючі мережі можуть стати єдиним способом забезпечення комунікацій. Це особливо важливо для підтримки зв'язку на важливих об'єктах, що є частиною інфраструктури видобутку корисних копалин або віддалених наукових станцій. Використання літаючих мереж може бути більш економічно вигідним та швидким способом розгортання комунікаційної інфраструктури у порівнянні з традиційними і не потребують будівництва веж та прокладки кабелів.

LiFi (Light Fidelity) мережі пропонують значні переваги для комунікації, особливо у контексті БПЛА. LiFi – це метод передачі даних, який використовує світлодіоди (LED) для надсилання світлових сигналів [5]. LiFi може забезпечити передачу даних на швидкостях, значно вищих за традиційні Wi-Fi мережі, що є критично важливим для швидкого обміну інформацією між БПЛА. Використання світла для передачі даних виключає вплив електромагнітних завад. Оскільки світло не проходить через фізичні перешкоди, такі як стіни, будівлі або інші об'єкти, LiFi забезпечує підвищений рівень безпеки, оскільки сигнал не може бути легко перехоплений або зламаний ззовні. Використання існуючих світлодіодних освітлювальних систем для передачі даних дозволяє знизити енергоспоживання та об'єднати функції освітлення та зв'язку. Отже, застосування LiFi у поєднанні з БПЛА відкриває нові горизонти для створення адаптивних мереж, що швидко розгортаються і можуть бути особливо корисними у надзвичайних ситуаціях.

Проте, під час використання літаючих мереж ми можемо стикатися з різноманітними перешкодами [3, 4, 22, 23, 24], які потрібно враховувати. Фізичні перешкоди включають вплив погодних умов, таких як сильний вітер, дощ, сніг та екстремальні температури, які можуть негативно вплинути на роботу БПЛА. Крім того, складний рельєф місцевості, густі ліси, високі будівлі та інші фізичні об'єкти можуть створювати труднощі для навігації та зв'язку. Інформаційні перешкоди включають електромагнітні завади, які можуть спричинити збої у передачі даних та управлінні БПЛА. Перевантаження радіочастотного спектра та навмисні перешкоди (джемінг) можуть значно ускладнити виконання завдань.

З огляду на такі складні умови, надійність використання літаючих мереж стає критично важливою. Дослідження [30] підкреслює необхідність систематизації та розвитку підходів до забезпечення надійності для успішного функціонування літаючих мереж у складних і непередбачуваних умовах. Висока надійність забезпечує їх автономність та здатність виконувати завдання без постійного втручання людини. Це означає, що БПЛА повинні бути здатними самостійно орієнтуватися в складних умовах, адаптуватися до змінних обставин та вчасно реагувати на виникнення непередбачуваних ситуацій. Висока надійність пристроїв є запорукою успішного виконання місії та мінімізації ризиків для користувачів і навколишнього середовища.

Зважаючи на автономність БПЛА, важливо забезпечити стійкість їхніх систем до відмов та можливість швидкого відновлення функціональності у разі виникнення проблем. Це включає розроблення надійних алгоритмів та засобів керування, резервування критичних компонентів та впровадження систем самодіагностування для виявлення та усунення несправностей у реальному часі.

Отже, забезпечення надійності літаючих мереж є актуальним для підтримки зв'язку в умовах руйнувань, де традиційна інфраструктура не може ефективно функціонувати або швидко відновитися.

### АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Огляд публікацій за визначеною тематикою проведено за такими напрямками

- загальний аналіз галузі БПЛА;
- аналіз комунікаційних технологій, які реалізуються з використанням БПЛА (літаючих мереж) для різних застосувань;
- аналіз варіантів розгортання літаючих мереж для забезпечення комунікацій у надзвичайних ситуаціях;
- аналіз проблем і методів забезпечення надійності (безвідмовності і готовності) літаючих мереж.

Загальний аналіз галузі безпілотних літальних апаратів (БПЛА) охоплює різні аспекти їх розвитку, застосування та інновацій. В цій категорії розглянуті публікації, що надають огляд поточного стану галузі, включаючи технічні досягнення, тенденції та майбутні перспективи. Відзначено основні напрямки використання БПЛА [1] в архітектурі та урбанізмі, підкреслено важливість систематичного та бібліометричного аналізу для оцінки наукового прогресу. Надано загальний огляд останніх досягнень у сфері БПЛА [2, 3], зокрема їхніх технічних можливостей та застосувань. Показано останні тенденції у розвитку БПЛА, включаючи нові технології та інновації. Особливу увагу приділено досягненням у напрямку автономності БПЛА, що дозволяє виконувати місії з мінімальною участю людини. Наприклад, у статті [4] надано детальний огляд сучасних методів і технологій для забезпечення автономної навігації та безпечного

функціонування БПЛА, зокрема розглянуто питання планування траєкторій, уникнення перешкод, локалізація та картографування, використання різних алгоритмів управління.

Таблиця 1

**Структуровані списки публікацій за напрямками**

Напрямок (тематичний)	Статті
Загальний аналіз галузі БПЛА	1, 2, 3, 4
Аналіз комунікаційних технологій, які реалізуються з використанням БПЛА (літаючих мереж) для різних застосувань	5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13
Аналіз варіантів розгортання літаючих мереж БПЛА для забезпечення комунікацій у надзвичайних ситуаціях	14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24
Аналіз проблем і методів забезпечення надійності (безвідмовності і готовності) літаючих мереж БПЛА	25, 26, 27, 28, 29, 30

Проведено дослідження комунікаційних технологій, що використовуються в літаючих мережах, та їх застосування в різних галузях. Розглянуто дослідження LiFi мереж [5] та їхніх відкритих питань, застосувань та майбутніх напрямків розвитку. Детально описані характеристики літаючих мереж (FANETs) [6, 7], їхні застосування та бездротові технології. Описано інтеграцію FANETs з технологіями, такими як IoT, віртуальна реальність, хмарні обчислення. Розглянуто архітектури комунікацій та маршрутних протоколів для FANETs [8]. Розглянуто використання БПЛА для збору та обробки даних від сенсорів на землі, що розташовані в межах фабрики [9]. У цьому дослідженні пропонується новий онлайн-фреймворк, який дозволяє БПЛА розподіляти обчислювальні завдання між сусідніми БПЛА, що діють як обчислювальні вузли, перш ніж основний БПЛА прибуде до місця призначення. Стаття [10] присвячена використанню безпілотних літальних апаратів (БПЛА) для забезпечення мережевих обчислень на периферії (edge computing) з високою надійністю та низькою затримкою. Застосовується підхід цифрового двійника (Digital Twin) для оптимізації роботи таких мереж. У статті [11] розглянуто переваги та недоліки різноманітних методів управління роєм (централізовані методи, децентралізовані методи, консенсусні методи, інтелектуальні методи). У статті [12] продемонстровано приклади застосування БПЛА для збору даних з наземних сенсорів, рятувальних операцій та моніторингу. Описано методи оптимізації, які включають: використання генетичних алгоритмів та алгоритмів рою часток для планування маршрутів, розробка методів для зниження енергоспоживання БПЛА шляхом оптимізації режимів роботи сенсорів та комунікаційних модулів, застосування алгоритмів машинного навчання для прогнозування та оптимізації параметрів польоту в реальному часі. Стаття [13] зосереджується на розробці та впровадженні алгоритмів навігації для мережі безпілотних літальних апаратів (БПЛА) для моніторингу меж зони рухомої екологічної катастрофи. Основна мета полягає у забезпеченні безперервного моніторингу найшвидших сегментів рухомої межі зони катастрофи. Запропоновані алгоритми передбачають обмін даними між БПЛА для координації їх дій та забезпечення ефективного моніторингу.

