

---

## CYBERSECURITY AND CRITICAL INFRASTRUCTURE PROTECTION

---

DOI 10.20535/2411-1031.2025.13.2.344717

УДК 621.396

КАТЕРИНА ЛУКІНА

### **ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ ПОСЛІДОВНИХ ПОСТУПОК ДЛЯ КООРДИНАЦІЇ ЦІЛЮВИХ ФУНКЦІЙ ВУЗЛОВИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ В РАДІОМЕРЕЖАХ MANET**

Аналіз військового досвіду російсько-української війни та ситуація в світі в цілому свідчать, що інформаційна перевага є визначальною умовою для перемоги на полі бою. Для забезпечення переваги необхідна мобільна, надійна та живуча інформаційно-комунікаційна мережа. Представником такої мережі є радіомережа класу MANET, яка має здатність до самовідновлення, самоорганізації та здатна функціонувати в умовах обмежених ресурсів та постійної зміни топології. Для ефективного управління цією складною системою та забезпечення оптимального рівня роботи її вузлів, важливою є координація цільових функцій систем управління, як критерію, за яким оцінюється якість роботи вузла і мережі. В статті запропонований варіант застосування методу багатокритеріальної оптимізації, а саме – методу послідовних поступок в процесі координації цільових функцій вузлових систем управління в тактичних мобільних радіомережах класу MANET. Застосування методу пропонується на етапі формування управляючого впливу вузла-координатора. За основу взятий метод координації цільових функцій з використанням нечіткої логіки, при цьому мобільна мережа розглядається як складна ієрархічна система. Ключовою особливістю використання методу послідовних поступок в даній статті є те, що використовується безітеративний варіант, який заміщує ітераційний процес визначення поступки, який є необхідним в класичних методах багатокритеріальної оптимізації. Це дозволяє скоротити час, який вузол-координатор витрачає на формування нечіткої підмножини допустимих рішень і, як наслідок, прискорюється весь процес координації. Запропоновано введення типових сценаріїв розвитку подій в мобільній радіомережі, які дозволять надавати цільовим функціям пріоритети відповідно до кожного сценарію. Це допоможе запобігти виникненню конфліктних ситуацій в мережі, коли цільові функції суперечать одна одній. впровадження методу послідовних поступок в процес координації дозволить отримати більш чітку системну цільову функцію.

**Ключові слова:** мобільні радіомережі, MANET, координація, цільова функція, ієрархічна система, безітеративний метод, метод послідовних поступок

**Постановка проблеми:** Досвід російсько-української війни та військово-політична ситуація в світі показують, що вирішальним фактором на полі бою є інформаційна перевага. В умовах широкомасштабного та динамічного протистояння ефективне управління силами оборони вимагає створення мобільної, надійної та живучої інформаційно-комунікаційної мережі, як основи для обміну інформацією, швидкого прийняття рішень для досягнення успіху в сучасних бойових операціях. У тактичній ланці управління військами забезпечити зростаючі вимоги до інформаційного забезпечення військ (сил) можливо шляхом використання мобільних радіомереж класу MANET (Mobile Ad-Hoc Networks) [1]. Їх застосування охоплює сфери як спеціальні (мережі зв'язку тактичної ланки управління, бездротові мережі пунктів управління, аварійні мережі, що розгортаються в умовах надзвичайних ситуацій та ін.) так і цивільні (мережі підприємств, домашні мережі) [2].

Характерними особливостями радіомереж класу MANET є висока динаміка зміни топології, децентралізоване управління та відсутність фіксованої мережевої структури. За таких умов для забезпечення інформаційного обміну із заданою якістю потрібні спеціальні підходи до управління цими мережами. Одним з підходів є представлення системи управління (СУ) радіомережі сукупністю мобільних вузлів, що взаємодіють між собою, кожен з яких є окремою вузловою СУ. СУ мобільною радіомережею є складною та ієрархічною та має всі характерні властивості таких систем, а саме: наявність спільних цілей (цільових функцій) для всієї системи і окремих цілей (цільових функцій) для підсистем (мобільних вузлів), можливість розподілу управління за рівнями системи, прийняття рішень стосовно різних завдань на вищих рівнях управління, необхідність координації цільових функцій, що виконуються, та підсистем [3].

Залежно від умов функціонування системи управління, ЦФ не завжди збігаються: часто вони залежать одна від одної, можуть суперечити одна одній або конкурувати (конфліктувати) між собою. Наприклад, прагнення до мінімізації витрат енергії батарей мобільних вузлів неминуче призведе до росту кількості ретрансляцій або збільшення довжини маршруту передачі і, відповідно, до збільшення часу передачі повідомлень. Отже, є можливість виникнення ситуацій, коли деяка підсистема (мобільний вузол або СУ вузла), намагаючись досягти поставленої перед нею ЦФ, може діяти всупереч загальносистемній ЦФ. Тому, вирішення проблеми узгодження та координації конфліктуючих ЦФ між системами управління мобільною радіомережею та її вузловими системами управління є актуальним науковим завданням.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Критерієм оптимальності управління радіомережею є цільова функція (ЦФ) управління, це деяка кількісно вимірювана величина, що відображає ступінь досягнення поставленої мети і є функцією вхідних і вихідних змінних, параметрів об'єкта управління і часу [3]. Можливі ЦФ управління мережами радіозв'язку класу MANET, їх класифікація та порядок визначення системою управління вузла наведені [4], [5], [6]. До основних вузлових (користувальницьких) ЦФ відносять оптимум (обмеження) наступних параметрів: пропускна спроможність, час затримки передачі повідомлень, потужність передавача, енергія (витрати енергії) батарей.

В мобільних радіомережах управління підсистемами нерідко здійснюється в умовах неповної інформації, коли підсистемі вищого рівня можуть бути не повністю відомі цілі та обмеження підсистем нижчих рівнів, вирішення зазначеного завдання можливе шляхом застосування методів координації, здатних приймати рішення в умовах функціонування, характерних для МР. Основними методами координації для застосування в складних ієрархічних системах, за результатами досліджень, є ітеративні та безітеративні методи, особливості їх використання розглянуті в [7].

