

РОМАНЮК Валерій Антонович,

доктор технічних наук, професор,
Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут, Київ, Україна,
<https://orcid.org/0000-0002-6218-2327>

ГРИМУД Андрій Геннадійович,

доктор філософії,
Національний університет оборони України, Київ, Україна,
<https://orcid.org/0000-0003-4012-5185>

КЛАСИФІКАЦІЯ ТА ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ЗАВДАНЬ УПРАВЛІННЯ КОМУНІКАЦІЙНИМИ ПОВІТРЯНИМИ МЕРЕЖАМИ

В умовах зміни тактичної обстановки, протидії супротивника ефективне управління повітряною мережею неможливо без відповідної системи управління. Процес управління функціонуванням повітряної мережі зв'язку, яка складається з сукупності (групи) повітряних платформ зв'язку, що створюють мережу повітряного руху та забезпечують зони обслуговування мобільних абонентів (як наземних, так і повітряних). Об'єктом дослідження є процес управління функціонуванням комунікаційної повітряної мережі, що складається з сукупності (групи) повітряних платформ зв'язку.

***Метою статті** є аналіз та синтез класифікації завдань управління комунікаційними повітряними мережами (FANET-мережами) військового призначення та визначення множини завдань системи управління такими мережами залежно від цільових функцій управління та можливих методів (підходів) їх реалізації.*

***Методи дослідження.** У процесі підготовки статті було застосовано комплексні методи дослідження, зокрема методи аналізу та синтезу. Використання методу аналізу дозволило детально вивчити завдання управління комунікаційною повітряною мережею, а метод синтезу сприяв класифікації цих завдань за різними критеріями.*

***Отримані результати дослідження.** Особливу увагу було надано виявленню ключових аспектів організації та оптимізації процесів управління, що дало змогу структурувати завдання та визначити їхню ієрархічну послідовність. На основі результатів аналізу здійснено комплексне дослідження можливих методів і підходів до реалізації цих завдань. Окрім того, розглянуто сучасні технологічні рішення, здатні забезпечити ефективне та надійне функціонування комунікаційної мережі в різних умовах експлуатації. На систему управління повітряною мережею покладаються такі основні завдання: визначення та узгодження порядку спільних дій автономних безпілотних літальних апаратів; формування польотних завдань та траєкторій польоту групи безпілотних літальних апаратів; динамічне коригування польотного завдання та ролі кожного безпілотного літального апарату під час його виконання; організація транспортної мережі для зв'язку між безпілотними літальними апаратами, покриття та обслуговування мобільних абонентів тощо. Розглянуто основні характеристики завдань управління: комунікативність та специфічність.*

***Елементи наукової новизни.** У роботі наведено удосконалену класифікацію завдань управління комунікаційними повітряними мережами для їх подальшої алгоритмізації та реалізації в спеціалізованому програмному забезпеченні системи управління. Елементами наукової новизни є класифікація завдання управління комунікаційними повітряними мережами (FANET-мережами) військового призначення.*

***Теоретична й практична значущість.** Теоретичною та практичною значущістю статті визначено напрями синтезу системи управління повітряними мережами, що дає змогу запропонувати ефективну інтелектуальну систему управління комунікаційними повітряними мережами військового призначення. Виокремлені етапи, функції, цілі та завдання управління комунікаційною повітряною мережею дадуть змогу побудувати системи управління такими мережами. Використання комунікаційних повітряних мереж дасть змогу покращити показники функціонування мобільної компоненти комунікаційних мереж військового призначення. Перспективами подальших досліджень слід вважати формалізацію основних завдань управління комунікаційною повітряною мережею та розроблення відповідних алгоритмів їх реалізації.*

***Ключові слова:** безпілотні літальні апарати, комунікаційна аероплатформа, система управління, комунікаційна повітряна мережа.*

Вступ

Постановка проблеми. Останнім часом, безпілотні літальні апарати (далі – БпЛА) стають все більш популярними через швидкий технологічний прогрес електронних та комунікаційних технологій [1]. Перевагами застосування комунікаційних повітряних мереж (далі – КПМ) є:

здатність забезпечувати зв'язок мобільним абонентам (далі – МА) в реальному часі без наявності будь-якої наземної комунікаційної інфраструктури;

БпЛА системи забезпечують широкий спектр виконання завдань як у цивільних, так і військових сферах: організація комунікаційної повітряної мережі, спостереження (моніторинг) наслідків катастроф (стану поля бою), проведення пошуково-рятункових операцій, дистанційне зондування, моніторинг кордонів, продуктопроводів, передача на наземну станцію відеоданих і зображень в реальному режимі часу і т.д. [1–6].