Розглянуто варіанти розгортання літаючих мереж для забезпечення ефективних комунікацій у надзвичайних ситуаціях, таких як стихійні лиха чи аварійні події. Розглянуто методи оптимізації розгортання декількох безпілотних літальних апаратів (БПЛА) [14] для максимізації пропускну здатності у присутності перешкод, що є ключовим при розгортанні мереж в умовах руйнувань. Стаття [15] зосереджена на використанні мереж із затримкою передачі (DTN) для підтримки літаючих ad-hoc мереж (FANET). Вона розглядає архітектури, моделювання та аналітичні підходи, які дозволяють поліпшити зв'язок між безпілотними літальними апаратами (БПЛА) в умовах, коли існують значні затримки передачі даних, що є важливим для забезпечення надійності зв'язку в умовах надзвичайних ситуацій. Стаття [16] присвячена оптимальному розподілу ресурсів у системах безпілотних літальних апаратів (БПЛА) для забезпечення бездротової передачі даних та енергії в режимі реального часу, при надзвичайних ситуаціях. Описано використання БПЛА як релейного вузла D2D (Device-to-Device) для передачі інформації та енергії між пристроями. Розроблено алгоритму для реального часу, що максимізує енергоефективність, оптимізуючи час збору енергії та контроль потужності передачі. У статті [17] пропонується групувати користувачів (алгоритм K-means) в зоні лиха у кластери на основі їхнього місцезнаходження. Щоб оптимізувати розподіл ресурсів, зменшуючи відстань між БПЛА та користувачами в кожному кластері, що покращує ефективність зв'язку та зменшує затримки. Алгоритми в реальному часі коригують розташування БПЛА у відповідь на зміну умов та потреб користувачів. Стаття [18] присвячена розробці методів оптимізації планування маршрутів та часу виконання збору даних для безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у зв'язку з надзвичайними ситуаціями (алгоритм генетичної оптимізації, метод роєння частинок,

метод гілок і меж, жадібні алгоритми). Публікація [19] досліджує широкий спектр аспектів, пов'язаних з використанням безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у бездротових комунікаційних мережах. БПЛА розглядаються як перспективне рішення для розширення покриття мереж 5G та подальших поколінь. Вони можуть служити макро базовими станціями, реле станціями, малими комірками або рухомими агрегаторами. Основна проблема полягає в ефективному розгортанні БПЛА та управлінні ресурсами мережі. Розглянуто стратегію розміщення на основі попиту (Demand-based Deployment), коли БПЛА розміщуються в залежності від поточних вимог до мережі, таких як навантаження або концентрація користувачів. Це дозволяє оптимально використовувати ресурси, надаючи покриття в областях з високим попитом. Розглянуто стратегію розміщення на основі покриття (Coverage-based Deployment), коли БПЛА розміщуються таким чином, щоб забезпечити максимальне покриття території. Це важливо в сценаріях, де необхідно покрити великі площі з мінімальною кількістю БПЛА. Розглянуто стратегію розміщення на основі ресурсів (Resource-based Deployment). Ця стратегія фокусується на оптимальному розміщенні БПЛА для ефективного використання ресурсів, таких як енергія або частотний спектр. Розглянуто різноманітні стратегії траєкторій БПЛА (статичні траєкторії (Static Trajectories), динамічні траєкторії (Dynamic Trajectories), оптимізація траєкторій (Trajectory Optimization), спільні траєкторії (Cooperative Trajectories)). Публікація [20] є систематичним оглядом існуючих алгоритмів планування траєкторій для безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у тривимірному (3D) середовищі. Вона охоплює різні методи та підходи до оптимізації траєкторій, враховуючи реальні сценарії, де БПЛА можуть діяти як базові станції, реле станції або автономні пристрої для забезпечення бездротового зв'язку. Зазвичай цивільні безпілотні літальні апарати страждають від обмеження зв'язку прямої видимості, але у статті [21] була розглянута високогірна літальна платформа, яка діє як ретранслятор сигналу. В статті [22, 23] розроблено методологію та алгоритми використання літаючих мереж для забезпечення LiFi комунікацій в умовах руйнувань. Алгоритми “правого і лівого кутів” та “керованого водоспаду” забезпечують різні варіанти прокладання маршрутів, якими розгортається літаюча мережа, і детально досліджуються та порівнюються за показниками кількості БПЛА для забезпечення комунікацій. Робота [24] описує загальну схему планування, розгортання і забезпечення надійності, а також програмні засоби системи підтримки прийняття рішень щодо розгортання літаючих мереж для забезпечення LiFi комунікацій в умовах руйнувань. Зазначимо, що стратегії підтримки надійності мереж детально не розглядаються і потребують подальшої систематизації та розвитку.

Проаналізовано проблеми надійності літаючих мереж та методів, що застосовуються для забезпечення їхньої безвідмовності та готовності. У статті [25] розглядається використання літаючих сенсорних мереж (FSNets) і літаючих крайових мереж (FENets) в системах передової повітряної мобільності (AAM) для моніторингу міських комплексних об'єктів. Розглянуто різні методи резервування для підвищення надійності системи, включаючи дублювання сенсорів та крайових вузлів, використання гібридних мереж (інтеграція з іншими типами мереж, що забезпечує резервний канал зв'язку і передачі даних), динамічне перерозподілення задач. Вивчено впливу експлуатаційних умов на знос та деградацію компонентів. Розглянуто стратегії відновлення функціональності системи після часткових відмов та підтримання її роботи в критичних ситуаціях. Стаття [26] досліджує стійкість електричної підтримки в ролях безпілотних літальних апаратів (БПЛА) під час спеціальних місій. Основна увага приділяється управлінню батареями та стратегіям динамічного розподілу ресурсів для забезпечення безперервної роботи та оптимізації використання ресурсів. Визначається ймовірність того, що батарея розрядиться під час виконання місії, що може призвести до відмови БПЛА. Цей показник критичний для оцінки стійкості системи. Аналізуються умови, за яких ймовірність відмови батареї стає неприйнятно високою. Аналізується вплив різних режимів роботи БПЛА (наприклад, активний політ, режим очікування, дозарядження) на споживання енергії та стійкість системи. На основі аналізу можна оптимізувати режими роботи для мінімізації ймовірності відмови та максимізації часу безперервної роботи. У статті [27] розглянуто використання реконфігурованих інтелектуальних поверхонь (RIS), що може значно підвищити пропускну здатність та енергоефективність БПЛА. Стаття [28] зосереджується на створенні безпечної платформи для інтеграції безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у екосистему Інтернету речей (IoT). Описані методи дозволяють забезпечити безперебійність роботи системи, захистити її від зовнішніх загроз і підвищити рівень безвідмовності та готовності до виконання завдань в умовах підвищеної небезпеки. Публікація [29] робить значний внесок у розуміння методів забезпечення надійності та готовності БПЛА через впровадження сучасних алгоритмів глибокого навчання та автономного прийняття рішень. Ці методи сприяють підвищенню безвідмовності системи, знижують залежність від людського фактора і забезпечують готовність до виконання складних бойових завдань в непередбачуваних умовах.

Ключовою роботою, на яку спираються автори даного дослідження, є стаття [30], де описано моделі забезпечення надійності літаючих мереж впродовж забезпечення LiFi комунікацій в умовах руйнувань. При цьому надано аналіз фактично однієї стратегії, коли забезпечується випереджувальне заміщення основного рою БПЛА резервним. Отже важливо обґрунтувати можливі варіанти таких стратегій з огляду на вимоги та обмеження системи, яка об'єднує власне БПЛА і відповідний комплекс обслуговування.

Проведений аналіз показав, що галузь безпілотних літальних апаратів активно розвивається, охоплюючи різні сфери застосування від архітектури до промисловості та надзвичайних ситуацій. Різноманітність комунікаційних технологій та методів забезпечення надійності дозволяє розширювати функціональні можливості БПЛА, роблячи їх незамінним інструментом у багатьох галузях. Стосовно рішень, які описано для використання літаючих мереж для забезпечення LiFi комунікацій в умовах руйнувань, слід зазначити наступне:

- питання надійності таких мереж в умовах обмеженого часу і ресурсів розглянуто точково і потребують системного дослідження;
- стратегії підтримки надійності (об'єм резервування, способи доставки і заміщення тощо) та автономності не обґрунтовано з урахуванням різних класифікаційних ознак;
- показники, критерії та алгоритми вибору стратегій та їх параметрів мають бути розроблено та досліджено.

