

## МЕТОД ПІДТРИМАННЯ ДІЮЧИХ МАРШРУТІВ НА ОСНОВІ ПРОГНОЗОВАНОГО ЧАСУ ЇХ ІСНУВАННЯ В РАДІОМЕРЕЖАХ ТИПУ MANET

У статті запропоновано метод підтримання діючих маршрутів у радіомережах типу MANET, суть якого полягає у прийнятті рішення щодо пошуку нових маршрутів на основі прогнозованого часу існування діючих маршрутів, який обчислюється за параметром залишкової ємності вузлових батарей. Застосування даного методу дозволяє скоротити об'єми службового трафіка та збільшити пропускну спроможність радіомережі типу MANET.

*Жук П.В., Сова О.Я., Міночкін А.І., Романюк В.А. Метод поддержания действующих маршрутов на основе прогнозированного времени их существования в радиосетях типа MANET. В статье предложен метод поддержания маршрутов в радиосетях типа MANET, заключающийся в принятии решения по поиску новых маршрутов на основе прогнозируемого времени существования действующих маршрутов, которое вычисляется по параметру остаточной емкости узловых батарей. Применение данного метода позволяет сократить объемы служебного трафика и увеличить пропускную способность радиосети типа MANET.*

*P. Zhuk, O. Sova, A. Minochkin, V. Romanuk. The active routes maintaining method for MANET based on the predicted time of the routes existence. The routes maintaining method in mobile radio networks with dynamic topology is offered in the article. Method consists in decision-making to seek new routes based on route lifetime prediction, which is calculated by the residual capacity of host cells. Application of this method will allow reducing the service traffic volume and increasing MANET throughput.*

**Ключові слова:** мобільна радіомережа, динамічна топологія, маршрутизація потоків даних.

**Актуальність досліджень.** На сьогоднішній день постійна зміна форм та способів ведення бойових дій вимагає удосконалення систем зв'язку, засобами яких забезпечується передача команд бойового управління та зв'язок взаємодії між підрозділами під час виконання поставлених завдань. Враховуючи високу маневреність сучасних бойових дій, особливо в тактичній ланці управління, провідними у військовому відношенні країнами світу приймаються на озброєння системи безпроводового зв'язку, які працюють за принципом Ad-Нос. Зазначений принцип передбачає здатність елементів до самоорганізації в радіомережу без завчасного розгортання та планування, а мережі, які його використовують поділяються на стаціонарні (Ad-Нос Networks) та мобільні радіомережі (Mobile Ad-Нос Networks, MANET) [1].

На відміну від мереж Ad-Нос, у яких передбачається наявність стаціонарних вузлів, у MANET всі елементи мережі мобільні. Основними особливостями мереж класу MANET є: динамічна топологія, спричинена мобільністю всіх вузлів та обмеженою дальністю й пропускнуною спроможністю каналів радіозв'язку; неоднорідність вузлів за потужністю, мобільністю, ємністю батарей та ін.; здатність до самоорганізації. З урахуванням зазначених особливостей, в [2] запропоновано використання мереж MANET при побудові перспективної мобільної компоненти (МК) мереж зв'язку ЗС України, до складу якої входитимуть мобільні радіомережі (МР) 4-х рівнів: 0-й – сенсорні мережі; 1-й – мобільні радіомережі низової ланки управління; 2-й – мережі мобільних базових станцій, що утворюють опорну мережу; 3-й – повітряна мережа, яка може бути реалізована на безпілотних літальних апаратах.

Кожен вузол МР виконуватиме функції як кінцевого терміналу, так і маршрутизатора. У випадку, коли вузол-відправник  $a$  не „бачить” у зоні своєї радіовидимості вузол-адресат  $b$  – повідомлення будуть надіслані шляхом ретрансляції через проміжні вузли. При цьому передача може здійснюватися одним або множиною маршрутів. Тобто, однією з найактуальніших проблем, які необхідно вирішити при проектуванні перспективних МР військового призначення є проблема маршрутизації потоків даних.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Сьогодні існує велика кількість досліджень, пов'язаних з вивченням процесів маршрутизації потоків даних як в стаціонарних мережах,

так і мережах класу MANET. Детальна класифікація методів маршрутизації (ММ), а також функції, які виконують ММ у стаціонарних мережах та мережах класу MANET наведені в [3].



