

**А. М. АФАНАСЬЄВА**магістр кафедри електронних обчислювальних машин  
Харківський національний університет радіоелектроніки  
ORCID: 0009-0006-4622-8053**В. М. ТКАЧОВ**кандидат технічних наук, доцент,  
доцент кафедри електронних обчислювальних машин  
Харківський національний університет радіоелектроніки  
ORCID: 0000-0002-6524-9937

## ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПОБУДОВИ ВИСОКОМОБІЛЬНИХ КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖ НА БАЗІ РОЮ БПЛА

Існує чимала кількість переваг використання безпілотних літальних апаратів для побудови мережі на великій території в порівнянні з існуючими рішеннями. А у зв'язку зі збільшенням популярності та використання безпілотних літаючих апаратів (далі – БПЛА), виникають нові проекти, спрямовані на вивчення поточних проблем, які, теоретично, можуть бути вирішені за допомогою дронів або роїв дронів.

БПЛА володіють великою мобільністю, оскільки вони можуть легко переміщатися на великі відстані. Це означає, що їх можна швидко розгорнути та переносити з одного місця на інше в залежності від потреб мережі. Наприклад, у випадку зміни топографії або виникнення нових вимог до покриття зв'язку, БПЛА можуть бути легко перенесені в нові місця для оптимального покриття. Однією з ключових переваг використання БПЛА є їхній потенціал для автономної роботи. Вони можуть бути запрограмовані для виконання різних завдань без значного людського втручання. Наприклад, вони можуть автоматично відслідковувати стан мережі та, у випадку виявлення проблем або відмови, самостійно виправляти ситуацію шляхом відновлення зв'язку або переорієнтації. БПЛА мають здатність переміщатися у тривимірному просторі, що дозволяє їм забезпечувати покриття на широкій території порівняно з традиційними методами. Це дозволяє створювати мережі з більш широким охопленням та забезпечувати доступ до зв'язку в регіонах, де раніше це було складним або неможливим.

Проте створення мережі з безпілотних літальних апаратів може зіткнутися з рядом недоліків та складнощів. Спочатку, складність конфігурації може бути значним викликом. Налаштування мережі з БПЛА вимагає розуміння принципів роботи кожного дрона, вибір відповідної технології зв'язку та налаштування параметрів мережі. Це може вимагати значних зусиль і часу від кваліфікованих фахівців. Також, обмежена пропускна здатність може бути проблемою, особливо при передачі великої кількості даних. Залежно від технології зв'язку та кількості дронів у мережі, може виникнути обмеження на пропускну здатність мережі, що може обмежити її ефективність. Крім того, вартість впровадження та підтримки мережі з БПЛА може бути великою. Додатково, потрібно мати на увазі недостатню стійкість до перешкод. Залежно від середовища, в якому працюють дрони, можуть виникати проблеми зі стійкістю зв'язку через перешкоди, електромагнітні спотворення або інші фактори, що можуть погіршити продуктивність мережі. Ще виникає питання щодо потенційних загроз безпеки. Мережі з БПЛА можуть бути уразливі до кібератак, перехоплення сигналів або фізичних пошкоджень, що може призвести до втрати контролю над дронами або витоку конфіденційної інформації.

Тож, хоча мережі, побудовані роєм БПЛА стикаються з рядом викликів і обмежень, що потребують уважного вивчення та розв'язання, вони мають значний потенціал і переваги. Дослідження способів оптимізації конфігурації, забезпечення надійності та зменшення вартості впровадження таких мереж буде корисним для подальшого розвитку цієї технології. Такий підхід дозволить максимально використовувати потенціал мереж БПЛА та забезпечити їх успішне впровадження в різноманітних областях застосування.

**Ключові слова:** безпілотні літальні апарати (БПЛА), мобільність, модель з'єднання, керуюча станція, конфігурація мережі, стійкість до перешкод, високомобільна мережа.

