

**Беляков Р.О.**

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

## МЕТОДИКА СИНТЕЗУ ТОПОЛОГІЇ НАЗЕМНО-ПОВІТРЯНОЇ КОМУНІКАЦІЙНОЇ МЕРЕЖІ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

*Стаття присвячена розробці методики синтезу топології наземно-повітряної комунікаційної мережі спеціального призначення. Управління мережами класу MANET є складним завданням через їх динамічну природу, високу мобільність вузлів, обмежені ресурси: енергію батареї, технічні характеристики комунікаційних засобів, протоколи різних рівнів моделі OSI, та потребу реалізації функцій управління на вузловому і мережевому рівні в умовах зростаючої актуальності вимоги із децентралізації управління. Наукова новизна запропонованого алгоритму методики полягає у впровадженні алгоритмів екстремального машинного навчання типу AOS-ELM для формування субоптимальних та оптимальних управляючих рішень для реалізації вузлових та мережевих цілей на основі прогнозування векторів станів мобільних комунікаційних вузлів на виконання користувальницьких вимог із забезпечення якості інформаційного обміну.*

*Проведено формалізацію процесу формування управляючих рішень в ієрархічній моделі управління наземно-повітряною мережею з акцентом на формування бази знань станів мобільних комунікаційних вузлів та мережі в цілому. Визначено, що параметрами керування в процесі управління наземно-повітряною комунікаційною мережею є складові управляючі структури мережі (ступінь зв'язності, взаємне розташування вузлів, дальності радіодоступу, види модуляції, технології розширення спектру, методи маршрутизації, методи управління діаграмою направленості та ін.). Зроблено висновок, що для реалізації стратегії управління необхідно визначити закономірності станів мобільних вузлів з урахуванням динаміки (фізичної – швидкість, прискорення, зони функціонування, та комунікаційної – навантаження, пропускна спроможність та ін.) їх взаємодії та визначення типу управляючого впливу, що доцільно дослідити експериментальним шляхом і визначено напрямком подальших досліджень.*

*Використання такого підходу може забезпечити ефективне управління мережею, адаптуючись до змін у середовищі та враховуючи цільові функції вузлового та мережевого рівня в режимі часу близького до реального.*

**Ключові слова:** комунікаційна мережа, MANET, FANET, система інтелектуального управління, нейромережі, екстремальне машинне навчання, прогнозування, оцінка параметрів, вагові коефіцієнти.

**Постановка проблеми.** Управління сучасними комунікаційними мережами класу MANET є складним завданням через їхню динамічну природу, високу мобільність вузлів, обмежені ресурси, та проблеми інтеграції повітряних комунікаційних мереж [1], що є часто є єдино-можливим рішенням для влаштування інтервалів ретрансляції радіосигналів, особливо в умовах ведення бойових дій, або влаштування пошуково-рятувальних операцій.

Крім того, однією із вимог щодо забезпечення інформаційного обміну є зменшення рівня централізованого контролю, що ускладнює процес влаштування кібератак [2] і вимагає розробки моделей, методів, методик, алгоритмів для підвищення ефективності мобільних комунікаційних мереж спеціального призначення.

Для побудови систем управління мереж такого класу необхідно забезпечити комплексне представлення математичної моделі процесу

формування управлінських рішень, що з максимальним охопленням описує процес інформаційного обміну мобільних комунікаційних вузлів як наземної так і повітряної мережі, і описуватиме умови та середовище функціонування. Проте, результат аналізу публікацій в даній предметній області показав, що на сьогоднішній день залишається актуальним завдання розробки нового або удосконалення існуючого науково-методичного апарату для інтелектуалізації процесу управління наземно-повітряними комунікаційними мережами, які активно використовуються, однак математично не описані, або описані фрагментарно.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Моделювання децентралізованих комунікаційних мереж є предметом досліджень низки науковців, зокрема авторів наукових праць [1-10]. В статті [1] обговорюється проблема інтеграції повітряних комунікаційних мереж класу FANET для її

застосування у якості повітряної підмережі на комунікаційних аероплатформах з метою ретрансляції радіосигналів та забезпечення інформаційного обміну із заданим рівнем. В [2] зосереджена увага на аспекти кібербезпеки сучасного інфопростору, та визначено, що децентралізація мереж є одним із шляхів боротьби із кібератаками. В науковій праці [3] описано процес управління топологією за синтезованими правилами, отриманими експериментальним шляхом та описано процес прийняття рішення із ітеративного пошуку оптимальної топології мобільної радіомережі. В [4] показано модель прийняття рішень по управлінню повітряною мережею, а в [5] розкрито цільові функції цього процесу. В статті [6] показано модель мобільності наземної комунікаційної мережі, для формування статистичної вибірки метрик переміщення мобільних комунікаційних вузлів на етапі планування. В науковій праці [7] розкрито методику управління позиціонуванням повітряною комунікаційною мережею в умовах впливу навмисних завад. В статті [8, 9] показано ієрархічний принцип побудови мобільних радіомереж наземної компоненти. В статті [9] розкрито процес інтелектуального управління вузловими ресурсами наземної комунікаційної мережі, а в [10] – повітряної.