Об'єктом розгляду статті є процес управління функціонуванням комунікаційної повітряної радіомережі, яка складається з множини (групи) комунікаційних аероплатформ (рис. 1), які створюють повітряну транспортну мережу [5] та забезпечують зони обслуговування мобільним абонентам (наземним і повітряним). Кожна комунікаційна аероплатформа (далі – КА) побудована на основі БпЛА, який оснащений додатковим обладнанням: два приймопередавача з функціями маршрутизації даних (перший приймопередавач призначений для організації зони обслуговування (фіксованої або змінної) мобільним абонентам, другий – для організації повітряної транспортної мережі та обміну даними між КА, зв'язку з наземною транспортною мережею), комплектом антен, системою управління (процесор з відповідним спеціалізованим програмним забезпеченням).

Комунікаційні повітряні мережі побудовані за принципами самоорганізації та децентралізованого

управління (мережі типу FANET, Flying ad-hoc networks) та можуть бути застосовані для виконання таких основних завдань [4–7]:

створення повітряного компоненту мереж зв'язку військового призначення [5];

швидкої організації додаткової (резервної) мережі (каналів) радіозв'язку з мобільними абонентами;

забезпечення оперативного зв'язку мобільним абонентами у важкодоступній зоні (районі виконання бойового завдання), ретрансляція (маршрутизація) інформаційних потоків через мережу КА;

збільшення зони покриття (розгортається при існуючій комунікаційній інфраструктурі, наприклад, для швидкого відновлення після часткового або повного її руйнування, розвантаження базових станцій в місцях скупчення абонентів);

збір даних із віддалених сенсорних вузлів (полів), які накопичили інформацію за час автономної роботи і т.п.

Перевагами застосування КПМ є:

здатність забезпечувати зв'язок МА, збір даних з сенсорних вузлів в реальному часі без наявності будь-якої наземної комунікаційної інфраструктури;

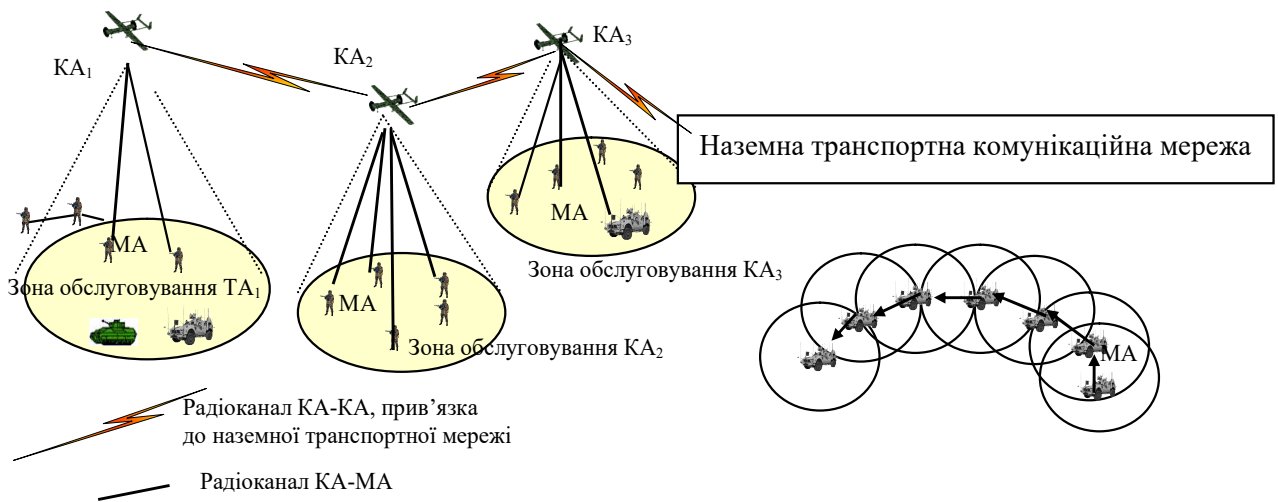
легкість та швидкість масштабування, відносно висока живучість.

Однак, застосування повітряних мереж (далі – ПМ) викликає необхідність рішення низки додаткових завдань управління мережею порівняно з класичними мережами [4–8]:

керування траєкторією польоту КА з урахуванням просторової мобільності БпЛА та наявністю можливих перешкод (заборонених ділянок на місцевості внаслідок рельєфу місцевості, забудови або зони дій протиповітряної оборони противника) та правил повітряного руху;

забезпечення топології ПМ, зон покриття мобільним абонентам в умовах руху КА;

оптимізація використання обмежених ресурсів мережі тощо.



а) фіксовані зони обслуговування КА

б) змінна зона покриття КА при обслуговуванні МА

Рисунок 1 – Архітектура комунікаційної повітряної мережі та варіанти зон покриття комунікаційними аероплатформами

Застосування ПМ на принципах самоорганізації (радіомережі типу FANET) дає змогу [4]:

швидко та істотно розширити територію виконання бойового завдання завдяки передачі даних через проміжні вузли або КА;

підвищити максимальну тривалість організації ПМ (аж до цілодобової) шляхом поетапної заміни вузлів, які вийшли з ладу (з розрядженими акумуляторними батареями або знищених);

підвищити живучість мережі шляхом автоматичної реконфігурації топології мережі в умовах виведення з ладу одного або декількох КА;

істотно знизити вартість технічних рішень.

