

УДК: 004.7:004.75

DOI: 10.33099/2311-7249/2026-55-1-206-214

ЧЕКАН Андрій Юрійович,

Національний університет оборони України, Київ, Україна,

<https://orcid.org/0009-0008-1767-4331>

КОМПЛЕКСНА МОДЕЛЬ ТОПОЛОГІЇ СИСТЕМИ ЗВ'ЯЗКУ ТАКТИЧНОЇ ЛАНКИ УПРАВЛІННЯ

Метою статті є удосконалення моделі топології системи зв'язку тактичної ланки управління як інтегрованої сукупності взаємодіючих мереж, що забезпечує опис міжмережевих зв'язків, багатоканальності та ієрархічної структури управління. Удосконалення здійснене завдяки комплексному використанню технологій самоорганізованих Ad-hoc мереж (децентралізовані динамічні мережі, в яких вузли можуть вільно взаємодіяти один з одним) різних типів в системі зв'язку тактичної ланки управління.

Методи дослідження. У роботі використано теорію графів, метод ієрархічної декомпозиції топології системи, метод моделювання багатоканальних з'єднань. Такий методичний підхід дав змогу врахувати існуючі в системі зв'язку тактичної ланки управління мережі та лінії зв'язку, які функціонують між вузлами зв'язку пунктів управління, ґрунтуючись на пропускній спроможності системи зв'язку, та вибрати оптимальний маршрут інформаційного потоку, що забезпечує гарантоване надання необхідних сервісів зв'язку на пунктах управління.

Отримані результати дослідження. Удосконалено модель топології системи зв'язку тактичної ланки управління, яка забезпечує інтегроване представлення різних систем зв'язку та технологій їх функціонування в єдиній мережевій структурі. На основі теорії графів описано взаємозв'язки між мережевими вузлами зв'язку з урахуванням ієрархічної структури управління військами. Введення функції лінії зв'язку забезпечило опис стану та складу каналів зв'язку між мережевими вузлами зв'язку, що дало змогу сформувати матрицю з'єднань, елементи якої відображають склад ліній (каналів) зв'язку між вузлами. На основі отриманих матриць з'єднань сформовано функцію шляху, яка визначає множину можливих маршрутів передачі інформаційних потоків між вузлами зв'язку пунктів управління. Запропонований підхід дав змогу здійснити вибір оптимального маршруту передачі інформаційного потоку за визначеним критерієм пропускної здатності.

Елементи наукової новизни. Наукову новизну отриманих результатів становить удосконалення моделі топології системи зв'язку тактичної ланки управління завдяки об'єднанню різних систем зв'язку та технологій їх функціонування у вигляді єдиної мережевої структури. Запропонована модель дає змогу врахувати склад ліній (каналів) зв'язку між мережевими вузлами, для побудови оптимальних маршрутів передачі інформаційних потоків у гетерогенних системах зв'язку тактичної ланки управління.

Теоретична й практична значущість викладеного у статті. Результати дослідження створюють теоретичне підґрунтя для подальшого розвитку методів управління інформаційними потоками у системах зв'язку та можуть бути використані для побудови адаптивних алгоритмів маршрутизації та підвищення живучості систем системи зв'язку тактичної ланки управління.

Ключові слова: топологія мережі, самоорганізовані ad-hoc мережі, пропускна здатність, багатоканальна система, ієрархічна структура, мережеві вузли зв'язку.

Вступ

Постановка проблеми. Надійний зв'язок у тактичній ланці управління (далі – ТЛУ) стає важливим елементом управління військами, забезпечення ситуаційної обізнаності та координації дій підрозділів. Аналіз бойового досвіду засвідчив, що стійкість та адаптивність систем зв'язку безпосередньо впливають на здатність підрозділів виконувати бойові завдання в умовах високої динаміки обстановки, просторової розосередженості сил, інтенсивного маневру та активного застосування засобів радіоелектронної боротьби (далі – РЕБ) та вогневого впливу противника [1]. Аналіз функціонування систем зв'язку ТЛУ в бойових умовах виявив низку суперечностей. З одного боку, організаційно-штатна структура військових частин (підрозділів) має ієрархічний характер і передбачає централізоване управління інформаційними потоками. З іншого боку, ситуаційна обізнаність про бойову обстановку потребує децентралізованих, самоорганізованих мереж, здатних динамічно перебудовувати топологію при втраті вузлів

або каналів зв'язку [2].

Для Збройних Сил України впровадження самоорганізованих мереж є частиною переходу до мережево-центричного способу управління бойовими діями. Використання самоорганізованих ad-hoc мереж (від лат. ad hoc – «для цього»), здатне значно підвищити ефективність управління військами [3], що дає змогу командирам нижчої ланки отримувати більш автономні та стійкі канали зв'язку, а вищим штабам – резервувати канали передавання інформації. Самоорганізовані мережі (ad-hoc мережі) – це мережі, що здатні автоматично утворювати топологію зв'язків між вузлами (станціями) без централізованої інфраструктури та забезпечують зв'язок у динамічних, непередбачуваних умовах бойових дій, коли розгортання стаціонарних вузлів неможливе. Різновидами самоорганізованих мереж є спеціалізовані мережі, які можна класифікувати за середовищем функціонування та призначенням (рис. 1) [4].