Таким чином, оптимізація процесів інформаційного обміну в мобільних наземно-повітряних комунікаційних мережах є логічним продовженням вирішення наукової проблеми розробки нового науково-методичного апарату управління наземно-повітряними мережами для забезпечення заданої якості інформаційного обміну з урахуванням наявних вузлових та мережевих ресурсів і є перспективним напрямком наукових досліджень.

**Постановка завдання.** Метою роботи є розробка методики синтезу топології наземно-повітряної комунікаційної мережі спеціального призначення.

Наукова новизна запропонованого алгоритму методики полягає у впровадженні алгоритмів екстремального машинного навчання типу AOS-ELM для формування субоптимальних та оптимальних управляючих рішень для реалізації вузлових та мережевих цілей на основі прогнозування векторів станів мобільних комунікаційних вузлів на виконання користувальницьких вимог із забезпечення якості інформаційного обміну.

Проведено формалізацію процесу формування управляючих рішень в ієрархічній моделі управління наземно-повітряною мережею з акцентом

на формування бази знань станів мобільних комунікаційних вузлів та мережі в цілому.

**Виклад основного матеріалу. Вихідні умови функціонування мережі.** Перспективна наземно-повітряна комунікаційна мобільна мережа (НПМ) спеціального призначення розмірністю до сотні наземних мобільних комунікаційних вузлів – наземна комунікаційна мережа (НКМ), та до десяти комунікаційних аероплатформ (КА) об'єднаних у повітряну комунікаційну мережу (ПКМ), зони та граничні значення фізичних характеристик функціонування мобільних користувачів (МК) попередньо відомі, та опрацьовані на етапі планування [3]. Наземні комунікаційні вузли можуть бути виконані на засобах рухомості або у вигляді переносних SDR радіостанцій. У складі НКМ функціонують мобільні базові станції (МБС), що виконують завдання центру управління НКМ (ЦУМ), та управління ПКМ.

Наземна комунікаційна мережа не має прив'язки до будь-якої телекомунікаційної інфраструктури загального користування. Кожен мобільний комунікаційний вузол (МКВ) оснащений системою позиціонування, комунікаційним обладнанням, антенними пристроями, системою живлення та відповідною системою управління.

**Параметри комунікаційної мережі:** мережа представляється направленим графом  $G^\psi = (V^\psi, E^\psi)$ , із множиною вершин  $V^\psi = \{\mathcal{G}_i\}$  і множиною ребер  $E^\psi = \{(i, j) | d_{ij} \leq r_i \wedge d_{ij} \leq r_j\}$ ,  $i, j = \overline{1, N_\psi}$ ,  $i \neq j$ ,  $\psi = \overline{1, 3}$  (1- НКМ, 2 – мережа МБС, 3 – ПКМ).  $N_\psi$  – загальна кількість комунікаційних вузлів  $\psi$ -го рівня,  $d_{ij}$  – відстань між вузлами,  $r_i(p_i^\psi)$  – радіус (потужність) передачі  $i, j = \overline{1, N_\psi}$ ,  $i \neq j$ ,  $\psi = \overline{1, 3}$ . У якості системи управління НПМ прийнято складну ієрархічну інтелектуальну систему управління, що умовно розподілена на три основні рівні управління: виконавчий, вузловий та мережевий, та складається із  $q$ -ої кількості підсистем (підсистема управління маршрутизацією, топологією, навантаженням, безпекою, QoS, польотом (переміщенням МБС), радіоресурсом, витратами енергоресурсом).

**Параметри вузла:** кожен вузол графу  $\mathcal{G}_i^\psi$ , в деякий момент часу  $t$ , описується сукупністю параметрів: координатами розташування  $(x_i, y_i, z_i)$ ; швидкістю переміщення представлена через вектор швидкості в точці  $\vec{v}(t) = (v_x(t), v_y(t), v_z(t))$  у момент часу  $t$ ; вектором прискорення  $\vec{a}(t) = (a_x(t), a_y(t), a_z(t))$ ; напрямком переміщення  $\vec{d}(t) = \frac{\vec{v}(t)}{|\vec{v}(t)|}$ , де  $|\vec{v}(t)| = \sqrt{(v_x(t))^2 + v_y(t)^2 + v_z(t)^2}$ ;

