

Д. ТЕРЕНИК, В. ХАРЧЕНКО

ВИБІР СТРАТЕГІЙ РОЗГОРТАННЯ І ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ РОЮ БПЛА ДЛЯ ПІДТРИМКИ КОМУНІКАЦІЙ В УМОВАХ РУЙНУВАНЬ

Предметом дослідження в статті є система комунікаційних мереж БПЛА (літальних мереж, ЛМ), що використовують технологію *LiFi* для передачі інформації від джерела до приймача в умовах фізичних перешкод і кіберзагроз, а також стратегії розгортання та забезпечення надійності (СРЗН) ЛМ. **Мета роботи** – розроблення критеріїв і алгоритмів вибору СРЗН ЛМ, що забезпечують необхідний рівень надійності та ефективності за умови заданих обмежень. У статті розв'язуються конкретні **завдання**: систематизація стратегій розгортання та забезпечення надійності літальної мережі; формулювання принципів і розроблення алгоритму вибору оптимальної стратегії розгортання та забезпечення надійності ЛМ; надання рекомендацій щодо вибору оптимальних стратегій розгортання та забезпечення надійності літальної мережі. Упроваджено такі **методи**: системний аналіз для вибору оптимальної стратегії розгортання та забезпечення надійності; теорія надійності та ефективності системи. **Досягнуті результати**: розширено класифікатор стратегій розгортання ЛМ завдяки додатковим ознакам ремонту й обслуговування, а також наявності кібератак; сформульовано критерії вибору стратегій розгортання та забезпечення надійності ЛМ; розроблено алгоритм вибору оптимальної стратегії розгортання та забезпечення надійності ЛМ; проаналізовано та наведено приклад застосування розроблених алгоритмів для ілюстрації покрокової процедури вибору стратегії, що супроводжується розрахунками показників надійності. **Висновки**: запропоновані множини, критерії та алгоритм вибору стратегій розгортання та забезпечення надійності комунікаційних мереж БПЛА дають змогу обґрунтувати сукупність параметрів і спланувати реалізацію оптимальної (за визначеним критерієм) політики впровадження автоматичної системи підтримки комунікацій на об'єктах критичної інфраструктури в умовах руйнувань та кібервпливів, а також підвищити ефективність (мінімізувати вартість) застосування літальних мереж.

Ключові слова: БПЛА; *LiFi*; літальні мережі; алгоритми вибору; надійність; ефективність стратегії.

1 Вступ

1.1 Мотивація та огляд публікацій

Забезпечення надійних комунікацій в умовах руйнувань є критично важливим, особливо в разі природних катастроф, техногенних аварій та воєнних конфліктів. Відсутність комунікацій у таких ситуаціях може призвести до втрат людського життя та значних матеріальних ресурсів. Літальні мережі, що містять у своєму складі безпілотні літальні апарати (БПЛА) та підтримуються відповідною інфраструктурою, можуть стати ефективним рішенням для швидкого надання або відновлення комунікацій за критичних умов завдяки мобільності, гнучкості та можливості розгортання в найкоротші терміни.

Застосування БПЛА для забезпечення комунікацій в екстремальних ситуаціях привернуло увагу наукової спільноти. Наприклад, у дослідженні [1] розглянуто ключові характеристики та технології безпілотних ад-гок-мереж, що доводить їх потенціал у розв'язанні завдань з комунікацій. Автори роботи [2] проаналізували можливості використання безпілотних

літальних апаратів у бездротових мережах для забезпечення комунікацій у складних умовах.

Проте існує значна кількість технічних викликів, які необхідно подолати для забезпечення надійності та стійкості (резильєнтності) таких мереж [3]. До основних проблем належать оптимізація маршрутів БПЛА та взаємодія дронів у рої [4], забезпечення безперебійного енергопостачання [5], мінімізація затримок у передачі даних і захист мереж від зовнішніх загроз. У дослідженні [6] наголошується на важливості оптимізації ресурсів у розподілених системах із використанням БПЛА, що є одним із ключових аспектів для забезпечення надійності таких мереж. Важливим є завдання визначення раціонального розміру флотилії БПЛА з огляду на надійність літальних апаратів та необхідну якість контролю ситуації в надзвичайних ситуаціях, що розглянуто в роботі [7]. У статтях [8–10] пропонуються методи, що дають змогу БПЛА автономно навігувати в невідомих раніше внутрішніх коридорних приміщеннях без використання GPS, із застосуванням монокулярної камери, лазерних дальномірів або простих камер.

Окрім технічних викликів, важливим аспектом також є економічна ефективність використання БпЛА для забезпечення комунікацій. У дослідженнях [11, 12] доведено, що правильне планування, розгортання та управління ресурсами може значно зменшити витрати та підвищити ефективність роботи таких мереж. Окремо варто згадати про виклики кібербезпеки [13], що супроводжують використання БпЛА та літальних мереж в умовах руйнувань та інформаційних впливів. Безпілотні літальні апарати, особливо в разі їх масового застосування, стають мішенню для кібератак, що може призвести до втрати контролю або до компрометації переданої інформації. У праці [14] наголошується на важливості розроблення методів захисту від кібератак для забезпечення безпеки та надійності операцій із використанням БпЛА, що може сприяти стабільній роботі літальних мереж у будь-якій ситуації.

Отже, важливим є визначення принципів і алгоритмів вибору стратегій, які забезпечують значення показників надійності відповідно до вимог і підвищують ефективність системи за умови заданих обмежень. Це дасть змогу ідентифікувати найкращі стратегії для забезпечення стабільної та надійної роботи літальних мереж у складних та мінливих обставинах. Такий підхід є важливим для прийняття обґрунтованих рішень під час планування, розгортання та використання літальних мереж у разі руйнувань.

Ключовими роботами, на які спираються автори цього дослідження, є статті [15–17], у яких описано стратегії розгортання та моделі забезпечення надійності літальних мереж під час забезпечення *LiFi*-комунікацій в умовах руйнувань. У роботі [18] систематизовано множину стратегій, надано їх класифікацію та описано приклади таких стратегій. Тому природним є наступний крок: обґрунтування критеріїв і розроблення алгоритмів вибору стратегій з множини можливих варіантів з огляду на вимоги та обмеження системи, яка об'єднує власне БпЛА і відповідний комплекс керування та обслуговування.

1.2 Мета й завдання дослідження

Узагальнена модель досліджуваної системи (рис. 1) містить у своєму складі рій літальних БпЛА, що 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 інформації, наприклад, кризовий центр, де вона збирається та аналізується). Рій комунікаційних БпЛА розташовується в точці С (депо, де розміщено апарати, здійснюється керування мережею та розташовано вузол профілактичного обслуговування й ремонту). У просторі подальшого розгортання БпЛА є різноманітні, хаотично розташовані фізичні перешкоди, які необхідно оминати, щоб забезпечити пряму видимість між сусідніми БпЛА. Крім цього, на роботу БпЛА впливають фізичні фактори та кіберзагрози. Отже, на відміну від моделі, запропонованої у роботі [18], досліджувана модель доповнена вузлом ремонту та захисту від кібервпливів.

Мета статті – розроблення критеріїв і алгоритмів вибору стратегій, що забезпечують необхідний рівень надійності та ефективності системи за умови заданих обмежень. Множина стратегій доповнена з огляду на додаткові класифікаційні ознаки. Запропонований підхід є важливим для прийняття обґрунтованих рішень під час планування, розгортання та використання літальних мереж у разі руйнувань, що забезпечить за певних умов підвищення ефективності та безпеки рятувальних операцій та інших критичних завдань.

Щоб досягти окресленої мети, необхідно виконати такі завдання:

- доповнити множину стратегій розгортання та забезпечення надійності ЛМ;
- сформулювати принципи та розробити алгоритм вибору оптимальної стратегії розгортання та забезпечення надійності ЛМ;
- проаналізувати стратегії розгортання та забезпечення надійності ЛМ за сформульованими принципами й алгоритмами;
- надати рекомендації щодо вибору оптимальних стратегій розгортання та забезпечення надійності ЛМ.