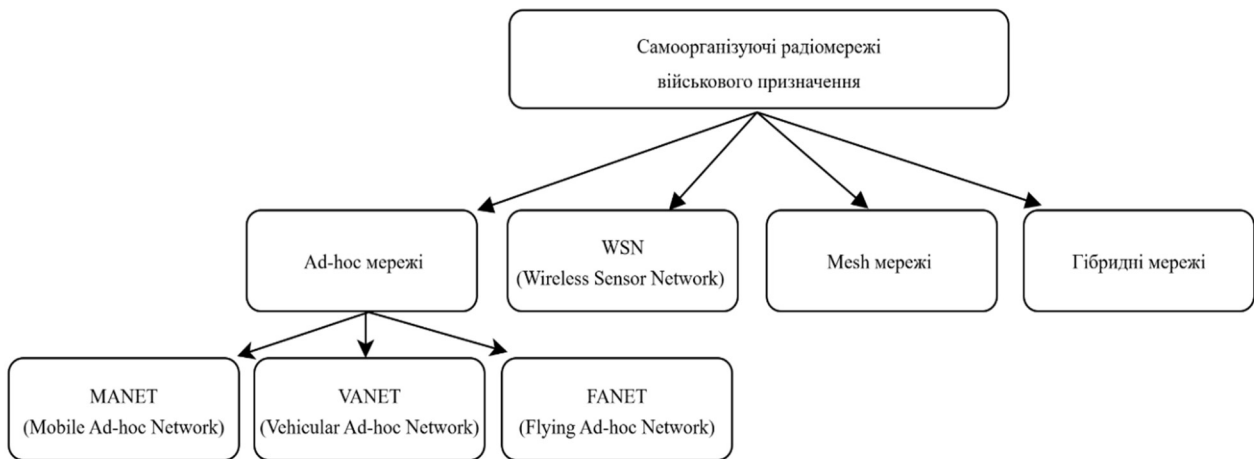


Рисунок 1 – Класифікація самоорганізованих радіомереж

Самоорганізована Ad hoc радіомережа складається з множини мобільних вузлів, основною особливістю яких є відсутність централізованої координації або фіксованої інфраструктури. Кожен вузол є не тільки кінцевим користувачем мережі, але і виступає як маршрутизатор для пересилання пакетів інших вузлів. Такі мережі дають змогу динамічно організувати мережеву взаємодію між користувачами на великих площах з незначними витратами ресурсів. У свою чергу, ad-hoc радіомережі розподіляються на такі мережі [5]:

Mobile ad-hoc Network (MANET) – базовий клас самоорганізованих радіомереж, що складаються з мобільних вузлів (радіостанцій, терміналів), які динамічно утворюють мережу без централізованого керування та без комунікаційних вузлів інфраструктури. Усі вузли рівноправні та самостійно координують маршрутизацію. Кожен вузол здатний приймати і передавати пакети даних далі, виступаючи одночасно кінцевим отримувачем і проміжним ретранслятором (маршрутизатором) трафіку. Топологія MANET є децентралізованою і може змінюватися у реальному часі внаслідок пересування вузлів. Зв'язки між кореспондентами, як правило, мають багато напрямків і утворюють довільну динамічну топологію [2–4];

Vehicular ad-hoc Networks (VANET) різновид мобільних радіомереж, у яких вузлами є транспортні засоби, оснащені бортовими засобами радіозв'язку, а також стаціонарні вузли (ретранслятори), що забезпечують їхню тактичну координацію під час застосування [6]. У разі використання VANET у військовій сфері вона створює мережу взаємодії рухомих бойових платформ, зокрема, танків, бойових машин піхоти, командно-штабних машин, рухомих артилерійських систем, автомобілей забезпечення тощо;

Flying ad-hoc Network (FANET) – це різновид мережі повітряного базування, вузлами яких є безпілотні літальні апарати (далі – БПЛА), що обмінюються даними між собою незалежно від наземної інфраструктури. Мережі FANET можуть розглядатися як різновид MANET, але мають

специфічні риси, зумовлені рухом БПЛА у тривимірному просторі, високими швидкостями носіїв засобів зв'язку та особливостями вимог до зв'язку на значні відстані в повітрі. Головною особливістю мережі FANET є те, що принаймні один вузол має зв'язок із наземним центром керування. Також FANET мають ієрархічну побудову та частково децентралізовану мережу між БПЛА, поєднану з каналом зв'язку з центральним (наземним) пунктом управління [7];

Самоорганізована мережа Wireless Sensor Network (WSN) побудована на множині сенсорів, об'єднаних між собою радіоканалом для обміну даними про навколишнє середовище [8]. Сенсори (датчики) вимірюють фізичні параметри довкілля та об'єктивні показники (вологість, температуру, освітленість, рівень шуму, сейсмічні показники тощо) і передають дані на пункти управління для прийняття рішення;

Mesh мережі – радіомережі коміркової структури, які поєднують як стаціонарні, так і мобільні вузли і можуть мати декілька точок виходу до фіксованої мережі Mesh-мережа створює топологію, за якої кожен вузол може з'єднуватися з кількома іншими та бути транзитним для забезпечення трафіку інших абонентів, завдяки чому утворюється решітчаста структура зв'язків із багатьма маршрутами, а широка смуга спектру сигналу дає змогу передавати відеопотік у реальному часі [9];

Гібридними самоорганізованими радіомережами слід вважати (на думку автора) багаторівневі, децентралізовані мережі, що поєднують у своїй структурі різні типи мобільних і стаціонарних технологій (MANET, VANET, FANET, WSN, Mesh), здатні автоматично формувати, підтримувати та перебудовувати топологію мереж зв'язку в умовах бойових дій, забезпечуючи багаторівневу маршрутизацію, адаптивне управління ресурсами та стійкість до впливу засобів РЕБ противника.

Перевагою розглянутих мереж зв'язку є децентралізована самоорганізація, оскільки утворюють Mesh-топологію і підтримують мобільність вузлів, водночас, вони мають деякі відмінності. Зокрема, MANET виступають базовим класом, що охоплює більшість інших, VANET і FANET можна

розглядати як спеціалізовані MANET для окремих середовищ (наземного транспорту і авіації відповідно), зі своїми особливостями. WSN, хоча і можуть бути самоорганізованими, але суттєво відрізняються ресурсними обмеженнями та трафіком (переважно від датчиків до центру), і тому виділяються в окремий клас. Mesh-мережі ж є більш широким поняттям топології, яке може містити стаціонарні вузли, mesh-принцип часто поєднується з ієрархічними елементами (кілька вузлів під'єднані до фіксованої інфраструктури чи центра управління).

У практиці бойового застосування система управління потребує одночасного забезпечення вертикальних (за підпорядкуванням) і горизонтальних (між підрозділами) зв'язків. Додатковим фактором складності системи зв'язку є багатоканальний характер сучасних систем зв'язку. Підрозділи одночасно використовують засоби ультракороткохвильового (далі – УКХ) діапазону та широкопasmового доступу, транкінгові системи, радіорелейні та супутникові термінали, а також доступну цивільну інфраструктуру зв'язку. Водночас мережі (лінії) зв'язку мають різні характеристики щодо пропускної здатності, затримки в каналах, вимоги до завадостійкості від впливу РЕБ противника. В умовах бойових дій спостерігається вибіркове подавлення окремих частотних діапазонів, втрати ретрансляторів, фізичне знищення вузлів, що призводить до фрагментації мережі та порушення зв'язності між елементами системи зв'язку.

Тому, виникає наукове завдання щодо розвитку науково-методичного апарату побудови системи зв'язку ТЛУ, що має одночасно враховувати динамічну зміну ліній зв'язку і станів вузлів зв'язку, багатоканальність з'єднань між ними та ієрархічну структуру військового управління, а також давала змогу представити топологію такої системи у вигляді багаторівневого графа з збереженням каналної структури з'єднань та забезпеченням альтернативних маршрутів між ними.