потужністю передавача що може змінюватись адаптивно  $p_i^w(t) \leq p_{max}$ ; ємністю в кожен момент часу  $t$ , що не може бути вищою за деяке максимальне значення  $e_{\sigma_i}(t) \leq e_{\sigma_{imax}}$ ;  $\sim_i$  – шириною діаграми направленості антени  $i$ -го вузла; маршрутною таблицею найкоротших шляхів  $L_i = L_{\eta}(\pi_{ij}^k)$ , де  $\eta = \bar{1}, H$  – метрики маршрутної таблиці (наявність радіозв'язності, пропускна спроможність, затримка передачі, потужність передачі, евклідова відстань та ін.),  $\pi_{ij}^k = \{0, 1\}$  – маршрутна змінна, що визначає наявність маршруту від відправника до адресата через сусідній вузол. Інтенсивність вхідних потоків визначається матрицею

тяжіння  $\Gamma = \gamma_{jk}, \sum_{j=1}^{N_{\psi}} \sum_{k=1}^{N_{\psi}} \gamma_{jk} \leq \gamma_{max}, j \neq k$ ; пропускна

спроможність радіоканалу  $s_{ij} \leq s_{ijmax}, \forall (i, j) \in E^{\psi}$ ;

$\Pi_{\xi_{ij}}$  – пріоритет  $\xi$ -го типу трафіка  $\xi = \bar{1}, 3$ , (1 – відео, 2 – голос, 3 – дані) в каналі  $ij$ ; приймач кожного мобільного вузла характеризується порогом чутливості  $p_{пч}$ , яка визначає мінімальну потужність сигналу  $p_{min}^w(t)$ , який може бути прийнятий вузлом. У складі кожного мобільного вузла функціонує інтелектуальна система управління, основним завданням якої є ініціалізація векторів власного стану  $X_{1qr}(k) = \{x_{1qr}^a(k)\}_{a=1}^{a_{1qr}}$  – для НКВ,  $X_{KAlqr}(k) = \{x_{KAlqr}^a(k)\}_{a=1}^{a_{1qr}}$  – для КА.

**Допущення та обмеження:**  $N_{НПМ} \leq 100$ , місцевість функціонування НПМ –  $MAP_{НПМ}$  визначена завчасно (фізичні перешкоди та рельєф місцевості відомі); вузли НКМ розподілені за рангами  $P_i^{HM}, i = \bar{1}, 7$ , кожен ранг при цьому має свою обмежену ділянку функціонування на початковому етапі, потім розташування вузлів НКМ може змінюватись випадковим чином в межах  $MAP_{НПМ}$ , та займати на деякий час іншу ділянку функціонування, кожен вузол оснащений SDR радіостанціями із технологією MIMO. Безпілотні літальні апарати повинні виконувати польотне завдання за відсутності візуального спостереження власними силами (засобами).

**Необхідно:** розробити методику управління топологією наземно-повітряної комунікаційної мережі спеціального призначення, що з урахуванням ситуації  $X^w(t)$ , що склалася в КМ (чи її зоні  $\psi$  – го рівня), дозволить прийняти такі управлінські рішення  $W^*(t) = \{Y_{2q}\}, q = \bar{1}, Q$  двох основних класів задач реалізації цілей управління  $\Pi^w$  (управління переміщенням та/або польотом –  $U_{nep}(t)$ , та управління комунікаційними параметрами –  $U_{ком}(t)$ ) на фізичному  $W_{физ}(t)$ ,  $W_{кан}(t)$  та мережевому  $W_{мер}(t)$  рівнях моделі OSI, які відповідатимуть системній цільовій функції

$$W^*(t) = \arg \underset{W_{физ}, W_{кан}, W_{мер}(t) \in \mathbb{C}^w}{opt} \Pi^w(X^w(t), W_{физ}, W_{кан}, W_{мер}(t)), \quad (1)$$

$$\text{де } \Pi^w = \{U_{nep}(t); U_{ком}(t)\}, \quad (2)$$

$$X^w(t) = \{\tilde{X}_{1q}, \tilde{X}_{KAlq}, \widehat{X}_{1q}(k+1), \widehat{X}_{KAlq}(k+1), \tilde{X}_2, Z_{1q}(k), Z_{1qKa}(k)\}, \quad (3)$$

і дозволять забезпечити виконання цільової структури управління НПМ (або  $\psi$ -ої підмережі) мобільних комунікаційних вузлів та забезпечити задану якість інформаційного обміну  $\xi$ -го типу трафіка при виконанні обмежень на множині управляючих рішень та ресурси мобільних комунікаційних вузлів:

$$\Omega: \left\{ \begin{array}{l} t_3 \leq t_{здон} (l_{\eta}(\pi_{ij}^k) \leq l_{\etaдон}), \\ g_{ij} \leq s_{ijmax}, \\ r_i \leq r_{imax} (p_i \leq p_{imax}), \\ p_{пч_i} \leq p_{ij}(t), \\ e_{\sigma_i}(t) \leq e_{\sigma_{imax}} \end{array} \right\}, \quad (4)$$

де  $W_{физ}, W_{кан}, W_{мер}(t)$  – множини оптимальних (субоптимальних) управляючих рішень вузлової СУ на фізичному, каналному та мережевому рівні моделі OSI, відповідно, щодо реалізації управління переміщенням та комунікаційною складовою.