Стаття має чітку структуру. Другий розділ присвячений уточненню класифікації стратегій з огляду на додаткові ознаки, а також її опису й аналізу. У третьому розділі подані критерії та алгоритм вибору стратегій, а також стисло наведено інформаційну інфраструктуру системи. Четвертий розділ містить приклади застосування алгоритмів вибору стратегій. Нарешті, у п'ятому розділі підбито підсумки та окреслено подальші напрями досліджень.

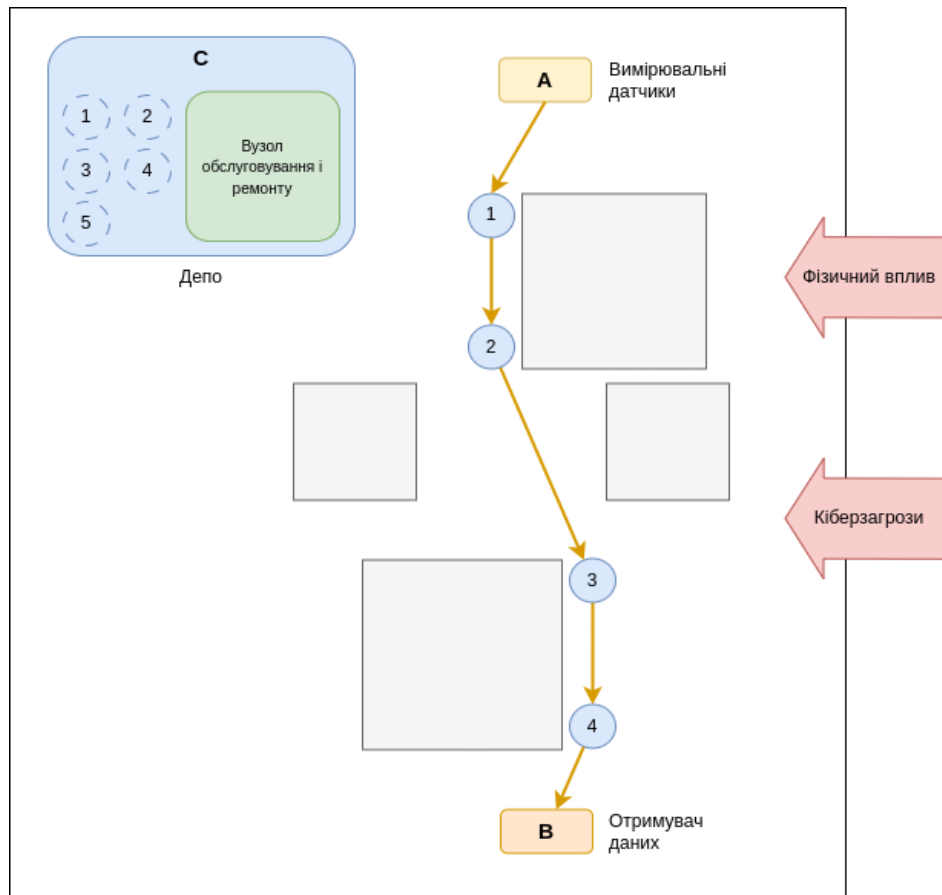


Рис. 1. Узагальнена модель досліджуваної системи ЛМ

2 Формування множини стратегій

На основі аналізу предметної галузі [15], спираючись на результати [18], де визначено шість ознак для класифікації стратегій розгортання мереж із використанням БпЛА, додамо ознаку профілактики й ремонту. Розмістимо ознаки за принципом зростання важливості та згрупуємо їх за близькістю. Надамо кожному значенню ознаки певний код, що застосовуватиметься для ідентифікації стратегії розгортання.

$$\begin{aligned}
 & \{ \text{Можливість переривання зв'язку} \} / \\
 & \{ \text{Наявність ремонту та обслуговування} \} / \\
 & \{ \text{Резервування} \} - \{ \text{Метод резервування} \} / \\
 & \{ \text{Зміна розташування перешкод} \} - \{ \text{Спосіб доставки БпЛА} \} - \{ \text{Тип стартової точки} \}.
 \end{aligned} \tag{1}$$

Запропоноване кодування містить чотири блоки в такій послідовності: комунікаційні ознаки, ознаки обслуговування, надійнісні ознаки, архітектурні ознаки. За результатами аналізу класифікатора визначимо множину стратегій, що може бути сформована як декартовий добуток підмножин (сутностей) за кожною ознакою (табл. 1).

Подамо класифікацію стратегій розгортання мережі БпЛА у вигляді двох стовпчиків (рис. 2): ліворуч наведено ознаки класифікації, праворуч – сутності (варіанти стратегій). Ця структура полегшує адаптацію класифікації до нових вимог і дає змогу легко додавати ознаки або варіанти стратегій без порушення загальної логіки класифікації.

Пропонується кодування стратегії за схемою (1), що узагальнює схему, наведену в роботі [18]:

Розглянемо обмеження, пов'язані з додаванням ознаки профілактикування та ремонту. Стратегії розгортання, що не припускають переривання зв'язку, вимагають безперервної роботи мережі БпЛА без жодних збоїв. Такі стратегії передбачають, що мережа має постійно функціонувати, що унеможливує зупинення роботи БпЛА для ремонту або технічного обслуговування.