Аналіз досліджень і публікацій. Аналіз останніх досліджень і публікацій, присвячених питанням побудови систем зв'язку ТЛУ та управління інформаційними потоками в них свідчить про те, що основою функціонування системи зв'язку мають бути мобільні самоорганізовані ad-hoc технології різних видів. Так, А. І. Міночкін й В. А. Романюк окреслили нову архітектуру та принципи побудови мобільної компоненти мереж зв'язку військового призначення, де вузли зв'язку швидко адаптуються до частих змін топології мереж, трафіка та ефективно використовують обмежені мережеві ресурси [10].

Вчені О. Я. Сова, О. О. Марилів, С. В. Сальник, В. В. Сальник, здійснили аналіз можливостей інтеграції БпЛА у структуру мобільних радіомереж, зокрема, як повітряних ретрансляторів або вузлів мережі [11]. Вони дослідили вплив висоти польоту, дальності зв'язку, енергетичних параметрів радіоканалів та мобільності вузлів на ефективність функціонування мережі. Автори підкреслюють, що використання БпЛА зменшує кількість наземних

ретрансляторів, підвищує гнучкість мережевої топології та забезпечує оперативне відновлення зв'язку під час пошкодження окремих елементів мережі.

Перспективи впровадження літаючих ретрансляторів для створення самоорганізованих повітряних мереж розглянуто в роботі [12] В. А. Романюка та Є. О. Степаненка. Запропоновані алгоритми побудови топології мереж радіозв'язку з телекомунікаційними

аероплатформами, що виконують роль повітряних шлюзів та формують повітряну мережу та дозволяють забезпечити зв'язність мережі, оптимізувати зони покриття, мінімізувати кількість телекомунікаційних аероплатформ.

Проблему підвищення ефективності функціонування тактичних радіомереж класу MANET шляхом застосування інтелектуальних методів управління мережею розглянули О. Я. Сова, В. А. Романюк, Я. А. Стемпковська, О. А. Симоненко у науковій праці [13]. Основна увага надається координації цільових функцій інтелектуальних систем управління, які використовуються для оптимізації параметрів функціонування мережі. У роботі підкреслюється, що управління тактичними радіомережами має враховувати декілька суперечливих критеріїв, зокрема, пропускну здатність каналів, затримку передачі інформації, енергоспоживання вузлів та стійкість мережі до змін топології. Отримані результати демонструють, що застосування інтелектуальних механізмів координації цільових функцій дає змогу підвищити стабільність роботи MANET-мереж у складних умовах функціонування, що є особливо важливим для систем зв'язку.

Водночас, результати аналізу публікацій свідчать, що питання цілісного моделювання топології мережі зв'язку ТЛУ, яке б одночасно враховувало гетерогенність каналів (радіо, супутникових, радіорелейних ліній тощо), динаміку їх нарощування чи масштабування та ієрархічну структуру управління, досліджено недостатньо. Наявні роботи висвітлюють різні класи самоорганізованих Ad-hoc мереж – наприклад, алгоритми маршрутизації в Mobile Ad-hoc Network (MANET), Vehicular Ad-hoc Networks (VANET), Flying Ad-hoc Network (FANET) чи Wireless Sensor Network (WSN), але не пропонується комплексної моделі, придатної для аналізу систему зв'язку ТЛУ, що будується за гібридним принципом. Тому, доцільно сформулювати опис елементів мережі (вузлів і ліній зв'язку), врахувати наявності декількох каналів між вузлами, а також перевірити відповідність моделі вимогам гнучкості, багатоканальності та ієрархічності.

Метою статті є удосконалення моделі топології системи зв'язку тактичної ланки управління як інтегрованої сукупності взаємодіючих мереж, що забезпечує опис міжмережевих зв'язків, багатоканальності та ієрархічної структури управління. Удосконалення здійснене завдяки комплексному використанню технологій самоорганізованих ad-hoc мереж різних типів в системі зв'язку тактичної ланки управління.

Виклад основного матеріалу дослідження

Досвід війни за незалежність України свідчить про те, що стійкість системи зв'язку ТЛУ залежить від сукупності спроможностей мереж зв'язку побудованих за гібридним принципом, тобто багаторівневі, децентралізовані та динамічно керовані

мережі, що поєднують у своїй структурі різні типи мобільних і стаціонарних мереж зв'язку (MANET, VANET, FANET, WSN, Mesh). Такі мережі зв'язку здатні автоматично формувати, підтримувати і перебудовувати топологію системи зв'язку в умовах бойових дій, забезпечуючи багаторівневу маршрутизацію, адаптивне управління ресурсами та стійкість до впливу засобів РЕБ (рис. 2).

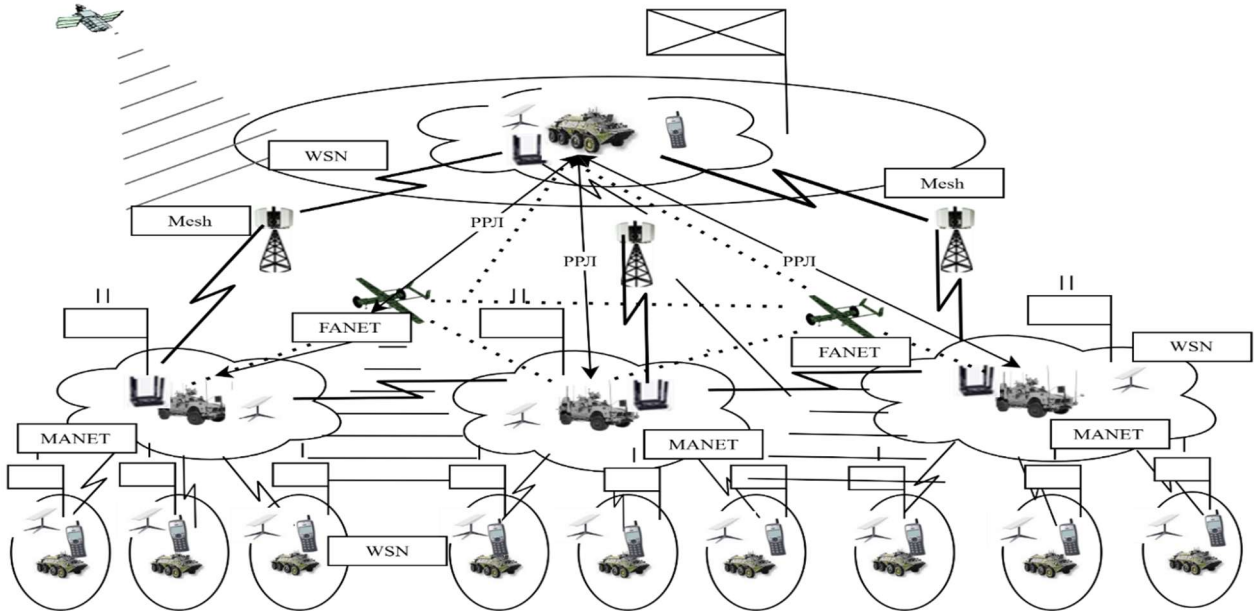


Рисунок 2 – Ієрархічна система зв'язку тактичної ланки управління

Отже, ієрархічна система зв'язку (рис. 2) має відповідати бойовому складу сил і засобів, розділеною на кілька підмереж, що дає змогу забезпечити оптимальну побудову таких мереж для зменшення надлишковості та складності розрахунків. Систему

зв'язку ТЛУ доцільно розглядати як комбінацію топологічних відносин різних каналів (радіо, супутникових, радіорелейних ліній тощо) в одній системі у вигляді багаторівневого графа (рис. 3).