В [8] розглянуте питання класифікації задач координації, серед яких окремою гілкою є багатокритеріальні задачі.

Проведений аналіз [9] показав, що з урахуванням особливостей мобільних радіомереж, координацію цільових функцій СУ вузлів в залежності від пріоритетності поставлених завдань, типу трафіка, етапів і функцій управління, доцільно здійснювати з використанням безітеративних методів координації. Такий вибір обумовлений мінімальними затратами мережних і вузлових ресурсів при його застосуванні в мобільних радіомережах, можливістю прийняття рішень в умовах невизначеності, а також особливостями мобільних радіомереж. Він має суттєвий недолік, а саме - необхідність визначення і передачі на вищий рівень управління всієї ефективної множини параметрів підсистем (або достатньо точної апроксимації цієї множини).

В розробленому безітеративному методі координації [3] запропоновано представити СУ мобільною радіомережею за допомогою апарату нечіткої логіки. При цьому стан вузлів МР та зв'язки між ними описані шляхом завдання відповідних функцій приналежності, системи рівнянь та обмежень. Застосування цього методу дозволяє встановлювати наявність або

відсутність внутрішньосистемних конфліктів і їх природу, корегувати параметри вузлів та призначати режими їх роботи відповідно до ситуації, яка склалася в МР. Невизначеність вхідних параметрів робить нечіткими і ЦФ, і управляючий вплив, який вузол-координатор надсилає підлеглим вузлам.

**Метою даної статті** є підвищення ефективності координації ЦФ вузлових систем управління шляхом впровадження методу багатокритеріальної оптимізації в один з етапів існуючого методу координації. Застосування методу послідовних поступок в безітеративному варіанті на етапі прийняття рішення вузлом-координатором дозволить скоротити час на прийняття рішення, що для мереж класу MANET є актуальним у зв'язку з динамічним характером мережі.

#### Виклад основного матеріалу дослідження

Застосування нечіткої логіки та теорії множин для представлення вузлових систем управління радіомережі є оптимальним, з точки зору врахування нечітких вхідних даних. Тому, доцільно, залишити представлення в такому вигляді та зосередитись на вдосконаленні самого процесу (алгоритму) координації.

Проблемою управляючого впливу, що надається вузлом-координатором підлеглим вузлам для координації ЦФ, є невизначеність вихідних даних. Наближення до чіткості, введення чітких обмежень хоча б до деяких параметрів надасть цільовій функції більшої точності, визначеності. Можливість описати деякі параметри чітко, дозволить полегшити роботу системи управління мережею, підвищити ефективність процесу координації, зменшити кількість службової інформації, що передається від підлеглих вузлів вузлу-координатору.

Також актуальною є задача підвищення ефективності управляючого впливу вузла-координатора за рахунок більш раціонального використання цільових функцій як самого вузла-координатора так і підлеглих вузлів. В залежності від ситуації, що складається в МР в певні моменти часу та отриманої вузлом-координатором задачі, важливість певних ЦФ вузлів висувається на перший план, а інші стають менш важливими.

Процес координації буде розглядатися в мобільній радіомережі, яка представлена у вигляді дворівневої СУ, елементами якої є множина вузлових СУ. Верхній рівень (перший) системи має один елемент – вузол-координатор, нижній (другий) – кілька елементів, які відображають множину мобільних вузлів (рис. 1) [6].

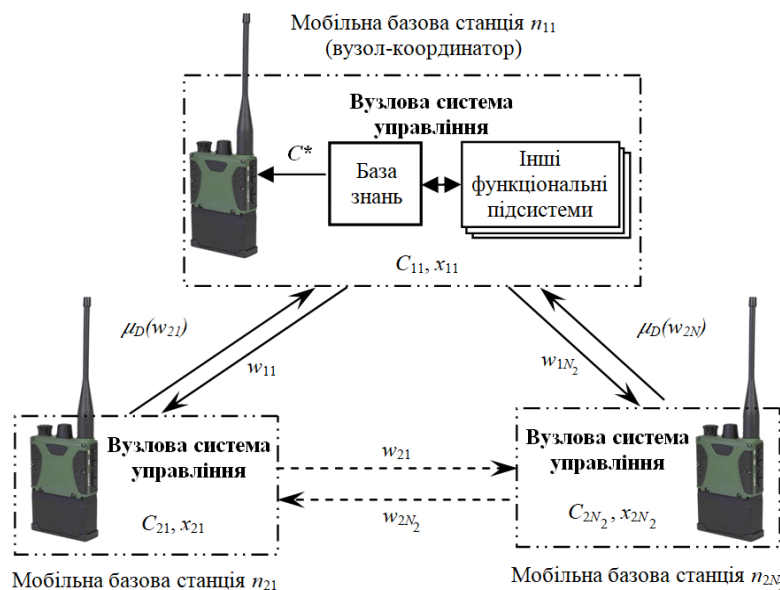


Рисунок 1 – Схема взаємодії вузлів у дворівневій системі управління МР

Реальна модель СУ МР може додатково мати вищий (мережевий) рівень, а також один або декілька нижчих рівнів для більш детального опису функціональних підсистем вузлових

СУ, тобто є складною ієрархічною системою. Вибір саме дворівневої системи для розгляду обумовлений тим, що згідно постулату М. Месаровича [10], будь-яка багаторівнева ієрархічна система може розглядатися як сукупність дворівневих, які є найпростішими типами систем, в яких проявляються всі найбільш важливі характеристики багаторівневої системи.