### Узагальнена модель досліджуваної системи

Узагальнена модель системи, яка досліджується (рисунок 1), складається з рою літаючих БПЛА, які забезпечують LiFi комунікацію для передачі даних від джерела А (вимірювальні датчики, наприклад, для контролю рівня радіації в зоні реактора) до приймача в точці В (отримувач даних, наприклад, кризового центру, де інформація збирається і аналізується). Вона базується на схемах, описаних в [22, 23, 24, 30]. Рій комунікаційних БПЛА початково розташовані в точці С (депо або станція, де розміщуються апарати і здійснюється керування мережею). У просторі розміщення БПЛА є різноманітні, хаотично розташовані статичні фізичні перешкоди, які необхідно оминати, для того, щоб забезпечити пряму видимість між сусідніми БПЛА. На рисунках 2-5 зображено деякі варіанти розгортання літаючої LiFi мережі БПЛА в умовах руйнувань.

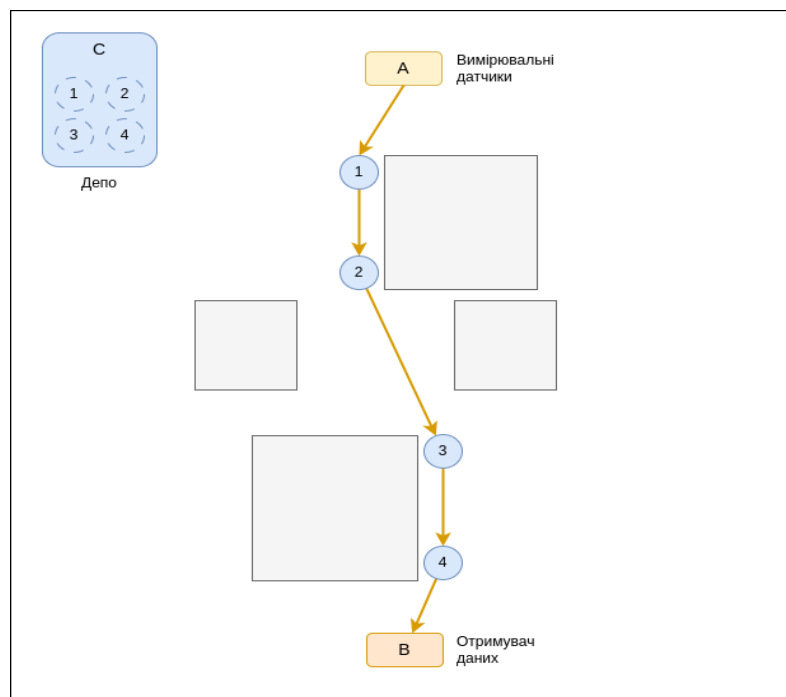


Рис. 1. Узагальнена модель системи - літаючої мережі, яка досліджується

### МЕТА І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою дослідження є розроблення класифікації стратегій розгортання літаючої комунікаційної мережі БПЛА в умовах руйнувань, що дозволить в подальшому сформулювати рекомендації щодо вибору стратегій розгортання мережі БПЛА за визначеним критерієм, наприклад, для забезпечення необхідної надійності системи при мінімальних витратах. Стаття базується і продовжує дослідження, які опубліковано в [14, 15, 19], де сформована ідея і розроблено алгоритми для побудови, розгортання, траєкторії переміщення і забезпечення надійності літаючих мереж для забезпечення комунікацій в умовах руйнувань.

Щоб досягти цієї мети, необхідно виконати наступні завдання:

- визначити та класифікувати стратегії розгортання мережі БПЛА за допомогою класифікаційно-множинного підходу;

- сформулювати принципи та розробити алгоритм вибору оптимальної стратегії розгортання мережі БПЛА для забезпечення надійності системи;
  - проаналізувати стратегії розгортання забезпечення надійності мережі БПЛА за сформульованими принципами та алгоритмами;
  - надати рекомендації щодо вибору оптимальних стратегій розгортання мережі БПЛА.
- В рамках даної роботи обмежимося задачею класифікації стратегій розгортання мережі БПЛА.

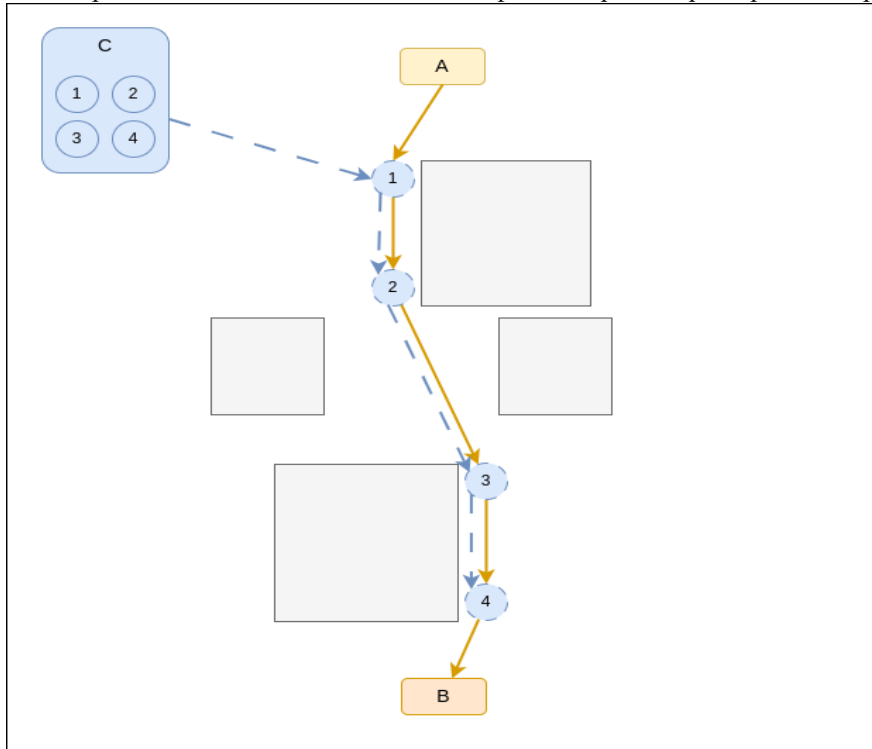


Рис. 2. Розгортання літаючої системи без використання БПЛА-носія (перша стартова точка)

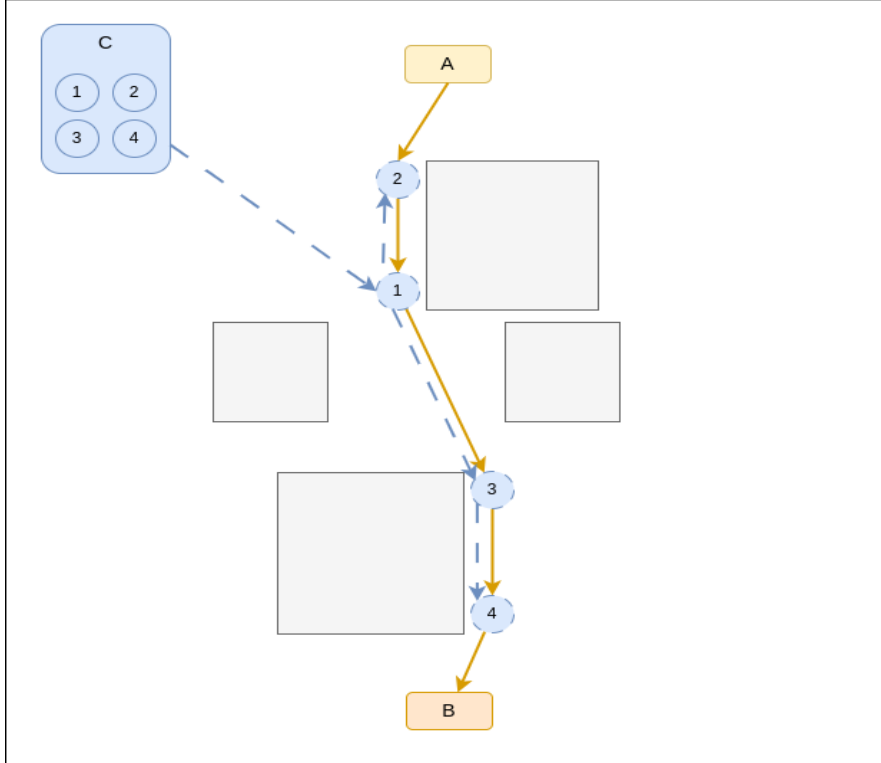


Рис. 3. Розгортання літаючої системи без використання БПЛА-носія (середня стартова точка)