Функціонування ПМ відбувається в умовах частоті зміни обстановки (вплив різноманітних засобів вогневого враження та радіоелектронної протидії противника, висока маневреність підрозділів та мобільність абонентів, випадковий характер вхідних потоків даних, мобільність КА), що призводить до виходу з ладу (перенавантаженню) елементів мережі, зникненню радіоканалів, виникненню помилок у повідомленнях тощо.

Водночас, до ПМ подаються високі вимоги за живучістю, завадостійкістю, безпекою та пропускну здатністю. Виконати ці вимоги в складних умовах можна тільки на основі автоматизації процесів (рішення задач) управління мережею [1]. Тому задача аналізу та синтезу систем управління комунікаційними повітряними мережами є актуальною.

Для розробки принципів побудови та алгоритмів функціонування системи управління цією мережею необхідно провести класифікацію завдань управління мережею радіозв'язку [2–4] (рис. 2).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналізу завдань управління ПМ присвячена значна кількість робіт. Синтез ПМ починається із визначення її призначення, архітектури та функцій. Можливі варіанти архітектури ПМ для різних сфер застосування запропоновано в роботах [1-5]. Планування застосування комунікаційної повітряної транспортної мережі починається із задачі побудови її топології, яка розглядається в роботах [1; 4–8; 11].

У [1] авторами пропонується модель 3D-покриття повітряного простору мережею КА (на основі БПЛА літакового типу) для забезпечення визначеного коридору радіозв'язності повітряним мобільним абонентам (літакам під час виконання бойового завдання).

Авторами [4] розглянуті основні принципи побудови ПМ та можливі варіанти побудови їх топології, особливості архітектури порівняно з наземними мережами.

У науковій праці [5] запропоновано варіант архітектури перспективної мобільної компоненти мереж зв'язку військового призначення з визначенням функціоналу комунікаційних повітряних мереж: по-

перше, завдання покриття та обслуговування мобільних абонентів, по-друге, організація повітряної транспортної мережі.

В [11] наведена математична постановка задачі побудови топології ПМ з метою покриття множини наземних абонентів та запропоновано основні підходи до її рішення.

У дослідженні [7] авторами розглянута узагальнена методика управління топологією наземно-повітряних радіомереж із самоорганізацією, визначені цільові функції управління. Підкреслено, що алгоритм рішення завдання побудови топології мережі має NP-складність. Тому, для скорочення перебору можливих варіантів топологій мережі запропоновано використовувати базу продукційних правил (евристик), яка дає змогу отримувати близькі до оптимальних рішення в реальному масштабі часу у процесі реалізації конкретної цільової функції управління.

У роботі [6] розглянуті принципи побудови та функції системи управління групою БПЛА та варіанти топології мережі, в [8] визначені основні цільові функції управління комунікаційною повітряною мережею.

В [9; 10] розглянуто математичні моделі та відповідні алгоритми визначення (корегування) позиціонування (зв'язності) КА для збільшення пропускну здатності зони покриття (між КА та групою МА) або збільшення пропускну здатності всієї ПМ.

У підсумку зазначимо, що в більшості публікацій, науковцями фрагментарно розглядаються окремі завдання (функції) системи управління ПМ, однак не проведена їхня класифікація та не розглянуто особливості. Детальний опис комплексу завдань управління комунікаційною ПМ в цих роботах відсутній.

Отже, **метою статті** є аналіз і синтез класифікації завдань управління комунікаційними повітряними мережами (FANET-мережами) військового призначення та визначення множини завдань системи управління такими мережами залежно від цільових функцій управління та можливих методів (підходів) їх реалізації.

Виклад основного матеріалу дослідження

Проведемо класифікацію завдань управління комунікаційною повітряною радіомережею (рис. 2). За етапами завдання управління ПМ поділяться на завдання планування, розгортання (відновлення, нарощення) і оперативного управління [12]. *Етап планування* здійснюється посадовими особами наземного центру управління (далі – ЦУ) мобільною компонентою (далі – МК). Причому, залежно від тривалості циклу управління, можливі визначення завдань довгострокового і оперативного планування.