В якості вузла-координатора обирається головний вузол зони (чи мобільна базова станція), виділений з-поміж інших за певною ознакою (апаратні характеристики, місце розташування в топології радіомережі, кількість сусідів, тощо). Крім функцій, притаманних звичайному вузлу (прийом, передача та ретрансляція інформації в МР), вузол-координатор відповідає також за оптимізацію управлінських процесів для досягнення цілей управління всіма вузлами МР. Ще однією з пріоритетних задач вузла-координатора є формування та підтримка бази знань, де повинні зберігатися дані про параметри підлеглих вузлів та їх цільові функції, шляхом об'єднання інформації, отриманої від вузлів. На основі зібраної інформації вузол-координатор або формує новий запис, якщо підлеглий вузол вперше задіяний в мережі, або доповнює вже наявну інформацію новими даними.

Пояснення до позначень на рис. 1 [6]:

- $L$  загальна кількість рівнів у системі (для системи на рис. 1  $L = 2$ );
- $N_l$  – загальна кількість елементів на рівні  $l$ -му;
- $n_{li}$  –  $i$ -й елемент  $l$ -го рівня.

В нашому дослідженні на першому рівні – лише один елемент  $N_1 = 1$  – вузол-координатор. На  $l$ -му рівні,  $l \in [1; L]$ , наявні  $N_l$  елементів, (для нашого прикладу  $N_2 \geq 2$ ).

- $x_{li}$ ,  $i \in [1, N_l]$  – вектор, що характеризує стан елементу  $n_{li}$ ,
- $F_{li}(x_{li})$  – вектор показників цього елементу, що передається на верхній рівень,
- $\Phi_{li}(x_{li})$  – векторний критерій елемента.

Всі елементи нижнього рівня підпорядковуються одному елементу верхнього рівня – координатору.

ЦФ вузла-координатора:

$$C_{11}(w_1, x_{11}) \rightarrow opt, \quad (1)$$

де  $w_1 = \{w_{1i}\}$ ,  $i \in [1; N_2]$  – вектор рішень, що приймаються вузлом-координатором (мобільною базовою станцією) по відношенню до підлеглих вузлів другого рівня;

$x_{11}$  – множина параметрів, що описують поточний стан вузла-координатора.

ЦФ кожного мобільного вузла другого рівня:

$$C_{2i}(w_{2i}, x_{2i}) \rightarrow opt, \quad (2)$$

де  $w_{2i}$ ,  $i \in [1; N_2]$  – рішення, що приймаються  $i$ -м вузлом другого рівня;

$x_{2i}$  – множина параметрів, що характеризують стан  $i$ -го вузла другого рівня.

Системна цільова функція  $C_{11}^*$ , яка формується базою знань вузла-координатора. При цьому використовується інформація як про стан підлеглих вузлів, так і про стан вузла-координатора:

$$C_{11}^* = \{C_{11}(w_1, F_{11}); C_{21}(w_{21}, F_{21}), \dots, C_{2N_2}(w_{2N_2}, F_{2N_2})\}_{w_i \in \Omega} \rightarrow opt. \quad (3)$$

Вирішення задачі координації полягає в знаходженні оптимального вектору управляючих рішень елемента  $n_{11}$ :

$$w_1^* = \{w_{11}^*, w_{12}^*, \dots, w_{1N_2}^*\}. \quad (4)$$

Розглянемо етапи координації рис. 2 в дворівневій системі управління МР рис.1. Вважатимемо, що вузол-координатор  $n_{11}$  призначено. На першому етапі вузол-координатор  $n_{11}$  надсилає вузлам нижчого рівня  $n_{21} \dots n_{2N_2}$  сигнал про свій статус, який для них є запитом на

початок роботи, тобто надсилання інформації про свій стан та параметри, для аналізу її вузлом-координатором.

Взагалі, збір інформації (передача інформації про стан підлеглих вузлів вузлу-координатору) може відбуватися кількома способами, в залежності від ситуації в мережі (необхідності):

- детерміновано (регулярно через певні проміжки часу з дискретністю  $t_d$ ) в цьому випадку пропонується надавати вузлу-координатору інформацію про поточний стан вузла через певні (задані) проміжки часу;

- за запитом (за вимогою) – при необхідності отримання інформації у визначений час;

- за подіями (у разі зміни параметрів функціонування, характеристик, ЦФ вузла).

Причиною такого запиту може бути, наприклад, відхилення критерію  $r$  від номінального значення  $r_{i0}$ . Відносне відхилення від критерію буде:

$$\sigma_{r_i} = \frac{|r_i - r_{i0}|}{\Delta r_i}, \quad (5)$$

де  $r_i$  – фактичне значення критерію;

$r_{i0}$  – номінальне значення;

$\Delta r_i$  – допустиме відхилення.

Переваги та недоліки методів збору інформації при застосуванні в радіомережах класу MANET показані в табл.1.

Таблиця 1 – Методи збору інформації

| Метод збору інформації | Переваги                                                             | Недоліки                                                                                |
|------------------------|----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| Детермінований         | постійна інформованість вузла-координатора про стан підлеглих вузлів | постійна завантаженість трафіка службовою інформацією, низька розвідзахищеність системи |
| За запитом             | скорочення об'єму службової інформації, що циркулює в мережі         | низька інформованість вузла-координатора про стан підлеглих вузлів                      |
| За подією              | мінімальна завантаженість трафіку службовою інформацією              | нездатність системи управління передбачати поведінку вузлів                             |

Інформацію про свій стан вузли нижнього рівня  $n_{2i}$  передають у вигляді вектору показників своєї роботи  $F_{2i}(x_{2i})$ .

На другому етапі, на основі отриманих векторів  $F_{2i}(x_{2i})$  від підлеглих вузлів та власних показників стану  $F_{11}$  вузол-координатор оцінює ситуацію, яка склалася в МР або зоні МР на момент часу  $t$  та приймає рішення щодо необхідності коригування цієї ситуації. Коригування необхідне для досягнення цілей функціонування (вузлових та мережевих) МР.

У випадку, коли ситуація в МР не потребує коригування, вважатимемо, що вузли скоординовані.

Необхідність коригування буде визначатися шляхом порівняння параметрів вузлів з вимогами до типу трафіку, який буде використовуватись для інформаційного обміну.