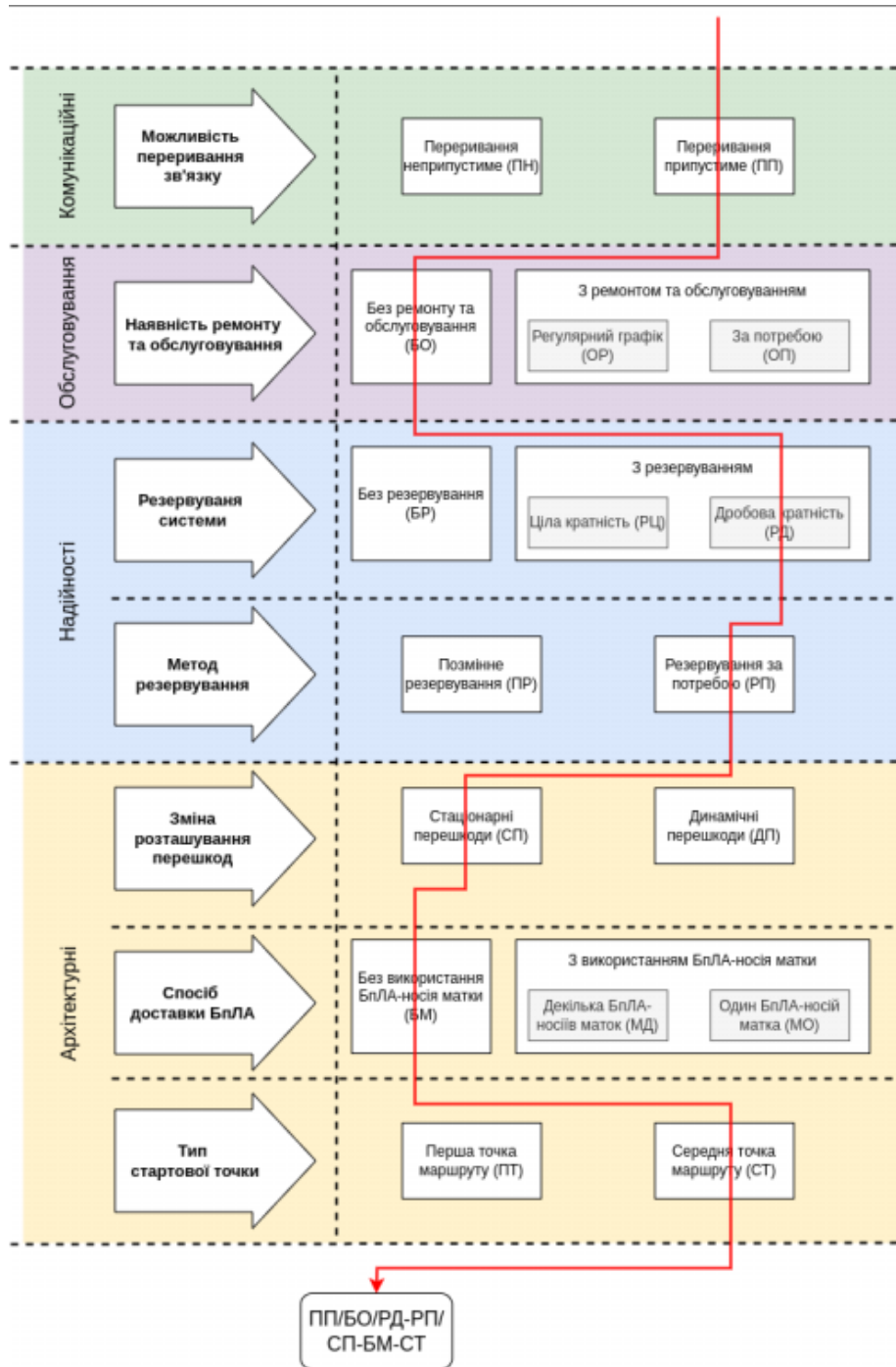


Рис. 2. Класифікатор стратегій розгортання мережі БЛЛА та приклад формування однієї з СРЗН

Таблиця 1. Множини стратегій розгортання ЛМ за групами ознак

Множина стратегій розгортання за комунікаційними ознаками	Множина стратегій розгортання за ознаками обслуговування	Множина стратегій розгортання за ознаками надійності	Множина стратегій розгортання за архітектурними ознаками
1. ПН 2. ПП	1. БО 2. ОР 3. ОП	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

Стратегії розгортання, що передбачають ремонт і обслуговування, вимагають можливості зупинення окремих БпЛА для проведення технічного обслуговування або ремонту. Це означає, що під час ремонту або обслуговування мережа повинна мати додаткові ресурси для підтримки безперервності роботи. Однак стратегії без резервування не передбачають наявності додаткових БпЛА

чи компонентів, які можуть замінити несправні або ті, що потребують обслуговування. Отже, поєднання цих двох стратегій є неефективним, оскільки спричиняє простій системи під час технічного обслуговування або ремонту.

Отримаємо множину стратегій розгортання ЛМ – 104 можливі комбінації, зважаючи на всі обмеження та вилучення неефективних стратегій (табл. 2).

Таблиця 2. Фінальна множина стратегій розгортання ЛМ

Переривання неприпустиме без обслуговування (ПН/БО)	Переривання припустиме без обслуговування (ПП/БО)	Переривання припустиме та регулярне обслуговування (ПП/ОР)	Переривання припустиме та обслуговування за потреби (ПП/ОП)
1. ПН/БО/РЦ-ПР/СП-БМ-ПТ	1. ПП/БО/БР/СП-БМ-ПТ	1. ПП/ОР/РЦ-ПР/СП-БМ-ПТ	1. ПП/ОП/РЦ-ПР/СП-БМ-ПТ
2. ПН/БО/РЦ-ПР/СП-БМ-СТ	2. ПП/БО/БР/СП-БМ-СТ	2. ПП/ОР/РЦ-ПР/СП-БМ-СТ	2. ПП/ОП/РЦ-ПР/СП-БМ-СТ
3. ПН/БО/РЦ-ПР/СП-МО-ПТ	3. ПП/БО/БР/СП-МО-ПТ	3. ПП/ОР/РЦ-ПР/СП-МО-ПТ	3. ПП/ОП/РЦ-ПР/СП-МО-ПТ
4. ПН/БО/РЦ-ПР/СП-МД-СТ	4. ПП/БО/БР/СП-МД-СТ	4. ПП/ОР/РЦ-ПР/СП-МД-СТ	4. ПП/ОП/РЦ-ПР/СП-МД-СТ
5. ПН/БО/РЦ-ПР/ДП-БМ-ПТ	5. ПП/БО/БР/ДП-БМ-ПТ	5. ПП/ОР/РЦ-ПР/ДП-БМ-ПТ	5. ПП/ОП/РЦ-ПР/ДП-БМ-ПТ
6. ПН/БО/РЦ-ПР/ДП-БМ-СТ	6. ПП/БО/БР/ДП-БМ-СТ	6. ПП/ОР/РЦ-ПР/ДП-БМ-СТ	6. ПП/ОП/РЦ-ПР/ДП-БМ-СТ
7. ПН/БО/РЦ-ПР/ДП-МО-ПТ	7. ПП/БО/БР/ДП-МО-ПТ	7. ПП/ОР/РЦ-ПР/ДП-МО-ПТ	7. ПП/ОП/РЦ-ПР/ДП-МО-ПТ
8. ПН/БО/РЦ-ПР/ДП-МД-СТ	8. ПП/БО/БР/ДП-МД-СТ	8. ПП/ОР/РЦ-ПР/ДП-МД-СТ	8. ПП/ОП/РЦ-ПР/ДП-МД-СТ
9. ПН/БО/РЦ-РП/СП-БМ-ПТ	9. ПП/БО/РЦ-ПР/СП-БМ-ПТ	9. ПП/ОР/РЦ-РП/СП-БМ-ПТ	9. ПП/ОП/РЦ-РП/СП-БМ-ПТ
10. ПН/БО/РЦ-РП/СП-БМ-СТ	10. ПП/БО/РЦ-ПР/СП-БМ-СТ	10. ПП/ОР/РЦ-РП/СП-БМ-СТ	10. ПП/ОП/РЦ-РП/СП-БМ-СТ
11. ПН/БО/РЦ-РП/СП-МО-ПТ	11. ПП/БО/РЦ-ПР/СП-МО-ПТ	11. ПП/ОР/РЦ-РП/СП-МО-ПТ	11. ПП/ОП/РЦ-РП/СП-МО-ПТ
12. ПН/БО/РЦ-РП/СП-МД-СТ	12. ПП/БО/РЦ-ПР/СП-МД-СТ	12. ПП/ОР/РЦ-РП/СП-МД-СТ	12. ПП/ОП/РЦ-РП/СП-МД-СТ
13. ПН/БО/РЦ-РП/ДП-БМ-ПТ	13. ПП/БО/РЦ-ПР/ДП-БМ-ПТ	13. ПП/ОР/РЦ-РП/ДП-БМ-ПТ	13. ПП/ОП/РЦ-РП/ДП-БМ-ПТ
14. ПН/БО/РЦ-РП/ДП-БМ-СТ	14. ПП/БО/РЦ-ПР/ДП-БМ-СТ	14. ПП/ОР/РЦ-РП/ДП-БМ-СТ	14. ПП/ОП/РЦ-РП/ДП-БМ-СТ
15. ПН/БО/РЦ-РП/ДП-МО-ПТ	15. ПП/БО/РЦ-ПР/ДП-МО-ПТ	15. ПП/ОР/РЦ-РП/ДП-МО-ПТ	15. ПП/ОП/РЦ-РП/ДП-МО-ПТ
16. ПН/БО/РЦ-РП/ДП-МД-СТ	16. ПП/БО/РЦ-ПР/ДП-МД-СТ	16. ПП/ОР/РЦ-РП/ДП-МД-СТ	16. ПП/ОП/РЦ-РП/ДП-МД-СТ
17. ПН/БО/РД-РП/СП-БМ-ПТ	17. ПП/БО/РЦ-РП/СП-БМ-ПТ	17. ПП/ОР/РД-РП/СП-БМ-ПТ	17. ПП/ОП/РД-РП/СП-БМ-ПТ
18. ПН/БО/РД-РП/СП-БМ-СТ	18. ПП/БО/РЦ-РП/СП-БМ-СТ	18. ПП/ОР/РД-РП/СП-БМ-СТ	18. ПП/ОП/РД-РП/СП-БМ-СТ
19. ПН/БО/РД-РП/СП-МО-ПТ	19. ПП/БО/РЦ-РП/СП-МО-ПТ	19. ПП/ОР/РД-РП/СП-МО-ПТ	19. ПП/ОП/РД-РП/СП-МО-ПТ
20. ПН/БО/РД-РП/СП-МД-СТ	20. ПП/БО/РЦ-РП/СП-МД-СТ	20. ПП/ОР/РД-РП/СП-МД-СТ	20. ПП/ОП/РД-РП/СП-МД-СТ
21. ПН/БО/РД-РП/ДП-БМ-ПТ	21. ПП/БО/РЦ-РП/ДП-БМ-ПТ	21. ПП/ОР/РД-РП/ДП-БМ-ПТ	21. ПП/ОП/РД-РП/ДП-БМ-ПТ
22. ПН/БО/РД-РП/ДП-БМ-СТ	22. ПП/БО/РЦ-РП/ДП-БМ-СТ	22. ПП/ОР/РД-РП/ДП-БМ-СТ	22. ПП/ОП/РД-РП/ДП-БМ-СТ
23. ПН/БО/РД-РП/ДП-МО-ПТ	23. ПП/БО/РЦ-РП/ДП-МО-ПТ	23. ПП/ОР/РД-РП/ДП-МО-ПТ	23. ПП/ОП/РД-РП/ДП-МО-ПТ
24. ПН/БО/РД-РП/ДП-МД-СТ	24. ПП/БО/РЦ-РП/ДП-МД-СТ	24. ПП/ОР/РД-РП/ДП-МД-СТ	24. ПП/ОП/РД-РП/ДП-МД-СТ
	25. ПП/БО/РД-РП/СП-БМ-ПТ		
	26. ПП/БО/РД-РП/СП-БМ-СТ		
	27. ПП/БО/РД-РП/СП-МО-ПТ		
	28. ПП/БО/РД-РП/СП-МД-СТ		
	29. ПП/БО/РД-РП/ДП-БМ-ПТ		
	30. ПП/БО/РД-РП/ДП-БМ-СТ		
	31. ПП/БО/РД-РП/ДП-МО-ПТ		
	32. ПП/БО/РД-РП/ДП-МД-СТ		