A. M. AFANASIEVA

Master at the Department of Electronic Computers  
Kharkiv National University of Radioelectronics  
ORCID: 0009-0006-4622-8053

V. M. TKACHOV

Ph.D, Associate Professor,  
Professor at the Department of Electronic Computers  
Kharkiv National University of Radioelectronics  
ORCID: 0000-0002-6524-9937

## COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODS FOR BUILDING HIGH-MOBILITY COMPUTER NETWORKS BASED ON A SWARM OF UAVS

*There are numerous advantages to using unmanned aerial vehicles (UAVs) for building networks over large territories compared to existing solutions. With the increasing popularity and utilization of UAVs, new projects are emerging to investigate current issues that theoretically can be addressed using drones or swarms of drones.*

*UAVs possess great mobility as they can easily traverse vast distances. This means they can be swiftly deployed and relocated according to network requirements. For example, in case of topographical changes or new demands for communication coverage, UAVs can be easily relocated to new areas for optimal coverage. One of the key advantages of utilizing UAVs is their potential for autonomous operation. They can be programmed to perform various tasks without significant human intervention. For example, they can automatically monitor network status and, in case of issues or failures, autonomously rectify the situation by restoring communication or reorienting themselves. UAVs have the ability to move in three-dimensional space, allowing them to provide coverage over a wide area compared to traditional methods. This enables the creation of networks with broader coverage and facilitates access to communication in regions where it was previously difficult or impossible.*

*However, the establishment of a network using UAVs may face several drawbacks and challenges. Initially, configuration complexity can be a significant challenge. Setting up a UAV network requires understanding the principles of operation of each drone, selecting appropriate communication technology, and configuring network parameters. This may require significant effort and time from qualified professionals. Additionally, limited bandwidth can be a problem, especially when transmitting large amounts of data. Depending on the communication technology and the number of drones in the network, there may be restrictions on the network's bandwidth, which can limit its effectiveness. Moreover, the cost of implementation and maintenance of a UAV network can be significant. Furthermore, insufficient resilience to obstacles must be taken into account. Depending on the environment in which drones operate, issues with communication stability may arise due to obstacles, electromagnetic distortions, or other factors that could degrade network performance. Additionally, there is the question of potential security threats. UAV networks may be vulnerable to cyber-attacks, signal interception, or physical damage, which could result in loss of control over the drones or leakage of confidential information.*

*Therefore, although networks built by a swarm of UAVs face a number of challenges and limitations that require careful study and resolution, they have significant potential and advantages. Research into methods to optimize configuration, ensure reliability, and reduce the cost of implementing such networks will be beneficial for further development of this technology. Such an approach will allow for maximal utilization of the potential of UAV networks and ensure their successful implementation in various application areas.*

**Key words:** *Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), mobility, connectivity model, control station, network configuration, obstacle resilience, high-mobility network.*

### Постановка проблеми

В сучасному світі зростає потреба в ефективних комунікаційних системах, особливо на великих територіях, таких як сільська місцевість чи віддалені регіони. Забезпечення стабільного зв'язку на таких площах стає викликом через обмежену доступність інфраструктури та перешкоди від природного середовища.

У сучасний епоху, налаштування мереж на великих площах зазвичай виконується за допомогою традиційних методів, таких як прокладання кабелів або використання супутникового зв'язку. Однак ці методи мають свої недоліки. Наприклад, прокладання кабелів в сільській місцевості часто ускладнюється через рельєф місцевості, довжину відстаней та вартість інфраструктури. Також, супутниковий зв'язок, хоча і забезпечує широке охоплення, але має високу вартість та обмежену пропускну здатність.

Додатково, традиційні мережі можуть бути вразливі до різних ризиків та пошкоджень, таких як природні катастрофи, технічні відмови або кібератаки. У разі таких ситуацій, відновлення зв'язку може бути складним та вимагати значних зусиль та витрат.