Третім етапом процесу координації є сам процес коригування, результатом якого є управляючий вплив  $w_1^* = \{w_{11}, w_{12}, \dots, w_{1N_2}\}$ .

В розробленому методі [6], для вирішення задачі координації, СУ мобільною радіомережею представлена з використанням апарату нечіткої логіки. При цьому стан вузлів МР та зв'язки між ними описані шляхом завдання відповідних функцій приналежності, системи рівнянь та обмежень. Як критерій ефективності вірних рішень, застосовується їх функція належності, яка визначає ступінь приналежності рішення до множини ефективних, допустимих та скоординованих рішень:

$$\mu_D(w_{li}) = \mu_{C \cap \Omega \cap K}(w_{li}), \quad (6)$$

де  $D$  – нечітке рішення вузла  $n_{li}$ .

Воно має вигляд:

$$D = C \cap \Omega \cap K. \quad (7)$$

Нечітка підмножина  $D$  є перетином нечітких множин  $C$ ,  $\Omega$ , та  $K$ , де:

- нечітка підмножина  $C$  – ефективність прийнятого рішення,
- нечітка підмножина  $\Omega$  – характеристика допустимості прийнятого рішення,
- нечітка множина  $K$  – скоординованість рішень (режимів та параметрів), причому  $C, \Omega, K \subset W$ .

Скоординоване рішення вузла-координатора можна виразити через рішення підлеглих вузлів другого рівня [6]:

$$\mu_K(w_1) = \mu_D \left( \sum_{i=1}^{N_2} w_{2i} \right) = \max_{\{w_{2i}\}} \left[ \mu_D(w_{2i}) \otimes \dots \otimes \mu_D(w_{2N_2}) \right]. \quad (8)$$

Метод забезпечує гнучке реагування на ситуацію в МР: дає можливість коригувати (змінювати) параметри вузлів та призначати їм необхідні режими роботи, в залежності від умов, що склалися в МР. При цьому застосування цього методу дозволяє встановлювати факти наявності або відсутності внутрішньосистемних конфліктів, причини їх виникнення та запобігати цьому. в і їх природу, корегувати параметри вузлів та призначати режими їх роботи відповідно до ситуації в МР. Областю визначення зазначеної функції належності є множина всіх рішень, згенерованих вузлами МР  $W = \{w_{li}\}$ .

Актуальною є задача підвищення ефективності управляючого впливу вузла-координатора за рахунок більш раціонального використання цільових функцій як самого вузла-координатора так і підлеглих вузлів.

В залежності від ситуації, що складається в МР в певні моменти часу та отриманої вузлом-координатором задачі, важливість певних ЦФ вузлів висувається на перший план, а інші стають менш важливими. Тобто можна говорити про певну кількість типових сценаріїв розвитку подій в мобільній радіомережі, враховуючі те, що кожен вузол в ній може виконувати задачі як приймача, передавача так і ретранслятора.

Розв'язання такої багатокритеріальної задачі можливе за рахунок застосування математичних методів оптимізації.

Треба врахувати, що рішення багатокритеріальних задач неможливе без залучення до нього особи, що приймає рішення (ОПР). Виходячи із своїх уявлень про оптимальність рішення особа, що приймає рішення, надає перевагу одній із можливих альтернатив. В літературі пропонуються різні способи залучення особи, що приймає рішення до процесу прийняття рішення. В залежності від того, на якій стадії процесу виявляються та використовуються переваги, математичні методи оптимізації поділяються на:

- ті, в яких ОПР може виразити свої переваги до початку процесу багатокритеріальної оптимізації;
- інтерактивні (діалогові) методи;
- методи побудови множини ефективних рішень з наступним представленням його ЛПР.

При застосуванні методів оптимізації в радіомережах класу MANET, функції ОПР покладаються на вузол-координатор.

Для оптимізації управляючого впливу для кожного вузла (або загального управляючого впливу), задіяного в процесі забезпечення інформаційного обміну, застосуємо один з інтерактивних методів багатокритеріальної оптимізації, а саме метод послідовних поступок [11], [12].

Процедура розв'язання багатокритеріальної задачі цим методом складається з кількох етапів:

1. *Ранжування критеріїв.* Всі окремі (часткові) критерії розташовують та нумерують в порядку їх відносної важливості (пріоритетності) для вирішення задачі, що поставлена.
2. *Оптимізація за головним критерієм.* Вирішується задача оптимізації першого, найбільш важливого, критерію. В результаті визначається його ідеальне (найкраще) значення.
3. *Визначення величини поступки.* Обирається порогове значення критерію – допустима поступка величину поступки.
4. *Введення обмеження та перехід.* Допустима поступка стає додатковим жорстким обмеженням. З урахуванням цього обмеження максимізують другий за важливістю частковий критерій і продовжують до останнього за важливістю критерію.
5. *Визначення оптимального (компромісного) рішення* – вектора рішень, який отримано на останньому кроці оптимізації та який задовольняє вимогам (поступкам) всіх часткових критеріїв одразу.

Оптимізацію за цим методом будемо здійснювати на підмножині ефективних, допустимих та скоординованих рішень  $D$  та застосуємо критерії цільових функцій, які були визначені в [6]:

1. Максимум (обмеження) пропускної здатності  $S^*$  (каналу, маршруту чи напрямку зв'язку):

$$S^* \rightarrow \max S(S^* \geq S_{\text{зад}});$$

2. Мінімум (обмеження) потужності передачі  $P^*$  (каналу, маршруту чи напрямку зв'язку):

$$P^* \rightarrow \min P(P^* \leq P_{\text{зад}});$$

3. Мінімум (обмеження) витрат енергоресурсу  $E^*$  (батареї окремого вузла, або вузлів, з яких складається маршрут чи напрямок передачі):

$$E^* \rightarrow \min E(E^* \leq E_{\text{зад}});$$

4. Мінімум (обмеження) часу затримки доставки пакетів  $t_3$ :

$$t_3^* \rightarrow \min t_3(t_3^* \leq t_{\text{зад}}).$$

Проранжуємо критерії цільових функцій: позначимо їх, як  $M_n$ , де  $n = \overline{1, 2, \dots, S}$  – ступінь важливості критерію (для нашого випадку  $n = \overline{1, 2, 3, 4}$ ), причому  $M_1$  буде головним (найважливішим), менш важливим буде  $M_2$ , а далі за важливістю йдуть наступні критерії:  $M_3, M_4, \dots, M_S$  (для нашого випадку відповідно будуть розглядатися критерії  $M_1, M_3, M_4, \dots, M_S$ ).

