

*Олег Ярославович Сова (канд. техн. наук, с.н.с., докторант)*

*Валерій Антонович Романюк (д-р. техн. наук, професор, заступник начальника інституту)*

*Павло Васильович Жук (канд. техн. наук, доцент, начальник факультету)*

*Віталій Миколайович Ошурко (ад'юнк)*

*Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації Державного університету телекомунікацій, Київ, Україна*

## МЕТОД КООРДИНАЦІЇ ЦІЛЬОВИХ ФУНКЦІЙ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ВУЗЛАМИ ТАКТИЧНИХ МОБІЛЬНИХ РАДІОМЕРЕЖ

Суть методу полягає в тому, що у якості характеристики прийнятих рішень з координації цільових функцій інтелектуальних систем управління вузлами мобільних радіомереж запропоновано використовувати функції їх належності до підмножини ефективних, допустимих і скоординованих рішень. Це дозволить не тільки встановлювати наявність або відсутність внутрішньосистемних конфліктів і їх природу, але й корегувати параметри вузлів та призначати режими їх роботи відповідно до ситуації, яка склалася в мобільній радіомережі.

**Ключові слова:** інтелектуальна система управління; цільові функції; мобільні радіомережі.

### Вступ

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Основне завдання тактичних мереж полягає в організації зв'язку для бойових підрозділів в умовах, де відсутній доступ до мереж фіксованого зв'язку. Дані мережі характеризуються частими змінами топології через мобільність вузлів і втрату зв'язності, пов'язану з відсутністю прямої видимості між вузлами. За таких умов здатність до самоорганізації та самовідновлення, які притаманні мобільним радіомережам (МР) класу MANET (Mobile Ad-Hoc Network) [1], робить їх ідеальними для використання в тактичних військових мережах зв'язку.

В ході попередніх досліджень було показано, що ефективне функціонування МР неможливе без наявності системи управління (СУ) в складі кожного мобільного вузла [2]. З метою прийняття рішень вузловою СУ в умовах невизначеності, якими характеризується функціонування МР, в [3] запропоновано інтелектуалізувати процес управління вузлами МР шляхом використання технологій обробки даних та отримання знань.

**Постановка наукового завдання.** Критерієм оптимальності рішень, прийнятих інтелектуальною СУ (ІСУ) вузлом МР, що відображає ступінь досягнення поставленої цілі (цілей), є цільова функція управління (ЦФ). Це деяка кількісно вимірювана величина, яка є функцією вхідних і вихідних змінних, параметрів об'єкта управління і часу. В [4] показано, що основними користувальницькими (вузловими) ЦФ можуть бути: максимізація пропускної спроможності, мінімізація часу доставки повідомлень, мінімізація потужності передачі та максимізація часу функціонування МР шляхом управління витратами енергоресурсів.

До особливостей зазначених ЦФ можна віднести те, що більшість з них залежать одна від одної, а також можуть заперечувати одна-одній. Наприклад, бажання мінімізувати витрати енергії батарей абонентів призведе до росту кількості ретрансляцій або довжини маршруту передачі і, відповідно, збільшення часу передачі повідомлень. У зв'язку з цим *актуальним є наукове завдання*, яке полягає в координації рішень, що приймаються вузловими ІСУ в процесі функціонування МР.

Враховуючи вищезазначене, **метою** даної статті є розробка методу координації цільових функцій вузлових ІСУ в тактичних МР. **Об'єктом дослідження** є процес прийняття рішення ІСУ з управління вузловими та мережевими ресурсами. **Предметом дослідження** є методи координації цільових функцій ІСУ вузлів, які приймають участь у передачі інформації.

### Виклад основного матеріалу дослідження

За необхідності передачі інформації, вузлова ІСУ повинна здійснити вибір ЦФ, які залежать від (рис. 1) [4]:

стану вузла, що визначається його параметрами та наявними ресурсами;

стану мережі (визначається станом вузлів, каналів, напрямків, зони та всієї мережі, наявністю ресурсів та динамікою їх зміни);

типу інформації (трафіка), який визначає вимоги до якості передачі (час затримки передачі та його варіація, кількість помилок тощо).

Стан вузла можна описати наступними параметрами: навантаження, якість обслуговування трафіка, розмір черг, кількість радіоканалів з сусідами, мобільність, наявні чи необхідні маршрути передачі, тощо [4]. Ресурсами

вузла є апаратні (енергія батарей, швидкодія процесорів, потужність передавача, тощо), алгоритмічні або програмні (множина алгоритмів або протоколів управління на різних рівнях моделі

OSI та функціональних підсистемах), радіоресурс, тощо. Кожен вузол збирає інформацію про ситуацію, що склалася в МР та за сукупністю показників визначає її стан [4].