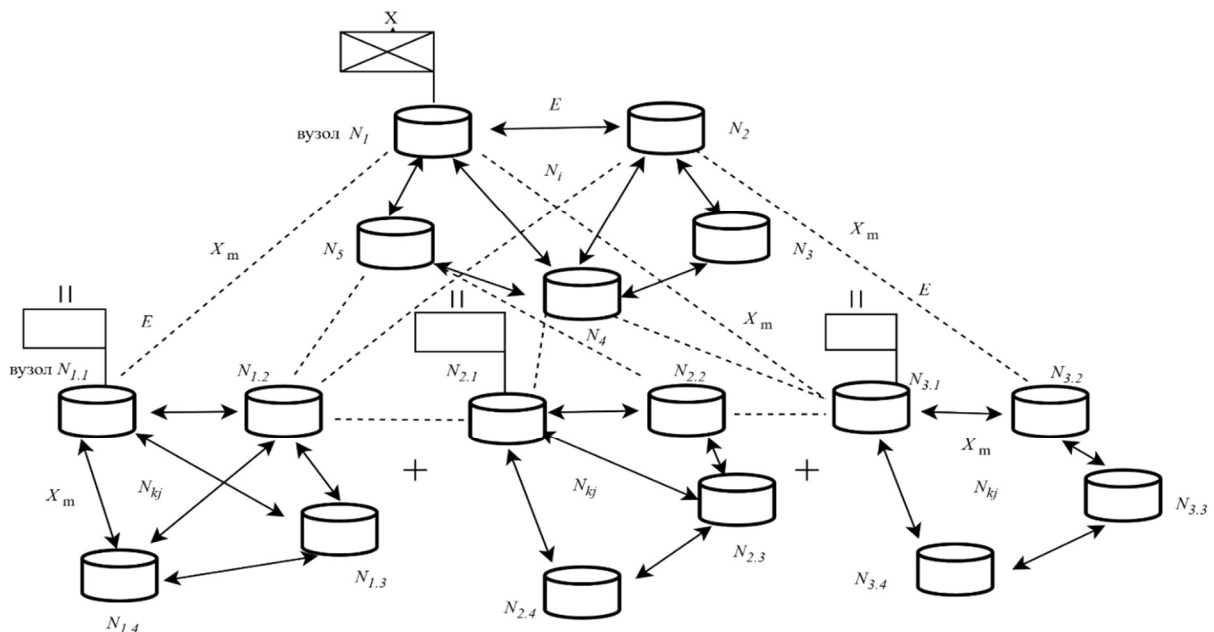


Рисунок 3 – Комплексна модель топології системи зв'язку тактичної ланки управління

Складовими мережі зв'язку (рис. 3) є: засоби зв'язку, інтегровані з транспортними засобами, що становлять мережеві вузли; мережеві вузли з'єднані між собою каналами зв'язку; канали, що характеризують топологічні відносини між вузлами. Припустимо, що система зв'язку ТЛУ складається з множини комунікаційних одиниць – N (мережкових вузлів) та множини топологічних відносин – E (комутаційні з'єднання каналів зв'язку), то модель топології $G(N, E)$ поданої графом (рис. 3) складається з множини вершин та множини ребер [14]. На рис. 3 наведено варіант багатовузлової топології системи зв'язку ТЛУ, склад якої містить вузли зв'язку рівня бригади N_i ($i = 1, \dots, 5$) та вузли зв'язку рівня батальйону N_{kj} ($k = 1, \dots, 3$ – номер батальйону, $j = 1, \dots, 4$) – номер вузла зв'язку батальйону, між якими встановлено прямі та опосередковані з'єднання через різні типи ліній (каналів) зв'язку. Особливістю такої топології є багатоканальний характер окремих ліній зв'язку, тобто між двома вузлами можуть одночасно функціонувати декілька фізично незалежних каналів (наприклад, УКХ, супутниковий та радіорелейний). Саме ця властивість визначає специфіку формування матриці з'єднань системи зв'язку ТЛУ.

Удосконалена система зв'язку ТЛУ передбачає використання декількох *ad-hoc* мереж, тому кожна лінія системи містить загальну множину каналів X , що комутуються на мережкових вузлах, тоді множина каналів зв'язку різних типів, що можуть використовуватись у системі доцільно подати за виразом:

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_\alpha, \dots, x_m\}, \quad (1)$$

де m – загальна кількість типів каналів зв'язку, що можуть функціонувати у системі.

Кожна лінія зв'язку (комунікаційне з'єднання) має стани «працює» або «не працює», і може складатися з багатьох каналів. Комунікаційне з'єднання ліній (каналів) зв'язку між будь-якою парою мережкових вузлів рівня бригади та/або батальйону є динамічно змінною функцією $\chi(\varphi)$, залежною від φ – факторів, що впливають на функціонування ліній (мереж) зв'язку в системі в

момент часу t (швидкість маневрів підрозділів, відстань між вузлами зв'язку, умови місцевості тощо).

Оскільки на вузлах передбачено комутацію доступних ліній (каналів) зв'язку, загальною кількістю H , між будь-якою парою мережкових вузлів у момент часу t з загальної множини каналів X , тоді функція лінії (мереж) зв'язку між мережевими вузлами можна записати у вигляді:

$$\chi(\varphi) = \bigcup_{h=1}^H x_{ah}^t(\varphi), \quad (2)$$

де x_{ah}^t – доступна (ліній) канал зв'язку α -го типу;

$h = 1, \dots, H$ – номер доступної (ліній) каналу зв'язку.