Рис. 1. Класифікація методів маршрутизації

Так, в стаціонарних мережах зв'язку використовуються, в основному, табличні ММ, функціонування яких передбачає дві основні фази: *фаза „навчання”* маршрутам, в ході якої заповнюються маршрутні таблиці вузлів та *фаза пошуку нового маршруту серед наявних в маршрутній таблиці* вузла-відправника або суміжних вузлів. При цьому вибір оптимального маршруту здійснюється за критерієм мінімальної кількості переприємів чи мінімального часу затримки передачі. Так як топологічні зміни в стаціонарних мережах відбуваються відносно рідко, то табличні ММ забезпечують високу пропускну спроможність стаціонарних мереж.

Однак, враховуючи динамічну топологію МР, маршрутизація в мережах класу MANET вимагає наявності додаткових методів для підтримання маршруту в активному стані безпосередньо під час сеансу передачі даних. Як показав аналіз існуючих ММ табличні методи втрачають свою ефективність під час застосування в МР через необхідність розсилання значних об'ємів службової інформації. Найбільш прийнятними для використання в МР, враховуючи їх особливості, є зондові ММ [3 – 5].

Особливістю зондових ММ є те, що, крім кількості переприємів та часу затримки, вони використовують множину різнорідних метрик для пошуку оптимального маршруту (чи маршрутів) передачі: відстань між вузлами, географічні координати вузлів, швидкість та напрямок їх переміщення, ємність батарей тощо. Проте, основна відмінність зондових методів полягає в тому, що вони будують маршрут у разі необхідності, шляхом розсилання службових повідомлень (зондів-запитів), використовуючи різні методи зондування. З одного боку – це дозволяє уникнути значних об'ємів службової інформації в радімережі, однак спричиняє певну затримку передачі інформації, особливо на етапі пошуку нових маршрутів. Тобто, зондові ММ передбачають інші фази функціонування, в порівнянні з табличними ММ: *фаза пошуку маршруту* (зондування) та *фаза підтримання маршруту* в активному стані під час передачі.

У фазі підтримання маршруту більшість протоколів маршрутизації, які запропоновані на сьогоднішній день для використання в МР (DSR, DSDV, TORA та ін.) [6], передбачають, що вузол *a* використовує поточний маршрут передачі до того часу, поки не буде втрачено зв'язок з вузлом *b* і вже після цього розпочинає пошук нового маршруту. За такої ситуації відбувається втрата значної кількості пакетів, що, в результаті, приводить до зменшення пропускну спроможності МР, затримок передачі даних та значних витрат мережевих ресурсів, спрямованих на відновлення сеансу передачі.

Враховуючи, що всі вузли МР мобільні, а також живляться, в основному, від батарей – для усунення зазначеного недоліку запропоновано низку методів, які намагаються „передбачити” момент розриву каналу зв'язку і, завдяки цьому, розпочати пошук нових маршрутів ще до втрати зв'язку між відправником та адресатом [6 – 8]. Деякі з цих методів використовують GPS-інформацію про місце розташування вузлів. Однак, GPS-приймач значно ускладнює структуру мобільного пристрою і, крім того, GPS-сигнал надто слабкий,

щоб приймати його всередині приміщень, або в щільно забудованих населених пунктах. Інші методи використовують імовірнісні моделі, які обчислюють відповідність стану каналу зв'язку вимогам до передачі за параметром, у якості якого використовується потужність сигналу на прийомі, або співвідношення сигнал/шум. Однак, у випадку тимчасового зменшення потужності сигналу, яке не призвело б до розриву радіоканалу, ці методи можуть прийняти хибне рішення про необхідність зміни маршруту передачі. Деякі з методів приймають рішення про необхідність перебудови поточного маршруту на основі інформації про залишкову ємність батарей вузлів, з яких формується маршрут передачі. Проте, в залежності від інтенсивності використання ємності батарей, ці рішення можуть бути прийняті із запізненням.

До окремої групи доцільно віднести методи, які використовують різні технології обробки знань для прийняття рішення з управління ресурсами радіомереж (потокими даних, маршрутизацією тощо) [9, 10]. Наприклад, застосування систем нейро-нечіткого виводу, які об'єднують в собі переваги нейронних мереж та систем нечіткого виводу, забезпечить здатність МР до самоорганізації, а також адаптації її елементів до умов функціонування, які характеризуються невизначеністю.