**Методологія дослідження.** Цикл управління топологією наземно-повітряної комунікаційної мережі включає наступні етапи [4]:

- збір інформації про стан та параметри функціонування мережі або її зони та розрахунок та оцінка характеристик мережі (зони);
- знаходження нової топології мережі (у випадку відхилення параметрів функціонування від допустимих значень, що реалізує ціль управління вузла і доведення до вузлів прийнятого рішення).

Класифікація стратегій управління вузловими та користувальницькими цільовими функціями показано на рисунку 1. На рисунку здійснено декомпозицію процесу управління, базисним завданням якого є формування управляючого впливу деякого виду, або його їх системної дії. На рисунку 2 введено наступні умовні позначення:

$J_{ij} = 1$  – радіозв'язність між вузлами  $i$  та  $j$  ( $i, j \in N_{\psi}, i \neq j$ );

$\max s(m_{ab})$  – функція максимуму пропускної спроможності маршруту між вузлами  $a$  та  $b$  ( $a, b \in N_{\psi}, a \neq b$ );

$\min t_s(m_{ab})$  – функція мінімуму часу затримки маршруту між вузлами  $a$  та  $b$  ( $a, b \in N_{\psi}, a \neq b$ );

$\min p(m_{ab})$  – функція мінімуму витрат по потужності на маршруті між вузлами  $a$  та  $b$  ( $a, b \in N_{\psi}, a \neq b$ );



Рис. 1. Схема вибору стратегії формування управляючих рішень наземно-повітряної комунікаційної мережі