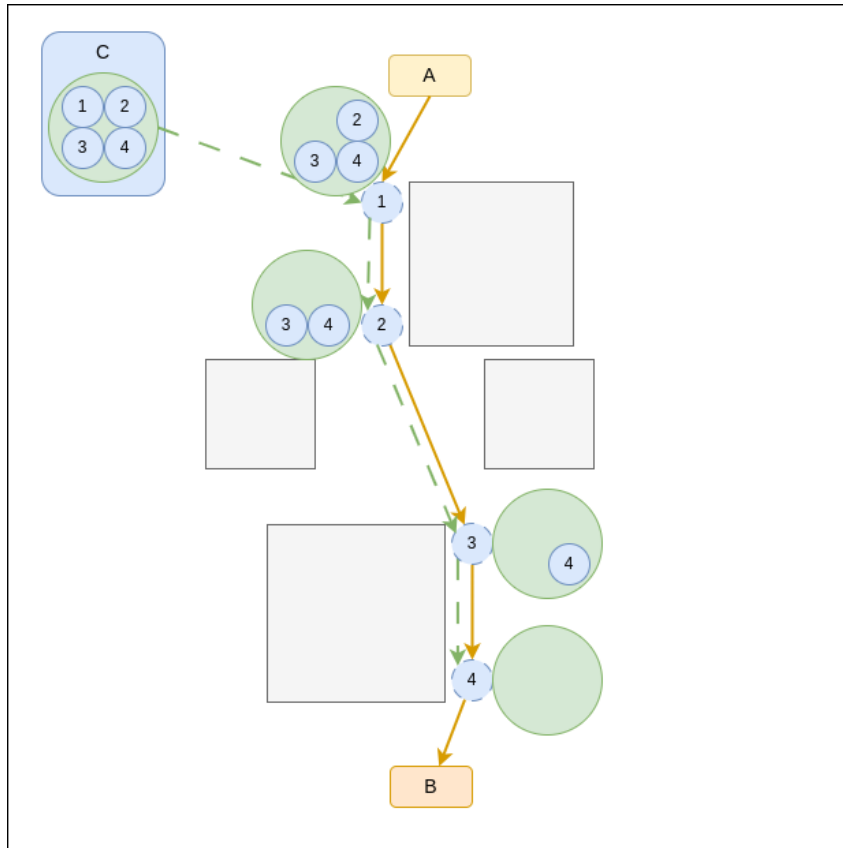


Рис. 4. Розгортання літаючої системи з використанням одного БПЛА-носія (перша стартова точка)

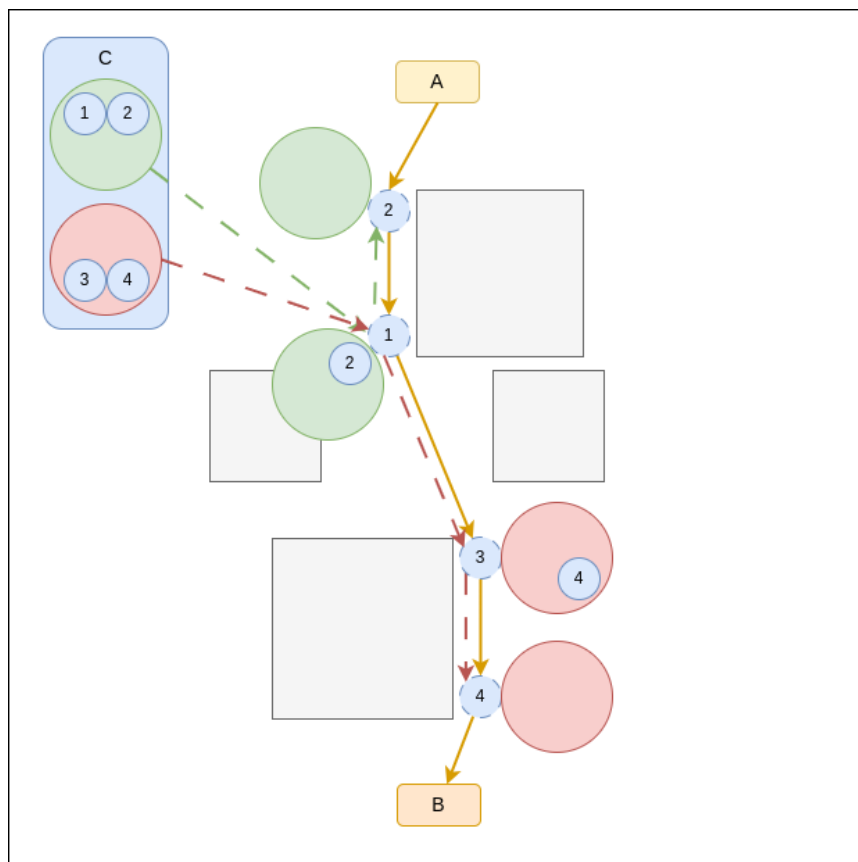


Рис. 5. Розгортання літаючої системи з використанням декількох БПЛА-носіїв (середня стартова точка)

## МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для вирішення задачі класифікації застосуємо класифікаційно-множинний підхід, що передбачає систематичне розділення та групування об'єктів дослідження за певними ознаками для визначення множини стратегій і методів. У контексті дослідження надійності та ефективності комунікаційних мереж з використанням БПЛА, цей підхід дозволяє визначити різні стратегії розгортання мережі, враховуючи різноманітні умови та фактори впливу, для подальшої оцінки та порівняння надійності таких систем.

Етапи дослідження є наступними:

- Класифікація стратегій розгортання
  - Аналіз вимог до мережі
  - Визначення класифікаційних ознак
- Формування множини стратегій розгортання
  - Комбінація різних класифікаційних ознак для формування множини можливих стратегій розгортання
  - Фільтрація отриманої множини з урахуванням різноманітних обмежень системи

### Класифікація стратегій розгортання

На основі аналізу предметної області [22] визначено шість ознак для класифікації стратегій розгортання мереж з використанням БПЛА. Розмістимо ці ознаки в порядку зростання важливості та згрупуємо їх за можливістю. Також запропоновано присвоїти кожному значенню ознаки певний код, який буде використовуватися для ідентифікації стратегії розгортання. Отримаємо наступні групи ознак:

Комунікаційні ознаки:

1. Можливість переривання зв'язку
  - Переривання неприпустиме (код: ПН)
  - Переривання припустиме та задане (код: ПП)

Надійнісні ознаки:

2. Резервування системи
  - Без Резервування (код: БР)
  - З Резервуванням
    - i. Ціла кратність (код: РЦ)
    - ii. Дробова кратність (код: РД)
3. Метод резервування:
  - Позмінне резервування: Заміна компонентів або БПЛА здійснюється за графіком (код: ПР).
  - Резервування за потребою: Заміна компонентів або БПЛА здійснюється в разі виникнення необхідності (код: РП)

Архітектурні ознаки:

4. Зміна розташування перешкод
  - Стаціонарні перешкоди: Розташування перешкод незмінне (код: СП).
  - Динамічні перешкоди: Розташування перешкод може змінюватися (код: ДП).
5. Спосіб доставки БПЛА:
  - Без використання БПЛА-носія матки (код: БМ)
  - З використанням БПЛА-носія матки
    - i. Один БПЛА-носій (код: МО)
    - ii. Декілька БПЛА-носіїв (код: МД)
6. Тип стартової точки:
  - Перша точка маршруту (код: ПТ)
  - Середня точка маршруту (код: СТ)

### Формування множини стратегій розгортання

Представимо класифікацію стратегій розгортання мережі БПЛА у вигляді рисунка 6 з двома стовпчиками: ліворуч ознаки класифікації, праворуч - сутності (варіанти стратегій). Ознаки класифікації можуть бути незалежними або залежними. Також ознаки можуть мати свої підознаки і утворювати ієрархію. Отже ця класифікаційна структура є фасетно-ієрархічною. Ця структура полегшує адаптацію класифікації до нових вимог і дозволяє легко додавати нові ознаки або варіанти стратегій без порушення загальної логіки класифікації.