Таким чином, можна зробити висновок, що наукова задача, пов'язана з удосконаленням існуючих та розробкою нових методів зондової маршрутизації для використання в МР, які відносяться до мереж класу MANET, є актуальною на сьогоднішньому етапі розвитку безпроводових технологій. **Метою** даної статті, є підвищення ефективності функціонування мобільних радіомереж шляхом удосконалення методів підтримання маршрутів передачі в активному стані при зондовій маршрутизації. **Об'єктом** досліджень є процеси маршрутизації потоків даних в МР, **предметом** дослідження – зондові методи маршрутизації в МР з динамічною топологією.

**Постановка задачі наукового дослідження.** У зв'язку з неможливістю збору в реальному режимі часу інформації про стан всієї МР будемо розглядати процес маршрутизації потоків даних на інформаційному напрямку  $a - b$ , який складається з кінцевих вузлів  $a$  та  $b$  (відповідно відправник та адресат), а також множини вузлів, які формують канали передачі між  $a$  та  $b$ .

**Задані параметри МР:** нехай між вузлами  $a$  та  $b$  існує маршрут  $m$  (побудований за деяким протоколом маршрутизації, наприклад DSR), у якому загальна кількість вузлів рівна  $k$ . Кожен  $i$ -й вузол на маршруті живиться від акумуляторної батареї, яка характеризується деякою залишковою ємністю батареї  $E_{z_i}(t)$  і визначає час „життя”  $i$ -го вузла  $T_i(t)$  – тобто час, протягом якого цей вузол зможе передавати інформацію або приймати участь у її ретрансляції на маршруті  $m$ . Тип інформації –  $\xi = 1-3$  (мова, відео, передача даних); кількість адресатів при кожній сесії  $|b| = 1$  (однокористувальницька передача); вхідне навантаження  $\Gamma_{\xi}^{a-b}(t) = \|g_{\xi}^{a-b}(t)\|$ ,  $g_{\xi}^{a-b}(t) \leq g_{\max}^{a-b}$  для  $a \neq b$ ;  $\omega^{a-b}(t) \leq \omega_{\max}^{a-b}$  – інтенсивність зміни топології; пропускна спроможність напрямку  $s^{a-b} \leq s_{\max}^{a-b}$ .

**Допущення:** радіозв'язність між вузлами мережі підтримується одним з протоколів каналного рівня; потужність сигналу на прийомі та співвідношення сигнал/шум будемо вважати незмінними.

Час існування діючого маршруту  $T_m(t)$  буде визначатися мінімальним часом „життя”  $i$ -го вузла  $T_i(t)$  на маршруті  $m$

$$T_m(t) = \min(T_1(t), T_2(t), \dots, T_i(t)), i = \overline{1, k}. \quad (1)$$

Час „життя”  $i$ -го вузла  $T_i(t)$  визначається виразом [12]

$$T_i(t) = \frac{E_{z_i}(t)}{\sum_{j=1}^J R_j(t)}, j = \overline{1, J}, \quad (2)$$

де  $E_{3_i}(t)$  – залишкова ємність батареї  $i$ -го вузла після відправки або ретрансляції деякого  $j$ -го пакету;  $R_j(t)$  – коефіцієнт витрати енергії  $i$ -им вузлом при передачі  $j$ -го пакету, який обчислюється з виразу [12]

$$R_j(t) = \frac{E_{3_{j-1}}(t) - E_{3_j}(t)}{t_j - t_{j-1}},$$

де  $E_{3_{j-1}}(t)$  та  $E_{3_j}(t)$  – залишкові ємності батареї  $i$ -го вузла перед відправкою відповідно  $j-1$  та  $j$ -го пакетів;  $t_{j-1}$  та  $t_j$  – відповідно часи прибуття  $j-1$  та  $j$ -го пакетів на  $i$ -й вузол.

**Множина вимог до методу маршрутизації**  $\{B_q\} = \{B_1, B_2, B_3\}$ : робота в умовах децентралізованого управління; мінімальна завантаженість мережі службовою інформацією; можливість взаємодії з різними рівнями моделі OSI.