Однак на сьогоднішній день існують нові технології, які можуть вирішити ці проблеми. Один з таких підходів – використання рою БПЛА для побудови мережі, що покриває велику площу. Цей підхід може забезпечити ефективне покриття, високу мобільність та здатність до автономного відновлення. У разі виявлення проблеми,

такої як відмова БПЛА, система може автоматично виявити та замінити його, забезпечуючи безперебійну роботу мережі.

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Безпілотні літальні апарати вже зараз відкривають широкі можливості в різних сферах і стануть ключовою інноваційною галуззю у майбутньому. На сьогоднішній день основним застосуванням дронів є використання одного пристрою в межах видимості та під контролем людини. Однак можливості мережевого зв'язку можуть значно розширити ці можливості, забезпечуючи нові можливості для цивільних дронів та відкриваючи нові сфери застосування.

З розвитком ринку дронів та зростанням їх популярності, з'являється нагальна потреба у розробці надійних мереж зв'язку для дронів, які можуть забезпечити стабільний зв'язок на великих відстанях. Існуючі рішення «точка-точка» для забезпечення зв'язку між дронами виявляються обмеженими через нестабільність сигналу та обмежену дальність передачі даних. Крім того, зростає кількість несанкціонованих польотів та аварій, в яких беруть участь дрони. Це створює потребу в розвитку ефективної регуляторної політики для контролю над цими пристроями.

Одним із ключових аспектів досліджень і публікацій у сфері використання рою безпілотних літальних апаратів для побудови мереж на великій площі є вивчення можливостей автономної роботи [1] дронів у побудові та управлінні мережею. Вчені досліджують алгоритми та технології, які дозволять дронам автоматично виявляти проблеми у мережі, такі як відмови апаратів чи перешкоди в сигналі, і реагувати на них шляхом відновлення зв'язку або перенаправлення трафіку. Інший напрямок досліджень зосереджується на оптимізації розташування та руху дронів для забезпечення максимального покриття площі та оптимального розподілу ресурсів. Вчені розробляють моделі та алгоритми, які нададуть можливість ефективно розміщувати дрони у просторі, забезпечуючи одночасно найкращий зв'язок для користувачів та економію енергії для самого рою.

Крім того, дослідження також розглядають можливості використання різних типів дронів для різних завдань у мережі. Наприклад, деякі дослідження зосереджуються на використанні великих дронів з великою здатністю до перевезення обладнання для розгортання базових станцій, тоді як інші вивчають можливості використання невеликих дронів для забезпечення доступу до інтернету з повітря у важкодоступних регіонах.

#### **Формулювання мети дослідження**

Метою даної роботи є огляд існуючих рішень побудови самовідновлювальних високомобільних комп'ютерних мереж та визначення ефективних методів самовідновлення на основі використання рою безпілотних літальних апаратів. Подальшими цілями є аналіз переваг і недоліків існуючих підходів, розробка нових стратегій використання БПЛА для забезпечення стійкості та надійності високомобільних мереж в умовах непередбачуваних обставин. Крім того, дослідження спрямоване на вивчення можливостей оптимізації роботи мережі з використанням рою БПЛА з метою забезпечення швидкого відновлення зв'язку та зменшення витрат на обслуговування та ремонт.

#### **Викладення основного матеріалу дослідження**

Перед тим, як почати створювати та налаштовувати мережу з двох або більше безпілотних літальних апаратів, необхідно для початку налаштувати зв'язок між одним із дронів та керуючим блоком (рис. 1).

Керуючий блок є незмінною складовою частиною в операціях керування БПЛА. Він виступає як інтерфейс між оператором та дроном, забезпечуючи контроль, моніторинг та комунікацію. Важливість належного налаштування цього зв'язку важко переоцінити, оскільки від нього залежить успішне виконання завдань, безпека польоту та точність управління. Керуючий блок може включати в себе різноманітні компоненти, такі як боді-комп'ютери, контролери польоту, пульт керування або навіть мобільні додатки. Ці пристрої забезпечують оператору можливість керувати рухами дрона, встановлювати місії, отримувати телеметричні дані та взаємодіяти з додатковими функціями.