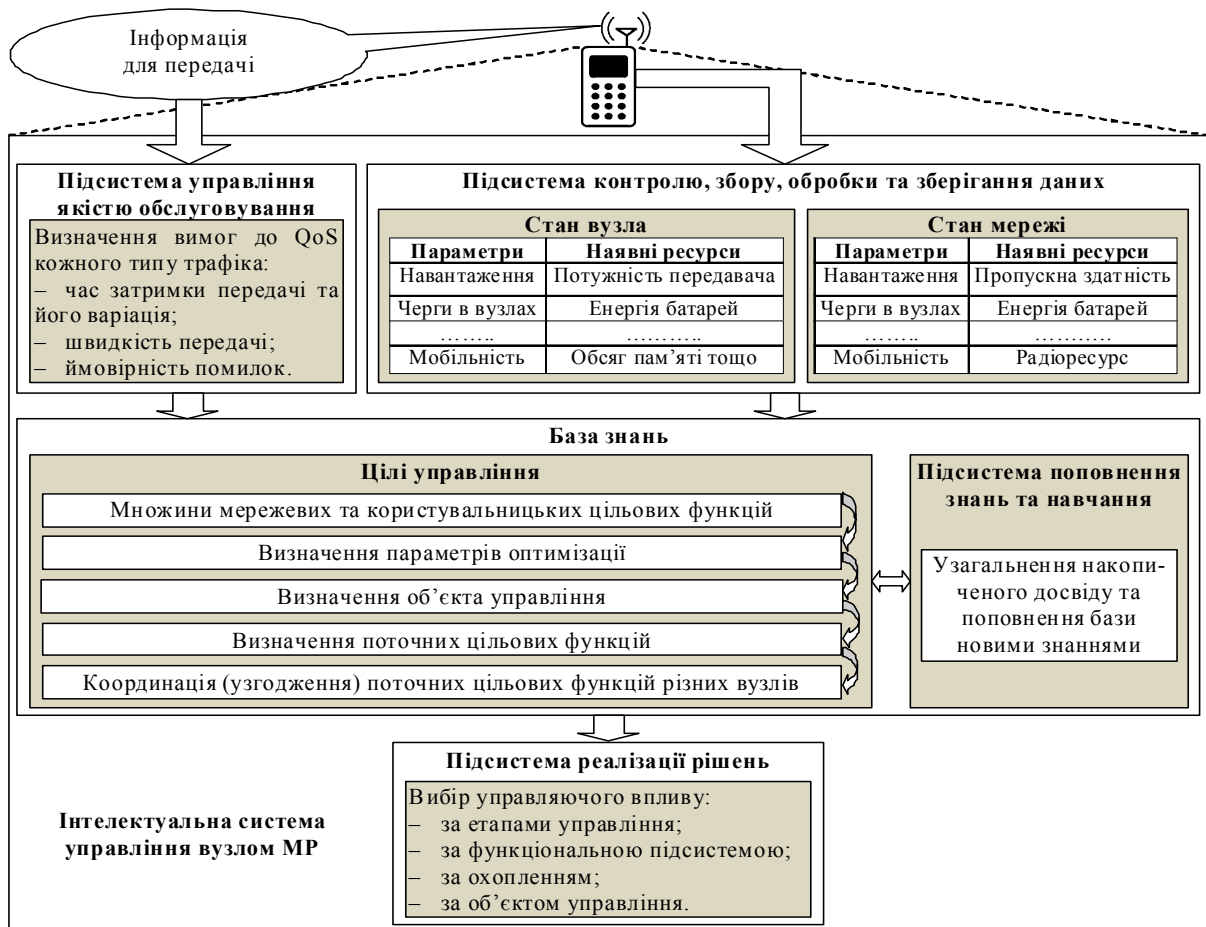


Рис. 1. Схема визначення цільових функцій системою управління вузла

В базі знань, на основі інформації про стан вузла, МР та вимог до якості обслуговування того чи іншого типу трафіка, визначаються цільові функції управління вузлом, об'єкти та параметри оптимізації, а також здійснюється координація поточних цільових функцій різних вузлів які приймають участь у передачі інформації.

Як зазначалося вище, до основних користувацьких ЦФ можна віднести оптимум (обмеження) наступних параметрів: пропускна спроможність, час затримки передачі повідомлень, потужність передавача, енергія (витрати енергії) батарей. В якості критеріїв зазначених цільових функцій можуть бути:

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

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

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

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

3. Максимум часу функціонування через мінімум (обмеження) витрат енергоресурсу  $E^*$  (батарей окремого вузла, або вузлів, з яких складається маршрут чи напрямок передачі):

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

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

$$t_3^* \rightarrow \min t_3 (t_3^* \leq t_{3зад}).$$

Однак, в умовах постійної зміни ситуації в МР досягнення максимальних (мінімальних) значень критеріїв не завжди є можливим чи доцільним, так як вимагатиме значних затрат вузлових та мережеских ресурсів. Тому, у [5] авторами запропоновано використання користувацької оптимізації, яка передбачає, що оптимальне управлінське рішення  $w^*(t)$ , прийняте вузловою ІСУ, повинно відповідати обмеженням на вузлові та мережескі ресурси  $\Omega$  при оптимізації цільової функції  $C$ , заданої у вигляді вектору:

$$w^*(t) = \arg \text{opt}_{w(t) \in \Omega} C(x(t), w(t)), \quad (1)$$

де

$$C = \{S(x), t_c(x), P(x), E(x)\}; \quad (2)$$

$$x(t) = \{\xi(t), e_{\sigma}(t), \Gamma_{\xi}(t), \omega(t), O(t), B(t), b(t)\}; \quad (3)$$

при виконанні обмежень на ресурс та вимог до якості обслуговування  $\xi$ -го типу трафіка (мова, відео, дані)

$$\Omega = \{p \leq p_{ijmax}, s \leq s_{ijmax}, t_3^{\xi} \leq t_{3max}^{\xi}, \omega \leq \omega_{max}, e_{\sigma i} \leq e_{\sigma max}\}, \quad (4)$$

де  $x(t)$  – множина параметрів, які характеризують стан вузла МР;  $S$  – пропускна спроможність;  $t_3$  – середній час затримки передачі пакетів;  $P$  – потужність передачі;  $\omega(t)$  – інтенсивність зміни топології;  $\Gamma_{\xi}(t)$  – вхідне навантаження  $i$ -го вузла МР;  $e_{\sigma i}$  – ємність батарей  $i$ -го вузла;  $s_{ij}$  – пропускна спроможність каналу  $ij$ ;  $P_{ij}$  – потужність передачі в каналі  $ij$ ;  $t_3^{\xi}$  – час затримки передачі пакетів  $\xi$ -типу,  $V_{ст}$  – об'єми службового трафіка;  $O(t)$  – об'єм інформації;  $B(t)$  – вимоги до безпеки інформації;  $b(t)$  – кількість адресатів.

Крім того, у ході функціонування МР може скластися необхідність в одночасному задоволенні кількох критеріїв, які мають різну фізичну природу і частина з них потребує максимізації (пропускна спроможність та час функціонування МР), а частина – мінімізації (потужність передачі та час затримки передачі пакетів). Тобто, в один і

той же момент часу ЦФ різних мобільних вузлів можуть суперечити одна-одній, що призводить до появи внутрішньосистемних конфліктів двох видів:

- *внутрішньорівневі* – виникають через несумісність користувальницьких цілей окремих вузлів у рамках заданої структури МР і обмежень;
- *міжрівневі* (між вузлом-координатором та підлеглими вузлами) – пов'язані з тим, що системна ЦФ, визначена вузлом-координатором, не збігається з ЦФ підлеглих вузлів.