Рисунок 2 – Класифікація завдань управління комунікаційними повітряними мережами

Змістом планування є (виходячи із прогнозованої обстановки та наявних ресурсів):

1. Планування топології ПМ (здійснюється централізовано наземним центром управління мережею (далі – ЦУМ)). Містить узагальнене планування мобільної компоненти мереж зв'язку військового призначення (далі – МЗВП) в цілому та окреме планування топології мережі кожного рівня мобільної компоненти (далі – МК) [5]:

аналіз вимог органів (посадових осіб) військового управління щодо якості передачі певних видів трафіка; аналіз параметрів мобільних абонентів – рівень вхідного навантаження за типом трафіка, параметри діючих каналів мережі тощо);

аналіз наявних ресурсів (їх кількість та райони розміщення та переміщення)

визначення цілей управління мережею та їх пріоритетизація;

знаходження оптимальної кількості сил та засобів (мобільних базових станцій, КА, апаратних, радіотерміналів тощо) для досягнення визначених цільових функцій управління;

визначення місця розташування елементів мережі та їх переміщення на місцевості або в просторі для реалізації певної мети управління.

2. Розподіл ресурсів (апаратних, частотних, енергетичних, просторових) МК, вибір конкретних параметрів і режимів роботи технічних засобів (методів та алгоритмів управління навантаженням, маршрутизацією, управління доступу до каналів, частоти, потужності передач тощо).

3. Планування траєкторією польоту БпЛА: окремо на етапах розгортання мережі та оперативного управління (завдання визначення траєкторії баражування БпЛА) та складання графіка розгортання.

Етап розгортання реалізує рішення, які прийняті на етапі планування, та зводиться до розгортання КА в запланованих районах (запуск заданої кількості КА, управління траєкторією їх польоту у задані райони баражування та формування заданої топології наземно-повітряної мережі). Водночас, завдання етапу розгортання можуть виконуватися й на етапі оперативного управління за значних змін МК (її ушкодження, введення нових угруповань військ та ін.).

Контроль за етапом розгортання мережі здійснюється наземним центром управління мережею.

Етап відновлення топології здійснюється в разі суттєвого знищення та виходу з ладу багатьох елементів МК завдяки наявним силам та засобам, встановлення нових параметрів і конфігурацій елементів мережі.

Етап нарощування топології реалізується за рахунок введення додаткових КА або зміни зв'язності (топології) мережі з метою забезпечення зв'язком органів управління під час їх переміщення за бойовими порядками військ.

На етапі оперативного управління [12] за прийнятими критеріями ефективності центром управління постійно оцінюється стан мереж і приймаються рішення (відповідно до плану та реальної обстановки) з утримання (оптимізації) показників ефективності функціонування в ПМ або здійснюється її системна або користувальницька оптимізація.

Завдання оперативного управління (на відмінність завдань планування) вирішуються змішаним способом (централізовано/децентралізовано) у режимі реального часу, а за змістом багаторазово їх повторюють. Цикл управління мережі здійснюється центром управління та включає наступні етапи [12; 13]:

збір інформації про стан мережі (водночас, центру управління необхідно приймати рішення з оптимізації параметрів збору службової інформації (за обсягом – кількість параметрів та частота збору, кількість рівнів (еталонної моделі взаємодії відкритих систем) та функціями управління (управління топологією, управління маршрутизацією, управління навантаженням тощо). Можливі підходи щодо оптимізації процесу збору даних запропоновано в дослідженнях [12; 13];

аналіз інформації стану – визначаються: ступінь виконання мережею своїх функцій, необхідність управляючого впливу, цілі управління з їх пріоритетизацією з подальшою деталізацією їх на підцілі згідно моделі прийняття рішень [13];

прийняття рішення щодо траєкторії польоту КА, топології (зонам покриття) мережі, маршрутам передачі даних та алгоритмам управління потоками, резервування ресурсу, налаштування обладнання, встановлення потужності передавачів, діаграм

спрямованості антен відновленню елементів мережі тощо з урахуванням обмежень на ресурси та час реалізації). Можливі підходи з інтелектуалізації процесу прийняття рішень запропоновано в [10; 13; 14];

виконання рішення (видача й доведення управляючих команд і рішень) та контроль виконання рішень у задані часові інтервали.

За обхватом управляючий вплив може бути здійснено в масштабах всієї МК або за певним її рівнем, зоною, окремою мережею або повітряною мережею, напрямком маршруту, каналом, окремими абонентами.

За мету управління доцільно визначити такі цільові функції: забезпечення зв'язності між певними елементами мережі, забезпечення якості маршрутів передачі даних, забезпечення заданого рівня (оптимізації) продуктивності, розміру зони покриття, потужності передач радіозасобів тощо [8].

За функціями системи управління завдання поділяються на два основних класи: комунікаційні та специфічні, які притаманні ПМ. *Комунікаційні* завдання управління характерні для будь якого функціонала системи управління радіомережею з самоорганізацією [4; 12]: управління топологією, управління маршрутизацією, управління навантаженням, управління радіоресурсом (наприклад, завдання територіально-частотного планування), управління безпекою тощо.