Для належного налаштування зв'язку між безпілотним літальним апаратом (БПЛА) та керуючим блоком слід вибрати відповідну технологію зв'язку, яка враховує конкретні потреби та умови експлуатації. Налаштування параметрів зв'язку, таких як частота, потужність сигналу та шифрування, є ключовим етапом для забезпечення стабільної та безпечної комунікації. Після цього обидва пристрої повинні бути підключені до однієї мережі для взаємодії. Процедура аутентифікації та авторизації необхідні для забезпечення безпеки зв'язку. Після налаштування необхідно провести тестування з'єднання, що включає перевірку стабільності сигналу, швидкості передачі даних та відповіді на команди. У разі потреби може знадобитися калібрування та налагодження параметрів зв'язку для досягнення оптимальної продуктивності та ефективності взаємодії. Належно налаштований зв'язок між БПЛА та керуючим блоком є критичним для забезпечення повного контролю та безпеки польоту.



Рис. 1. Модель зв'язку між дроном та керуючою станцією

Наступним кроком потрібно приєднати до схеми ще один дрон, який буде спілкуватись з керуючою станцією за допомогою першого дрону. Для додавання другого дрону в схему, де вже налаштоване з'єднання між першим дроном та керуючою станцією, необхідно встановити з'єднання між першим і другим дронами. Це може бути досягнуто за допомогою вбудованих модулів комунікації на обох дронах, які підтримують технології зв'язку, такі як Wi-Fi, Bluetooth або радіо.

Коли мова йде про спілкування між дронами, вибір технології зв'язку залежатиме від різних факторів, які варто врахувати для ефективного функціонування мережі. По-перше, вирішальним фактором є відстань між дронами та їхньою керуючою станцією. Якщо дрони знаходяться на значній відстані один від одного, доцільніше використовувати технологію радіо-зв'язку, яка має великий радіус дії та надійність сигналу. У випадку, коли дрони знаходяться близько один до одного, можна використовувати короткодіючі технології, такі як Wi-Fi або Bluetooth. По-друге, враховується середовище, в якому дрони будуть працювати. У відкритих просторах з мінімальними перешкодами радіо-зв'язок може бути ефективним рішенням. Проте, у забудованій місцевості короткодіючі технології можуть забезпечити кращу стабільність сигналу. Крім того, слід врахувати потужність сигналу та пропускну здатність технології зв'язку. Для завдань, де необхідна велика пропускну здатність та висока швидкість передачі даних, варто розглянути технології, які можуть забезпечити швидкий та стабільний зв'язок.

Після встановлення зв'язку між дронами, другий дрон може надсилати дані через перший дрон до керуючої станції. Перший дрон, у свою чергу, може використовувати свій власний з'єднання з керуючою станцією для передачі цих даних. Важливо, щоб обидва дрона були підключені до однієї мережі для взаємодії. Передача даних від другого дрону через перший може здійснюватися за допомогою внутрішнього мережевого маршрутизатора на першому дронах. Цей маршрутизатор може використовувати технології маршрутизації для ефективного пересилання даних між дронами та керуючою станцією.

Після успішного налаштування зв'язку між обома дронами та керуючою станцією, другий дрон може спілкуватись з керуючою станцією через перший дрон, роблячи польоти та передавання даних більш ефективними та забезпечуючи більш широкий охоплення мережі (рис. 2).

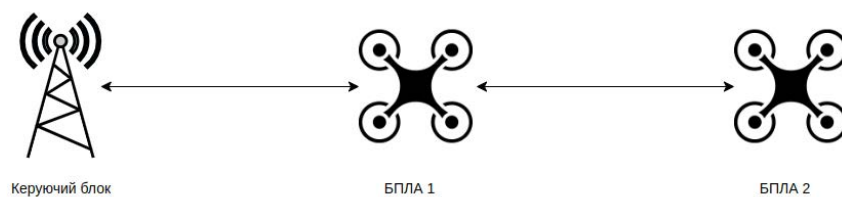


Рис. 2. Модель зв'язку між двома дронами та керуючою станцією

Далі потрібно налаштувати зв'язок між усім набором дронів, тому наступним кроком буде розглянуто різні методи з'єднання між безпілотними літальними апаратами (БПЛА) та керуючою станцією для ефективного керування групою дронів у різних сценаріях застосування.