**Необхідно:** здійснити синтез методу підтримання маршрутів в МР з динамічною топологією, який забезпечить мінімізацію службового трафіка на інформаційному напрямку ( $V_{ст}^{a-b}$ ) шляхом завчасного виявлення моменту розриву маршрутів передачі. Управляючий вплив розробленого методу  $U_M^{a-b}(t)$  повинен відповідати вимогам користувальницької (вузлової) оптимізації (3) [13]:

$$U^*(t) = \arg \min_{U_M^{a-b}(t) \in \Omega} V_{ст}^{a-b}(X^{a-b}, U_M^{a-b}(t)), \quad (3)$$

$$X(t) = \{\xi^{a-b}(t), E_{3_i}(t), \Gamma_{\xi}^{a-b}(t), \omega^{a-b}(t), T_m(t), t_3^{\xi}, S^{a-b}(t)\}; \quad (4)$$

при виконанні обмежень на ресурс та вимог до якості обслуговування  $\xi$ -го типу трафіка

$$\Omega = \{s_{ij} \leq s_{ij_{max}}, t_3^{\xi} \leq t_{3_{max}}^{\xi}, \omega^{a-b} \leq \omega_{max}^{a-b}, E_{3_i} \geq E_{3_{min}}\},$$

де  $X^{a-b} = \{x_i(t)\}$ ,  $i = \overline{1, I}$  – параметри стану маршруту, та вузлів:  $S^{a-b}$  – пропускна спроможність інформаційного напрямку;  $t_3^{\xi}$  – середній час затримки передачі пакетів  $\xi$ -типу;  $\omega^{a-b}(t)$  – інтенсивність зміни топології на напрямку  $a-b$ ;  $\Gamma_{\xi}^{a-b}(t)$  – вхідне навантаження на напрямку  $a-b$ ;  $E_{3_i}(t)$  – залишкова ємність батареї  $i$ -го вузла;  $T_m(t)$  – час існування діючого маршруту;  $T_i(t)$  – час „життя”  $i$ -го вузла. Зазначені параметри можуть бути отримані шляхом взаємодії різних рівнів моделі OSI (наприклад, прикладного, транспортного, мережевого, фізичного) [14].

**Новий метод підтримання маршрутів в МР.** Враховуючи наведений вище аналіз можливих шляхів підвищення ефективності ММ в МР з динамічною топологією, пропонується новий метод підтримання маршруту передачі даних в МР, **суть якого** полягає у прийнятті рішення щодо пошуку нових маршрутів на основі прогнозованого часу існування діючого маршруту, який обчислюється за параметром залишкової ємності вузлових батарей.

Вибір зазначеного параметру в якості критерію оцінки стану маршруту обумовлений тим, що кожен вузол МР живиться від батареї, тому її ємність визначає „час життя” вузла на напрямку передачі. Крім того, оцінка витрат ємності вузлової батареї дозволить врахувати енергетичні потреби вузла, пов’язані з прийомом і передачею даних та обробкою службової інформації вузловим процесором, а також спрогнозувати „час життя” вузла на напрямку передачі, що дозволить завчасно побудувати нові маршрути, виключивши з них ті вузли, які володіють низькою залишковою ємністю батарей.

Запропонований метод підтримання маршруту передачі передбачає чотири основні етапи функціонування (рис. 2). На **першому етапі** відбувається збір інформації про час існування діючого маршруту  $T_m(t)$ . Для цього всіма вузлами (крім адресата  $b$ ) здійснюється обчислення їх часу „життя” за виразом (2). Інформацію про  $T_i(t)$  кожен  $i$ -й вузол записує у заголовок інформаційного пакету. У випадку, якщо в  $i$ -му вузлі час „життя” виявиться меншим за час, який записаний у заголовку – вузол міняє існуюче значення часу „життя” на

те, яке було обчислене ним. На прийомі вузол-адресат підсумовує інформацію про  $T_i(t)$ , обчислюючи час існування всього маршруту відповідно до виразу (1), і записує значення  $T_m(t)$  в пам'ять. При цьому, перше, після побудови нового маршруту, обчислене вузлом-адресатом значення  $T_m(t)$  позначається як  $T_m(0)$  і надалі використовуватиметься для визначення параметру  $\delta$ , який показує на скільки скорочується час життя діючого маршруту після прийому наступного повідомлення.