Специфічні завдання з'являються, виходячи з особливостей побудови та характеристик ПМ:

завдання розрахунку траєкторії й реалізації польоту КА на етапах розгортання мережі та функціонування (в районі баражування КА для забезпечення заданих фіксованих або змінних зон покриття);

завдання покриття КА визначених зон (територій) або повітряних коридорів для обслуговування певних МА;

завдання мінімізації витрат ресурсів (мінімізації кількості КА, витрат енергії КА та МА тощо);

завдання визначення пріоритету цільових функцій управління та їх координація між КА в умовах децентралізованого управління мережею тощо.

За способом управління системи управління поділяються на централізовані, децентралізовані та змішані. На етапі планування, ЦУМ планує траєкторію польоту для розгортання топології мережі, зон покриття, визначає режими роботи радіозасобів. У процесі функціонування мережі системи управління кожної КА корегують заплановані рішення ЦУМ залежно від ситуації та пріоритету цільових функцій управління всією МК [10; 13; 14].

За математичною постановкою завдання управління можуть бути класифіковані як: маршрутні, покриття, мережевого планування, розподілу ресурсів тощо; за кількістю критеріїв оптимізації – однокритеріальні та багатокритеріальні; за наявним типом вхідних даних – в чіткій (нечіткій) постановці, статичні (динамічні), детерміновані (ймовірнісні), загальні (часткові) тощо.

Під час функціонування мережі та впливу противника на неї, найбільш вірогідним варіантом стану мережі буде незв'язна топологія. Тому для відновлення ПМ, в першу чергу, необхідно отримати мінімальну зв'язність топології, а далі, за наявності резерву сил і засобів, нарощувати пропускну здатність і стійкість напрямів та всієї мережі. Більш детально класифікація завдань управління наведена авторами в табл. 1.

Таблиця 1

Класифікація завдань управління повітряними мережами

Класифікаційна ознака	Тип завдання управління повітряною мережею
Етап застосування мережі	планування; розгортання (відновлення, нарощування); оперативного управління.
Рівень ієрархії процесу управління	управління мобільною компонентою; управління певною мережею або повітряною мережею; управління зоною мережі; управління напрямком передачі; управління маршрутом передачі; управління радіоканалом.
Алгоритми реалізації	централізовані; децентралізовані; змішані.
Характер перетворення вихідної інформації в процесі управління	інформаційні; розрахункові; оптимізаційні.
Наявність взаємозв'язків між завданнями	автономні; комплексні.
Ступінь інформованості	детерміновані; ймовірнісні; невизначені.

Класифікаційна ознака	Тип завдання управління повітряною мережею
Періодичність рішення	періодична; випадкова.
Залежно від типу БпЛА та типу каналу управління центром управління мережею або окремим БпЛА	Завдання управління мережами: БпЛА літакового типу; БпЛА роторного типу. За типом каналу управління комунікаційною аероплатформою центром управління мережею: радіоканал; оптичний (проводовий, безпроводовий) канал; через саму повітряну мережу.
За формою моделювання	аналітичні; імітаційні.
Вид постановки та використання математичного апарату	розподілу ресурсів; масового обслуговування; теорії ігор; визначення маршрутів польотів; складання розкладів та інші.

Перераховані завдання істотно розрізняються між собою. Найскладнішими є етапи розгортання, формування і оперативного управління нею. Це пояснюється жорсткими обмеженнями на час виконання всіх функцій на даних етапах. Водночас, завдання розгортання і формування мережі може виконуватися і на етапі оперативного управління за умови сильних пошкоджень мережі.

За ієрархією, завдання управління можна розбити на низку рівнів. На першому (нижньому) рівні вирішуються завдання управління окремими радіоканалами (мережами):

- вибір радіозасобів, визначення оптимальних режимів їхньої роботи тощо;
- автоматичне входження в радіозв'язок, його ведення та відновлення;
- автоматична ідентифікація абонентів і підтримання доступу мобільним користувачам до КА;
- оперативний контроль якості процесів передачі інформації по радіоканалах;
- автоматична ретрансляція (маршрутизація) повідомлень, що передаються.

Означені завдання вирішуються децентралізовано для кожної з ліній радіозв'язку.

На другому (верхньому) рівні вирішуються завдання управління мережею (зоною) радіозв'язку:

- забезпечення доставки різноманітних повідомлень (тип, обсяг, категорія) з заданою якістю (своєчасність, вірогідність, скритність) (забезпечення QoS передачі);
- ведення бази даних мобільних користувачів;
- забезпечення доступу в мережу новим абонентам;
- динамічне перепланування топології ПМ під час бою;

- оперативний контроль і прогнозування умов ведення радіозв'язку з урахуванням радіоелектронної протидії супротивника (оцінка радіоелектронної обстановки), яка містить: аналіз розповсюдження радіохвиль (залежно від радіочастотного діапазону, режимів роботи, рельєфу місцевості тощо) та визначення зон покритті КА; визначення

місцеположення й ідентифікація станцій завад супротивника і аналіз їхнього впливу;

- розподіл частотних і енергетичних ресурсів всіх елементів мережі (призначення частот, потужності випромінювання, виду і режиму роботи, антенних приладів і т. д.);

- управління навантаженням;
- адресація в мережі;
- управління топологією мережі;
- управління маршрутизацією повідомлень;
- забезпечення безпеки мережі;
- прогнозування поведінки мережі;
- навчання інтелектуальних баз знань по управлінню мережею [13, 14];

Рішення завдань другого рівня вимагає поєднання централізованого і децентралізованих принципів управління. Тому завдання управління всією мережею будуть вирішуватися на центрі управління мережею, зоною радіомережі – КА, радіолінією – радіотерміналами.