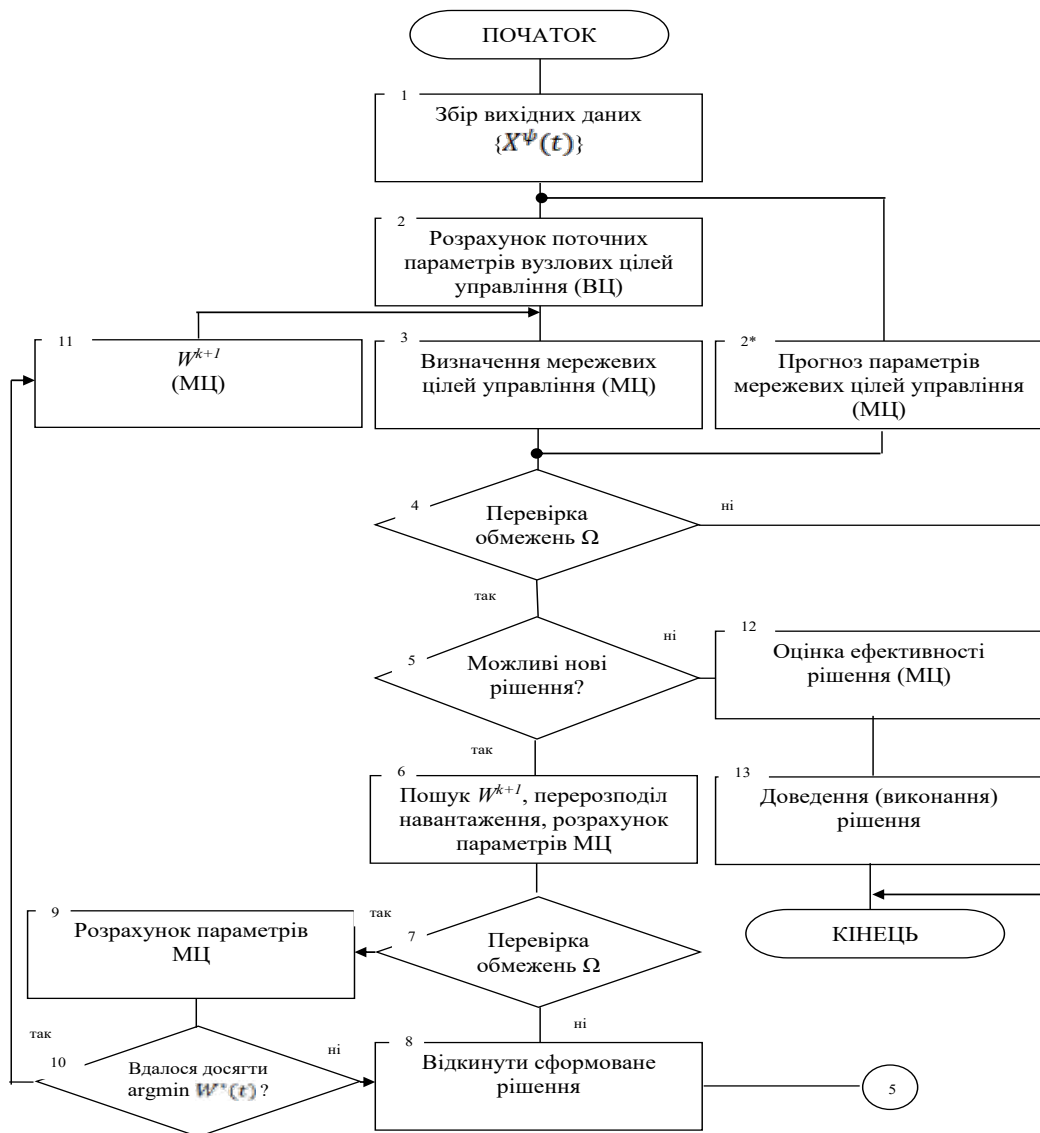


Рис. 2. Алгоритм управління топологією НПМ

$S_{\max} = \max_{s \in S} S(s)$  – функція максимуму пропускної спроможності мережі;

$\bar{t}_{\min} = \left( \frac{1}{|M|} \right) \min_{m_{ab} \in M} \sum t_z(m_{ab})$  – функція мінімуму

середнього часу затримки мережі,  $M$  – множина маршрутів мережі;

$\min_{m \in M} \bar{P}(m_{ab})$  – функція мінімуму середньої витрати по потужності мережі,  $M$  – множина маршрутів мережі;

$\min_{E_i \in E} \bar{E}$  – функція мінімуму середньої витрати енергії  $i$ -ої кількості вузлів мережі.

**Алгоритм управління топологією НІМ** складається із наступних кроків:

**1. Збір інформації про стан мережі та введення початкових (вихідних) даних** (блок 1):

$N_{\psi}$  – загальна кількість комунікаційних вузлів  $\psi$  – го рівня,  $\psi = 1, 3$  (1- НКМ, 2 – мережа МБС, 3 – ПКМ).

координати вузлів в тривимірному просторі, закони зміни їх швидкості від мінімального до максимального, прискорення та напрямку, зони переміщення (згідно рангів) [3, 5, 6];

діапазон зміни радіусу радіодоступності (в залежності від потужності обладнання, режимів роботи, виду модуляції);

коефіцієнт направленості антени;  
енергія батарей, початкової маршрутно-таблиці найкоротших шляхів, отриманої зі статистичної вибірки на етапі планування [3];

інтенсивність потоків пакетів;  
протоколу доступу до каналу;  
визначених мобільним користувачем допустимих (мінімально необхідних) значень параметрів  $\Omega$  (вузлові цілі – блок 2).

**2. Визначення (розрахунок) відповідності параметрів мережевих цілей** управління, тобто розрахунок вихідної топології (блок 3) та перевірка відповідності обмеженням (блок 4), що здійснюється швидше за рахунок паралельного процесу прогнозування МЦ (блок 2\*). При виконанні всіх вимог – закінчити алгоритм (блок 12, 13) – перебудова топології не потрібна.

**3. Аналіз можливості отримання нової топології** (блок 5). Якщо рішення існує, перейти до кроку 4, інакше – оцінити ефективність отриманого рішення, довести його до вузлів та закінчити алгоритм (блок 12, 13).

**4. Пошук «допустимої» топології** (блок 6–11). Пошук нового рішення  $W^{k+1}$ ; побудова маршрутних таблиць, що визначається матрицею навантаження та прийнятим протоколом маршрути-

зації; перерозподіл потоків згідно маршрутних таблиць; розрахунок МЦ для утворених маршрутів мережі; перевірка виконання обмежень МЦ для оновленої топології; якщо  $W^{k+1} \leq \operatorname{argmin} W^*(t)$  (субоптимальна умова), то відкинути рішення, інакше – прийняти рішення  $W^{k+1}$  та перейти до кроку 3 (блок 5).

В статті [4, 7] в контексті визначених управлінських вузлових параметрів розглядається потужність передачі та/або направленість антени. Крім того, з позиції управління топологією задача пошуку матриці зв'язності  $W^*(t)$  відноситься до класу NP-повних.

У контексті управління топологією мережі, задача пошуку оптимальної матриці зв'язності  $W^*(t)$  (1) може включати в себе визначення таких параметрів, як мінімальна вартість зв'язку між вузлами, максимальна пропускна спроможність, мінімізація затримок, забезпечення надійності зв'язку та інші. Це може включати рішення оптимізаційних задач, які можуть бути NP-складними через велику кількість можливих конфігурацій та необхідність врахування багатьох обмежень.

Однак, варто зазначити, що конкретна складність задачі залежить від її точної формулювання та обмежень, які на неї накладаються. У деяких випадках, застосування евристичних алгоритмів або алгоритмів наближеного рішення, машинного навчання може дозволити ефективно знаходити прийнятні рішення для задач управління топологією, навіть якщо вони теоретично відносяться до класу NP-повних.