Пропонується кодування стратегії за схемою (1):

$$\{\text{Можливість переривання зв'язку}\} / \{\text{Резервування}\} - \{\text{Метод резервування}\} / \{\text{Зміна розташування перешкод}\} - \{\text{Спосіб доставки БПЛА}\} - \{\text{Тип стартової точки}\} \quad (1)$$



Запропоноване кодування складається з трьох блоків у наступній послідовності: комунікаційні ознаки, надійнісні ознаки, архітектурні ознаки. За результатами аналізу класифікатора сформуємо множину можливих стратегій, яка може бути сформована як декартовий добуток підмножин сутностей за кожною ознакою.

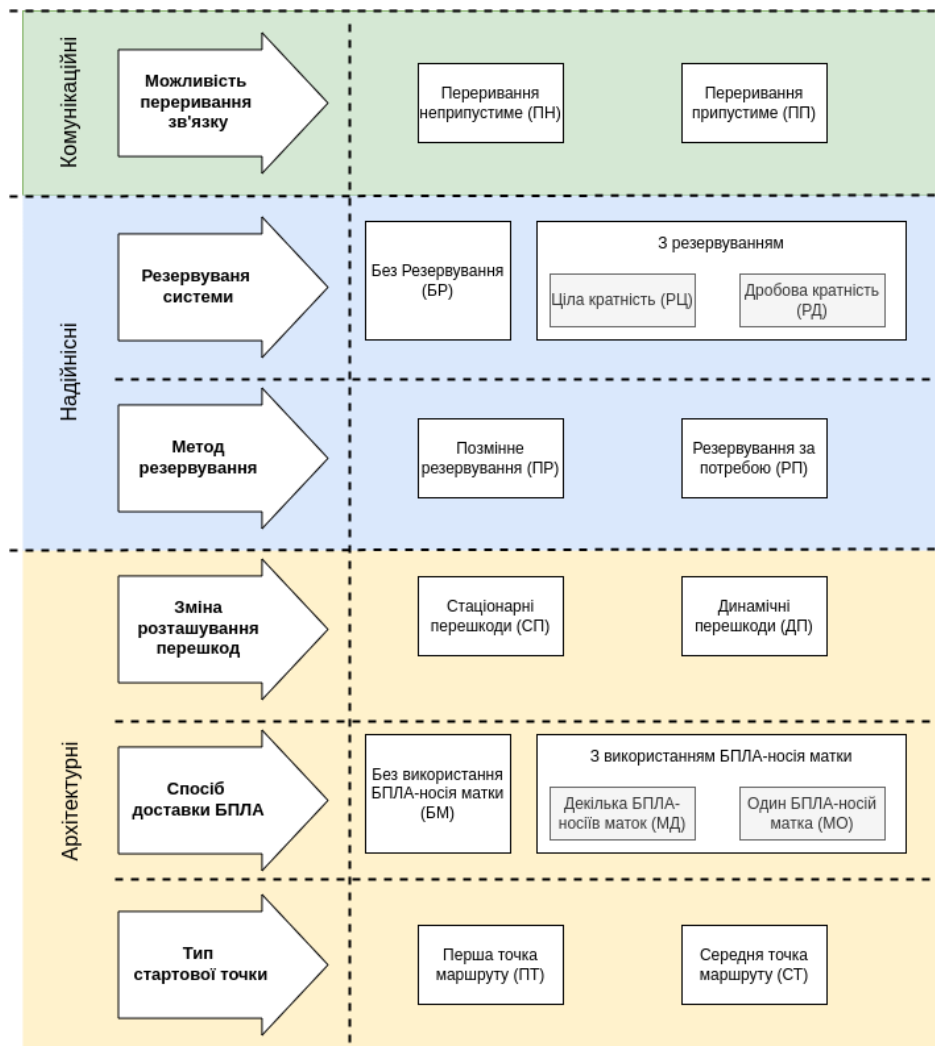


Рис. 6. Класифікатор стратегій розгортання мережі БПЛА

Розглянемо комунікаційні ознаки та сформуємо множину можливих стратегій за результатами роботи з класифікатором.

Можливі значення ознак:

- Можливість переривання зв'язку (ПН, ПП).

Комунікаційні ознаки зараз включають лише одну ознаку “можливість переривання зв'язку”, тож множина стратегій буде обмежена лише двома варіантами. Це означає, що всі можливі стратегії розгортання мереж з використанням БПЛА будуть залежати від цих двох варіантів комунікаційних ознак.

Розглянемо ознаки надійності та сформуємо множину можливих стратегій за результатами роботи з класифікатором.

Застосуємо декартовий добуток для всіх ознак надійності та приберемо комбінації з урахуванням обмежень. Можливі значення ознак: резервування системи (БР, РЦ, РД); метод резервування (ПР, РП). Декартовий добуток цих множин надається у вигляді списку всіх можливих комбінацій.

Маємо дві залежні ознаки: “резервування системи” та “метод резервування”. Резервування системи має три стани: “резервування цілої кратності”, “резервування дробової кратності”, і “без резервування”. При цьому стратегії “без резервування” виключають використання ознаки “методу резервування”. Методу резервування також залежить від кратності резервування. При “дробовій кратності” позмінне резервування стає неафективним, тому що дробова кратність означає, що резервні ресурси розподіляються нерівномірно або частково, що ускладнює ефективне відновлення системи. Після фільтрації декартового добутку отримуємо множину стратегій по ознакам надійності що включає 4 комбінації:

1. БР;
2. РЦ-ПР;
3. РЦ-РП;
4. РД-РП.

Розглянемо архітектурні ознаки та сформуємо множину можливих стратегій за результатами роботи з класифікатором. Застосуємо декартовий добуток для всіх архітектурних ознак та приберемо комбінації з урахуванням обмежень:

- зміна розташування перешкод (СП, ДП);
- спосіб доставки БПЛА (БМ, МО, МД);
- тип стартової точки (ПТ, СТ).

Декартовий добуток цих множин виражається у вигляді списку всіх можливих комбінацій.

Використання одного БПЛА-носія матки робить неефективними стратегії з центральною стартовою точкою, оскільки БПЛА-носію доведеться проходити деякі частини маршруту декілька разів. Це значно знижує ефективність і продуктивність системи, оскільки збільшується час та ресурси, необхідні для виконання завдань.

Використання декількох БПЛА-носіїв робить неефективними стратегії з першою стартовою точкою, оскільки всім додатковим БПЛА-носіям доведеться проходити ті ж самі початкові ділянки маршруту, що і першому БПЛА-носію.