Для зменшення або усунення зазначених конфліктів пропонується виділення в структурі МР вузла-координатора, який для вирішення задачі координації може використовувати відповідні методи, котрі, в залежності від організаційної структури МР (централізована чи децентралізована), діляться на два класи: ітеративні та безітеративні [6].

Розглянемо постановку задачі координації ЦФ вузлів мобільної радіомережі, яка функціонує за децентралізованим принципом, що передбачає рівноправність усіх вузлів у ході прийняття рішень. Для реалізації функцій координатора у МР вибирається головний вузол зони (чи мобільна базова станція), виділений з-поміж інших за певною ознакою (апаратні характеристики, місце розташування в топології радіомережі, кількість сусідів, тощо). Враховуючи зазначене, схема СУ мобільною радіомережею може бути представлена у вигляді сукупності вузлових ІСУ двох рівнів (рис. 2).

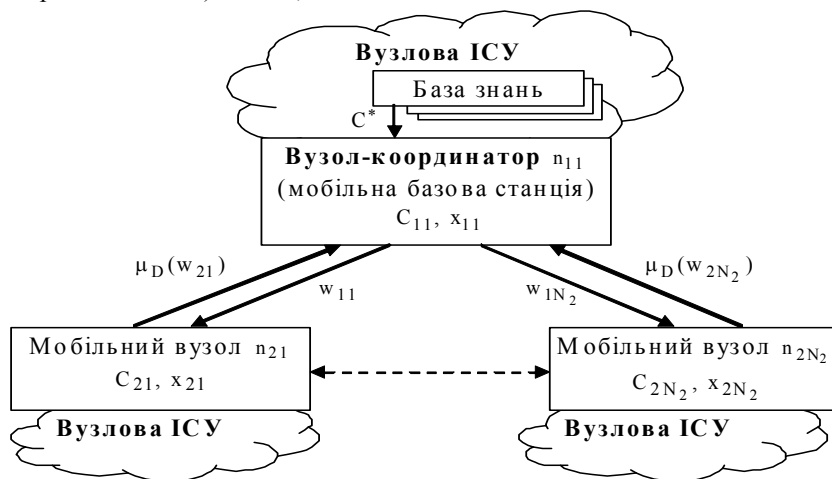


Рис. 2. Схема взаємодії вузлів у дворівневій системі управління МР

Введемо наступні позначення:  $L$  – загальна кількість рівнів у СУ радіомережею (для системи на рис. 2  $L = 2$ );  $N_l$  – загальна кількість мобільних вузлів на  $l$ -му рівні  $l \in [1:L]$  (для нашого прикладу  $N_2 \geq 2$ );  $n_{li}$  –  $i$ -й вузол  $l$ -го рівня.  $N_1 = 1$  – на першому рівні наявний лише вузол-координатор – головний вузол зони (мобільна базова станція).

ЦФ вузла-координатора запишемо, як

$$C_{11}(w_1, x_{11}) \rightarrow \text{opt}, \quad (5)$$

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 характеризують стан вузла-координатора.

Використання ЦФ вузла-координатора (мобільної базової станції) в якості системної цільової функції всієї МР (чи її зони) призведе до

значного ускладнення задачі оптимізації, а також не дозволить врахувати власні ЦФ підлеглих мобільних вузлів під час прийняття рішень з управління ресурсами МР чи її зони. Крім того, системна цільова функція МР не має прямої залежності від рішень, які приймаються вузловими ІСУ нижчого рівня, що ускладнює вибір режимів їх роботи. Тому вважатимемо, що для кожного мобільного вузла другого рівня задані свої цільові функції

$$C_{2i}(w_{2i}, x_{2i}) \rightarrow \text{opt}, \quad (6)$$

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  $C_{11}^*$  формується базою знань вузла-координатора на основі інформації про стан підлеглих вузлів та самого вузла-координатора. Дана інформація надходить до бази знань у вигляді вектору показників стану вузла-координатора  $F_{11}$  та векторів показників стану вузлів другого рівня  $F_{2i}$ ,  $i \in [1: N_2]$ . З урахуванням виразів (5) та (6) системна цільова функція  $C_{11}^*$  матиме вигляд:

$$C_{11}^* = \left\{ C_{11}(w_1, F_{11}); C_{21}(w_{21}, F_{21}), \dots \right\}_{w_{1i} \in \Omega} \rightarrow \text{opt}, \quad (7)$$

Основна відмінність між вектором рішень  $w_1 = \{w_{1i}\}$  та рішеннями  $w_{2i}$ , що приймаються вузлами другого рівня, полягає в тому, що на рівні вузла-координатора вирішуються питання розподілу мережових та вузлових ресурсів, питання допустимості параметрів та ефективності режимів функціонування вузлів, а також координації ЦФ вузлів, шляхом встановлення відповідних значень векторних критеріїв  $\Phi_{1i}(x_{1i})$ .

У свою чергу, рішення вузлів другого рівня пов'язані лише з реалізацією управляючих впливів щодо вибору необхідних параметрів та режимів їх функціонування, з урахуванням критеріїв, надісланих вузлом-координатором. Тобто, при переході з нижчого на вищий рівень системи управління МР втрачається деяка інформація про деталі функціонування вузлів, але з'являється можливість оцінити функціонування МР з системної точки зору. При цьому, найбільш детально при аналізі розглядаються тільки ті вузли, в яких спостерігається істотне відхилення параметрів функціонування від оптимальних значень, а все, що не відіграє особливої ролі з системної точки зору, виключається з подальшого розгляду.

В табл. 1 наведена взаємозалежність між векторними критеріями та управляючими рішеннями, які можуть бути прийняті ІСУ мобільних вузлів для досягнення системної цільової функції.