3 Принципи й алгоритм вибору стратегій

3.1 Визначення критеріїв вибору

Розглянемо характеристики системи, за якими важливо оцінити та порівняти різні стратегії розгортання літальної мережі БпЛА. Це допоможе визначити найкращі стратегії, які забезпечують необхідний рівень надійності та ефективності системи за умови заданих обмежень, що важливо для прийняття обґрунтованих рішень під час планування, розгортання та використання літальних мереж унаслідок руйнувань.

Безвідмовність: здатність системи безперервно виконувати функції комунікації протягом заданого часу. У цьому разі береться до уваги кількість БпЛА, що утворюють мережу, яка варіюється згідно з обмеженнями, що визначаються поточними умовами та вимогами. Резервування БпЛА дає змогу знизити ймовірність відмови мережі та забезпечити її безперервне функціонування із заданою безвідмовністю.

Ремонтпридатність (відновлюваність, обслуговуваність): здатність системи до відновлення працездатності після відмови або в контексті цього дослідження та роботи [15]. Це означає час

перезарядження батарей БпЛА, оскільки їх ремонт не розглядається. Перехід системи в непрацездатний стан відбувається через розрядження батарей. Важливо оптимізувати процес зарядження, щоб мінімізувати час простою та забезпечити безперервну роботу мережі.

Вразливість до зовнішніх впливів (живучість, резильєнтність): здатність системи протистояти впливу фізичних або інформаційних факторів. Вона також характеризується керованістю процесів деградації (зменшення ефективності) в умовах втрати працездатності частиною елементів системи. Різні БпЛА по-різному реагують на вплив зовнішніх чинників, а на рівні системи мають реалізовуватися процедури керованої деградації, щоб мінімізувати вплив на ефективність. Увага приділяється комплексному впливу навколишнього середовища через коефіцієнт інтенсивності відмови, який відтворює чутливість БпЛА до цих факторів. Вразливість до кіберзагроз є критичним аспектом, що впливає на живучість та резильєнтність системи. До таких загроз належать атаки на комунікаційні канали, спроби перехоплення або підроблення даних, а також спроби взяти під контроль безпосередньо БпЛА. Необхідно, щоб система мала механізми виявлення та реагування на кібератаки, що дасть змогу швидко відновити функціональність після інцидентів. Розроблення і тестування сценаріїв кібербезпеки допоможуть покращити готовність системи до можливих атак.

Оперативність розгортання: час, необхідний для повного розгортання літальної мережі з використанням БпЛА для забезпечення комунікацій між джерелами інформації та центрами прийняття рішень. Час, що витрачається на заміщення окремих апаратів або їх груп без неприпустимої перерви комунікації, має бути окремим показником, що впливає на ефективність системи загалом.

Ефективність: комплексна характеристика, що визначається тим, як система забезпечує досягнення ключових цілей (якісний, тривалий і безперервний зв'язок), зважаючи на витрати. Ця характеристика дає змогу оцінити економічну доцільність вибору тієї чи іншої стратегії розгортання та підтримки мережі, беручи до уваги витрати на закупівлю, обслуговування та експлуатацію БпЛА, а також очікуваний результат у вигляді якісної та надійної роботи мережі.

Надамо показники, за якими доцільно вимірювати перелічені характеристики.

1. **Імовірність безвідмовної роботи за визначений час, $P(tx)$:** імовірність, що система буде функціонувати безвідмовно протягом заданого часу tx . Це ключовий показник безвідмовності (надійності), що визначає, наскільки довго система може працювати без відмов згідно з вимогами.

2. **Середній час відновлення (MTTR – Mean Time To Repair):** середній час, необхідний для відновлення працездатності системи після відмови, що передбачає час на заміну або зарядження батарей БпЛА.

3. **Інтенсивності відмов БпЛА в номінальних умовах λ_0 і під впливом зовнішніх факторів λ_e ,** пов'язаних між собою, у найпростішому варіанті добутком коефіцієнтів, що зважають на фізичні та інформаційні впливи.

4. **Час розгортання (T):** час підготовки (необхідний для підготовки системи до розгортання), час запуску (необхідний для фізичного розгортання та запуску системи), час налаштування (необхідний для налаштування і перевірки працездатності системи).

5. **Показник економічної ефективності (EP – Economic Performance):** відношення математичного очікування часу безвідмовної роботи з імовірністю, не нижчою від заданої (TP_{req}), до сумарної вартості системи (TC – Total Cost, де $TC = CAPEX + OPEX$, $CAPEX$ (Capital Expenditure) – витрати на обладнання; $OPEX$ (Operational Expenditure) – витрати на експлуатацію мережі, до очікуваного часу безперебійної роботи.

Визначимо, які можуть бути критерії для вибору стратегій.

- Простий критерій: використовується тільки один показник, для якого сформовано вимогу, наприклад, $P(tx) > P_{req}$. Може також задаватися вимога до максимізації або мінімізації певного показника.

- Комплексний критерій: використовується кілька показників для таких характеристик, як безвідмовність, вартість, час на заміну, для яких можуть бути встановлені окремі вимоги (обмеження).