За характером відпрацювання і використання інформації завдання діляться на інформаційні, розрахункові й оптимізаційні. До розрахункових завдань можна віднести, наприклад, завдання визначення зони обслуговування КА, до інформаційної – задачу збору інформації про стан елементів мережі.

Кінцевою метою системи управління мережею радіозв'язку може бути екстремум деякого функціоналу, визначений для всієї мережі (наприклад, максимум пропускної спроможності мережі або мінімум середньої затримки передачі повідомлень певного пріоритету тощо), або екстремум цього функціоналу на ділянці мережі, між окремими парами «відправник-одержувач» зі збереженням заданих параметрів всієї мережі. У першому випадку слід говорити про завдання оптимізації мережі в цілому, в другому – про оптимізацію ділянок (чарунок) мережі, напрямків зв'язку (користувальницька

оптимізація). Слід відзначити наявність взаємозв'язків між завданнями. Якщо завдання пов'язане з іншими завданнями, то воно класифікується як комплексне, в іншому разі – як автономне.

Залежно від того, наскільки відомі вихідні дані для виконання завдання вони діляться на детерміновані, ймовірнісні та невизначені. До детермінованих відносяться ті завдання, для яких визначені всі вихідні дані. Для їхнього виконання застосовуються різноманітні засоби відшукування екстремуму функції. В ймовірнісних завданнях вихідні дані носять ймовірний характер. Для їхнього виконання задіюється апарат теорії ймовірностей. Для невизначених завдань може застосовуватися теорія нечітких множин.

За періодичністю рішення розрізняють завдання, що вирішуються через певний інтервал часу і з випадковою періодичністю, залежно від подій (наприклад, розрахунок параметрів радіоліній за виявлення станції завад супротивника).

КА можуть розрізнятися за типом БПЛА: літакового або роторного типу. Так, наприклад, для літакового типу виникає задача розрахунку траєкторії баражування БПЛА для забезпечення визначених зон обслуговування МА. За застосуванні БПЛА роторного типу визначаються координати точок його зависання. Крім цього, тип каналу управління між ЦУМ та КА (а можливо й визначені канали комунікацій між КА): радіоканал, оптичний канал (проводовий або безпроводовий) або через ПМ визначає певну специфіку задач управління ПМ та можливості впливу противника на процес функціонування ПМ та її характеристики.

З погляду розробки алгоритмів управління, оцінки складності їх реалізації більш істотним є ділення завдань управління за формою моделювання і математичним апаратом. За формою моделювання математичні моделі завдань управління розділяються на аналітичні і алгоритмічні (імітаційні). В аналітичних моделях залежність між змінними, що описують модель, є математичним виразом. За імітаційного моделювання поведінка різноманітних елементів мережі описується сукупністю алгоритмів, які відтворюють функціонування мережі на ЕОМ.

Список бібліографічних посилань

1. Bujari A., Calafate C. T., Cano J.-C., Manzoni P., Palazzi C. E., Ronzani D. Flying ad-hoc network application scenarios and mobility models. *International Journal of Distributed Sensor Networks*. 2017. Vol.13(10). DOI: 10.1177/1550147717738192. 2. Sen A., Ghosh P., Silva T., Das N., Kundu A. Architecture and Algorithms for an Airborne Network. *Networking and Internet Architecture*, 2010. DOI: 10.48550/arXiv.1009.4499. 3. Flying Ad hoc Networks (FANET): Performance Evaluation of Topology Based Routing Protocols. *International Journal of Interactive Mobile Technologies (iJIM)*. 2022. № 16(4). DOI: 10.3991/ijim.v16i04.28235. 4. Романюк В. А., Степаненко Є. О., Панченко І. В., Восколович О. І. Літаючі самоорганізуючі радіомережі. *Збірник наукових*

З допомогою імітаційного моделювання можна вирішувати завдання оцінки застосування різноманітних методів управління мережею, порівнювати топології мережі, визначати ступінь впливу змін параметрів мережі і її поведінки на критерій ефективності функціонування мережі тощо. За математичним апаратом розрізняють завдання розподілу ресурсів, масового обслуговування, гральні, маршрутні, складання розкладів та інші.