Таблиця 2

**Множини стратегій розгортання комунікаційної мережі БПЛА**

Множина стратегій розгортання по ознакам надійності	Множина стратегій розгортання по архітектурним ознакам	Остаточна множина стратегій розгортання	
		Переривання неприпустиме (ПН)	Переривання припустиме (ПП)
1. БР 2. РЦ-ПР 3. РЦ-РП 4. РД-РП	1. СП-БМ-ПТ 2. СП-БМ-СТ 3. СП-МО-ПТ 4. СП-МД-СТ 5. ДП-БМ-ПТ 6. ДП-БМ-СТ 7. ДП-МО-ПТ	1. ПН/РЦ-ПР/СП-БМ-ПТ 2. ПН/РЦ-ПР/СП-БМ-СТ 3. ПН/РЦ-ПР/СП-МО-ПТ 4. ПН/РЦ-ПР/СП-МД-СТ 5. ПН/РЦ-ПР/ДП-БМ-ПТ 6. ПН/РЦ-ПР/ДП-БМ-СТ 7. ПН/РЦ-ПР/ДП-МО-ПТ 8. ПН/РЦ-ПР/ДП-МД-СТ 9. ПН/РЦ-РП/СП-БМ-ПТ 10. ПН/РЦ-РП/СП-БМ-СТ 11. ПН/РЦ-РП/СП-МО-ПТ 12. ПН/РЦ-РП/СП-МД-СТ 13. ПН/РЦ-РП/ДП-БМ-ПТ 14. ПН/РЦ-РП/ДП-БМ-СТ 15. ПН/РЦ-РП/ДП-МО-ПТ 16. ПН/РЦ-РП/ДП-МД-СТ 17. ПН/РД-РП/СП-БМ-ПТ 18. ПН/РД-РП/СП-БМ-СТ 19. ПН/РД-РП/СП-МО-ПТ 20. ПН/РД-РП/СП-МД-СТ 21. ПН/РД-РП/ДП-БМ-ПТ 22. ПН/РД-РП/ДП-БМ-СТ 23. ПН/РД-РП/ДП-МО-ПТ 24. ПН/РД-РП/ДП-МД-СТ	1. ПП/БР/СП-БМ-ПТ 2. ПП/БР/СП-БМ-СТ 3. ПП/БР/СП-МО-ПТ 4. ПП/БР/СП-МД-СТ 5. ПП/БР/ДП-БМ-ПТ 6. ПП/БР/ДП-БМ-СТ 7. ПП/БР/ДП-МО-ПТ 8. ПП/БР/ДП-МД-СТ 9. ПП/РЦ-ПР/СП-БМ-ПТ 10. ПП/РЦ-ПР/СП-БМ-СТ 11. ПП/РЦ-ПР/СП-МО-ПТ 12. ПП/РЦ-ПР/СП-МД-СТ 13. ПП/РЦ-ПР/ДП-БМ-ПТ 14. ПП/РЦ-ПР/ДП-БМ-СТ 15. ПП/РЦ-ПР/ДП-МО-ПТ 16. ПП/РЦ-ПР/ДП-МД-СТ 17. ПП/РЦ-РП/СП-БМ-ПТ 18. ПП/РЦ-РП/СП-БМ-СТ 19. ПП/РЦ-РП/СП-МО-ПТ 20. ПП/РЦ-РП/СП-МД-СТ 21. ПП/РЦ-РП/ДП-БМ-ПТ 22. ПП/РЦ-РП/ДП-БМ-СТ 23. ПП/РЦ-РП/ДП-МО-ПТ 24. ПП/РЦ-РП/ДП-МД-СТ 25. ПП/РД-РП/СП-БМ-ПТ 26. ПП/РД-РП/СП-БМ-СТ 27. ПП/РД-РП/СП-МО-ПТ 28. ПП/РД-РП/СП-МД-СТ 29. ПП/РД-РП/ДП-БМ-ПТ 30. ПП/РД-РП/ДП-БМ-СТ 31. ПП/РД-РП/ДП-МО-ПТ 32. ПП/РД-РП/ДП-МД-СТ

Крім того, одночасне використання декількох БПЛА-носіїв може призвести до збільшення ризику зіткнень або конфліктів у повітряному просторі, що вимагає додаткових зусиль для забезпечення безпеки і надійності операцій. Це може вимагати розробки складних алгоритмів координації та управління польотами, що підвищує обчислювальні витрати і складність системи.

Динамічні перешкоди значно ускладнюють системи без використання БПЛА-носія матки через збільшення обсягу додаткових розрахунків, які має виконувати кожен окремий БПЛА. Це ускладнює координацію та управління польотом, знижуючи загальну ефективність системи, але не виключає такі стратегії. Після фільтрації декартового добутку отримуємо множину стратегій по архітектурним ознакам надійності що включає 8 комбінації:

1. СП-БМ-ПТ;
2. СП-БМ-СТ;
3. СП-МО-ПТ;
4. СП-МД-СТ;
5. ДП-БМ-ПТ;
6. ДП-БМ-СТ;
7. ДП-МО-ПТ;
8. ДП-МД-СТ.

Тепер сформуємо остаточну множину стратегій розгортання комунікаційної мережі БПЛА, враховуючи, що системи “без резервування” при “неприпустимому перериванні” неефективні, оскільки такі системи не можуть забезпечити безперервність зв'язку у разі відмови компонентів. Це значно знижує надійність і продуктивність мережі, що є критичним для ефективного виконання завдань. Тому виключаємо ці комбінації з розгляду та отримуємо наступні остаточні можливі стратегії розгортання (Таблиця 2).

Таким чином, з урахуванням всіх обмежень, остаточна множина стратегій складається з 56 можливих комбінацій.

### Приклади формування стратегій

На рисунку 7 зображено приклад роботи з класификатором стратегій розгортання LiFi мережі БПЛА, для побудови стратегії за заданими критеріями. Розглянемо два варіанти.

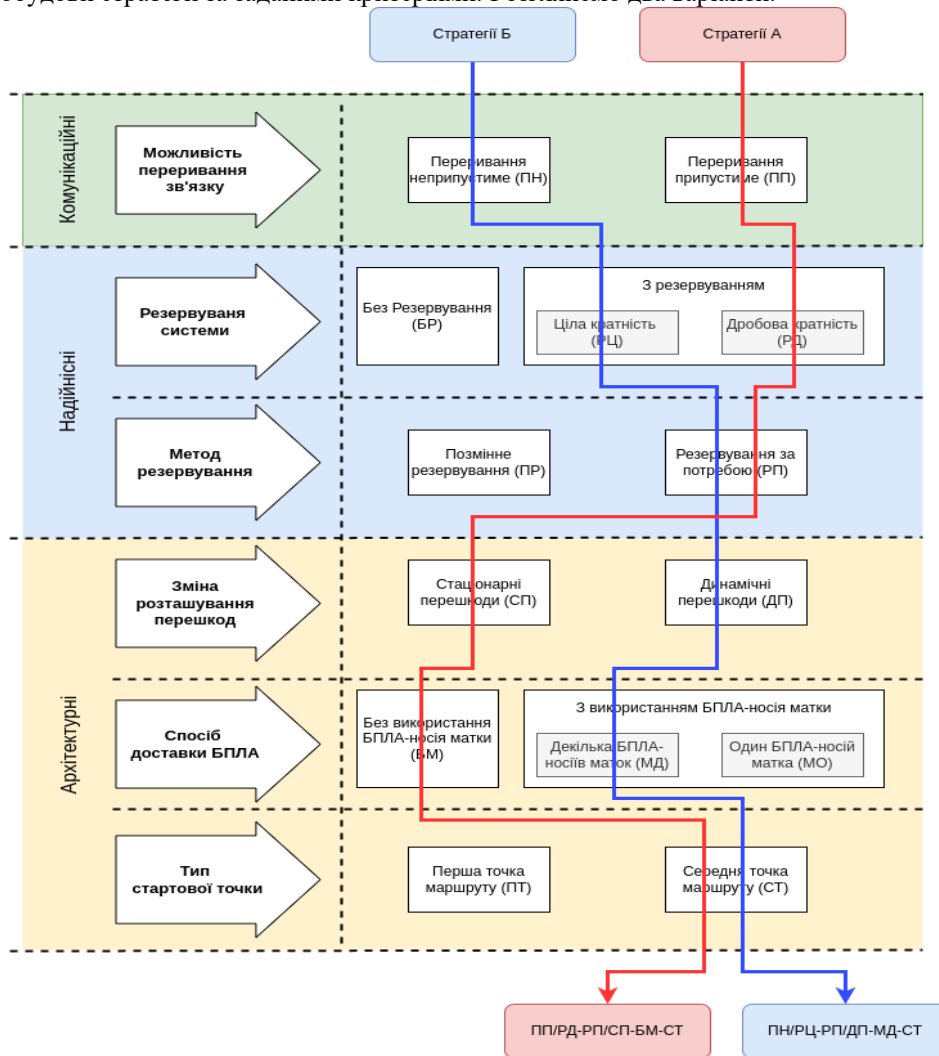


Рис. 7. Побудова стратегії розгортання мережі “Стратегія А”, “Стратегія Б”

Умови розгортання для “Стратегії А”: переривання зв'язку припустимі (ПП), дробова кратність резервування (РД), резервування за потреби (РП), стаціонарні перешкоди (СП), без використання БПЛА-носія матки (БМ), середня точка старту маршруту (СТ).

Умови розгортання для “Стратегії Б”: переривання зв'язку неприпустимі (ПН), резервування цілої кратності (РЦ), резервування за потреби (РП), динамічні перешкоди (ДП), використання декількох БПЛА-носіїв матки (МД), середня точка старту маршруту (СТ).

### ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

Кінцевим результатом даного дослідження є розроблена класифікація стратегій розгортання літаючої мережі, яка служить для забезпечення оптико-бездротових комунікацій між джерелами і отримувачами інформації.