- Критерій, коли задається цільова функція та обмеження: наприклад, мінімум вартості розв'язання задачі B_{min} (вартість всіх задіяних БпЛА + вартість обслуговування), якщо $P(tx) > P_{req}$. У цьому разі B_{min} є цільовою функцією, а $P(tx) > P_{req}$ – обмеженням.

- Критерій аналогічно до пункту 3, але з кількома обмеженнями.

• Багатокритеріальна задача (оптимізація): кілька цільових функцій і кілька обмежень.

3.2 Алгоритм вибору

Алгоритм вибору – це послідовність дій, що використовується для визначення оптимальних за заданим критерієм стратегій розгортання мережі БПЛА. За алгоритмом систематично оцінюються всі можливі варіанти й обирається найкращий за визначеним критерієм. Використання алгоритму вибору забезпечує обґрунтованість і ефективність прийнятих рішень, допомагаючи знизити ризики та підвищити надійність системи.

Запропоновано загальну послідовність вибору оптимальних стратегій розгортання ЛМ.

1. **Ініціалізація.** Збір початкових даних про розгортання літальної мережі, результати визначення умов експлуатації та доступні ресурси.

2. **Формування множини можливих стратегій.** Фільтрація непридатних комбінацій (зі списку розробленої множини стратегій) згідно з обмеженнями, зібраними в процесі ініціалізації.

3. **Визначення критеріїв вибору стратегії розгортання.** Такий вибір встановлюється насамперед замовником системи. Крім того, зважаючи на те, що застосування літальних мереж зазначеного класу орієнтоване на складні мінливі умови, складники критерію (значення обмежень, показники, які беруться до уваги) або навіть сам тип критерію можуть змінюватися.

4. **Оцінювання показників ефективності.** Виконання моделювання та симуляції функціонування системи за кожної стратегії. Розрахунок необхідних показників (надійності, швидкості розгортання, енергоспоживання, фінансових витрат тощо).

5. **Вибір оптимальної стратегії.** Оцінювання стратегій та їх вибір відповідно до визначеного критерію.

6. **Перевірка та валідація.** Тестування обраної стратегії в симуляційних умовах. Аналіз результатів і корекція стратегії за необхідності. Аналіз можливих ризиків і способів їх мінімізації.

3.3 Архітектура системи

Підтримку впровадження певного алгоритму та алгоритмів керування за допомогою розгортання та експлуатації ЛМ забезпечує ІТ-інфраструктура системи, елементами якої є:

• сервери, що обробляють значні обсяги даних у реальному часі, зокрема аналізують телеметричні

показники від БПЛА та обчислюють оптимальні маршрути;

• мережне обладнання для забезпечення зв'язку між компонентами системи;

• програмне забезпечення для моніторингу стану системи в реальному часі, а саме: виявлення відмов, моніторинг працездатності мережі та управління запасами БПЛА;

• інструменти для захисту системи від кіберзагроз;

• бази даних для зберігання та оброблення інформації; використовуються як *SQL*, так і *NoSQL* бази даних для забезпечення гнучкості та ефективності управління інформацією, зважаючи на різні вимоги до структури й оброблення даних. Подібний підхід досліджено та обґрунтовано в роботі [19];

• інтерфейси для відтворення інформації у вигляді карт, графіків та інших візуальних елементів, що полегшують аналіз та прийняття рішень.

4 Приклади вибору стратегії

Розглянемо процес розгортання рою БПЛА для утворення літальної комунікаційної *LiFi*-мережі в приміщенні з перешкодами під час аварійної ситуації на кшталт руйнування турбінної зали атомної станції чи іншої споруди. Рій комунікаційних БПЛА (що містить основні та резервні апарати) розташований у депо в точці С. Це може бути зроблено заздалегідь, і завдання розгортання та функціонування мережі розв'язується повністю в автоматичний спосіб. Депо не оснащено пунктом ремонту та обслуговування, але є резервні БПЛА. Маршрут передачі *LiFi*-сигналу (*LiFi*-маршрут) від точки А (джерело інформації) до точки В (споживач інформації), кількість БПЛА для створення мережі та їх розміщення на маршруті визначаються заздалегідь на підставі алгоритмів, описаних у роботі [15]. Використовуються однотипні БПЛА (однакові характеристики щодо автономності, швидкості, інтенсивності відмов тощо). Наявність БПЛА-матки не передбачено.

Застосуємо множину стратегій розгортання ЛМ, розроблену в розділі 2, щоб обрати стратегії, допустимі для виконання поставленого завдання.

Починаємо з ознак за зростанням важливості.

• **Можливість переривання зв'язку:** задана умовами завдання:

– Переривання припустиме (код – ПП).

• **Наявність ремонту та обслуговування:** не передбачена умовами завдання:

– Без ремонту та обслуговування (код – БО): депо не оснащено пунктом ремонту та обслуговування.

• **Резервування:** за умовами завдання використання резервних БПЛА допускається:

– З резервуванням дробової кратності (код – РД).

• **Метод резервування:** за умови "дробової кратності" позмінне резервування стає неефективним:

– Резервування за потребою (код – РП).

• **Розташування перешкод:** їх розміри, кількість і розміщення задані умовами завдання:

– Стационарні перешкоди (код – СП).

• **Спосіб доставки БПЛА:** заданий умовами завдання:

– Без використання БПЛА-носія матки (код – БМ).

• **Тип стартової точки:** не уточнюється, але симуляції показали, що стратегії із середньою точкою старту є більш ефективними (менший час розгортання). Крім того, якщо розглядати комплекс, що забезпечує розгортання літальної мережі, як частину штатної системи безпеки, місце розташування депо може бути визначено з огляду на цю обставину:

– Середня точка маршруту (код – СТ).

Отже, обираємо одну стратегію ПП/БО/РД-РП/СП-БМ-СТ, яка відповідає цим вимогам і висновкам (рис. 3). Вона також ілюструється відповідною траєкторією (див. рис. 2).

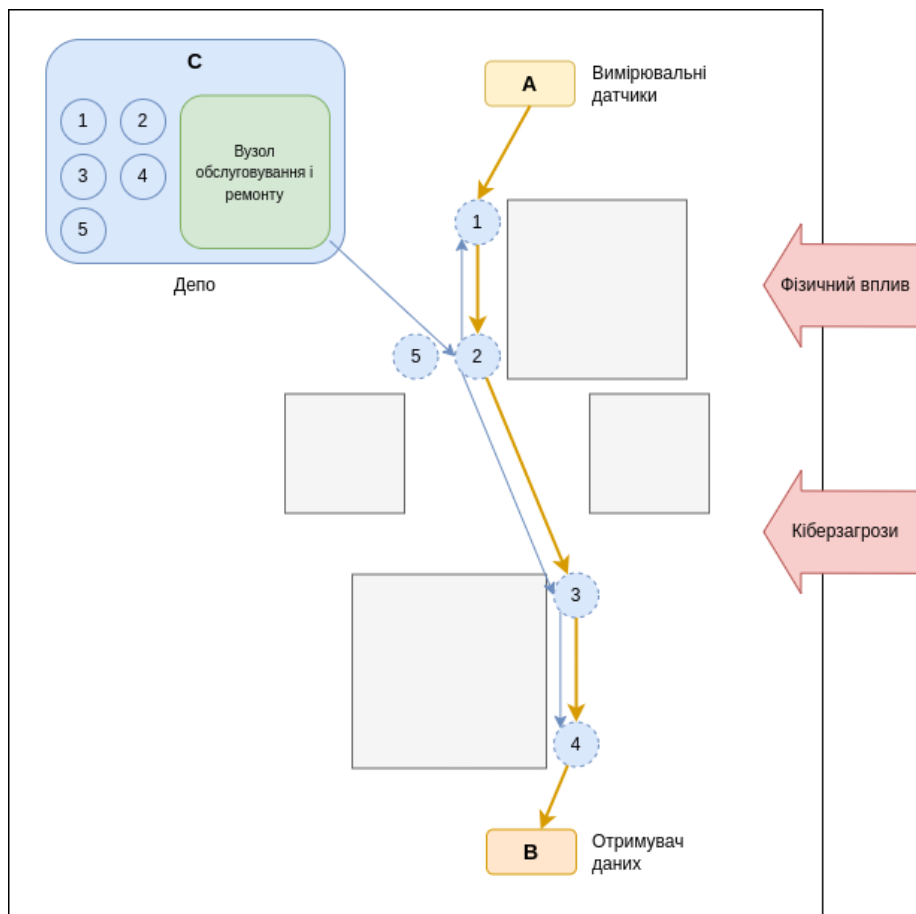


Рис. 3. Стратегія розгортання мережі ПП/БО/РД-РП/СП-БМ-СТ

Припустимо, що задані такі вимоги до розгортання комунікаційної мережі БПЛА:

• імовірність безвідмовної (безперервної) роботи має бути не нижчою від припустимого значення протягом заданого часу;

• показник економічної ефективності має бути максимальним.