Для математичного опису моделі топології системи зв'язку тактичної ланки управління використовуємо матричний підхід до формалізації процесу комутації каналів зв'язку на вузлах:

$$G = [\chi_{ij}(\varphi)]_{n \times m}, \quad (3)$$

де n – кількість вузлів, що комутують канали в системі зв'язку ТЛУ.

Тобто кожний елемент матриці G має відображати склад каналів, що забезпечують пряме з'єднання між вузлами N_i та N_{kj} у момент часу t . Для формування матриці G введемо такі правила, якщо:

відсутній прямий канал зв'язку між вузлами, то $\chi(\varphi) = 0$;

зв'язність вузла із самим собою, тобто не потребує використання жодного каналу зв'язку, то $\chi(\varphi) = 1$;

існує один тип каналу з множини X , то $\chi(\varphi) = x_\alpha$;

існує декілька каналів з множини X , то $\chi(\varphi) = \{x_1, x_2, \dots, x_h\}$.

Припустимо, що в системі зв'язку ТЛУ бригадного рівня (рис. 3) розгорнуто мережеві вузли зв'язку кількістю $N_i = 5$ між якими функціонують $\alpha = 5$ типів каналів (x_1 – УКХ радіоканал, x_2 – транкінговий канал, x_3 – канал широкосмугового доступу, x_4 – супутниковий канал, x_5 – радіорелейний канал), тоді $X = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5\}$, а матриця з'єднань набуває такого вигляду:

$$G = [\chi(\varphi)]_{5 \times 5}. \quad (4)$$

Тоді матриця з'єднань для вузлів бригади, як приклад, набуває вигляду:

Номер вузла	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5
N_1	1	x_2, x_4, x_5	0	x_5	x_2, x_4
N_2	x_2, x_4, x_5	1	x_2, x_4, x_5	x_5	0
N_3	0	x_2, x_4, x_5	1	x_5	x_1
N_4	x_5	x_5	x_5	1	x_5
N_5	x_2, x_4, x_5	0	0	x_5	1

Кожний рядок матриці відображає всі з'єднання відповідного вузла з іншими вузлами зв'язку рівня бригади. Перший рядок вказує, що між вузлом зв'язку N_1 та N_2 функціонує транкінгові, супутникові та радіорелейні канали зв'язку, а з вузлом зв'язку N_3 прямих каналів зв'язку немає. Припустимо, що в системі зв'язку

батальйону розгорнути чотири мережеві вузли зв'язку $N_{1,1}, \dots, N_{1,4}$ між якими функціонує п'ять типів каналів x_{ah} , то матриця з'єднань для вузлів батальйону, наприклад, набуває такого вигляду:

Номер вузла	$N_{1,1}$	$N_{1,2}$	$N_{1,3}$	$N_{1,4}$
$N_{1,1}$	1	x_3, x_5	x_1, x_2, x_3, x_4	x_1, x_2, x_4
$N_{1,2}$	x_3, x_5	1	x_3, x_5	x_3, x_5
$N_{1,3}$	x_1, x_2, x_4	x_5	1	x_1, x_2, x_4
$N_{1,4}$	x_1, x_2, x_4	x_3, x_5	x_1, x_2, x_4	1

Така матриця з'єднань розраховується для кожного батальйону чи окремого підрозділу бригади, який має свою систему зв'язку та ієрархічно входить до складу управління бригади. У подальшому слід зазначити, що

Номер вузла	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5
$N_{1.1}$	x_2, x_4, x_5	0	x_4	x_4	x_4
$N_{1.2}$	0	x_2, x_4, x_5	0	0	x_2, x_4, x_5
$N_{1.3}$	x_4	0	x_4	x_4	x_4
$N_{1.4}$	x_4	0	x_4	x_4	x_4

Отже, побудова матриць з'єднань формалізує топологічну структуру системи зв'язку та визначає наявність ліній (каналів) зв'язку між мережевими вузлами, де кожний елемент наведених вище матриць відображає комунікацію між пунктами управління ТЛУ у певний момент часу. Тому, матриця з'єднань описує структурну зв'язність мережі, але сама по собі не визначає порядок проходження інформаційних потоків між вузлами.

На практиці інформація між пунктами управління, як правило, передається маршрутами, які можуть складатися з послідовного з'єднання декількох ліній (каналів) зв'язку та мережеских вузлів. Разом із тим, у складних гетерогенних мережах, що поєднують різні типи каналів (радіо, радіорелейні, супутникові, широкопasmові тощо) і містять різні типи самоорганізованих мереж (MANET, VANET, FANET, WSN), між двома вузлами можуть існувати декілька альтернативних шляхів передачі інформації. Тому після формування матриць з'єднань виникає необхідність визначити можливі маршрути інформаційних потоків, що забезпечують передачу інформації між вузлами системи зв'язку ТЛУ. В таких умовах, топологія системи зв'язку ТЛУ може змінюватися в реальному часі, що вимагає формалізованого опису маршрутів передачі інформації та можливості їх оперативної перебудови.

Отже, на основі з'єднань, сформованих завдяки використанню гетерогенних мереж доцільно ввести функцію шляху інформаційних потоків, що описує всі можливі маршрути передачі інформації між вузлами системи зв'язку ТЛУ та використовується для подальшого вибору оптимального маршруту.

Побудова маршрутів інформаційних потоків. Оскільки кожний елемент матриці G (4) характеризує стан лінії зв'язку між мережевими вузлами та визначає сукупність каналів із множини X , які можуть бути використані для передачі інформації. Тоді маршрути інформаційного потоку між відповідними вузлами N_i та N_{kj} визначається як впорядкована послідовність, що з'єднані між собою відповідними лініями зв'язку через множини проміжних вузлів:

$$\{N_i\} \rightarrow \{N_{i(kj)}^q\} \rightarrow \dots \rightarrow \{N_{kj}\} \quad (5)$$

де $N_{i(kj)}^q$ – проміжні вузли зв'язку маршруту інформаційного потоку.

Слід зазначити, що до множини проміжні вузли зв'язку можна віднести як мережеві вузли бригадного так і батальйонного рівня.

ієрархічна побудова системи управління бригади передбачає об'єднання всіх елементів системи зв'язку рівня бригади та рівня батальйонів у одну комплексну систему, яку доцільно навести матрицею зв'язності:

Припустимо, що між мережевими вузлами існує декілька можливих маршрутів передачі інформації. Тоді кожний маршрут інформаційного потоку через доступні лінії (канали) зв'язку h у момент часу t можна подати як об'єднання ліній (мереж) зв'язку, визначених за виразом (2):

$$L_{hp}^t = \chi_{ik1}(\varphi), \chi_{k1k2}(\varphi), \dots, \chi_{kj}(\varphi) \quad (6)$$

де p – номер маршруту між мережевими вузлами, $p = 1, \dots, P$.