Таблиця 1

**Взаємозалежність між векторними критеріями та управляючими рішеннями ІСУ мобільних вузлів**

| Критерій вузлової ЦФ ( $C_{1i}$ )                                 | Управляючі рішення ( $w = \{w_{1i}\}$ )  |
|---|--|
| Максимум (виконання обмеження) спроможності пропускну             | Мінімізація взаємних завад при передачі інформації<br>Мінімізація об'ємів службового трафіка<br>Побудова незалежних маршрутів передачі   |
| Мінімум (виконання обмеження) часу доставки пакетів               | Оптимізація топології зони мережі<br>Побудова незалежних маршрутів передачі<br>Побудова найкоротшого маршруту(тів) заданої якості        |
| Мінімум (виконання обмеження) потужності передачі                 | Використання режиму „сон”<br>Використання спрямованих антен<br>Побудова найкоротших маршрутів<br>Оптимізація топології зони мережі       |
| Максимум (виконання обмеження) часу функціонування вузла (мережі) | Використання енергозберігаючих методів маршрутизації інформації<br>Використання режиму „сон”<br>Мінімізація використання енергії батарей |

Враховуючи все вищезазначене, вирішення задачі координації цільових функцій ІСУ вузлів МР, які приймають участь у передачі інформації, полягає в знаходженні таких управляючих рішень на кожному з рівнів СУ радіомережею, які б у сукупності задовольняли системній цільовій функції  $C_{11}^*$ . Для вирішення задачі координації в багаторівневих СУ найчастіше використовуються ітеративні методи, які потребують постійного обміну інформацією між координатором та підлеглими вузлами про стан МР чи її зони. Однак, в умовах частої зміни топології МР це призведе до

значних затрат вузлових та мережових ресурсів [6], тому задачу координації ЦФ вузлів, що приймають участь у передачі інформації в МР, пропонується вирішувати з використанням безітеративного методу координації.

**Метод координації цільових функцій вузлів МР з використанням нечіткої логіки.** При моделюванні дворівневої системи управління МР важливим є опис вузлів у якості взаємопов'язаних підсистем, кожна з яких переслідує власні цілі. Однак, динамічна природа МР, яка унеможливило збір повної інформації про стан МР, та

багатовекторність критеріїв її функціонування ускладнюють побудову математичної моделі ІСУ мобільною радіомережею на основі використання класичних методів динамічного програмування. Тому, для розробки безітеративного методу координації запропоновано використання теорії нечітких множин спільно з теорією ієрархічних багаторівневих систем [7 – 10].

З одного боку, застосування принципів системного аналізу, при описі елементів СУ мобільної радіомережі, сприятиме відображенню внутрішньорівневої та міжрівневої взаємодії вузлів МР, що забезпечить цілісність її розгляду, як складної системи, і дозволить:

вирішувати завдання з управління вузловими та мережевими ресурсами на всіх рівнях управління з позиції системної мети, що задається системою ЦФ;

розглянути функціонування системи управління МР на основі врахування основних процесів, елементів СУ і зв'язків між ними, що дозволить отримати достовірні оцінки стану вузлів МР та визначити вимоги до параметрів їх функціонування з метою передачі інформації із заданою якістю обслуговування;

достатньо спростити модель СУ радіомережею і, водночас, забезпечити адекватне відображення реального процесу управління вузловими і мережевими ресурсами в МР.

З іншого боку, використання для опису СУ мобільною радіомережею теорії нечітких множин позбавить необхідності точно задавати значення всіх параметрів та їх межі, що є дуже складним процесом для такої динамічної системи як МР. Функції належності спочатку лише грубо задають систему переваг та обмежень, а в ході подальшого функціонування МР відбувається самонавчання вузлової ІСУ з подальшим корегуванням значень функції лише в районі передбачуваної точки оптимуму.

У сукупності застосування теорії нечітких множин спільно з теорією ієрархічних багаторівневих систем дозволить відобразити основні властивості системи управління МР і спростити процес її аналізу, подолати труднощі, пов'язані з наявністю векторного критерію, відсутністю унімодальності та дискретністю.

Основні труднощі вирішення завдань оптимізації багаторівневих систем полягають в тому, що рішення підсистем нижчестоячого рівня залежить від завдання з боку вищого рівня (цілі, обмеження), а рішення вищого рівня, в свою чергу, залежать від відгуку елементів нижчестоячого рівня. Вирішення цієї проблеми пропонується здійснювати за допомогою введення поняття нечіткого оптимального рішення, яке приймається ІСУ деякого вузла  $n_{ij}$ . Для цього опишемо структуру дворівневої СУ мобільної радіомережі (рис. 2) із використанням апарату нечіткої логіки, шляхом завдання відповідних функцій приналежності, система рівнянь і

обмежень, що описують стан вузлів МР та зв'язки між ними [8, 9].

У якості характеристики прийнятих рішень пропонується використовувати функцію їх належності до підмножини ефективних, допустимих та скоординованих рішень  $\mu_D(w_{ij})$ . Областю визначення зазначеної функції належності є множина всіх рішень, згенерованих вузлами МР  $W = \{w_{ij}\}$ .

Характеристика допустимості прийнятого рішення визначається ступенем його належності до множини обмежень на ресурси та вимог до якості обслуговування  $\xi$ -го типу трафіка  $\Omega$  і задається нечіткою підмножиною  $\Omega \subset W$  з функцією належності  $\mu_\Omega(w_{ij})$ . Ефективність прийнятого рішення визначається нечіткою цільовою функцією  $C$ , яка задається нечіткою підмножиною  $C \subset W$  з функцією належності  $\mu_C(w_{ij})$ . Скоординованість рішень характеризується ступенем їх належності до множини скоординованих режимів  $K$  і задається нечіткою множиною  $K \subset W$  з функцією належності  $\mu_K(w_{ij})$ . Результируючий вплив нечіткої цільової функції, нечітких обмежень та нечіткої координації на вибір рішення вузлом  $n_{ij}$  може бути представлено як перетин нечітких множин  $C \cap \Omega \cap K$ , функція належності якого матиме вигляд [8, 9]:

$$\mu_{C \cap \Omega \cap K}(w_{ij}) = \mu_C(w_{ij}) \wedge \mu_\Omega(w_{ij}) \wedge \mu_K(w_{ij}) = \min\{\mu_C(w_{ij}), \mu_\Omega(w_{ij}), \mu_K(w_{ij})\}; w_{ij} \in W \quad (8)$$