Отже, критерієм вибору стратегії забезпечення надійності системи БПЛА буде критерій з використанням цільової функції з обмеженнями.

Цільова функція: показник економічної ефективності має бути максимальним, зважаючи на сумарні витрати ТС та очікуваний час безперебійної роботи (*MTBF*).

Обмеження: мережа має відповідати певному заданому рівню надійності, $P(tx) \geq P_{req}$. Припустимо, що $P_{req} = 0,9$.

Оскільки за попереднього аналізу маємо одну прийнятну стратегію (ПП/БО/РД-РП/СП-БМ-СТ), наведемо її різні варіації. Розглянемо приклади застосування цієї стратегії за умови використання різних моделей БПЛА, щоб з'ясувати, що є більш економічно ефективним: обрати більш дешеві, але менш надійні БПЛА чи обрати дорожчі та надійні.

Маємо таку загальну вхідну інформацію:

- кількість БПЛА в мережі – 5;
- час роботи (t_1) – 20 год.

Варіація 1, дорожчі БПЛА:

- ціна одного БПЛА – 2000 USD;
- інтенсивність відмов одного БПЛА (λ_1) – 0,0010 відмов на годину.

Варіація 2, дешевші БПЛА:

- ціна одного БПЛА – 1500 USD;
- інтенсивність відмов одного БПЛА (λ_2) – 0,0013 відмов на годину.

Надійність (гарантоздатність) БПЛА визначається:

– безвідмовністю технічних засобів (беруться до уваги відмови електронних компонент, двигунів, сенсорів тощо, а також коефіцієнт зовнішніх факторів);

– безвідмовністю (коректністю) вбудованого програмного забезпечення (відмови можуть бути викликані дефектами в коді, збоями в операційній системі, роботі з базою даних або програмному забезпеченні управління польотом);

– ризиками успішних кібератак (реалізацією загроз, пов'язаних із втручанням у систему керування, зломом або саботажем через мережні вразливості).

На підставі цього аналізу можемо припустити, що інтенсивність відмови одного БПЛА (λ_{UAV}) передбачає інтенсивності відмов технічних ($\lambda_{hardware}$) і програмних ($\lambda_{software}$) засобів, а також відмов унаслідок успішних кібератак (λ_{cyber}), і в разі

прийнятності припущення про незалежність відмов отримаємо формулу (2):

$$\lambda_{UAV} = \lambda_{hardware} + \lambda_{software} + \lambda_{cyber}. \quad (2)$$

Розглянемо систему з n БПЛА в мережі та m резервних БПЛА. Коли в мережі відмовляє БПЛА та його неможливо замінити (резервних БПЛА не вистачає) – система вважається непрацездатною. Імовірність безвідмовної роботи системи можна розрахувати, використовуючи модель ковзного резервування.

Модель ковзного резервування передбачає, що маємо основні та резервні елементи (у нашому випадку – БПЛА), які можуть толерувати відмови основних елементів способом їх заміни. Імовірність безвідмовної роботи системи залежить від кількості основних та резервних елементів, а також від імовірності безвідмовної роботи кожного окремого елемента.

Припущення: ймовірності безвідмовної роботи основних і резервних елементів однакові, а їх відмови є незалежними подіями; резервні БПЛА постійно перебувають у повітрі; відмова виявляється миттєво; заміна БПЛА, що відмовив, виконується миттєво.

Імовірність безвідмовної роботи системи P_s можна розрахувати за формулою

$$P_s = \sum_{k=0}^m C(n+m, k) * P^{n+m-k} * (1-P)^k, \quad (3)$$

де $C(n+m, k)$ – кількість комбінацій вибору k відмов серед n основних і m резервних БПЛА;

P – імовірність безвідмовної роботи одного БПЛА за заданий час;

n – кількість БПЛА, що безпосередньо виконують завдання, у мережі;

m – кількість резервних БПЛА, що можуть замінити основні літальні апарати в разі їх відмови;

k – кількість відмов.

Обчислимо (табл. 3) для варіантів 1 і 2 реалізації стратегії ПП/БО/РД-РП/СП-БМ-СТ. Знайдемо m , за умови якої ймовірність безвідмовної роботи всієї системи задовольнятиме умову $P_s \geq P_{req}$.

Таблиця 3. Розрахунки ймовірності безвідмовної роботи системи

Варіант	λ	P (20)	n	m	P_s	Умова ($P_s \geq P_{req}$)	Ціна всіх БПЛА ($price * (m + n)$)
Варіант 1	0,0010	0,980	5	0	0,904	$0,904 \geq 0,9$	10000
Варіант 2	0,0013	0,974		0	0,878	$0,878 < 0,9$	7500
				1	0,990	$0,990 \geq 0,9$	9000

Для варіанта 1 за відсутності резерву маємо ймовірність безвідмовної роботи (протягом 20 год) системи $P_s = 0,904$, що задовольняє задане обмеження ($P_s \geq P_{req}$). У цьому разі ціна флоту БпЛА становить 10 000 USD.

Для варіанта 2 за наявності одного резервного БпЛА маємо ймовірність безвідмовної роботи (протягом 20 год) системи $P_s = 0,990$, що задовольняє задане обмеження ($P_s \geq P_{req}$). У цьому разі ціна флоту БпЛА становить 9000 USD.

Зважаючи на вищу ймовірність безвідмовної роботи та нижчу вартість флоту БпЛА, варіант 2 є економічно більш вигідним. Його вибір дає змогу максимізувати показник економічної ефективності, зменшити сумарні витрати та забезпечити вищу надійність системи.

Розглянуті приклади мають суто ілюстративний характер, загалом пошук найкращої за визначеним критерієм стратегії має ґрунтуватися на класичних методах оптимального резервування, адаптованих для БпЛА й пошуку маршрутів [20], а також на застосуванні стохастичних мереж Петрі або марковських випадкових процесів для відновлюваних ЛМ [21].

5 Висновки

5.1 Основні результати

Ключовим результатом цього дослідження є алгоритм вибору стратегій підтримки надійного функціонування літальної мережі, розгорнутої для забезпечення оптико-бездротових комунікацій між джерелами й отримувачами інформації.

У роботі узагальнено класифікатор стратегій за додатковими ознаками, що дало змогу розширити множину стратегій, якщо порівнювати зі статтею [18]. Запропоновані варіанти критеріїв допомагають варіювати постановки задачі вибору стратегій. Приклад надано для одного з простих критеріїв, який ілюструє покрокову процедуру вибору стратегії, що доповнюється розрахунками показників надійності.