Функцію, що характеризує сукупність можливих маршрутів передачі інформаційного потоку кількістю P між пунктами управління,

$$F_{ij}(t) = \bigcup_{p=1}^P L_{hp}^t. \quad (7)$$

Значення функції дає змогу визначити ступінь топологічної зв'язності мереж у системі зв'язку ТЛУ та наявність резервних маршрутів. Разом із тим, у реальних умовах функціонування системи зв'язку ТЛУ різні маршрути можуть істотно відрізнятися за своїми характеристиками. Зокрема, лінії зв'язку, що входять до складу маршруту, можуть мати різну пропускну здатність, затримку передачі інформації, завадостійкість та надійність функціонування, крім того, в умовах бойових дій окремі канали можуть тимчасово втрачати працездатність унаслідок вогневого враження чи роботи засобів РЕБ противника. Тому для забезпечення ефективного функціонування системи зв'язку доцільно здійснити вибір оптимального маршруту передачі інформаційного потоку із множини можливих маршрутів, визначених функцією $F_{ij}(t)$.

Визначення оптимального маршруту передачі інформаційних потоків. Під оптимальним маршрутом передачі інформаційного потоку між мережевими вузлами слід розуміти маршрут, який забезпечує найкраще значення вибраного критерію ефективності функціонування системи зв'язку [15]. Як критерій пропонується використовувати пропускну здатність маршруту, що характеризується мінімальним значенням пропускну здатності лінії зв'язку (\min), що входить до складу відповідного маршруту, оскільки саме ця лінія обмежує обсяг передачі інформації по всьому маршруту.

Якщо маршрут L_{hp}^t між мережевими вузлами складається з послідовності ліній (каналів) зв'язку $\{\chi(\varphi)\}$, тоді пропускну здатність $C(L_{hp}^t)$ на маршруті передачі інформаційного потоку через доступні лінії (канали) зв'язку в момент часу t визначається за виразом:

$$C(L_{hp}^t) = \min_{L_{hp}^t} l_{\chi}, \quad (8)$$

де l_{χ} – пропускна здатність лінії (каналу) зв'язку.

Тоді оптимальний маршрут передачі інформаційного потоку між мережевими вузлами системи зв'язку визначається за максимальною пропускною здатністю (max) серед усіх можливих маршрутів:

$$\text{opt}L_{hp}^t = \max_{L_k \in L_h^t} \{C(L_h^t)\}. \quad (9)$$

Отже, оптимальний маршрут здатний забезпечити максимальну пропускну здатність передачі інформаційного потоку між мережевими вузлами, що підвищує ефективність функціонування системи зв'язку ТЛУ, забезпечує раціональне використання наявних ліній (каналів) зв'язку та підвищує стійкість передачі інформації в умовах динамічної зміни топології мережі.

Висновки

На основі поєднання ієрархічної структури військового управління та інтегрованої сукупності взаємодіючих гетерогенних мереж зв'язку розроблено комплексну модель топології (рис. 3), яка удосконалює систему зв'язку тактичної ланки управління в умовах бойових дій.

Подання системи зв'язку тактичної ланки управління у вигляді багаторівневого графу дало змогу врахувати ієрархічне підпорядкування вузлів зв'язку пунктів управління тактичного рівня з елементами системи зв'язку та визначити структурні взаємозв'язки між мережевими вузлами, а введення функції лінії (каналу) зв'язку дозволило описати сукупність ліній (каналів) зв'язку між мережевими вузлами відповідно до їх типу та стану. Використання матриць з'єднань, що відображають склад ліній (каналів) зв'язку між мережевими вузлами, забезпечило опис структури системи зв'язку тактичної ланки управління та створило основу для побудови маршрутів інформаційних потоків.

Список бібліографічних посилань

1. Лаврут О. О., Лаврут Т. В., Климович О. К., Здоренко Ю. М. Новітні технології та засоби зв'язку у ЗСУ: шлях трансформації та перспективи розвитку. *Наука і техніка Повітряних Сил ЗСУ*. 2019. №1 (34). С. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.30748/NITPS.2019.34.13>.
2. Джусь О. П., Лобур М. В. Аналіз стану та проблем функціонування безпроводових ad hoc та mesh мереж. *Кібербезпека: освіта, наука, техніка*. 2025. № 2(30). С. 727–746. DOI: <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2025.30.914>.
3. Пермяков О. Ю., Гук О. М., Нестеров О. М., Уварова Т. В. Аналіз існуючих підходів щодо оцінювання функціонування гетерогенних інформаційних систем військового призначення. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. 2020. №39(3). С. 39–44. DOI: <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2020-39-3-39-44>.
4. Романюк В. А. Мобільні радіомережі (MANET) – основа побудови тактичних мереж зв'язку. *Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення*: матеріал IV Науково-практичного семінару, м. Київ, 2007р. Київ: ВІТІ НТУУ «КПІ», 2007. С. 5–18. URL: https://journal.viti.edu.ua/public/romanuk/2007/6_2007.pdf (дата звернення: 12.02.2026).
5. Сальник С. В., Сфанова К. О., Бригадир С. П. Аналіз мобільних засобів

Також сформовано функцію маршрутів передачі інформаційного потоку між пунктами управління (9), що дало змогу визначати оптимальний маршрут передачі інформаційного потоку в системі зв'язку тактичної ланки управління. Наведена у статті модель дає змогу формалізувати процес побудови маршрутів передачі інформаційних потоків, як поєднання ліній (каналів) зв'язку та здійснити вибір оптимального маршруту за критерієм пропускної спроможності. Отримані результати створюють математичну основу для аналізу зв'язності мереж зв'язку в загальній системі зв'язку та проведення оцінювання ефективності функціонування системи зв'язку тактичної ланки управління.

Перспективи подальших досліджень. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розроблення алгоритмів адаптивного управління навантаженням в гетерогенних системах зв'язку з використанням технологій самоорганізованих ad-hoc мереж та розроблення механізмів інтелектуальної пріоритизації інформації в умовах раптового збільшення обсягів даних в умовах зміни обстановки в ході ведення (операції) бойових дій.

Конфлікт інтересів. Конфлікти інтересів, що впливають на результати дослідження, відсутні.

Фінансування. Фінансування дослідження не здійснювалося.

Доступність даних. Дослідження виконано з використанням виключно відкритих даних, доступних у публічних джерелах.

Використання засобів штучного інтелекту (далі – ШІ). У процесі підготовки цієї статті автором було використано ШІ, як допоміжний засіб, з метою покращення лінгвістичної якості тексту, пошуку джерел за тематикою дослідження та лінгвістичної корекції англomовного резюме. Автор підтверджує повну перевірку інформації, запропонованої ШІ, яка не вплинула на наукову новизну, достовірність та цілісність результатів дослідження.