Тобто,

$$M_1 \succ M_2 \succ M_3 \succ M_4.$$

В залежності від задачі, отриманої вузлом-координатором, функціонування вузлів мережі, буде здійснюватися за певними сценаріями. Основні (типові) можливі варіанти сценаріїв розвитку подій та відповідні критерії за важливістю для кожного варіанту представлені в табл.2.

Крім того, у зв'язку з динамічним характером мережі класу MANET, у зв'язку з дефіцитом часу, у зв'язку з тим, що затримки на діалог з особою, що приймає рішення можуть бути критичними, застосувати класичний варіант методу послідовних поступок, де поступка визначається ітераційно, неможливо.

Пропонується метод послідовних поступок застосувати безітеративно. Для застосування саме такого варіанту методу, граничні величини допустимого зниження  $\Delta_k$  для кожного критерію та сценарію пропонується примусово призначати на етапі проектування системи. Це перетворить  $\Delta_k$  з інтерактивної змінної на задану константу, що забезпечить швидке прийняття рішення.

Таблиця 2 – Сценарії розвитку подій

| Сценарій \ Критерії                            | $M_1$                | $M_2$                | $M_3$                | $M_4$                |
|------------------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Термінова передача повідомлення                | $t \rightarrow \min$ | $S \rightarrow \max$ | $E \rightarrow \min$ | $P \rightarrow \min$ |
| Передача повідомлення великого обсягу          | $S \rightarrow \max$ | $E \rightarrow \min$ | $t \rightarrow \min$ | $P \rightarrow \min$ |
| Звичайна передача (стандартна передача)        | $E \rightarrow \min$ | $t \rightarrow \min$ | $S \rightarrow \max$ | $P \rightarrow \min$ |
| Транзитна передача повідомлення                | $E \rightarrow \min$ | $S \rightarrow \max$ | $t \rightarrow \min$ | $P \rightarrow \min$ |
| Багатоадресна передача                         | $E \rightarrow \min$ | $P \rightarrow \min$ | $S \rightarrow \max$ | $E \rightarrow \min$ |
| Передача в мережі з високою мобільністю        | $t \rightarrow \min$ | $P \rightarrow \min$ | $S \rightarrow \max$ | $E \rightarrow \min$ |
| Передача при критичному значенні енергоресурсу | $E \rightarrow \min$ | $P \rightarrow \min$ | $t \rightarrow \min$ | $S \rightarrow \max$ |

Величина поступки  $\Delta_k$  для критерію  $M_k$  буде визначати нову, обмежену область допустимих рішень  $D_k$  на кожному кроці. Отриманий в результаті цього компромісний вектор  $M^*$  буде використовуватися для формування нечіткої функції належності цілі  $\mu_1^1$

Наприклад, для сценарію “Термінова передача повідомлення” поступки можуть бути такими (табл.3):

Таблиця 3 – Поступки сценарію “Термінова передача повідомлення”

| Цільова функція                                                                           | Позначення                                      | Поступка/обмеження, $\Delta_k$                   |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| $M_1$ : Мінімум часу затримки доставки пакетів $t_3$<br>(обмеження) часу доставки пакетів | $t_3^* \rightarrow \min t_3 (t_3 \leq t_{зад})$ | $t \leq 100$ мс<br>(для термінової передачі)     |
| $M_2$ : Максимум (обмеження) пропускної здатності $S^*$                                   | $S^* \rightarrow \max S (S^* \geq S_{зад})$     | $S \geq 512$ кбіт/с<br>(для великого обсягу)     |
| $M_3$ : Мінімум (обмеження) витрат енергоресурсу $E$                                      | $E^* \rightarrow \min E (E^* \leq E_{зад})$     | Час функціонування $\geq 80\%$ від максимального |
| $M_4$ : Мінімум (обмеження) потужності передачі $P^*$                                     | $P^* \rightarrow \min P (P^* \leq P_{зад})$     | $P \leq 5$ мВт                                   |

У зв'язку з тим, що метод послідовних поступок використовується в контексті нечіткої логіки, це вимагає перетворення ранжування та обмежень методу послідовних поступок на функції належності ( $\mu$ ) (табл.4).