Наукова новизна результатів, на думку авторів, полягає в такому:

- додано класифікаційну ознаку "наявність ремонту та обслуговування", що дало змогу розширити

множину стратегій розгортання ЛМ БпЛА. Важливість уваги до цієї доволі відомої ознаки зумовлена тим, що вона передбачає створення повністю автоматично працюючих депо БпЛА;

- визначено різноманітні критерії для вибору оптимальних стратегій розгортання комунікаційних мереж БпЛА, що дає змогу системно обґрунтовувати варіанти вибору;

- запропоновано алгоритм для вибору стратегій розгортання мережі БпЛА на основі запропонованих критеріїв, який визначає основні етапи пошуку залежно від вимог.

Отже, дослідження розширює базис стратегій розгортання літальних мереж і надає інструменти для їх ефективного вибору та адаптації до змінних умов експлуатації. Це сприяє підвищенню надійності та ефективності ЛМ у кризових ситуаціях, забезпечує безперервність передачі даних між джерелами та отримувачами інформації.

5.2 Перспективи роботи

Подальші дослідження мають бути спрямовані на:

- розроблення алгоритмів для автоматизованої заміни БпЛА, що беруть до уваги різні сценарії розгортання залежно від класифікаційних ознак;

- створення та дослідження математичних моделей надійності, що описують поведінку систем за умови використання різних стратегій розгортання ЛМ. Це передбачає аналіз впливу різних факторів на безперебійність (безвідмовність) роботи системи, надійність загалом;

- розроблення програмного забезпечення для розв'язання задач і створення системи підтримки прийняття рішень, що дасть змогу автоматизувати процеси планування та розгортання літальної мережі БпЛА;

- дослідження впливу кіберзагроз на гарантоздатність (безпеку та надійність) ЛМ, а також розроблення методів захисту від кібератак;

- аналіз економічної ефективності різних стратегій розгортання та обслуговування ЛМ з огляду на витрати на обладнання, експлуатацію та обслуговування;

- розроблення ІТ-архітектури ЛМ і комплексу обслуговування.

Список літератури

1. A review of flying ad hoc networks: key characteristics, applications, and wireless technologies / F. Pasandideh et al. *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14, No. 18. 4459 p. DOI: 10.3390/rs14184459
2. Non-terrestrial networks with UAVs: A projection on flying ad-hoc networks / M. Nemati et al. *Drones*. 2022. Vol. 6, No. 11. 334 p. DOI: 10.3390/drones6110334
3. Petritoli E., Leccese F., Ciani L. Reliability and Maintenance Analysis of Unmanned Aerial Vehicles. *Sensors*. 2018. Vol. 18, No. 9. 3171 p. DOI: 10.3390/s18093171
4. Modeling and analysis of self-organizing UAV-assisted mobile networks with dynamic on-demand deployment / D. Horvath et al. *Entropy*. 2019. Vol. 21, No. 11. 1077 p. DOI: 10.3390/e21111077
5. Tian Z., Haas Z. J., Shinde S. Routing in Solar-Powered UAV Delivery System. *Drones*. 2022. Vol. 6, No. 10. 282 p. DOI: 10.3390/drones6100282
6. 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. DOI: 10.1109/glocom.2018.8647441
7. Ruban I., Lebediev V. Method for determining the rational number of uav flotilla taking into account the reliability of the aircraft. *Innovative technologies and scientific solutions for industries*. 2023. No. 1 (23). P. 108–114. DOI: 10.30837/itssi.2023.23.108
8. Deep Neural Network for Autonomous UAV Navigation in Indoor Corridor Environments / R. P. Padhy et al. *Procedia Computer Science*. 2018. Vol. 133. P. 643–650. DOI: 10.1016/j.procs.2018.07.099
9. Bachrach A., He R., Roy N. Autonomous Flight in Unknown Indoor Environments. *International Journal of Micro Air Vehicles*. 2009. Vol. 1, No. 4. P. 217–228. DOI: 10.1260/175682909790291492
10. Bills C., Chen J., Saxena A. Autonomous MAV flight in indoor environments using single image perspective cues. *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Shanghai, China, 9–13 May 2011. DOI: 10.1109/icra.2011.5980136
11. 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. DOI: 10.1109/iwcmc.2019.8766511.
12. Robust UAV mission planning / L. Evers et al. *Annals of Operations Research*. 2012. Vol. 222, No. 1. P. 293–315. DOI: 10.1007/s10479-012-1261-8
13. Alwateer M., Loke S. W., Rahayu W. Drone services: An investigation via prototyping and simulation. *2018 IEEE 4th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*, Singapore, 5–8 February 2018. DOI: 10.1109/wf-iot.2018.8355153
14. 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. DOI: 10.1109/iaeac47372.2019.8998066
15. Deployment of a UAV swarm-based LiFi network in the obstacle-ridden environment: algorithms of finding the path for UAV placement / K. Leichenko et al. *Radioelectronic and Computer Systems*. 2024. Vol. 2024, No. 1. P. 176–195. DOI: 10.32620/reks.2024.1.14
16. 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. Збірник наукових праць*. 2024. Т. 1, № 75. С. 193–200. DOI: 10.26906/SUNZ.2024.1.193
17. Лейченко К. М., Фесенко Г. В., Харченко В. С. Стратегії розгортання та методи забезпечення надійності рою БПЛА для утворення LiFi мережі. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2024. № 1. С. 21–31. DOI: 10.31891/2219-9365-2024-77-3
18. Тереник Д., Харченко В. С. Класифікація стратегій забезпечення надійності літаючої мережі для забезпечення комунікацій в умовах руйнувань. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2024. № 2. С. 357–370. DOI: 10.31891/2219-9365-2024-78-41
19. Тереник Д., Кучук Г. А. Порівняння SQL та NoSQL баз даних на прикладі проектування аффілейт репорт систем. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. 2020. № 1. С. 83–89. DOI: 10.32620/reks.2020.1.08
20. Gal Y., Zarrouk D. Task-Based Motion Planning Using Optimal Redundancy for a Minimally Actuated Robotic Arm. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12, No. 19. P. 9526. DOI: 10.3390/app12199526
21. Stochastic Modeling for Assessing the Reliability and Availability of Drone-Based Surveillance Systems / L. Lins et al. *2024 IEEE International Systems Conference (SysCon)*, Montreal, QC, Canada, 15–18 April 2024. DOI: 10.1109/syscon61195.2024.10553470