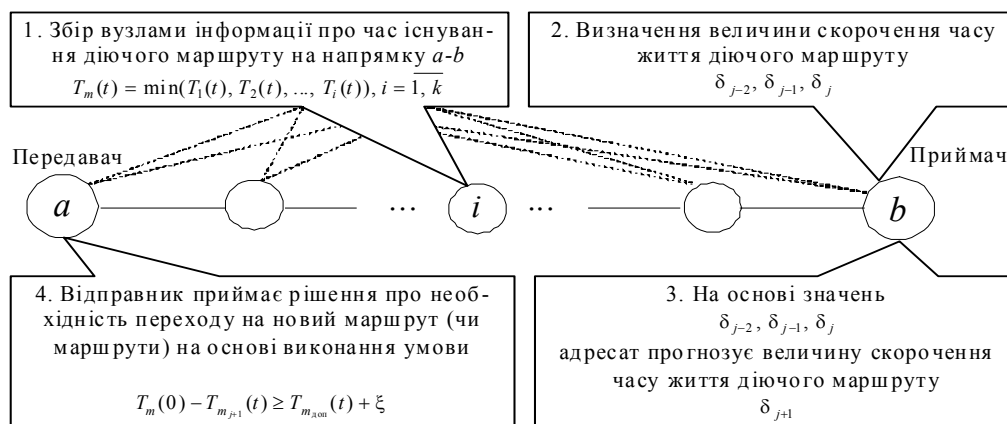


Рис. 2. Етапи функціонування запропонованого методу

На **другому етапі** адресатом визначається величина скорочення часу життя діючого маршруту  $\delta$  як різниця початкового  $T_m(0)$  та поточного  $T_{m_j}(t)$  значень часу життя маршруту  $m$ . При цьому, в пам'яті вузла-адресата записується послідовність трьох останніх значень  $\delta$ , які обчислюються з виразів:

$$\begin{aligned} \delta_{j-2} &= T_m(0) - T_{m_{j-2}}(t); \\ \delta_{j-1} &= T_m(0) - T_{m_{j-1}}(t); \\ \delta_j &= T_m(0) - T_{m_j}(t), \end{aligned}$$

де  $T_m(0)$  – час існування маршруту на початку його виявлення; послідовність часів існування маршруту  $T_{m_{j-2}}(t)$ ,  $T_{m_{j-1}}(t)$ ,  $T_{m_j}(t)$  отриманих з  $j-2, j-1$  та  $j$  повідомлень.

На **третьому етапі** на основі значень  $\delta_{j-2}, \delta_{j-1}, \delta_j$  вузол  $b$  прогнозує величину скорочення часу життя діючого маршруту  $\delta_{j+1}$  і обчислює прогнозоване значення часу існування діючого маршруту  $T_{m_{j+1}}(t)$ :

$$T_{m_{j+1}}(t) = T_m(0) - \delta_{j+1}. \quad (5)$$

З урахуванням апріорної невизначеності обстановки та умов функціонування МР, для визначення  $\delta_{j+1}$  в методі запропоновано використовувати систему нейро-нечіткого виводу. Суттєвою перевагою подібних нейро-нечітких систем в порівнянні з класичними системами нечіткого виводу є те, що набір нечітких правил та параметри функцій приналежності не задаються людиною-експертом, а знаходяться за допомогою спеціальних процедур навчання нейронних мереж [15].

Моделювання процесу прогнозування величини скорочення часу життя діючого маршруту  $\delta_{j+1}$  з використанням системи нейро-нечіткого виводу можливо здійснити за допомогою системи комп'ютерної математики MATLAB + Simulink, яка надає засоби для побудови нечіткої нейронної мережі типу ANFIS (Adaptive Network-based Fuzzy Inference System). В даному випадку для моделювання була вибрана нечітка продукційна ANFIS-мережа, яка реалізує алгоритм нечіткого виводу Цукамото [15, 16].

Як зазначалося вище, вхідними змінними для моделювання є значення  $\delta_{j-2}$ ,  $\delta_{j-1}$ ,  $\delta_j$ , вихідною змінною є прогнозована величина скорочення часу життя діючого маршруту  $\delta_{j+1}$ . З метою спрощення позначень пропонується вхідні та вихідну змінну позначити відповідно  $x_1, x_2, x_3$  та  $y$ .

Задамо області зміни вихідної та вхідних змінних, відповідно  $Y$  та  $X$ .

$$X = [x_i, \bar{x}_i], \quad i=\overline{1,3} \quad (6)$$

$$Y = [y, \bar{y}], \quad (7)$$

де  $\underline{x}_i(\bar{x}_i)$  – нижнє (верхнє) значення вхідних змінних  $x_i$ ,  $i=\overline{1,3}$ ;  $\underline{y}(\bar{y})$  – нижнє (верхнє) значення вихідної змінної  $y$ .