Перша модель з'єднання передбачає пряме безпроводне з'єднання між кожним БПЛА та керуючою станцією. Цей метод дозволяє оператору контролювати кожен дрон окремо, забезпечуючи гнучкість та індивідуальний підхід до керування. Однак він може бути обмежений обсягом даних, які можна передати, та відстанню між дронами та керуючою станцією, що може обмежити радіус дії системи. Другий варіант включає в себе використання одного дрона як головного вузла, який підключається до керуючої станції, а інші дрони приєднуються до нього. Це забезпечує певний рівень структуризації мережі та дозволяє керувати більшою кількістю дронів, але може створювати залежність від головного дрона та призводити до втрати зв'язку у випадку його відмови.

В третій моделі з'єднання один головний дрон має безпосереднє з'єднання з керуючою системою, а усі інші дрони з'єднуються лінійно один до одного, тобто кожен дрон має зв'язок з двома дронами з одного боку і з двома з іншого боку (рис. 3). Ця структура забезпечує взаємозв'язок між дронами у вигляді ланцюга, де кожен дрон

передає та отримує дані від сусідніх дронів. Перевагою такого підходу є простота організації мережі, адже кожен дрон має тільки два безпосередніх сусіди, з якими він спілкується. Це дозволяє зменшити складність комунікації та підвищити стійкість мережі до втрати зв'язку, оскільки відмова одного дрона не призведе до втрати зв'язку з усією мережею. Проте, ця модель має обмеження у відстані передачі даних між дронами, оскільки кожен дрон може взаємодіяти тільки з двома сусідніми дронами. Також, при збільшенні кількості дронів у ланцюгу може збільшуватися затримка передачі даних через кількість проміжних пересилок. Також проблемою в такому типі побудови мережі є те, що з керуючим блоком з'єднаний тільки один дрон і, у випадку, коли головний дрон виходить з ладу, виникне втрата зв'язку, подібно до описаного вище в другій моделі. Проте це можна покращити додавши ще один БПЛА, який буде під'єднано до керуючого блоку, та який матиме з'єднання з першим головним дроном та ще одним дроном у колі. В такій моделі можна набагато менше перейматись з приводу головного дрону, адже тепер шансів втратити повністю зв'язок менше.

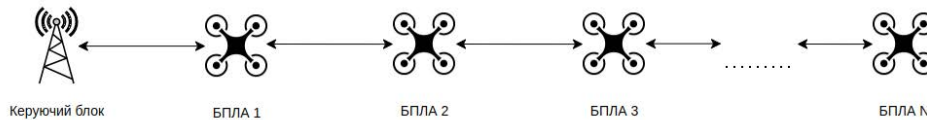


Рис. 3. Модель лінійного зв'язку між групою дронів та керуючою станцією

Ще одна модель[2] передбачає використання проміжного вузла або проміжного сховища даних. Вона є ефективним методом організації зв'язку між дронами та керуючою станцією. У цій моделі дані спочатку передаються від керуючої станції до проміжного вузла, який потім ретранслює їх до всіх дронів у групі. Однією з основних переваг цієї моделі є підвищена стабільність зв'язку. Проміжний вузол дозволяє оптимізувати маршрутизацію даних та підтримувати постійний зв'язок між керуючою станцією та всіма дронами у групі. Це зменшує ймовірність втрати сигналу та забезпечує стабільний обмін даними навіть на значній відстані. Крім того, використання проміжного вузла дозволяє зменшити вплив на відстань між дронами та керуючою станцією. Оскільки дані спочатку передаються до проміжного вузла, а вже потім до дронів, можливість втрати сигналу через велику відстань зменшується. Проте, існують деякі недоліки цієї моделі. Одним із них є збільшене затримки в передачі даних. Оскільки дані спочатку проходять через проміжний вузол, це може призводити до затримок у доставці інформації до дронів. Крім того, наявність проміжного вузла може зробити систему більш складною та вразливою до відмови, оскільки вона залежить від надійності працездатності саме цього вузла.