Тому, для скорочення перебору можливих топологій, в статті [3] пропонується використовувати множину правил, об'єднаних в базу знань, що змінюють зв'язність мережі для покращення її параметрів, при чому критерієм визначення моменту перебудови топології мережі є невиконання однієї з умов обмежень (4).

В контексті отримання рішення системою управління із використанням алгоритмів машинного навчання [11] використання бази знань пропонується здійснювати за загальною схемою, що показана на рисунку 2.

Схема (рис. 2) представляє структуру взаємодії між різними компонентами ієрархічної моделі управління наземно-повітряною комунікаційною мережею, що включає процеси:

– аналіз стану мережі – збір та аналіз даних про поточний стан мережі відбувається як для наземних комунікаційних вузлів (НКВ), так і для повітряних комунікаційних аероплатформ (КА);

– прогноз стану вузлів та мережі – на основі отриманої та обробленої інформації форму-

ється прогноз майбутнього стану НКВ, КА та мережі;

- формування рішень – на основі прогнозованого стану мережі формуються управлінські рішення, що спрямовані на оптимізацію роботи мережі та покращення комунікації;

- поповнення бази знань – для систем управління кожного НКВ та КА існують бази знань, які містять статистичні дані та використовуються для аналізу стану мережі та прогнозування станів (реалізації вузлових та мережевих цілей).

Бази знань містять актуальну інформацію, яка використовується для виявлення тенденцій та закономірностей у поведінці вузлів (реакції на управляючі впливи в умовах середовища). Аналіз стану мережі із має на меті зібрати докладну інформацію про поточний стан мережі, в тому числі про її топологію, наявність та стан маршрутів, рівень сигналу, перешкоди тощо. Прогнозування стану мережі необхідне для передбачення змін у мережі та планування відповідних дій для підтримки ефективної роботи мережі, та зменшення часу формування управляючих рішень – оптимальної стратегії управління для оптимізації вузлового та мереже-

вого ресурсу та покращення якості інформаційного обміну. В контексті управління – мобільна базова станція виконує задачі центру управління мережею, та формує управляючі впливи  $\{Y_{2q}\}, q = \overline{1, Q}$  – множина векторів управління мережею. На рисунку 3 використано наступні умовні позначення:

$X_{1qr}(k)$  – множина векторів стану  $q$ -го інтелектуального агента НКВ, де  $X_{1qr}(k) = \{x_{1qr}^a(k)\}, a = 1, 2, \dots, a_{1qr}$ ;

$\tilde{X}_{1q}(k)$  – множина узагальнених векторів оцінок стану  $q$ -ї підсистеми першого рівня, де  $\tilde{X}_{1q}(k) = \{\tilde{x}_{1q}^a(k)\}, a = 1, 2, \dots, a_{1q}$ ;

$U_{1qr}(k)$  – множина векторів управління  $q$ -ї підсистеми першого рівня, які спрямовані  $r$ -му ІА нульового рівня, де  $U_{1qr}(k) = \{u_{1qr}^b(k)\}, b = 1, 2, \dots, b_{1qr}$ ;

$Y_{1q}(k)$  – множина векторів управління  $q$ -ї підсистеми першого рівня, які надсилаються підсистемі управління верхнього рівня (вузлу-координатору), де  $Y_{1q}(k) = \{y_{1q}^d(k)\}, d = 1, 2, \dots, d_{1q}$ ;

$Z_{1q}(k)$  – множина векторів оцінок стану  $q$ -ї підсистеми першого рівня, які надсилаються підсистемі управління верхнього рівня (вузлу-координатору), де  $Z_{1q}(k) = \{z_{1q}^d(k)\}, d = 1, 2, \dots, d_{1q}$ .