Тоді, нечітку множину  $D = C \cap \Omega \cap K$  будемо називати нечітким рішенням вузла  $n_{ij}$ , причому

$$\mu_D(w_{ij}) = \mu_{C \cap \Omega \cap K}(w_{ij}) \quad (9)$$

Зв'язок рішень, які приймаються вузлом-координатором, з рішеннями вузлів другого рівня може бути записаний наступним рівнянням:

$$w_1 = f(w_{21}, \dots, w_{2N_2}) \quad (10)$$

Якщо множина рішень  $W$  складається з одного параметра, то рівняння (10) можна записати у вигляді

$$w_1 = \sum_{i=1}^{N_2} w_{2i} \quad (11)$$

У загальному випадку, для деякої багаторівневої системи управління із загальною кількістю рівнів  $L$  системне скоординоване рішення на  $l$ -му рівні можна записати наступним виразом:

$$D(w_1) = D(w_{L1}) \cdot \dots \cdot D(w_{LN_L}) \cdot D(w_{(L-1)1}) \cdot \dots \cdot D(w_{(L-1)N_{L-1}}) \cdot \dots \cdot D(w_{(1+1)1}) \cdot \dots \cdot D(w_{(1+1)N_{1+1}}) \cap C(w_1) \cap \Omega(w_1) \quad (12)$$

де  $w_1$  – вектор рішень, що приймаються вузлами на  $l$ -му рівні.

У зв'язку з тим, що в ієрархічній СУ рішення на  $l$ -му рівні управління залежить тільки від

стану елементів цього рівня та рішень, які приймаються вищестоящим  $(l-1)$ -м та нижчестоящим  $(l+1)$ -м рівнями, у виразі (12) при знаходженні системного рішення враховуються всі рішення елементів нижчестоящих рівнів. Приймаючи до уваги інваріантність виразу (12), а також допущення про те, що ЦФ вузла-координатора враховується в системній ЦФ  $C^*$ , можемо отримати рекурентну процедуру, яка дозволить представити системне скоординоване рішення вузла-координатора через нечіткі рішення підлеглих вузлів другого рівня (рис. 2) [8]:

$$D(w_1) = [D(w_{21}) \cdot \dots \cdot D(w_{2N_2})] \cap C^*(w_1) \cap \Omega(w_1). \quad (13)$$

Для прийняття рішення вузол-координатор повинен попередньо згорнути рішення, які приймаються підлеглими вузлами другого рівня  $D(w_{21}), \dots, D(w_{2N_2})$  в системне рішення  $D(w_{21}, \dots, w_{2N_2})$ . Тоді (13) запишемо у наступному вигляді:

$$D(w_1) = D(w_{21}, \dots, w_{2N_2}) \cap C^*(w_1) \cap \Omega(w_1). \quad (14)$$

Використання такої рекурентної процедури обумовлене наявністю в кожного вузла МР самостійних прав щодо обробки інформації та прийняття рішень з управління вузловими та мережевими ресурсами. Але, на відміну від класичних СУ де рішення представляються в чіткій формі (у вигляді конкретних числових значень відповідних параметрів управління) вважатимемо, що рішення всіх вузлових ІСУ у процесі їх координації є нечіткими і задаються для кожної ІСУ функціями належності  $\mu(w_{ij})$ . Тоді для функцій належності підмножини ефективних і допустимих рішень вираз (14) запишеться в наступному виді:

$$\mu_D(w_1) = \mu_D(w_{21}, \dots, w_{2N_2}) \otimes \mu_{C^*}(w_1) \otimes \mu_{\Omega}(w_1),$$

де

$$\mu_D(w_{21}, \dots, w_{2N_2}) = \mu_D(w_{21}) \otimes \dots \otimes \mu_D(w_{2N_2}), \quad (15)$$

$\otimes$  – бінарна операція над функціями належності, яка в залежності від їх фізичного змісту може бути алгебраїчним множенням, додаванням або операцією Заде [8, 9].

Відповідно до виразу (8) функція належності  $\mu_D(w_{21}, \dots, w_{2N_2})$  характеризує міжрівневу координацію  $K$ , причому для прийняття рішення вузлом координатором необхідно спроектувати координуюче рішення  $\mu_D(w_{21}, \dots, w_{2N_2})$  на вісь  $w_1$ , використовуючи рівняння (11). Тоді функцію  $\mu_D(w_{21}, \dots, w_{2N_2})$  можна записати у вигляді:

$$\mu_K(w_1) = \mu_D \left( \sum_{i=1}^{N_2} w_{2i} \right). \quad (16)$$

З рівняння (16) видно, що рішення вузла-координатора  $w_1$  може бути виконане за допомогою множини рішень вузлів другого рівня

$w_{21}, \dots, w_{2N_2}$ . Крім того, з виразу (15) видно, що робота МР буде найбільш ефективною у випадку, коли кожен вузол прийматиме оптимальні рішення, максимізуючи (мінімізуючи) свою функцію належності:

$$\mu_D \left( \sum_{i=1}^{N_2} w_{2i} \right) = \max_{\{w_{2i}\}} [\mu_D(w_{21}) \otimes \dots \otimes \mu_D(w_{2N_2})]. \quad (17)$$

Це дозволяє реалізувати в СУ мобільною радіомережею стратегію управління, яка відповідає принципу оптимальності Беллмана [8, 9]: якими б не були стан та рішення вузла-координатора в момент часу  $t$ , наступні рішення підлеглих вузлів повинні бути оптимальними відносно цього рішення. Застосування даного принципу оптимальності дозволить до мінімуму скоротити об'єми службової інформації між вузлами МР, необхідної для оцінки ситуації, яка склалася в момент часу  $t$ , та забезпечить локальну обробку цієї інформації окремими вузлами.