Висновки й перспективи подальших досліджень

Отже, застосування комунікаційних повітряних мереж дасть змогу створити повітряну компоненту радіозв'язку на базі безпілотних літальних апаратів та значно покращити функціонування мобільної компоненти комунікаційних мереж військового призначення. Проведені наукові дослідження підтвердили практичну цінність викладених підходів, зокрема, в умовах швидкоплинної зміни топології мережі та впливу противника.

Ефективне управління комунікаційними повітряними мережами в таких умовах не можливе без реалізації спеціалізованої системи управління. Наведена у статті класифікація завдань управління комунікаційними повітряними мережами (FANET-мережами) військового призначення, може бути основою для їх подальшої алгоритмізації та реалізації в програмному забезпеченні системи управління комунікаційною повітряною мережею.

Перспективами подальших досліджень слід вважати формалізацію основних завдань управління комунікаційною повітряною мережею та розроблення відповідних алгоритмів їх реалізації. Крім того, планується розробити адаптивні методи оптимізації управління в умовах динамічних змін і зовнішніх впливів, що забезпечить підвищення надійності та ефективності функціонування мережі у складних умовах експлуатації. Такий підхід не лише розширить функціональні можливості системи управління, але й сприятиме подальшому розвитку технологій у сфері комунікаційних мереж військового призначення.

праць ВІТІ. 2017. № 1. С. 104–114. 5. Романюк В. А., Міночкін А. І. Архітектура перспективної мобільної компоненти тактичних мереж зв'язку Збройних сил України. *Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ «КПІ»*. № 5. 2004. С. 107–115. 6. Гримуд А. Г., Романюк В. А. Побудова системи управління групою тактичних безпілотних літальних апаратів. *Збірник наукових праць ВІТІ*. 2020. № 3. С. 63–74. 7. Романюк В. А., Степаненко Є. О. Методика управління топологією наземно-повітряних радіомереж військового призначення. *Збірник наукових праць ВІТІ*. 2018. № 4. С. 92–102. 8. Романюк В. А. Цільові функції управління телекомунікаційними аероплатформами в тактичних мережах зв'язку. *Збірник матеріалів VIII науково-практичної конференції ВІТІ*. Київ, 2015. С. 37–41. 9. Романюк В. А.

Алгоритм позиціонування телекомунікаційних аероплатформ для збільшення пропускної здатності повітряної мережі. *Збірник матеріалів XII науково-практичної конференції ВІПІ*. Київ, 2019. С. 203–207. **10. Романюк В. А., Степаненко Є. О.** Модель прийняття рішень по управлінню повітряною мережею. *Збірник наукових праць ВІПІ*. 2019. № 3. С. 84–95. **11. Романюк В. А., Міночкін А. І.** Задачі управління топологією мережі безпілотних летальних апаратів мобільного компоненту мереж зв'язку військового призначення. *Збірник наукових праць ВІПІ НТУУ «КПІ»*. 2005. № 2. С. 83–90. **12. Романюк В. А.,**

Міночкін А. І. Методологія оперативного управління мобільними радіомережами. *Зв'язок*. 2005. № 2. С. 53–58. **13. Романюк В. А.** Архітектура системи оперативного управління тактичними радіомережами. *Збірник наукових праць ВІПІ НТУУ «КПІ»*. 2009. № 3. С. 70–76. **14. Беляков Р., Фесенко О.** Модель інтелектуального управління ресурсами наземної комунікаційної мережі класу MANET. *Інформаційні технології та суспільство*. 2023. № 3(9). DOI: 10.32689/maup.it.2023.3.1.

CLASSIFICATION AND GENERAL CHARACTERISTICS OF COMMUNICATION FLYING NETWORK MANAGEMENT TASKS

ROMANIUK Valery, Doctor of Technical Sciences, Professor, Military Institute of Telecommunications and Information Technologies named after Heroes of Kruty, Kyiv, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0002-6218-2327>

HRYMUD Andrii, PhD, National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0003-4012-5185>

Formulation of the problem in general. *In the face of changing tactical situations and enemy counteraction, effective management of the air network is impossible without an appropriate management system. The process of managing the operation of an airborne communication network, which consists of a set (group) of airborne communication platforms that create an air traffic network and provide service areas for mobile subscribers (both ground and air). The object of study is the process of managing the operation of the communication air network, consisting of a set (group) of airborne communication platforms.*

The purpose of the article is to analyse and synthesise the classification of tasks for managing military communication airborne networks (FANETs) and to determine the set of tasks of the management system for such networks, depending on the target management functions and possible methods (approaches) for their implementation.