Розроблений класифікатор таких стратегій дозволяє сформувати їх множину, яка є відкритою і може доповнюватися при використанні нових класифікаційних ознак. Запропонована структура класифікатора дозволяє ефективно формувати та оновлювати множину стратегій

Подальші дослідження мають бути спрямовано на:

- доповнення множини стратегій, відповідних алгоритмів заміни з урахуванням нових випадків розгортання і операційної підтримки в умовах змінних перешкод або характеристик простору, які можуть впливати на щільність розміщення БПЛА;
- визначення різноманітних критеріїв для оцінки та вибору оптимальних стратегій розгортання комунікаційних мереж БПЛА;
- розробка алгоритмів для оптимізації вибору стратегій розгортання мережі БПЛА на основі визначених критеріїв;
- розроблення та дослідження математичних моделей надійності (безвідмовності, що описують поведінку систем при використанні різних стратегій розгортання. Це включає аналіз впливу різних факторів на надійність та безперебійність роботи систем;
- розроблення програмного забезпечення для розв'язання задач і створення системи підтримки прийняття рішень, яке дозволить автоматизувати процеси планування та розгортання літаючої мережі БПЛА;
- проведення моделювання та тестування розроблених стратегій у реальних умовах для оцінки їх ефективності та надійності. Аналіз результатів тестування для подальшого вдосконалення стратегій та алгоритмів.

### Література

1. A Critical Review of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) Use in Architecture and Urbanism: Scientometric and Bibliometric Analysis / M. Videras Rodríguez et al. Applied Sciences. 2021. Vol. 11, no. 21. P. 9966. DOI: 10.3390/app11219966.
2. Recent Advances in Unmanned Aerial Vehicles: A Review / F. Ahmed et al. Arabian Journal for Science and Engineering. 2022. DOI: 10.1007/s13369-022-06738-0.
3. A Comprehensive Review of Recent Research Trends on Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) / K. Telli et al. Systems. 2023. Vol. 11, no. 8. P. 400. DOI: 10.3390/systems11080400.
4. Elmokadem T., Savkin A. V. Towards Fully Autonomous UAVs: A Survey. Sensors. 2021. Vol. 21, no. 18. P. 6223. DOI: 10.3390/s21186223.
5. A Review on LiFi Network Research: Open Issues, Applications and Future Directions / R. Badeel et al. Applied Sciences. 2021. Vol. 11, no. 23. P. 11118. DOI: 10.3390/app112311118.
6. A Review of Flying Ad Hoc Networks: Key Characteristics, Applications, and Wireless Technologies / F. Pasandideh et al. Remote Sensing. 2022. Vol. 14, no. 18. P. 4459. DOI: 10.3390/rs14184459.
7. Non-Terrestrial Networks with UAVs: A Projection on Flying Ad-Hoc Networks / M. Nemati et al. Drones. 2022. Vol. 6, no. 11. P. 334. DOI: 10.3390/drones6110334.
8. Flying ad-hoc networks (FANETs): A review of communication architectures, and routing protocols / M. A. Khan et al. 2017 First International Conference on Latest trends in Electrical Engineering and Computing Technologies (INTELLECT), Karachi, 15–16 November 2017. 2017. DOI: 10.1109/intellect.2017.8277614.
9. Lee G., Saad W., Bennis M. Online Optimization for UAV-Assisted Distributed Fog Computing in Smart Factories of Industry 4.0. GLOBECOM 2018 - 2018 IEEE Global Communications Conference, Abu Dhabi, United Arab Emirates, 9–13 December 2018. 2018. DOI: 10.1109/glocom.2018.8647441.
10. Unmanned aerial vehicle-aided edge networks with ultra-reliable low-latency communications: A digital twin approach / Y. Li et al. IET Signal Processing. 2022. DOI: 10.1049/sil2.12128.

11. Formation Control Algorithms for Multiple-UAVs: A Comprehensive Survey / H. Do et al. EAI Endorsed Transactions on Industrial Networks and Intelligent Systems. 2021. Vol. 8, no. 27. P. 170230. DOI: 10.4108/eai.10-6-2021.170230.
12. Caillouet C., Mitton N. Optimization and Communication in UAV Networks. Sensors. 2020. Vol. 20, no. 18. P. 5036. DOI: 10.3390/s20185036.
13. Savkin A. V., Huang H. Navigation of a Network of Aerial Drones for Monitoring a Frontier of a Moving Environmental Disaster Area. IEEE Systems Journal. 2020. Vol. 14, no. 4. P. 4746–4749. DOI: 10.1109/jsyst.2020.2966779.
14. Valiulahi I., Masouros C. Multi-UAV Deployment for Throughput Maximization in the Presence of Co-Channel Interference. IEEE Internet of Things Journal. 2020. P. 1. DOI: 10.1109/jiot.2020.3023010.
15. Delay Tolerant Network assisted flying Ad-Hoc network scenario: modeling and analytical perspective / A. Mukherjee et al. Wireless Networks. 2019. Vol. 25, no. 5. P. 2675–2695. DOI: 10.1007/s11276-019-01987-8.
16. Real-Time Optimal Resource Allocation for Embedded UAV Communication Systems / M.-N. Nguyen et al. IEEE Wireless Communications Letters. 2019. Vol. 8, no. 1. P. 225–228. DOI: 10.1109/lwc.2018.2867775.
17. Real-Time Deployment and Resource Allocation for Distributed UAV Systems in Disaster Relief / L. D. Nguyen et al. 2019 IEEE 20th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC), Cannes, France, 2–5 July 2019. 2019. DOI: 10.1109/spawc.2019.8815522.
18. Duong T. Q., Nguyen L. D., Nguyen L. K. Practical Optimisation of Path Planning and Completion Time of Data Collection for UAV-enabled Disaster Communications. 2019 15th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), Tangier, Morocco, 24–28 June 2019. 2019. DOI: 10.1109/iwcmc.2019.8766511.
19. Han S. I. Survey on UAV Deployment and Trajectory in Wireless Communication Networks: Applications and Challenges. Information. 2022. Vol. 13, no. 8. P. 389. DOI: 10.3390/info13080389.
20. Carvajal-Rodríguez J., Morales M., Tipantuña C. 3D Path Planning Algorithms in UAV-Enabled Communications Systems: A Mapping Study. Future Internet. 2023. Vol. 15, no. 9. P. 289. DOI: 10.3390/fi15090289.
21. Unmanned aerial system for post disaster identification / A. Mukherjee et al. 2014 International Conference on Circuits, Communication, Control and Computing (I4C), Bangalore, India, 21–22 November 2014. 2014. DOI: 10.1109/cimca.2014.7057799.
22. Leichenko K., Fesenko H., Kharchenko V., Illiashenko O. Розгортання LiFi мережі на основі рою БПЛА в умовах перешкод: алгоритми пошуку траєкторії для розміщення БПЛА. Radioelectronic and Computer Systems This link is disabled., 2024, 2024(1(109)), pp. 176–195
23. Лейченко К. М., Фесенко Г. В. Програмний засіб підтримки планування розгортання LiFi мережі на основі БПЛА для забезпечення передачі даних в умовах руйнувань. Системи управління, навігації та зв'язку. 2024. Вип. 1 (75). С. 193–200. DOI: 10.26906/SUNZ.2024.1.193.
24. Лейченко К., Фесенко Г., Харченко В. Стратегії розгортання та методи забезпечення надійності рою бпла для утворення lifi мережі. Measuring and computing devices in technological processes. 2024. № 1. С. 21–31. DOI: 10.31891/2219-9365-2024-77-3.
25. Flying Sensor and Edge Network-Based Advanced Air Mobility Systems: Reliability Analysis and Applications for Urban Monitoring / H. Fesenko et al. Drones. 2023. Vol. 7, no. 7. P. 409. DOI: 10.3390/drones7070409.
26. Kabashkin I. The Resilience of Electrical Support in UAV Swarms in Special Missions. Energies. 2024. Vol. 17, no. 10. P. 2422. DOI: 10.3390/en17102422.
27. An Energy Effective RIS-Assisted Multi-UAV Coverage Scheme for Fairness-Aware Ground Terminals / N. Lin et al. IEEE Transactions on Green Communications and Networking. 2024. P. 1. DOI: 10.1109/tgcn.2024.3424980.
28. Rodrigues M., Branco K. R. L. J. C. Cloud-SPHERE: Towards Secure UAV Service Provision. Journal of Intelligent & Robotic Systems. 2019. Vol. 97, no. 1. P. 249–268. DOI: 10.1007/s10846-019-01046-6.
29. Autonomous Decision-Making Method for Combat Mission of UAV based on Deep Reinforcement Learning / J. Xu et al. 2019 IEEE 4th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC), Chengdu, China, 20–22 December 2019. 2019. DOI: 10.1109/iaeac47372.2019.8998066.
30. Leichenko K., Fesenko H., Borges J., Kharchenko V. "Search for the Shortest Route Considering Physical Obstacles: Method of Controlled Waterfall, Tool, and Application." Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT'2023): Proc. 13th IEEE Int. Conf., Athens, Greece, Oct. 13–15, 2023. P. 1–5. DOI: 10.1109/DESSERT61349.2023.10416479.