**Алгоритм функціонування методу координації цільових функцій вузлів МР з використанням нечіткої логіки.** На відміну від більшості існуючих методів, які приймають рішення з координації до прийняття рішення нижчестоящими елементами або після прийняття рішення ними (корекція), пропонується метод координації передбачає узгодження рішень, що приймаються вузловими ІСУ, в процесі оперативного управління МР.

У загальному алгоритм прийняття рішень вузлами МР, яка функціонує за децентралізованим принципом, зводиться до наступного. Як зазначалося раніше, вузол-координатор і підлегли вузли другого рівня пов'язані між собою двома видами сигналів (рис. 2):

1) сигнал  $\mu_D(w_{2i})$  – нечітке оптимальне рішення підлеглих вузлів другого рівня, що посилається наверх вузлу-координатору і містить інформацію про допустимість та ефективності режимів роботи вузлів другого рівня;

2) сигнал  $w_{1i}$  – йде від вузла-координатора вниз, до підлеглих вузлів другого рівня, і визначає їх стратегію поведінки (вибір режиму роботи), зміни у структурі та значеннях параметрів вузлів другого рівня, а також координуючий вплив при фіксованій структурі і параметрах.

Разом з сигналом  $\mu_D(w_{2i})$  вузол-координатор отримує від підлеглих вузлів вектори показників їх стану  $F_{2i}$  у момент часу  $t$ , допустимі з точки зору їх локальних обмежень (4). Вектори  $F_{2i}$  використовуються базою знань вузла-координатора для корегування системної цільової функції (7), а їх структура залежить від поточної системної ЦФ, стану вузлів і зв'язків між ними.

Після корегування системної цільової функції  $C_{11}^*$  вузол-координатор приймає рішення щодо

вибору критеріїв функціонування вузлів нижнього рівня, оптимальних з точки зору всієї МР, і передає його у вигляді координуючого сигналу  $w_{1i}$  підлеглим вузлам. Для прийняття рішення вузлами МР запропоновано використовувати рекурентну процедуру [8], яка відповідає принципу оптимальності Беллмана і дозволяє вирішити внутрішньорівневі та міжрівневі конфлікти у СУ мобільною радіомережею.

Процедура передбачає два послідовні етапи для кожного рівня управління (вузла-координатора та підлеглих йому вузлів):

1. Вирішується оптимізаційна задача на декартовому добутку множин  $w_{21} \times \dots \times w_{2N_2}$  з ЦФ (17) для вузла-координатора, з урахуванням

рівняння (11) і обмежень на ресурс та вимог до якості обслуговування  $\xi$ -го типу трафіка (4). Результатом вирішення даної оптимізаційної задачі є функція належності (16).

2. Знаходиться нечітке рішення вузлом-координатором  $\mu_D(w_1)$  на основі виразів (14) та (15). Для прийняття чіткого рішення вузлом-координатор повинен вибрати таке рішення  $w_1^*$ , для якого ступінь належності до підмножини ефективних та допустимих рішень  $\mu_D(w_1^*)$  є максимальною, тобто