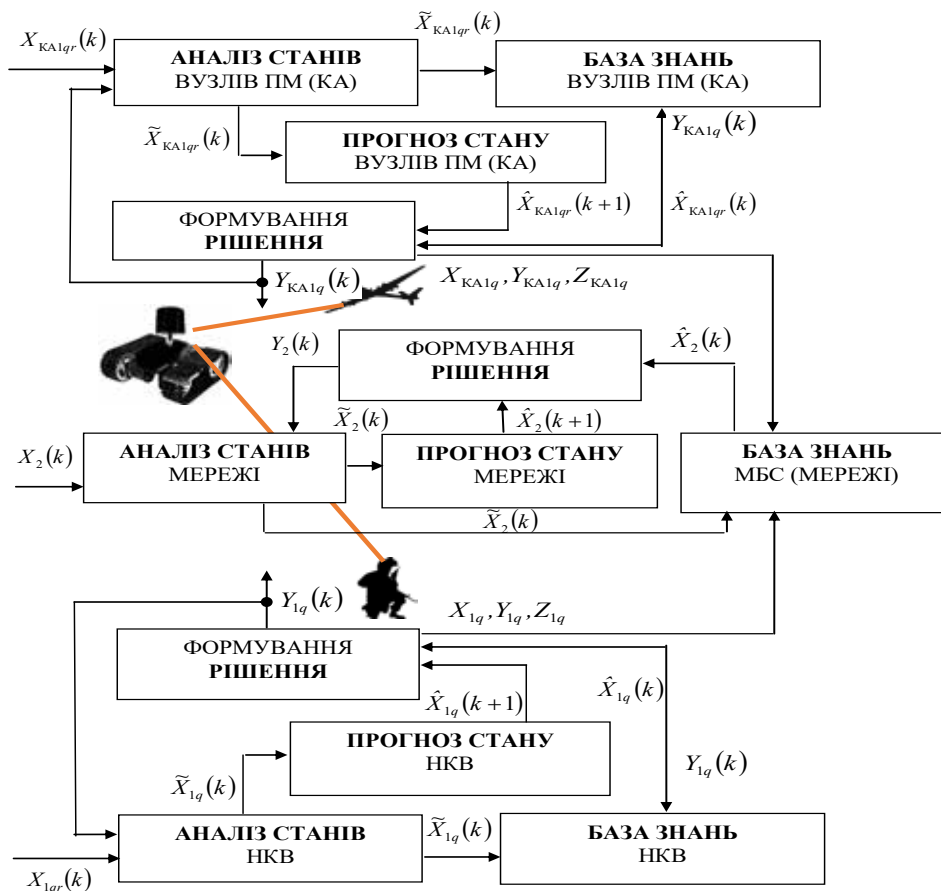


Рис. 3. Схема процесу формування управляючих рішень наземно-повітряної комунікаційної мережі

Для  $q$ -ї підсистеми управління КА на першому рівні:

$X_{KA1qr}(k)$  – множина векторів стану  $q$ -го інтелектуального агента КА, де  $X_{KA1qr}(k) = \{x_{KA1qr}^a(k)\}, a = 1, 2, \dots, a_{1qr};$

$\widetilde{X}_{KA1q}(k)$  – множина узагальнених векторів оцінок стану  $q$ -ї підсистеми КА першого рівня, де

$\widetilde{X}_{KA1q}(k) = \{\widetilde{x}_{KA1q}^a(k)\}, a = 1, 2, \dots, a_{1q};$

$U_{KA1qr}(k)$  – множина векторів управління  $q$ -ї підсистеми КА першого рівня, які спрямовані  $r$ -му ІА КА нульового рівня, де  $U_{KA1qr}(k) = \{u_{KA1qr}^b(k)\}, b = 1, 2, \dots, b_{1qr};$

$Y_{KA1q}(k)$  – множина векторів управління  $q$ -ї підсистеми КА першого рівня, які надсилаються підсистемі управління верхнього рівня (вузлу-координатору КА), де  $Y_{KA1q}(k) = \{y_{KA1q}^d(k)\}, d = 1, 2, \dots, d_{1q};$

$Z_{KA1q}(k)$  – множина векторів оцінок стану  $q$ -ї підсистеми КА першого рівня, які надсилаються підсистемі управління верхнього рівня (вузлу-координатору КА), де  $Z_{KA1q}(k) = \{z_{KA1q}^d(k)\}, d = 1, 2, \dots, d_{1q}.$

У статті [11] було показано порівняння нейромережевого алгоритму AOS-ELM (від англ. Adaptive Online Sequential Extreme Learning Machine), та нейронечіткого алгоритму. Визначено, що алгоритм AOS-ELM на відміну від нейронечіткого алгоритму показує кращі адаптивні властивості в задачах прогнозування станів

комунікаційних вузлів в нестационарних динамічних умовах, та зменшує вплив архаїчних і надмірних даних в процесі навчання в реальному часі за рахунок механізмів забування та фільтрації [11].

Тому, прийнято рішення, для реалізації процесу формування управляючих рішень вузлового рівня застосувати нейромережевий алгоритм AOS-ELM.

**Висновки.** У статті представлено методику синтезу топології наземно-повітряної комунікаційної мережі спеціального призначення, здійснено формалізований опис алгоритму формування управляючих рішень починаючи від субоптимального.

Визначальною особливістю застосування запропонованої методики є процес формування стратегії управління, що визначає структуру вузлових та мережевих цілей, визначає управляючий параметр та уточнює параметри керування.

Встановлено, що представлення системи управління наземно-повітряної комунікаційної мережі у вигляді ієрархічної моделі дозволяє здійснити декомпозицію задач управління вузловими та мережевими ресурсами в складних динамічних умовах.

Напрямок подальших досліджень є оцінка ефективності запропонованої методики, та визначення класу нейромережевих алгоритмів для його застосування в процесі управління мережевим ресурсом.