## References

1. A Critical Review of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) Use in Architecture and Urbanism: Scientometric and Bibliometric Analysis / M. Videras Rodríguez et al. Applied Sciences. 2021. Vol. 11, no. 21. P. 9966. DOI: 10.3390/app11219966.

2. Recent Advances in Unmanned Aerial Vehicles: A Review / F. Ahmed et al. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2022. DOI: 10.1007/s13369-022-06738-0.
3. A Comprehensive Review of Recent Research Trends on Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) / K. Telli et al. *Systems*. 2023. Vol. 11, no. 8. P. 400. DOI: 10.3390/systems11080400.
4. Elmokadem T., Savkin A. V. Towards Fully Autonomous UAVs: A Survey. *Sensors*. 2021. Vol. 21, no. 18. P. 6223. DOI: 10.3390/s21186223.
5. A Review on LiFi Network Research: Open Issues, Applications and Future Directions / R. Badeel et al. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, no. 23. P. 11118. DOI: 10.3390/app112311118.
6. A Review of Flying Ad Hoc Networks: Key Characteristics, Applications, and Wireless Technologies / F. Pasandideh et al. *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14, no. 18. P. 4459. DOI: 10.3390/rs14184459.
7. Non-Terrestrial Networks with UAVs: A Projection on Flying Ad-Hoc Networks / M. Nemati et al. *Drones*. 2022. Vol. 6, no. 11. P. 334. DOI: 10.3390/drones6110334.
8. Flying ad-hoc networks (FANETs): A review of communication architectures, and routing protocols / M. A. Khan et al. 2017 First International Conference on Latest trends in Electrical Engineering and Computing Technologies (INTELLECT), Karachi, 15–16 November 2017. 2017. DOI: 10.1109/intellect.2017.8277614.
9. Lee G., Saad W., Bennis M. Online Optimization for UAV-Assisted Distributed Fog Computing in Smart Factories of Industry 4.0. *GLOBECOM 2018 - 2018 IEEE Global Communications Conference, Abu Dhabi, United Arab Emirates, 9–13 December 2018*. 2018. DOI: 10.1109/glocom.2018.8647441.
10. Unmanned aerial vehicle-aided edge networks with ultra-reliable low-latency communications: A digital twin approach / Y. Li et al. *IET Signal Processing*. 2022. DOI: 10.1049/sil2.12128.
11. Formation Control Algorithms for Multiple-UAVs: A Comprehensive Survey / H. Do et al. *EAI Endorsed Transactions on Industrial Networks and Intelligent Systems*. 2021. Vol. 8, no. 27. P. 170230. DOI: 10.4108/eai.10-6-2021.170230.
12. Caillouet C., Mitton N. Optimization and Communication in UAV Networks. *Sensors*. 2020. Vol. 20, no. 18. P. 5036. DOI: 10.3390/s20185036.
13. Savkin A. V., Huang H. Navigation of a Network of Aerial Drones for Monitoring a Frontier of a Moving Environmental Disaster Area. *IEEE Systems Journal*. 2020. Vol. 14, no. 4. P. 4746–4749. DOI: 10.1109/jsyst.2020.2966779.
14. Valiulahi I., Masouros C. Multi-UAV Deployment for Throughput Maximization in the Presence of Co-Channel Interference. *IEEE Internet of Things Journal*. 2020. P. 1. DOI: 10.1109/jiot.2020.3023010.
15. Delay Tolerant Network assisted flying Ad-Hoc network scenario: modeling and analytical perspective / A. Mukherjee et al. *Wireless Networks*. 2019. Vol. 25, no. 5. P. 2675–2695. DOI: 10.1007/s11276-019-01987-8.
16. Real-Time Optimal Resource Allocation for Embedded UAV Communication Systems / M.-N. Nguyen et al. *IEEE Wireless Communications Letters*. 2019. Vol. 8, no. 1. P. 225–228. DOI: 10.1109/lwc.2018.2867775.
17. Real-Time Deployment and Resource Allocation for Distributed UAV Systems in Disaster Relief / L. D. Nguyen et al. 2019 IEEE 20th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC), Cannes, France, 2–5 July 2019. 2019. DOI: 10.1109/spawc.2019.8815522.
18. Duong T. Q., Nguyen L. D., Nguyen L. K. Practical Optimisation of Path Planning and Completion Time of Data Collection for UAV-enabled Disaster Communications. 2019 15th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), Tangier, Morocco, 24–28 June 2019. 2019. DOI: 10.1109/iwcmc.2019.8766511.
19. Han S. I. Survey on UAV Deployment and Trajectory in Wireless Communication Networks: Applications and Challenges. *Information*. 2022. Vol. 13, no. 8. P. 389. DOI: 10.3390/info13080389.
20. Carvajal-Rodriguez J., Morales M., Tipantuña C. 3D Path Planning Algorithms in UAV-Enabled Communications Systems: A Mapping Study. *Future Internet*. 2023. Vol. 15, no. 9. P. 289. DOI: 10.3390/fi15090289.
21. Unmanned aerial system for post disaster identification / A. Mukherjee et al. 2014 International Conference on Circuits, Communication, Control and Computing (I4C), Bangalore, India, 21–22 November 2014. 2014. DOI: 10.1109/cimca.2014.7057799.
22. Leichenko K., Fesenko H., Kharchenko V., Illiashenko O. Deployment of a UAV swarm-based LiFi network in the obstacle-ridden environment: algorithms of finding the path for UAV placement. *Radioelectronic and Computer Systems* This link is disabled., 2024, 2024(1(109)), pp. 176–195
23. Leichenko K., Fesenko H. Програмний засіб підтримки планування розгортання LiFi мережі на основі БПЛА для забезпечення передачі даних в умовах руйнувань. Системи управління, навігації та зв'язку. 2024. Вип. 1 (75). С. 193–200. DOI: 10.26906/SUNZ.2024.1.193.
24. Leichenko K., Fesenko H., Kharchenko V., Стратегії розгортання та методи забезпечення надійності рою бпла для утворення lifi мережі. *Measuring and computing devices in technological processes*. 2024. № 1. С. 21–31. DOI: 10.31891/2219-9365-2024-77-3.
25. Flying Sensor and Edge Network-Based Advanced Air Mobility Systems: Reliability Analysis and Applications for Urban Monitoring / H. Fesenko et al. *Drones*. 2023. Vol. 7, no. 7. P. 409. DOI: 10.3390/drones7070409.
26. Kabashkin I. The Resilience of Electrical Support in UAV Swarms in Special Missions. *Energies*. 2024. Vol. 17, no. 10. P. 2422. DOI: 10.3390/en17102422.
27. An Energy Effective RIS-Assisted Multi-UAV Coverage Scheme for Fairness-Aware Ground Terminals / N. Lin et al. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*. 2024. P. 1. DOI: 10.1109/tgcn.2024.3424980.
28. Rodrigues M., Branco K. R. L. J. C. Cloud-SPHERE: Towards Secure UAV Service Provision. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2019. Vol. 97, no. 1. P. 249–268. DOI: 10.1007/s10846-019-01046-6.
29. Autonomous Decision-Making Method for Combat Mission of UAV based on Deep Reinforcement Learning / J. Xu et al. 2019 IEEE 4th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC), Chengdu, China, 20–22 December 2019. 2019. DOI: 10.1109/iaeac47372.2019.8998066.
30. Leichenko K., Fesenko H., Borges J., Kharchenko V. "Search for the Shortest Route Considering Physical Obstacles: Method of Controlled Waterfall, Tool, and Application." *Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT'2023): Proc. 13th IEEE Int. Conf., Athens, Greece, Oct. 13–15, 2023*. P. 1–5. DOI: 10.1109/DESSERT61349.2023.10416479.