Research methods. *While preparing this article, comprehensive research methods were applied, particularly methods of analysis and synthesis. The use of the analysis method made it possible to study the tasks of managing the communication air network in detail, and the synthesis method contributed to the classification of these tasks according to various criteria. Particular attention was paid to identifying the key aspects of the organisation and optimising management processes, which allowed us to structure the tasks and determine their hierarchical sequence. Based on the results of the analysis, a comprehensive study of possible methods and approaches to realising these tasks was carried out. In addition, modern technological solutions that can ensure efficient and reliable operation of the communication network in various operating conditions are considered*

Analysis of recent research and publications. *In most of the analysed publications, scientists fragmentarily consider individual tasks (functions) of the communication air network management system, but do not classify them or consider their features. These works do not provide a detailed description of the tasks for managing the communication air network.*

Presenting the main material. *The following main tasks are assigned to the air network management system: determination and coordination of the procedure for joint actions of autonomous Unmanned Aerial Vehicles (UAVs); formation of flight tasks and flight paths of a group of UAVs; dynamic adjustment of the flight task and the role of each UAV during its execution; organisation of a transport network for communication between UAVs, coverage and maintenance of mobile subscribers, etc. The main characteristics of control tasks are considered: communicativeness and specificity. The paper presents an improved classification of functions for managing communication air networks for their further algorithmisation and implementation in specialised control system software.*

Elements of scientific novelty. *Managing communication air networks (FANETs) for military purposes is classified.*

Theoretical and practical significance. *The directions of synthesis of the air network management system are determined, which makes it possible to offer an effective intelligent control system for military communication air networks. The identified stages, functions, goals, and objectives of airborne communication network management will allow the building of management systems for such networks.*

Conclusion and the perspectives of future research. *Using communication air networks will improve the performance of the mobile component of military communication networks. Prospects for further research should be considered, including the formalisation of the main tasks of managing the communication air network and the development of appropriate algorithms for their implementation.*

Keywords: *Unmanned Aerial Vehicle (UAV), communication aerial platform, management system, flying ad-hoc network.*

References

1. Bujari, A., Calafate, C. T., Cano, J.-C., Manzoni, P., Palazzi, C. E., Ronzani, D., (2017). Flying ad-hoc network application scenarios and mobility models. *International Journal of Distributed Sensor Networks*. 13(10). DOI: 10.1177/1550147717738192. 2. Sen, A., Ghosh, P., Silva, T., Das, N., Kundu, A., (2010). Architecture and Algorithms for an Airborne Network. *Networking and Internet Architecture*. DOI: 10.48550/arXiv.1009.4499. 3. **Flying Ad hoc Networks (FANET): Performance Evaluation of Topology-Based Routing Protocols.** *International Journal of Interactive Mobile Technologies (IJIM)*. (2022). 16(4). DOI: 10.3991/ijim.v16i04.28235. 4. **Romaniuk, V. A., Stepanenko, Y. O., Panchenko, I. V., Voskoliovyh, O. I.,** (2017). Flying self-organising radio networks. *Collection of Scientific Papers VTI*. 1, 104–114. 5. **Romaniuk, V. A., Minochkin, A. I.,** (2004). Architecture of the prospective mobile component of the tactical communication networks of the Armed Forces of Ukraine. *Collection of Scientific Papers MITI NTUU «KPI»*. 5, 107–115. 6. **Hrymud, A. H., Romaniuk, V. A.,** (2020). Building a system for managing a group of tactical uncrewed aerial vehicles. *Collection of Scientific Papers MITI*. 3, 63–74. 7. **Romaniuk, V. A., Stepanenko, Y. O.,** (2018). Methodology for managing the topology of ground-air radio networks for military purposes. *Collection of Scientific Papers VTI*. 4, 92–102. 8. **Romaniuk, V. A.,** (2015). Target functions of telecommunications aerial platforms management in tactical communication networks. *Materials of the VIII Scientific-Practical Conference VITI*. Kyiv, 37–41. 9. **Romaniuk, V. A.,** (2019). An algorithm for positioning telecommunications aerial platforms to increase the throughput of the air network. *Materials of the XII Scientific-Practical Conference VITI*. Kyiv, 203–207. 10. **Romaniuk, V. A., Stepanenko, Y. O.,** (2019). Decision-making model for managing the air network. *Collection of Scientific Papers VITI*. Kyiv, 3, 84–95. 11. **Romaniuk, V. A., Minochkin, A. I.,** (2005). Managing the topology of the unmanned aerial vehicle network in the mobile component of military communication networks. *Collection of Scientific Papers MITI NTUU «KPI»*. 2, 83–90. 12. **Romaniuk, V. A., Minochkin, A. I.,** (2005). Methodology of operational management of mobile radio networks. *Communication*. 2, 53–58. 13. **Romaniuk, V. A.** (2009). Architecture of the operational management system for tactical radio networks. *Collection of Scientific Papers VTI NTUU «KPI»*. 3, 70–76. 14. **Belyakov, R., Fesenko, O.,** (2023). Model of intellectual management of resources of the ground communication network of the MANET class. *Information Technologies and Society*. 3(9). DOI: 10.32689/maup.it.2023.3.1.

Рукопис надійшов до редакції	28.02.2025
Рукопис прийнято до друку після рецензування	25.03.2025
Дата публікації	30.04.2025