Таблиця 4 Перетворення обмежень на функції належності  $\mu$ 

| Цільова функція                                                                | Позначення | Чітка поступка, $\Delta_k$ | Тип оптимізації                               | Функція належності $\mu(M)$ (формула)                                                                                                                                                           |
|--------------------------------------------------------------------------------|------------|----------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Мінімум часу затримки доставки пакетів $t_3$ (обмеження) часу доставки пакетів | $t_3$      | $t_{\max} = 100$<br>мс     | Мінімізація,<br>бажано<br>$t_3 \leq t_{\max}$ | $\mu(t) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } t \leq t_{\min} \\ \frac{t_{\max} - t}{t_{\max} - t_{\min}}, & \text{якщо } t_{\min} < t < t_{\max} \\ 0, & \text{якщо } t \geq t_{\max} \end{cases}$ |
| Максимум (обмеження) пропускної здатності $S^*$                                | $S$        | $S_{\min} = 512$<br>кбіт/с | Максимізація,<br>бажано<br>$S \geq S_{\min}$  | $\mu(S) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } S \geq S_{\max} \\ \frac{S - S_{\min}}{S_{\max} - S_{\min}}, & \text{якщо } S_{\min} < S < S_{\max} \\ 0, & \text{якщо } S \leq S_{\min} \end{cases}$ |
| Мінімум (обмеження) потужності передачі $P^*$                                  | $P$        | $P_{\max} = 5$<br>мВт      | Мінімізація<br>$P \leq P_{\max}$              | $\mu(P) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } P \leq P_{\min} \\ \frac{P_{\max} - P}{P_{\max} - P_{\min}}, & \text{якщо } P_{\min} < P < P_{\max} \\ 0, & \text{якщо } P \geq P_{\max} \end{cases}$ |
| Мінімум (обмеження) витрат енергоресурсу $E$                                   | $E$        | $E_{\max}$                 | Мінімізація<br>бажано<br>$E \leq E_{\max}$    | $\mu(E) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } E \leq E_{\max} \\ \frac{E_{\max} - E}{E_{\max} - E_{\min}}, & \text{якщо } E_{\min} < E < E_{\max} \\ 0, & \text{якщо } E \geq E_{\max} \end{cases}$ |

Визначені в таблиці 4 індивідуальні функції належності  $\mu(M_k)$  відображають ступінь задоволення кожного ранжованого критерію. Після цього об'єднаємо їх для формування загальної нечіткої підмножини допустимих рішень (нечітких обмежень)  $\mu_R$ .

Відповідно до принципів нечіткої логіки та моделі багатокритеріального вибору, для знаходження рішення, яке одночасно задовольняє всім ранжованим критеріям  $(M_1, M_2, M_3, M_4)$ , застосовується операція нечіткого перетину ( $T$ -норма).

В рамках розробленого методу [6] використовуємо оператор мінімуму (оператор Заде), що гарантує, що ступінь належності загального рішення  $\mu_R$  визначається найменш задоволеним критерієм. Це відповідає найбільш песимістичному підходу, який є необхідним для критичних систем MANET.

Нечітка підмножина допустимих рішень формується як перетин функцій належності всіх критеріїв:

$$\mu_R = \mu(t_3), \quad (9)$$

$$\mu_R(x) = \mu(t_3) \wedge \mu(S) \wedge \mu(E) \wedge \mu(P) \quad (10)$$

або, у розгорнутій формі через оператор мінімуму

$$\mu_R(x) = \min \{ \mu(t_3), \mu(S), \mu(E), \mu(P) \}, \quad (11)$$

де  $\mu_R(x)$  – функція належності нечітких обмежень (комбінованої поступки);  
 $x$  – вектор керованих параметрів (наприклад, потужність передавача, частота тощо);  
 $\mu(M)$  – індивідуальні функції належності, визначені через лінійні моделі відповідно до заздалегідь призначених поступках  $\Delta_k$ .

Отриманий вектор  $\mu_R(x)$  є основним компонентом для визначення фінального нечіткого рішення вузла  $\mu_D \mu_D$ , яке об'єднує:

- нечітку цільову функцію ( $\mu_G$ ) – ідеальні системні цілі (зазвичай  $\mu_G = 1$  для заданого сценарію);
- нечіткі обмеження ( $\mu_R$ ) – результат комбінованих поступок, отриманих без ітеративним методом (11);
- нечітку координацію ( $\mu_C$ ) – вплив вузла-координатора на підлеглі вузли (якщо такий вплив необхідний).

Відповідно до [6], результуючий вплив на вибір рішення вузлом може бути представлений як перетин нечітких множин:

$$\mu_D(x) = \mu_G(x) \wedge \mu_R(x) \wedge \mu_C(x). \quad (12)$$

У разі, якщо вузол-координатор приймає рішення для власного комплексу керуючих параметрів без прямого впливу підлеглих вузлів,  $\mu_C(x) = 1$ . Якщо також вважати, що цільова функція  $\mu_G$  є постійною для обраного сценарію (наприклад, Термінова передача повідомлення), то рівняння спрощується:

$$\mu_D(x) = \mu_R(x). \quad (13)$$

Для отримання оптимального чіткого рішення  $M^*$ , використовуємо критерій, який максимізує ступінь належності  $\mu_D(x)$ :

$$M^* = \arg \max_x \{ \mu_D(x) \}. \quad (14)$$

Для швидкості прийняття рішення в MANET, вузол-координатор може також використовувати  $h$ -зріз (або  $\alpha$ -зріз), де  $h$  – заданий мінімально необхідний ступінь належності (зона нечіткості), який ми вважаємо допустимим (наприклад,  $h = 0,8$ ):

$$D^* = \{ x \in D \mid \mu_D(x) \geq h \}. \quad (15)$$

Це дозволяє вузлу-координатору швидко отримати чіткий компромісний вектор  $M^*$  (вектор керованих параметрів), який гарантовано задовольняє всім ранжованим поступкам  $\Delta_k$  на рівні не нижче за  $h$ . Цей вектор  $M^*$  і становить управляючий вплив.

Запропонований варіант використання методу послідовних поступок для координації цільових функцій в радіомережах класу MANET використовує ієрархічний підхід, представлений в [6], але значно прискорює етап визначення допустимих рішень завдяки безітеративному застосуванню методу оптимізації.

Алгоритм функціонування методу координації цільових функцій вузлів МР із застосуванням методу послідовних поступок буде складатися з наступної послідовності етапів:

1. Ініціалізація та ідентифікація включають в себе: визначення цілей та визначення обстановки. Тобто, відбувається визначення поточного сценарію функціонування МР (наприклад, “Термінова передача”). Після цього встановлюється системна цільова функція  $\mu_G$  для даного сценарію.

2. Безітеративне застосування методу послідовних поступок шляхом швидкого визначення нечітких обмежень  $\mu_R$  без діалогу з ОПР. Цей етап складається з кількох під етапів:

2.1. Ранжування критеріїв відповідно до сценарію ( $M_1 \succ M_2 \succ M_3 \succ M_4$ ).