Нехай  $X^* = \langle x_1^*, x_2^*, x_3^* \rangle$  – вектор фіксованих значень вхідних змінних, що поступають на вхід вузлової системи управління. Тоді, задача прийняття рішення з прогнозування величини скорочення часу життя діючого маршруту полягає в тому, щоб на основі інформації про вектор входів  $X^*$  визначити вихід  $y^* \in Y$ . Для цього нейро-нечітка система навчається відтворювати залежність  $y^* = f_y(x_1^*, x_2^*, x_3^*)$  на основі наявної інформації про значення параметрів  $x_1^*$ ,  $x_2^*$  та  $x_3^*$ , тобто даних для навчання, одержаних в минулому.

Для встановлення зазначеної вище залежності будемо розглядати чіткі значення вхідних змінних  $x_i^*$ ,  $i=\overline{1,3}$  і вихідної змінної  $y^*$  як лінгвістичні змінні, задані на універсальних множинах (6) і (7). Для оцінки зазначених лінгвістичних змінних  $x_i^*$  та  $y^*$  будемо використовувати кількісні терми (нечіткі множини) з наступних терм-множин:

$$A_1 = \{a_1^1, a_1^2\} \text{ – терм-множина вхідної змінної } x_1;$$

$$A_2 = \{a_2^1, a_2^2\} \text{ – терм-множина вхідної змінної } x_2;$$

$$A_3 = \{a_3^1, a_3^2\} \text{ – терм-множина вхідної змінної } x_3;$$

$$G = \{g^1, g^2, \dots, g^k\} \text{ – терм-множина вихідної змінної } y,$$

де  $a_i^p$ ,  $i=\overline{1,3}$ ;  $p=\overline{1,2}$  –  $p$ -й лінгвістичний терм змінної  $x_i$ ;  $g^k$  –  $k$ -й лінгвістичний терм змінної  $y$ ,  $k=\overline{1, K}$ .

В таблиці 1 наведені базові значення нечітких термів зазначених вище терм-множин вхідних та вихідної лінгвістичних змінних.

Таблиця 1

Параметри бази знань нейрон-нечіткої системи

Назва лінгвістичної змінної	Синтаксичний опис змістових значень змінної
$x_1^*$ – чітке значення змінної $\delta_{j-2}$	$\{a_1^1 = \text{„мале”}, a_1^2 = \text{„велике”}\}$
$x_2^*$ – чітке значення змінної $\delta_{j-1}$	$\{a_2^1 = \text{„мале”}, a_2^2 = \text{„велике”}\}$
$x_3^*$ – чітке значення змінної $\delta_j$	$\{a_3^1 = \text{„мале”}, a_3^2 = \text{„велике”}\}$
$y^*$ – прогнозоване чітке значення змінної $\delta_{j+1}$	$\{g^1 - g^K \text{ – чіткі значення індивідуальних висновків правил}\}$

Запропонована нейро-нечітка система, навчається згідно методу зворотного поширення помилки для реалізації нечітких моделей [15]. В результаті її навчання сформовано базу правил системи нечіткого виводу наступного типу

П: Якщо  $(x_1 = a_1^p)$  і  $(x_2 = a_2^p)$ , то  $y = g^j$ .

Нижче наводиться наближена база правил, які отримуються під час навчання нейро-нечіткої системи для відтворення залежності  $y^* = f_y(x_1^*, x_2^*, x_3^*)$ :

Якщо  $(x_1^* = a_1^1)$  і  $(x_2^* = a_2^1)$  і  $(x_3^* = a_3^1)$ , то  $y^* = g^1$ ;

Якщо  $(x_1^* = a_1^1)$  і  $(x_2^* = a_2^1)$  і  $(x_3^* = a_3^2)$ , то  $y^* = g^2$ ;

Якщо  $(x_1^* = a_1^1)$  і  $(x_2^* = a_2^2)$  і  $(x_3^* = a_3^1)$ , то  $y^* = g^3$ ;

Якщо  $(x_1^* = a_1^2)$  і  $(x_2^* = a_2^1)$  і  $(x_3^* = a_3^1)$ , то  $y^* = g^4$ ;

Якщо  $(x_1^* = a_1^2)$  і  $(x_2^* = a_2^2)$  і  $(x_3^* = a_3^1)$ , то  $y^* = g^5$ ;

Якщо  $(x_1^* = a_1^2)$  і  $(x_2^* = a_2^2)$  і  $(x_3^* = a_3^2)$ , то  $y^* = g^6$ ;

Якщо  $(x_1^* = a_1^2)$  і  $(x_2^* = a_2^1)$  і  $(x_3^* = a_3^2)$ , то  $y^* = g^7$ ;

Якщо  $(x_1^* = a_1^1)$  і  $(x_2^* = a_2^2)$  і  $(x_3^* = a_3^2)$ , то  $y^* = g^8$ ,

де  $x_1^* - x_3^*$  – чіткі значення вхідних змінних;  $y^*$  – чітке значення вихідної змінної.