$$\mu_D(w_1^*) = \max_{w_{1i}} [\mu_D(w_1)]. \quad (18)$$

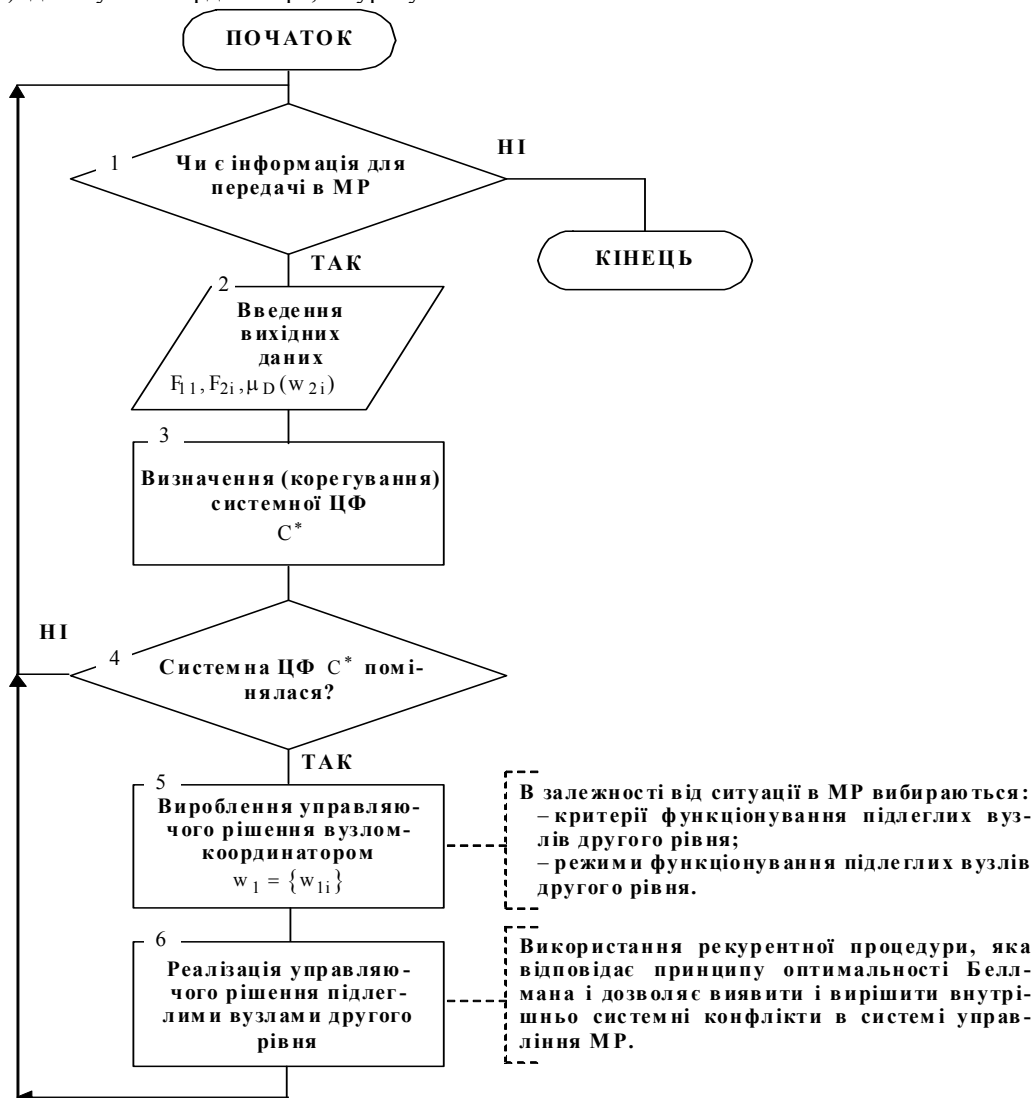


Рис. 3. Схема алгоритму координації у дворівневій ІСУ вузлом МР

Після прийняття чіткого рішення вузлом-координатором на основі вирішення оптимізаційної задачі (17), з урахуванням обмежень (4) та при  $\sum_{i=1}^{N_2} w_{2i} = w_1^*$  знаходяться чіткі

рішення підлеглими вузлами другого рівня  $w_{21}^*, \dots, w_{2N_2}^*$ .

Як зазначалося вище, вузли другого рівня, на відміну від вузла-координатора, не мають координуючих функцій, тобто

$$\mu_K(w_{2i}) = 1, i = \overline{1, N_2}. \quad (19)$$

Їх функціонування полягає у формуванні нечітких рішень пов'язаних з реалізацією управляючих впливів щодо розподілу вузлових та мережевих ресурсів, шляхом вибору необхідних параметрів та режимів функціонування:

$$D(w_{2i}) = C(w_{2i}) \cap \overline{\Omega(w_{2i})}, i = 1, N_2. \quad (20)$$

Взаємозв'язок вузлів другого рівня відбувається шляхом обміну службовими повідомленнями під час пошуку маршрутів передачі та безпосередньо під час обміну інформацією.

ЦФ вузла-координатора враховує ЦФ та можливості підлеглих вузлів другого рівня через координуюче нечітке рішення  $\mu_K(w_1)$  у виразі (8). Ця функція належності гарантує призначення підлеглим вузлам другого рівня таких параметрів функціонування та режимів роботи, які найбільше відповідають ситуації, що склалася в МР, тим самим враховуючи інтереси кожного вузла при прийнятті системного рішення.

### Висновки й перспективи подальших досліджень

Таким чином, на відміну від класичних методів динамічного програмування, які забезпечують узгодження рішень, прийнятих для однієї і тієї ж системи в послідовні моменти часу, запропонований метод координації цільових функцій вузлів МР з використанням нечіткої логіки спрямований на узгодження рішень, що приймаються вузловими ІСУ в дворівневій СУ мобільною радіомережею у процесі оперативного управління.

### Література

1. Fossa C. E. Internetworking tactical MANETs / Fossa C.E., Macdonald T.G. // Military Communications Conference (MILCOM'2010). – San Jose, CA. – Oct. 31.2010 – Nov. 3.2010. – P. 611 – 616. 2. Романюк В. А. Архітектура системи оперативного управління тактичними радіомережами / В. А. Романюк // Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ „КПІ”. – 2009. – № 3. – С. 70 – 76. 3. Романюк В. А. Концепция иерархического построения интеллектуальных систем управления тактическими радиосетями класса MANET: сборник тезисов докладов и выступлений участников XXII Международной Крымской конференции [“СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии”], (КрыМиКо). / В. А. Романюк, О. Я. Сова, П. В. Жук, Романюк А. В. – Севастополь, 2012. – С. 265. 4. Романюк В. А. Цільові функції оперативного управління тактичними радіомережами / В. А. Романюк // Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ „КПІ”. – 2012. – № 1. – С. 109 – 117. 5. Миночкин А. И. Методология оперативного управления мобильными радиосетями /

Новизна методу полягає в тому, що вперше для опису елементів системи управління мобільною радіомережею та зв'язків між ними було застосовано рекурентну процедуру прийняття рішень з управління вузловими та мережевими ресурсами МР, яка ґрунтується на використанні теорії ієрархічних систем та нечіткої логіки.

Суть методу полягає в тому, що у якості характеристики прийнятих рішень з координації ЦФ вузлів МР запропоновано використовувати функції їх належності до підмножини ефективних, допустимих і скоординованих рішень. Це дозволить не тільки встановлювати наявність або відсутність внутрішньосистемних конфліктів і їх природу, але й корегувати параметри вузлів та призначати режими їх роботи відповідно до ситуації, яка склалася в МР.

Застосування методу дозволить відобразити основні властивості системи управління МР і спростити процес її аналізу, провести багатоцільову оцінку кожного управляючого впливу, більш просто і з меншими затратами отримати оптимальне рішення з використанням інтерактивного режиму, скоротити обмін службовою інформацією між рівнями СУ та забезпечити локальну обробку інформації у вузлах.

Напрямок подальших досліджень є розробка методики корегування нечітких рішень, прийнятих ІСУ вузлів МР, з використанням методів теорії нечітких множин.

А. И. Миночкин, В. А. Романюк // Зв'язок. – 2005. – № 2. – С. 53 – 58. 6. Координація взаємодії інтелектуальних систем управління вузлів радіомереж класу MANET: доповіді та тези доповідей виступів учасників VIII міжнародної конференції „Проблеми телекомунікацій” / В. А. Романюк, О. Я. Сова, Я. А. Стемпковська, О. А. Симоненко – К. : ІТС НТУУ „КПІ”, 2014. – С. 151 – 153. 7. Системы: декомпозиция, оптимизация и управление / [Сост. М. Сингх, А. Титли; Сокр. пер. с англ. А.В. Запорожца]. – М. : Машиностроение, 1986. – 496 с. : ил. 8. Алтунин А. Е. Модели и алгоритмы принятия решений в нечетких условиях: Монография / А. Е. Алтунин, М. В. Семухин – Тюмень : Издательство Тюменского государственного университета, 2000. – 352 с. 9. Заде Л. А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Л. А. Заде – М. : Мир, 1976. – 165 с. 10. Месарович М. Общая теория систем / М. Месарович, Я. Такахара – М. : Мир, 1978. – 311 с.