2.2. Призначення чітких поступок  $\Delta_k$ : автоматично застосувати раніше визначені константи  $\Delta_k$  ( $t_{\max}, S_{\min}, P_{\max}, E_{\max}$ ) до кожного критерію.

2.3. Перетворення кожної  $\Delta_k$  на функцію належності  $\mu(M_k)$  за допомогою лінійних формул (табл.4).

2.4. Відбувається об'єднання нечітких обмежень шляхом формування загальної функції нечітких обмежень  $\mu_R$  через оператор мінімуму

$$\mu_R(x) = \min \{ \mu(t_3), \mu(S), \mu(E), \mu(P) \}.$$

3. Після цього формується загальне рішення шляхом синтезу всіх нечітких впливів (ціль, обмеження, координація)

$$\mu_D(x) = \mu_G(x) \wedge \mu_R(x) \wedge \mu_C(x).$$

де  $\mu_C(x)$  – функція належності координації з підлеглими вузлами.

Після цього знаходиться оптимальний вектор керованих параметрів  $M^*$  шляхом максимізації фінального нечіткого рішення:

$$M^* = \arg \max_x \{ \mu_D(x) \}.$$

4. Заключний етапом є формування управляючого впливу на основі вектора  $M^*$  та передача його підлеглим вузлам.

**Висновки:** Запропонований підхід є ефективним рішенням для підвищення якості управління тактичними мобільними радіомережі класу MANET. Основна перевага полягає у запровадженні безітеративного варіанту методу послідовних поступок на етапі прийняття рішення вузлом-координатором, що дозволяє скоротити час на формування нечіткої підмножини допустимих рішень. Ще однією перевагою є застосування типових сценаріїв розвитку подій, що, завдяки ранжуванню конфліктуючих цільових функцій, спрощує процес багатокритеріальної оптимізації. Підтверджено, що для складних ієрархічних систем, до яких належать і тактичні радіомережі, координація ЦФ є необхідною, а використання апарату нечіткої логіки є ідеальним для представлення вузлових систем управління в умовах нечітких вхідних даних. Подальші дослідження будуть спрямовані на практичну реалізацію та розширення застосування запропонованого підходу.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] В. Романюк, “Напрямки розвитку тактичних мереж зв’язку”, на *II наук.-тех. конф. Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення*, Київ, Україна, 2004, с. 22-32.
- [2] В. Романюк, “Еволюція тактичних радіомереж”, на *VI наук.-практ. сем. Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення*, Київ, Україна, 2011, с. 45-52.
- [3] В. Романюк, Я. Стемпковська, О. Симоненко, та О. Сова, “Координація цільових функцій інтелектуальних систем управління тактичними радіомережами класу MANET”, *Зб. наук. пр. ХУПС*, № 3 (40), с. 85-92, 2014.
- [4] В. Ходаков, Н. Соколова, та Д. Кирийчук, “О развитии основ координации сложных систем”, *Проблеми інформаційних технологій*, №2(016), с. 25-30, 2014. [Електронний ресурс]. Доступно: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/ZKhUPS\\_2014\\_3\\_20](http://nbuv.gov.ua/UJRN/ZKhUPS_2014_3_20). Дата звернення: Сер. 12, 2025.
- [5] В. Романюк, “Цільові функції оперативного управління тактичними радіомережами”, *Зб. наук. пр. ВІПІ НТУУ “КПІ”*, № 1, с. 109-117, 2012.
- [6] О. Сова, В. Романюк, П. Жук, та В. Ошурко, “Метод координації цільових функцій інтелектуальних систем управління вузлами тактичних мобільних радіомереж”,

Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони, № 3, с. 50-58, 2014. doi: [https://doi.org/10.33099/2311-7249/2014-0-3\(21\)-50-58](https://doi.org/10.33099/2311-7249/2014-0-3(21)-50-58).

- [7] А.В. Катренко, та І.В. Савка, “Механізми координації у складних ієрархічних системах”, *Віс. НУ “Львівська політехніка”. Інформаційні системи та мережі*, № 3(631), с. 156-166, 2008. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2019/apr/16297/vis631ism-156-166.pdf>. Дата звернення: Жовт. 10, 2025.
- [8] В.М. Дубовой, та М.С. Юхимчук, *Децентралізоване координаційне керування розподіленими кібер-фізичними системами з неперервними об’єктами: монографія*. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2022. [Електронний ресурс]. Доступно: [https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2024/Dubovoj\\_2022\\_225.pdf](https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2024/Dubovoj_2022_225.pdf). Дата звернення: Жовт. 17, 2025.
- [9] О. Сова, К. Лукіна, та А. Білан, “Координація цільових функцій вузлових систем управління в мобільних радіомережах класу MANET”, *Зб. наук. пр. ВІТІ*, № 1, с. 125-110, 2017.
- [10] M. Mesarovic, D. Macko, and Y. Takahara, *Theory of hierarchical multilevel systems*. New York, USA: Academic Press, 1970.
- [11] Л.С. Файнзільберг, О.А. Жуковська, та В.С. Якимчук, *Теорія прийняття рішень: Підручник*. Київ, Україна: Освіта України, 2018. [Електронний ресурс]. Доступно: [https://fainzilberg.irtc.org.ua/files/UCHEBNIK\\_TPR.pdf](https://fainzilberg.irtc.org.ua/files/UCHEBNIK_TPR.pdf). Дата звернення: Жовт. 17, 2025.
- [12] О.Ф. Волошин, та С.О. Мащенко, *Моделі та методи прийняття рішень*. Київ, Україна: Вид. Людмила, 2018. [Електронний ресурс]. Доступно: [https://csc.knu.ua/media/study/asp/decision\\_theory\\_mashchenko/book/book3.pdf](https://csc.knu.ua/media/study/asp/decision_theory_mashchenko/book/book3.pdf). Дата звернення: Жовт. 17, 2025.

Стаття надійшла до редакції 03.11.2025.