Нейро-нечітка система виводу, застосування якої пропонується для прогнозування величини скорочення часу життя діючого маршруту, структурно є нейронною мережею, що складається з п'яти шарів (рис. 3). Кожен шар виконує певні функції елементів системи нечіткого виводу.

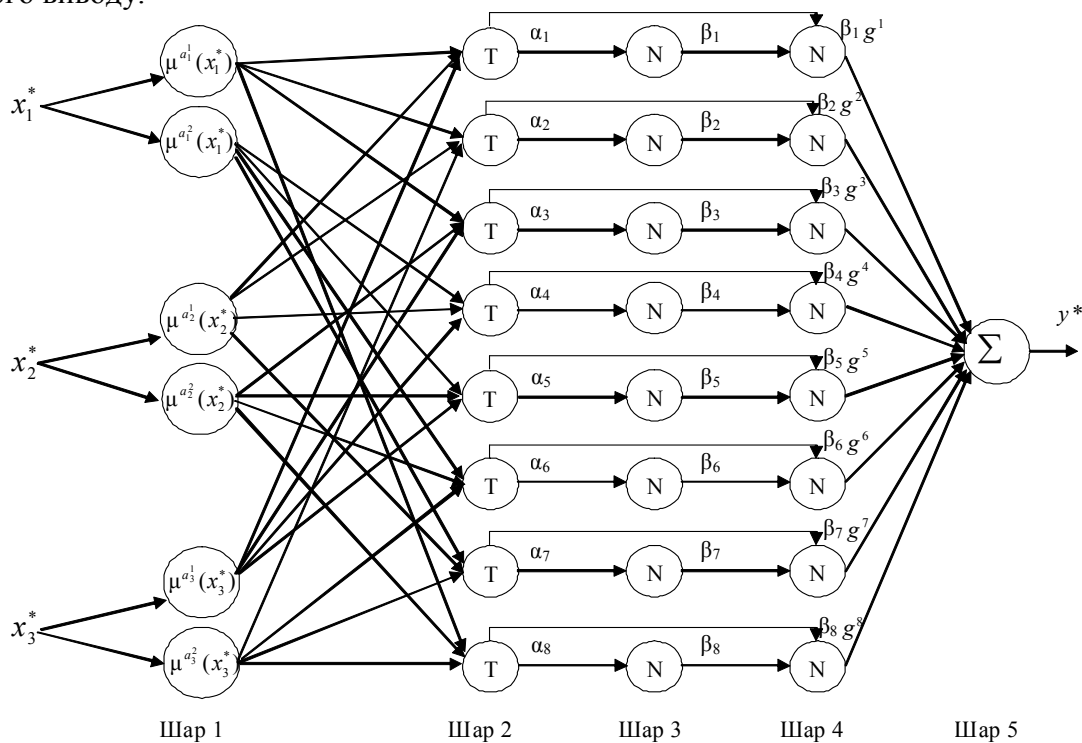


Рис. 3. Структура нечіткої нейронної мережі для прогнозування розміру скорочення часу життя діючого маршруту

Перший шар нейронів виконує процедуру фазифікації, тобто приведення до нечіткості [15, 16]. В результаті виконання цієї процедури обчислюються значення функцій

приналежності для вхідних змінних. Результати цих обчислень можна одержати шляхом підстановки конкретних значень  $x_i^*$ ,  $i = \overline{1, 4}$  вхідних змінних у вираз (7)

$$\mu^{a_i^p}(x_i^*) = \begin{cases} 0, & x_i^* \leq a, \\ \frac{x_i^* - a}{b - a}, & a \leq x_i^* \leq b, \\ \frac{c - x_i^*}{c - b}, & b \leq x_i^* \leq c, \\ 0, & c \leq x_i^*. \end{cases} \quad (8)$$

де  $\mu^{a_i^p}(x_i^*)$  – функція приналежності вхідної змінної  $x_i^*$  нечіткому терму  $a_i^p$ ,  $p = \overline{1, 2}$ ,  $i = \overline{1, 3}$ ;  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – нелінійні параметри функцій приналежності.

З метою забезпечення максимальної швидкодії нейро-нечіткої системи управління потоками даних, пропонується використовувати параметричні, нормальні, унімодальні, трикутні функції приналежності (рис. 5).