Існує також модель, де головний дрон виступає проміжним вузлом для з'єднання інших дронів та розбиває всі дрони на групи поменше. У цій моделі головний дрон виступає посередником між керуючим блоком і іншими дронами. Він приймає команди і дані від керуючого блоку та передає їх далі до підключених дронів, а також отримує дані від дронів і передає їх керуючому блоку. Для розрахунку та створення графіку мережі необхідно знати кількість усіх апаратів, які будуть додані до системи. Проте, під час розширення мережі додаванням нової кількості дронів у систему, це не буде проблематично, адже попередні зв'язки залишаться такими, які були попередньо змодельовані.

Основна перевага даної моделі – це – можливість легко розширювати мережу за потреби шляхом підключення нових дронів до головного дрона. Проте варто враховувати деякі недоліки. Складність конфігурації та керування головним дроном може вимагати додаткових зусиль та ресурсів для стабілізації з'єднання. Також існує ризик, що головний дрон може стати точкою вразливості або навантаження, яке може вплинути на всю мережу. Крім того, модель може мати обмеження на кількість підключених дронів через обмежені ресурси головного дрона, що може обмежувати масштабованість системи.

В такій моделі у дронів буде деревовидний зв'язок, де дрон спілкується з керуючим блоком через один з дронів, а також з'єднується ще з певною кількістю інших дронів. Перед налаштуванням мережі, варто розрахувати приблизну кількість можливих з'єднань одного дрона з іншими. Для цього можна скористатись наступною формулою:

$$y = \log_2(n + 1)$$

де  $n$  – запланована кількість дронів, а  $y$  – кількість можливих з'єднань одного дрона з іншим.

Загалом, модель з головним дроном як проміжним вузлом може бути ефективним рішенням для побудови високомобільних комп'ютерних мереж на базі рою БПЛА. Однак, перед її впровадженням необхідно уважно розглянути переваги та недоліки, а також розрахувати потенційні обмеження та виклики. Тільки такий підхід дозволить максимально використовувати потенціал цієї моделі і забезпечити ефективну роботу високомобільної мережі.

#### Висновки

У цьому дослідженні проведено детальний аналіз різних моделей побудови високомобільних комп'ютерних мереж на основі рою безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Певні розглянуті моделі включають в себе пряме

безпроводне з'єднання між кожним БПЛА та керуючою станцією, використання головного дрона як проміжного вузла для з'єднання інших дронів, а також модель, де головний дрон розбиває всі дрони на групи і виступає посередником між керуючим блоком і іншими дронами.

Перша модель передбачає індивідуальне керування кожним дроном, що забезпечує гнучкість управління, але може бути обмеженою обсягом передаваних даних та радіусом дії системи. Друга модель надає можливість легкої розширюваності мережі, але потребує уваги до складності конфігурації та керування головним дроном. Третя модель, в якій головний дрон виконує роль посередника, виявляє перевагу у збереженні зв'язків при розширенні мережі, але може бути вразливою до відмови головного дрона та обмеженням кількості підключених дронів.

Отже, хоча всі моделі мають свої переваги та недоліки, дослідження підкреслює значний потенціал використання БПЛА для побудови високомобільних комп'ютерних мереж. Подальші дослідження в цьому напрямку можуть спрямуватися на оптимізацію конфігурацій, забезпечення надійності та ефективності взаємодії в таких мережах, а також на розробку нових методів управління та забезпечення безпеки мережі.