зв'язку тактичної ланки управління військами. *Збірник наукових праць ХНУ ПС*. 2018. № 4 (58). С. 62–70. DOI: <https://doi.org/10.30748/zhups.2018.58.09>.

6. Березівський М. Ю. Моделі і методи підвищення ефективності передачі трафіку в мережах Vanet: дисертація доктора філософії: 06.02.2026 Київ, 2021. 126с. URL: https://duikt.edu.ua/uploads/p_2101_48039809.pdf (дата звернення: 02.02.2026).

7. Романюк В. А., Степаненко Є. О. Модель прийняття рішень по управлінню повітряною мережею. *Збірник наукових праць ВІТІ*. 2019. № 3. С. 84–95. URL: https://journal.viti.edu.ua/public/romanuk/2019/3_2019.pdf (дата звернення: 28.01.2026).

8. Жук О. В., Машталір В. В., Грозівський Р. І., Чекан А. Ю. Функціональна модель системи управління бездротовими сенсорними мережами військового призначення. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. 2024. № 3(51). С. 146–154. DOI: <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2024-51-3-146-154>.

9. Киричек Г. Г., Пестов О. Д., Тягунова М. Ю. Масштабна децентралізована mesh мережа. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. 2025. Т. 36 (75). № 1. С. 109–116. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663->

- 5941/2025.1.2/17. 10. Міночкін А. І., Романюк В. А. Концепція управління мобільною компонентою мереж зв'язку військового призначення. *Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ "КПІ"*. 2005. № 3. С51–60 URL: https://journal.viti.edu.ua/public/romanuk/2005/10_2005.pdf (дата звернення: 08.02.2026). 11. Сова О. Я., Марилів О. О., Сальник С. В., Сальник В. В. Аналіз використання безпілотних літальних апаратів в мобільних радіомережах. *Проблеми телекомунікацій: Матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції*, м. Київ, 2017р. Київ: Інститут телекомунікаційних систем та НДІ телекомунікацій «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2017. URL: <https://conference-journal.its.kpi.ua/article/view/100957/96200> (дата звернення: 05.02.2026). 12. Романюк В. А., Степаненко С. О. Алгоритми побудови топології мережі радіозв'язку з телекомунікаційними аероплатформами. *Збірник наукових праць ВІТІ*. 2018. №3. С. 70–78. URL: https://journal.viti.edu.ua/public/romanuk/2018/7_2018.pdf (дата звернення: 12.02.2026). 13. Сова О. Я., Романюк В. А., Стемпковська Я. А., Симоненко О. А. Координація цільових функцій інтелектуальних систем управління тактичними радіомережами класу MANET. *Збірник наукових праць ХУПС*. 2014. №3 (40). С.85–92. URL: https://journal.viti.edu.ua/public/romaniuk/2014/4_2014.pdf (дата звернення: 10.02.2026). 14. Романюк В. А., Степаненко С. О., Задачі управління топологіями мереж зв'язку тактичної ланки управління. *Збірник наукових праць ВІТІ*. 2017. №2, С 101–109. URL: https://journal.viti.edu.ua/public/romanuk/2017/10_2017.pdf (дата звернення: 18.02.2026). 15. Климаш Ю. В., Шпур О. М., Кайдан М. В. Комплексний метод оптимізації маршрутизації інформаційних потоків у самоорганізованих мережах. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»: Радіоелектроніка та телекомунікації*. 2017. № 885. С. 76-87. URL: <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2018/jun/13512/12.pdf> (дата звернення: 15.02.2026).

COMPREHENSIVE MODEL MANAGEMENT TOPOLOGY FOR A TACTICAL COMMUNICATION SYSTEM

CHEKAN Andrii, National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine, <https://orcid.org/0009-0008-1767-4331>

Formulation of the problem in general. *The experience of contemporary armed conflicts demonstrates that the resilience and adaptability of communication systems directly influence the ability of military units to accomplish operational tasks under conditions of rapid manoeuvring, spatial dispersion of forces, intensive electronic warfare, and enemy fire impact. Modern operations are characterised by high mobility, electronic warfare, and frequent disruptions to communication nodes and channels, requiring resilient, adaptive communication systems. At the same time, tactical communication systems integrate heterogeneous technologies with different performance characteristics, complicating their unified representation and management. Therefore, there is a need to develop a topology model capable of formally describing multi-channel, heterogeneous communication networks within a hierarchical military command structure. Purpose of the article.* *The improvement of the topology model of the tactical link control communication system as an integrated set of interacting networks, providing descriptions of inter-network links, a multichannel hierarchical control structure, and the system as a whole. The proposed improvement is achieved through the integrated application of various types of self-organising ad hoc networking (decentralised, dynamic networks in which nodes can freely interact with each other) technologies within the tactical communication system.*

Research methods. *The study employs a combination of theoretical and analytical research methods to formalise the structure of the tactical communication system. Graph theory is used to represent the topology of the communication system as a set of interconnected nodes and communication links. The hierarchical decomposition method is applied to describe the multi-level structure of the communication system, corresponding to the hierarchical organisation of military command and control. In addition, mathematical modelling of multi-channel communication links is used to represent the structure of heterogeneous communication connections between network nodes.*

Literature review. *Existing studies on tactical communication systems primarily focus on the application of self-organising ad hoc networking technologies. In particular, Romaniuk investigated the use of mobile ad hoc networks as a basis for tactical communication systems and emphasised the importance of adaptive routing and network management. Other studies examine the use of unmanned aerial vehicles as communication nodes or airborne relays in mobile radio networks, demonstrating that such solutions increase network flexibility and improve communication resilience. Research on Flying Ad-hoc Networks and other specialised ad-hoc network architectures has also highlighted the potential of aerial communication nodes to extend coverage and improve network connectivity. However, most existing work focuses on individual types of ad hoc networks rather than on integrated models that describe heterogeneous communication technologies within hierarchical military communication systems.*

Research results. *This study proposes an improved topology model of a tactical communication system that integrates hierarchical command structures with heterogeneous communication networks. Each communication link may consist of several channels from different technologies. This multi-channel nature of communication links is represented by a connection matrix whose elements reflect the set of available communication channels between network nodes at a given time. To analyse information transmission within the system, a path function is introduced that describes possible routes between communication nodes. Each route is defined as a sequence of communication links connecting intermediate nodes between the source and destination nodes. The optimal route for information transmission is determined based on the throughput criterion. The throughput of a route is defined as the minimum throughput of its communication links. The optimal route is therefore the route that provides the maximum throughput among all available routes.*

Research novelty. *The scientific novelty of this research lies in improving the topology model of tactical communication systems by integrating heterogeneous communication technologies within a unified network structure. The proposed approach*

introduces an algebraic representation of the connection matrix that reflects the composition of communication channels between network nodes. This representation preserves the channel structure of communication links within the topological model. In addition, the model combines the hierarchical structure of military command with the flexibility of self-organising ad-hoc communication networks.