## REFERENCE

- [1] V. Romanyuk, “Directions for the development of tactical communication networks”, in *Proc. II Scien. and Tech. Conf. Priority areas for the development of telecommunications systems and special purpose networks*, Kyiv, Ukraine, pp. 22-32, 2004.
- [2] V. Romanyuk, “Evolution of tactical radio networks”, in *Proc VI Scien. and Prac. Sem. Priority areas for the development of telecommunications systems and special purpose networks*, Kyiv, Ukraine, 2011, pp. 45-52.
- [3] V. Romanyuk, Y. Stempkovska, O. Symonenko, and O. Sova, “Coordination of target functions of intelligent control systems for tactical radio networks of the MANET class”, *Coll. of scien. works of the KNAFU*, vol. 40, no. 3, pp. 85-92, 2014.
- [4] V. Khodakov, N. Sokolova, and D. Kiriychuk, “On the development of the foundations of coordination of complex systems”, *Problems of information technologies*, vol. 016, no. 2, pp. 25-30, 2014. [Online]. Available: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/ZKhUPS\\_2014\\_3\\_20](http://nbuv.gov.ua/UJRN/ZKhUPS_2014_3_20). Accessed on: Aug. 12, 2025.
- [5] V. Romanyuk, “Target functions of operational management of tactical radio networks”, *Coll. of scien. works of MITI NTUU “KPI”*, vol. 1, pp. 109-117, 2012.
- [6] O. Sova, V. Romanyuk, P. Zhuk, and V. Oshurko, “Method of coordination of target functions of intelligent control systems of tactical mobile radio networks nodes”, *Modern information technologies in the sphere of security and defense*, vol. 3, pp. 50-58, 2014. doi: [https://doi.org/10.33099/2311-7249/2014-0-3\(21\)-50-58](https://doi.org/10.33099/2311-7249/2014-0-3(21)-50-58).
- [7] A. Katrenko, and I. Savka, “Coordination mechanisms in complex hierarchical systems”, *Bull. of the Nat. Un. “Lviv Politechnic”. Information Systems and Networks*, vol. 3, pp. 156-166, 2008. [Online]. Available: <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2019/apr/16297/vis631ism-156-166.pdf>. Accessed on: Oct. 10, 2025.

- [8] V. Dubovoy, and M. Yukhymchuk, *Decentralized coordination control of distributed cyber-physical systems with continuous objects: monograph*. Vinnytsia, Ukraine: VNTU, 2022. [Online]. Available: [https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2024/Dubovoj\\_2022\\_225.pdf](https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2024/Dubovoj_2022_225.pdf). Accessed on: Oct. 17, 2025.
- [9] O. Sova, K. Lukina, and A. Bilan, "Coordination of target functions of node control systems in mobile radio networks of the MANET class", *Coll. of scien. works MITI*, vol. 1, pp. 125-110, 2017.
- [10] M. Mesarovic, D. Macko, and Y. Takahara, *Theory of hierarchical multilevel systems*. New York, USA: Academic Press, 1970.
- [11] L. Feinsilberg, O. Zhukovskaya, and V. Yakymchuk, *Decision-making theory, Textbook*. Kyiv, Ukraine: Education of Ukraine, 2018. [Online]. Available: [https://fainzilberg.irtc.org.ua/files/UCHEBNIK\\_TPR.pdf](https://fainzilberg.irtc.org.ua/files/UCHEBNIK_TPR.pdf). Accessed on: Oct. 17, 2025.
- [12] O. Voloshyn, and S. Mashchenko, *Decision-Making Models and Methods*. Kyiv, Ukraine: Lyudmila Publishing House, [Online]. Available: [https://csc.knu.ua/media/study/asp/decision\\_theory\\_mashchenko/book/book3.pdf](https://csc.knu.ua/media/study/asp/decision_theory_mashchenko/book/book3.pdf). Accessed on: Oct. 17, 2025.

KATERYNA LUKINA

## USING THE SEQUENTIAL PROCEDURES METHOD FOR COORDINATION OF TARGET FUNCTIONS OF NODE CONTROL SYSTEMS IN MANET RADIO NETWORKS

Analysis of the military experience of the Russian-Ukrainian war and the situation in the world as a whole indicate that information advantage is a determining condition for victory on the battlefield. To ensure advantage, a mobile, reliable and resilient information and communication network is necessary. A representative of such a network is a radio network of the MANET class, which has the ability to self-recover, self-organize and is able to function in conditions of limited resources and constant topology changes. For effective management of this complex system and ensuring the optimal level of operation of its nodes, coordination of target functions of control systems is important as a criterion by which the quality of the node and network operation is assessed. The article proposes a variant of applying the multi-criteria optimization method, namely the method of successive concessions in the process of coordinating target functions of nodal control systems in tactical mobile radio networks of the MANET class. The method is proposed to be used at the stage of forming the controlling influence of the coordinator node. The method of coordinating objective functions using fuzzy logic is taken as a basis, while the mobile network is considered as a complex hierarchical system. The key feature of using the method of successive concessions in this article is that a non-iterative version is used, which replaces the iterative process of determining the concession, which is necessary in classical methods of multi-criteria optimization. This allows you to reduce the time that the coordinator node spends on forming a fuzzy subset of admissible solutions and, as a result, the entire coordination process is accelerated. It is proposed to introduce typical scenarios of events in a mobile radio network, which will allow you to give priority to objective functions in accordance with each scenario. This will help prevent conflict situations in the network when objective functions contradict each other. The introduction of the method of successive concessions into the coordination process will allow you to obtain a clearer system objective function.

**Лукіна Катерина Вікторівна**, молодший науковий співробітник Науково-дослідного центру, Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ, Україна, ORCID 0000-0002-2803-7839, [kate.lukina@gmail.com](mailto:kate.lukina@gmail.com).

**Lukina Kateryna**, research assistant of the Research center, Institute of special communication and information protection at the National technical university of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute", Kyiv, Ukraine.