## МЕТОД КООРДИНАЦИИ ЦЕЛЕВЫХ ФУНКЦИЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ УЗЛАМИ ТАКТИЧЕСКИХ МОБИЛЬНЫХ РАДИОСЕТЕЙ

Олег Ярославович Сова (канд. техн. наук, с.н.с., докторант)

Валерий Антонович Романюк (д-р. техн. наук, профессор, заместитель начальника института)

Павел Васильевич Жук (канд. техн. наук, доц., начальник факультета)

Виталий Николаевич Ошурко (адъюнкт)

Военный институт телекоммуникаций и информатизации Государственного университета телекоммуникаций, Киев, Украина



Суть метода заключается в том, что в качестве характеристики принятых решений по координации целевых функций интеллектуальных систем управления узлами мобильных радиосетей предложено использовать функции их принадлежности к подмножеству эффективных, допустимых и скоординированных решений. Это позволит не только устанавливать наличие или отсутствие внутрисистемных конфликтов и их природу, но и корректировать параметры узлов и назначать режимы их работы в соответствии с ситуацией, сложившейся в мобильной радиосети.

**Ключевые слова:** интеллектуальная система управления; целевые функции; мобильные радиосети.

## METHOD OF OBJECTIVE FUNCTIONS COORDINATION OF INTELLECTUAL NODES CONTROL SYSTEMS OF MOBILE RADIO NETWORKS

*Oleh Y. Sova (Candidate of Technical Sciences, Senior Research Fellow, Doctoral Candidate)*

*Valerii A. Romaniuk (Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy Chief of an Institute)*

*Pavlo V. Zhuk (Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Chief of a Faculty)*

*Vitalii M. Oshurko (Post Graduate Military Student)*

*Military Institute of Telecommunications and Informatization of State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine*

Objective functions are optimality criterion for the nodal intellectual control systems decisions. The primary objective functions are: throughput maximization, the messages delivery time minimization, transmission power minimization or radio network lifetime maximization. The special features of these objective functions are the fact that most of them depend on each other, and may deny with each other. In this context, the aim of this paper is to develop a new objective function coordination method.

The proposed method assumes that membership function of decisions belonging to a subset of effective, acceptable and coordinated solutions is used as a coordination decisions characteristic of nodal intellectual control systems objective functions. This will allow not only determining the existence or absence of intrasystem conflicts and their nature, but also adjust the nodes parameters and assign nodes operating modes in accordance to the situation in the MANET.

The novelty of the method lies in the fact that for the first time to describe the elements of the nodal control system and relations between them have been applied recurrent decision-making process, based on using of hierarchical systems theory and fuzzy logic. Application of the method will allow to display the key properties of the nodal control system and simplify the process of its analysis.

**Keywords:** intellectual control system; objective function; mobile radio networks.

### References

1. Fossa C.E. (2010), Internetworking tactical MANETs, Military Communications Conference (MILCOM 2010), San Jose, CA, pp. 611 – 616.
2. Romaniuk V.A. (2009), Tactical radio networks operational control system architecture. [Arkhitektura systemy operativnoho upravlinnia taktychnymy radiomerezhamy], Zbirnyk naukovykh prats VITI NTUU „KPI”, No. 3, pp. 70–76.
3. Romaniuk V.A., Sova O.Y., Zhuk P.V., Romaniuk A.V. (2012), Concept of intellectual control systems hierarchic construction for tactical MANET. [Kontseptsiya ierarhicheskogo postroeniya intelektualnykh sistem upravleniya takticheskimi radiosetnyami klasya MANET], Sbornik tezisov dokladov i vystupleniy uchastnikov XXII Mezhdunarodnoy Krymskoy konferentsii “SVCh-tehnika i telekommunikatsionnye tehnologii”, p. 265.
4. Romaniuk V.A. (2012), Objective function of tactical radio networks operational control. [Tsilovi funktsiyi operativnogo upravlinnia taktychnimi radiomerezhami], Zbirnyk naukovykh prats VITI NTUU „KPI”, No. 1, pp. 109–117.
5. Minochkin A.I., Romaniuk V.A. (2005), The methodology of the mobile radio networks operational control. [Metodologiya operativnogo upravleniya mobilnyimi radiosetnyami], Zviyazok, No. 2, pp. 53 – 58.
6. Romaniuk V.A., Sova O.Y., Stempkovska Y.A., Symonenko O.A. (2014), Nodal intellectual control system interaction coordination in MANET. [Koordynatsiia vziaimodii intelektualnykh system upravlinnia vuzliv radiomerezh klasu MANET], Dopovidi ta tezy dopovidei vystupiv uchasnykiv VIII mizhnarodnoi konferentsii „Problemy telekomunikatsii”, ITS NTUU „KPI”, Kyiv, pp. 151–153.
7. Synhkh M., Tytly A. (1986), Systems: Decomposition, Optimization And Management. [Sistemy: dekompozitsiya, optimizatsiya i upravlenie], Mashinostroenie, Moscow, 496 p.
8. Altunin A.E., Semuhin M.V. (2000), Models and algorithms for decision making in fuzzy environment: Monograph. [Modeli i algoritmy prinyatiya resheniy v nechetkikh usloviyah: Monografiya], Tyumen, Izdatelstvo Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta, 352 p.
9. Zade L.A. (1976), Notion of a linguistic variable and its application to the adoption of approximate solutions. [Ponyatie lingvisticheskoy peremennoy i ego primenenie k prinyatiyu priblizhennykh resheniy], Mir, Moscow, 165 p.
10. Mesarovich M., Takahara Y. (1978), The general systems theory. [Obschaya teoriya sistem], Mir, Moscow, 311 p.

Отримано: 29.09.2014 р.