The theoretical and practical significance. The proposed topology model provides a theoretical basis for further development of methods for managing information flows in tactical communication systems. In practice, the model can be used to develop adaptive routing algorithms and improve the resilience and efficiency of communication systems operating in dynamic, contested environments.

Conclusions and future work. A topology model for a tactical communication system integrating hierarchical command structures and heterogeneous communication networks has been developed. Representing the communication system as a graph, along with the introduction of connection matrices and routing functions, enables the analysis of network connectivity and the selection of optimal routes for information transmission. Future research should focus on developing adaptive traffic management algorithms and intelligent mechanisms for prioritising information flows in heterogeneous tactical communication systems based on self-organising ad hoc networking technologies.

Keywords: network topology, self-organising ad-hoc networks, bandwidth, multi-channel system, hierarchical structure, network communication nodes.

References

1. Lavrut, O.O., Lavrut, T.V., Klymovych, O.K. and Zdorenko, Y.M., (2019). The latest technologies and means of communication in the Armed Forces of Ukraine: the path of transformation and development prospects. *Science and technology of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine*, 1(34), 1–11. DOI: <https://doi.org/10.30748/NITPS.2019.34.13>.
2. Jus, O.P., Lobur, M.I., (2025). Analysis of the state and problems of operation of wireless ad hoc and mesh networks. *Cyber security: education, science, technology*, 2 (30), 727–746. DOI: <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2025.30.914>.
3. Permyakov, O. Y., Huk, O.M., Nesterov, O.M., Uvarova, T.I., (2020). Analysis of existing approaches to evaluating the functioning of heterogeneous information systems for military purposes. *Modern information technologies in the field of security and defense*, 39(3), 39–44. DOI: <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2020-39-3-39-44>.
4. Romaniuk, V., (2007). Mobile radio networks (MANET) as the basis of tactical communication networks [online]. *Priority directions for the development of special purpose telecommunication systems and networks: material of the IV Scientific and Practical Seminar. Kyiv, Ukraine, 2007*. Kyiv: VITI NTUU «KPI» Available at: https://journal.viti.edu.ua/public/romanuk/2007/6_2007.pdf [Accessed 15 February 2026].
5. Salnyk, S.V., Yefanov, K.O., Brigadier, S.P., (2018). Analysis of mobile means of communication of the tactical link of the control of troops [online]. *Collection of scientific works of KhNU PS.*, 4 (58), 111–116. <https://doi.org/10.30748/zhups.2018.58.09> [Accessed 15 February 2026].
6. Berezhivskiy, M., (2021). Models and Methods for Improving Traffic Transmission Efficiency in VANET Networks [online]. PhD. 06.02.2026. Kyiv State University of Telecommunications. Available at: https://duikt.edu.ua/uploads/p_2101_48039809.pdf [Accessed 6 February 2026].
7. Romanyuk, V.A., Stepanenko, E.O., (2019). Air network management decision-making model [online]. *Collection of scientific works of VITI*, 3, 84–95. Available at: https://journal.viti.edu.ua/public/romanuk/2019/3_2019.pdf [Accessed 6 February 2026].
8. Zhuk, O.V., Mashtalir, V.V., Grozovsky, R.I., Chekan, A.Y., (2024). Functional model of a wireless sensor network management system for military applications. *Modern Information Technologies in the Sphere of Security and Defence*, 3(51), 146–154. DOI: <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2024-51-3-146-154>.
9. Kirichek, G.G., Pestov, O.D., Tyachunova, M.Y., (2025). The scale of the decentralised mesh of merezh. *Scientific notes of the Tavri National University named after V.I. Vernadskyi*, 36 (75), 109–116. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.2/17>.
10. Minochkin, A.I., Romanyuk, V.A., (2005). Topology management tasks of unmanned aerial vehicle network of the mobile component of military communications networks [online]. *Collection of scientific works of VITI NTUU “KPI*, 3, 51–60. Available at: https://journal.viti.edu.ua/public/romanuk/2005/10_2005.pdf [Accessed 15 February 2026].
11. Sova, O.Y., Maryliv, O.O., Salnyk, S.V., Salnyk, V.I., (2017). Analysis of the use of unmanned aerial vehicles in mobile radio networks [online]. *Problems of telecommunications: Materials of the XI International Scientific and Technical Conference. Kyiv, Ukraine, 2017*. Kyiv: Institute of Telecommunication Systems and Research Institute of Telecommunications “KPI named after Igor Sikorskyi. Available at: <https://conferenc-journal.its.kpi.ua/article/view/100957/96200> [Accessed 15 February 2026].
12. Romanyuk, V.A., Stepanenko, E.O., (2018). Algorithms for building the topology of the radio communication network with telecommunication aerial platforms [online]. *Collection of scientific works of VITI*, 3, 70–78. Available at: https://journal.viti.edu.ua/public/romanuk/2018/7_2018.pdf [Accessed 15 February 2026].
13. Sova, O.Y., Romanyuk, V.A., Stempkovska, Y.A., (2014). Coordination of target functions of intelligent control systems of tactical radio networks of the MANET class [online]. *Collection of scientific works of KhNU PS.*, 3 (40), 85–92. Available at: https://journal.viti.edu.ua/public/romanuk/2014/4_2014.pdf [Accessed 15 February 2026].
14. Romanyuk, V.A., Stepanenko, E.O., (2017). Tactical control link communication network topology management tasks [online]. *Collection of scientific works of VITI*, 2, 101–109. Available at: https://journal.viti.edu.ua/public/romanuk/2017/10_2017.pdf [Accessed 15 February 2026].
15. Klimash, Yu.V., Shpur, O.M. and Kaidan, M.V. (2017) *Complex method for optimizing routing of information flows in self-organizing networks* [online]. Visnyk Natsionalnoho universytetu «Lvivska politekhnika»: Radioelektronika ta telekomunikatsii, 885, 76–87. Available at: <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2018/jun/13512/12.pdf> [Accessed 15 February 2026].

Рукопис надійшов до редакції 16.03.2026
 Рукопис прийнято до друку після рецензування 08.04.2026
 Дата публікації 30.04.2026