References

1. Pasandideh, F., da Costa, J. P. J., Kunst, R., Islam, N., Hardjawana, W., Pignaton de Freitas, E. (2022), "A review of flying ad hoc networks: key characteristics, applications, and wireless technologies". *Remote sensing*. No. 14(18), 4459 p. DOI: 10.3390/rs14184459
2. Nemati, M., Al Homssi, B., Krishnan, S., Park, J., Loke, S. W., Choi, J. (2022), "Non-terrestrial networks with uavs: a projection on flying ad-hoc networks". *Drones*. 6(11), 334 p. DOI: 10.3390/drones6110334
3. Petritoli, E., Leccese, F., Ciani, L. (2018), "Reliability and maintenance analysis of unmanned aerial vehicles". *Sensors*. 18(9), 3171 p. DOI: 10.3390/s18093171
4. Horvath, D., Gazda, J., Slapak, E., Maksymyuk, T. (2019), "Modeling and analysis of self-organizing uav-assisted mobile networks with dynamic on-demand deployment". *Entropy*. 21(11), 1077 p. DOI: 10.3390/e21111077
5. Tian, Z., Haas, Z. J., Shinde, S. (2022), "Routing in solar-powered UAV delivery system". *Drones*. 6(10), 282 p. DOI: 10.3390/drones6100282
6. Lee, G., Saad, W., Bennis, M. (2018), "Online optimization for uav-assisted distributed fog computing in smart factories of industry 4.0". *GLOBECOM 2018 - 2018 IEEE global communications conference, 9–13 December 2018, Abu Dhabi, United Arab Emirates*. IEEE. DOI: 10.1109/glocom.2018.8647441
7. Ruban, I., Lebediev, V. (2023), "Method for determining the rational number of uav flotilla taking into account the reliability of the aircraft". *Innovative technologies and scientific solutions for industries*. 1 (23), P. 108–114. DOI: 10.30837/itssi.2023.23.108
8. Padhy, R. P., Verma, S., Ahmad, S., Choudhury, S. K., Sa, P. K. (2018), "Deep neural network for autonomous UAV navigation in indoor corridor environments". *Procedia computer science*. 133, P. 643–650. DOI: 10.1016/j.procs.2018.07.099
9. Bachrach, A., He, R., Roy, N. (2009), "Autonomous flight in unknown indoor environments". *International journal of micro air vehicles*. 1(4), P. 217–228. DOI: 10.1260/175682909790291492
10. Bills, C., Chen, J., Saxena, A. (2011), "Autonomous MAV flight in indoor environments using single image perspective cues". *2011 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA), 9–13 May 2011, Shanghai, China*. IEEE. DOI: 10.1109/icra.2011.5980136
11. Duong, T. Q., Nguyen, L. D., Nguyen, L. K. (2019), "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)*, 24–28 June 2019, Tangier, Morocco. IEEE. DOI: 10.1109/iwcmc.2019.8766511
12. Evers, L., Dollevoet, T., Barros, A. I., Monsuur, H. (2012), "Robust UAV mission planning". *Annals of operations research*. 222(1), P. 293–315. DOI: 10.1007/s10479-012-1261-8
13. Alwateer, M., Loke, S. W., Rahayu, W. (2018), "Drone services: an investigation via prototyping and simulation". *2018 IEEE 4th world forum on internet of things (wf-iot)*, 5–8 February 2018, Singapore. IEEE. DOI: 10.1109/wf-iot.2018.8355153
14. Xu, J., Guo, Q., Xiao, L., Li, Z., Zhang, G. (2019), "Autonomous decision-making method for combat mission of UAV based on deep reinforcement learning". *2019 IEEE 4th advanced information technology, electronic and automation control conference (IAEAC)*, 20–22 December 2019, Chengdu, China. IEEE. DOI: 10.1109/iaeac47372.2019.8998066
15. Leichenko, K., Fesenko, H., Kharchenko, V., Illiashenko, O. (2024), "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*. 2024(1), P. 176–195. DOI: 10.32620/reks.2024.1.14
16. Leichenko, K., Fesenko, H. (2024), "A software tool to support the planning of the deployment of a lifi network based on BPL to ensure data transmission in conditions of destruction". [Prohramnyi zasib pidtrymky planuvannia rozghortannia lifi merezhi na osnovi bpla dlia zabezpechennia peredachi danykh v umovakh ruinuvan]. *Control, navigation and communication systems. Collection of scientific papers*. 1(75), P. 193–200. DOI: 10.26906/sunz.2024.1.193
17. Leichenko, K., Fesenko, H., Kharchenko, V. (2024), "Deployment strategies and methods for ensuring the reliability of a swarm of UAVs for the formation of a lifi network". [Stratehiji rozhortannja ta metody zabezpečennja nadijnosti roju bpla dlja utvorennja lifi mereži]. *Measuring and computing devices in technological processes*. (1), P. 21–31. DOI: 10.31891/2219-9365-2024-77-3
18. Terenik, D., Kharchenko, V. (2024), "Classification of strategies for ensuring the reliability of the flying network for ensuring communications in conditions of destruction". [Klasyfikacija stratehij zabezpečennja nadijnosti litajučoji mereži dlja zabezpečennja komunikacij v umovax rujnuvan]. *Measuring and computing devices in technological processes*. No. 2, P. 357–370. DOI: 10.31891/2219-9365-2024-78-35
19. Terenik, D., Kuchuk, H. (2020), "Comparison of sql and nosql databases on the example of designing affiliate report systems". [Porivnjannja sql i nosql baz danyx na prykladi proektuvannja affilejt report system]. *Radioelectronic and computer systems*. (1), P. 83–89. DOI: 10.32620/reks.2020.1.08

20. Gal, Y. and Zarrouk, D., (2022), "Task-Based motion planning using optimal redundancy for a minimally actuated robotic arm". *Applied Sciences*. 12(19), 9526 p. DOI: 10.3390/app12199526
21. Lins, L., Nascimento, E., Dantas, J., Araujo, J. and Maciel, P. (2024), "Stochastic modeling for assessing the reliability and availability of drone-based surveillance systems". *IEEE international systems conference (syscon)*, 5–18 April, Montreal, QC, Canada. *IEEE*, P. 1–8. DOI: 10.1109/syscon61195.2024.10553470

Надійшла (Received) 15.08.2024

Відомості про авторів / About the Authors

Тереник Дмитро – Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", магістр зі спеціальності "Комп'ютерна інженерія", аспірант кафедри комп'ютерних систем, мереж і кібербезпеки, Харків, Україна; e-mail: d.terenik@student.csn.khai.edu; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0003-4173-8757>

Харченко Вячеслав Сергійович – доктор технічних наук, професор, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", завідувач кафедри комп'ютерних систем, мереж і кібербезпеки, Харків, Україна; e-mail: v.kharchenko@csn.khai.edu; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5352-077X>

Terenyk Dmytro – National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Master of Science in Computer Engineering, PhD Student at the Department of Computer Systems, Networks, and Cybersecurity, Kharkiv, Ukraine.

Kharchenko Vyacheslav – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Head at the Department of Computer Systems, Networks, and Cybersecurity, Kharkiv, Ukraine.

CHOOSING STRATEGIES FOR DEPLOYMENT AND ENSURING THE RELIABILITY OF A UAV SWARM TO SUPPORT COMMUNICATIONS IN DESTRUCTION CONDITIONS

The **subject matter** of the article is the system of communication networks of UAVs (flying networks, FNs), which use LiFi technology for data transmission from the source to the receiver in conditions of physical obstacles and cyber threats, as well as deployment and reliability assurance strategies (DRAS) of FNs. The **goal** of the work is to develop criteria and algorithms for choosing DRAS of FNs that provide the necessary level of reliability and efficiency under given constraints. The following **tasks** were solved in the article: systematization of deployment strategies and ensuring the reliability of the flying network; formulation of principles and development of an algorithm for choosing the optimal deployment strategy and ensuring the reliability of FNs; providing recommendations on choosing the optimal deployment strategies and ensuring the reliability of the flying network. The following **methods** are used: system analysis for choosing the optimal DRAS; theory of reliability and system efficiency. The following **results** were obtained: the classifier of FNs deployment strategies was expanded due to additional features of repair and maintenance, as well as the presence of cyber attacks; the criteria for choosing deployment strategies and ensuring the reliability of FNs are formulated; an algorithm for choosing the optimal deployment strategy and ensuring the reliability of FNs was developed; the analysis is carried out and an example of the application of the developed algorithms is given to illustrate the step-by-step procedure for choosing a strategy, which is accompanied by calculations of reliability indicators. **Conclusions:** the proposed sets, criteria, and algorithm for choosing deployment and reliability assurance strategies of FNs enable the substantiation of a set of parameters and planning of the implementation of the optimal (according to the defined criterion) policy for the introduction of an automatic communication support system at critical infrastructure objects under conditions of destruction and cyber influence, as well as increase efficiency (minimize cost) of the use of flying networks.

Keywords: UAV; LiFi; flying networks; choice algorithms; reliability; strategy efficiency.

Бібліографічні опису / Bibliographic descriptions

Тереник Д., Харченко В. С. Вибір стратегій розгортання і забезпечення надійності рою БПЛА для підтримки комунікацій в умовах руйнувань. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2024. № 3 (29). С. 91–103. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.3.091>

Terenyk, D., Kharchenko, V. (2024), "Choosing strategies for deployment and ensuring the reliability of a UAV swarm to support communications in destruction conditions", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 3 (29), P. 91–103. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.3.091>