#### Список літератури:

1. Беляков Р. Проблема інтеграції повітряної мережі класу FANET в мобільну комунікаційну мережу спеціального призначення. *Computer-integrated technologies: education, science, production*. 2023. № 53. С. 263–276. URL: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-53-40> (дата звернення: 26.03.2024).
2. Roy Y., Mazur N., Riabchun O. Strategy of determination of the hypothetic direction of increasing the risk of inflammation of the infrastructure safety. *Cybersecurity: education, science, technique*. 2019. No. 3. P. 97–103. URL: <https://doi.org/10.28925/10.28925/2663-4023.2019.3.97103> (date of access: 26.03.2024).
3. Міночкін А. І., Романюк В. А. Управління топологією мобільної радіомережі. *Зв'язок*. 2003. № 2. С. 28–33.
4. Романюк В. А., Степаненко Є. О. Модель прийняття рішень по управлінню повітряною мережею. *Збірник наукових праць ВІПІ*. 2019. № 3. С. 84–95.
5. Romaniuk V. A., Bieliakov R. O. Objective control functions of FANET communication nodes of land-air network. *Computer-integrated technologies: education, science, production*. 2023. No. 50. P. 125–130. URL: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-50-19> (date of access: 26.03.2024).
6. Беляков Р., Фесенко О. Модель мобільності наземної комунікаційної мережі спеціального призначення. *Computer-integrated technologies: education, science, production*. 2023. № 51. С. 130–138. URL: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-51-17> (дата звернення: 26.03.2024).
7. Methodology positional controlling of communications aerial platform in FANET in the minds of infiltration of radio electronic countermeasures / R. Bieliakov et al. *Communication, informatization and cybersecurity systems and technologies*. 2023. No. 4. P. 5–15. URL: <https://doi.org/10.58254/viti.4.2023.01.05> (date of access: 26.03.2024).
8. Сова О. Я., Міночкін Д. А., Ошурко В. М. Ієрархічна модель взаємодії інтелектуальних агентів у системах управління мобільними радіомережами класу MANET. *Збірник матеріалів Міжнародної науково-технічної конференції «ПЕРСПЕКТИВИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ»*. 2015. С. 15–17.

9. Координація цільових функцій інтелектуальних систем управління тактичними радіомережами класу MANET / О. Я. Сова та ін. *Збірник наукових праць ВІТІ ДУТ*. 2014. № 4. С. 31–40.

10. Беляков Р., Фесенко О. Модель інтелектуального управління ресурсами наземної комунікаційної мережі класу MANET. *INFORMATION TECHNOLOGY AND SOCIETY*. 2023. № 3 (9). С. 6–14. URL: <https://doi.org/10.32689/maup.it.2023.3.1> (дата звернення: 20.03.2024).

11. Bieliakov R. O., Fesenko O. D. Improved model of intelligent management of node resources of the terrestrial communication network of the MANET class. *Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*. 2023. No. 5. P. 93–98. URL: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.5/16> (date of access: 25.03.2024).

#### **Bieliakov R.O. METHODOLOGY FOR SYNTHESIZING THE TOPOLOGY OF A SPECIAL-PURPOSE GROUND-AIR COMMUNICATION NETWORK**

*The article focuses on developing a methodology for synthesizing the topology of a specialized ground-air communication network. Managing MANET class networks presents a complex challenge due to their dynamic nature, high mobility of nodes, and limited resources including battery power and the technical specifications of communication devices. Additionally, it encompasses managing protocols across different OSI model layers and the necessity for implementing control functions at both node and network levels amid increasing demands for decentralized management. The scientific novelty of the proposed method algorithm lies in employing extreme learning machine algorithms of the AOS-ELM type for generating suboptimal and optimal control decisions to achieve node and network objectives based on predicting the state vectors of mobile communication nodes, thus meeting user requirements for quality of information exchange.*

*The process of making control decisions in the hierarchical model of ground-air network management was formalized with a focus on creating a knowledge base of the states of mobile communication nodes and the network as a whole. It was determined that the control parameters in managing the ground-air communication network include the components of the network's control structure (connectivity degree, mutual node positioning, radio access ranges, modulation types, spectrum spreading technologies, routing methods, and directional control techniques, etc.). It was concluded that implementing the management strategy necessitates identifying the regularities in the states of mobile nodes, considering the dynamics (physical – speed, acceleration, functioning zones; and communication – load, throughput, etc.) of their interaction and determining the type of control influence, which is expedient to investigate experimentally and will guide further research direction.*

*Such an approach could provide effective network management by adapting to environmental changes and considering the objective functions at the node and network levels in near-real time.*

**Key words:** communication network, MANET, FANET, intelligent control system, neural networks, extreme machine learning, forecasting, parameter estimation, weight coefficients.