### Список використаної літератури

1. Ткачов В.; Мітін Д.; Дух Я.; Підвищення живучості мережної складової рою БПЛА. Комп'ютерні інтелектуальні системи та мережі. Матеріали XI Всеукраїнської науково-практичної WEB конференції аспірантів, студентів та молодих вчених (21–23 березня 2018 р.), 98–100.
2. Tkachov V.; Hunko M.; Quest Method for Organizing Cloud Processing of Airborne Laser Scanning Data. 2019 IEEE 8th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL), 565–569.
3. Zeng, Y.; Zhang, R. Energy-efficient UAV communication with trajectory optimization. IEEE Trans. Wirel. Commun. 2017, 16, 3747–3760.
4. Yang, D.; Wu, Q.; Zeng, Y.; Zhang, R. Energy tradeoff in ground-to-UAV communication via trajectory design. IEEE Trans. Veh. Technol. 2018, 67, 6721–6726.
5. L.Pollini, M.Innocenti, R.Mati. Vision algorithms for formation flight and aerial refueling with optimal marker labeling. AIAA-2005-6010. AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit, San Francisco, California, Aug. 15–18, 2005.
6. Yanmaz, E.; Yahyanejad, S.; Rinner, B.; Hellwanger, H.; Bettstetter, C. Drone networks: Communications, coordination, and sensing. Ad Hoc Netw. 2018, 68, 1–15.
7. Cheng, F.; Zhang, S.; Li, Z.; Chen, Y.; Zhao, N.; Yu, F.R.; Leung, V.C. UAV trajectory optimization for data offloading at the edge of multiple cells. IEEE Trans. Veh. Technol. 2018, 67, 6732–6736.
8. Mozaffari, M.; Saad, W.; Bennis, M.; Merouane, D. Mobile Internet of Things: Can UAVs provide an energy-efficient mobile architecture? In Proceedings of the 2016 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), Washington, DC, USA, 4–8 December 2016; pp. 1–6.

### References

1. Tkachov V., Mitin D., Dukh Я.; Pidvyshhennja zhyvuchosti merezhnoji skladovoji roju BPLA. Komp'juterni intelektualni systemy ta merezhi. [Increasing the survivability of the network component of the UAV swarm. Computer intelligent systems and networks] Materialy XI Vseukrajinsjkoji naukovo praktychnoji WEB konferenciji aspirantiv, studentiv ta molodykh vchenykh [Materials of the 11th All-Ukrainian scientific and practical WEB conference of graduate students, students and young scientists] (March 21–23, 2018 p.), 98–100.
2. Tkachov V., Hunko M., Quest Method for Organizing Cloud Processing of Airborne Laser Scanning Data. 2019 IEEE 8th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL), 565–569.
3. Zeng, Y., Zhang, R. Energy-efficient UAV communication with trajectory optimization. IEEE Trans. Wirel. Commun. 2017, 16, 3747–3760.
4. Yang, D.; Wu, Q.; Zeng, Y.; Zhang, R. Energy tradeoff in ground-to-UAV communication via trajectory design. IEEE Trans. Veh. Technol. 2018, 67, 6721–6726.
5. L.Pollini, M.Innocenti, R.Mati. Vision algorithms for formation flight and aerial refueling with optimal marker labeling. AIAA-2005-6010. AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit, San Francisco, California, Aug. 15–18, 2005.
6. Yanmaz, E.; Yahyanejad, S.; Rinner, B.; Hellwanger, H.; Bettstetter, C. Drone networks: Communications, coordination, and sensing. Ad Hoc Netw. 2018, 68, 1–15.
7. Cheng, F., Zhang, S., Li, Z., Chen, Y., Zhao, N., Yu, F.R., Leung, V.C. UAV trajectory optimization for data offloading at the edge of multiple cells. IEEE Trans. Veh. Technol. 2018, 67, 6732–6736.
8. Mozaffari, M., Saad, W., Bennis, M., Merouane, D. Mobile Internet of Things: Can UAVs provide an energy-efficient mobile architecture? In Proceedings of the 2016 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), Washington, DC, USA, 4–8 December 2016; pp. 1–6.