Елементи *другого шару* виконують функцію агрегування ступенів істинності умов за кожним правилом системи нечіткого виводу у відповідності до операції Т-норми, в якості якої в даному випадку використовується операція міні-кон'юнкції [15 – 17]. В результаті виконання цієї процедури визначаються рівні „відсікання” для умов кожного з правил. Ті правила, степені істинності яких відрізняються від нуля, вважаються активними і використовуються для подальших розрахунків:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \mu^{a_1^1}(x_1) \wedge \mu^{a_2^1}(x_2) \wedge \mu^{a_3^1}(x_3), \\ \alpha_2 &= \mu^{a_1^1}(x_1) \wedge \mu^{a_2^2}(x_2) \wedge \mu^{a_3^2}(x_3), \\ \alpha_3 &= \mu^{a_1^2}(x_1) \wedge \mu^{a_2^2}(x_2) \wedge \mu^{a_3^1}(x_3), \\ \alpha_4 &= \mu^{a_1^2}(x_1) \wedge \mu^{a_2^1}(x_2) \wedge \mu^{a_3^1}(x_3), \\ \alpha_5 &= \mu^{a_1^2}(x_1) \wedge \mu^{a_2^2}(x_2) \wedge \mu^{a_3^2}(x_3), \\ \alpha_6 &= \mu^{a_1^1}(x_1) \wedge \mu^{a_2^2}(x_2) \wedge \mu^{a_3^2}(x_3), \\ \alpha_7 &= \mu^{a_1^1}(x_1) \wedge \mu^{a_2^1}(x_2) \wedge \mu^{a_3^2}(x_3), \\ \alpha_8 &= \mu^{a_1^1}(x_1) \wedge \mu^{a_2^2}(x_2) \wedge \mu^{a_3^2}(x_3), \end{aligned}$$

де  $\wedge$  – позначення операції логічного мінімуму.

*Третій шар* виконує нормалізацію і обчислює  $\beta_i$  – нормалізовані значення  $\alpha_i$ :

$$\beta_1 = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 + \alpha_5 + \alpha_6 + \alpha_7 + \alpha_8}, \dots, \beta_8 = \frac{\alpha_8}{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 + \alpha_5 + \alpha_6 + \alpha_7 + \alpha_8}.$$

*Четвертий шар* нейронів, після знаходження всіх значень ступенів істинності  $\alpha_n$  і проведення нормалізації виконує функцію активізації нечітких правил продукцій, використовуючи вираз (9)

$$\mu_j^g(y) = \min\{\alpha_n, \mu^{g_j}(y)\}, \quad (9)$$

де  $\mu^{g_j}(y)$  – функція приналежності терму  $g_j$ , який є значенням вихідної змінної  $y$ ;  $\mu_j^g(y)$  – функція приналежності кожного висновку для вихідних лінгвістичних змінних, які розглядаються.



П'ятий шар нейронів формує на виході мережі дефазифіковане значення вихідної величини  $y^*$ , яка відповідає прогнозованому значенню величини скорочення часу життя діючого маршруту (10). В якості методу дефазифікації в алгоритмі Цукамото використовується різновид методу центру тяжіння для одноточкових множин, який дозволяє здійснити перехід до чітких значень вихідної змінної без попереднього акумулювання активізованих висновків окремих правил.

$$y^* = \frac{\alpha_1 g_1 + \alpha_2 g_2 + \alpha_3 g_3 + \alpha_4 g_4 + \alpha_5 g_5 + \alpha_6 g_6 + \alpha_7 g_7 + \alpha_8 g_8}{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 + \alpha_5 + \alpha_6 + \alpha_7 + \alpha_8} = \beta_1 g_1 + \beta_2 g_2 + \beta_3 g_3 + \beta_4 g_4 + \beta_5 g_5 + \beta_6 g_6 + \beta_7 g_7 + \beta_8 g_8, \quad (10)$$

де  $\beta_1 - \beta_8$  – нормалізовані значення  $\alpha_1 - \alpha_8$ ;  $g_1 - g_8$  – нечіткі терми вихідної змінної  $y$ .

В даному випадку параметричними шарами нечіткої нейронної мережі є перший і четвертий шари, а параметрами, які будуть налаштовуватися в процесі навчання є:

- в першому шарі – нелінійні параметри  $a, b, c$  функцій приналежності  $\mu^{a_i^p}(x_i^*)$ ;
- в четвертому шарі – нелінійні параметри  $\alpha_n$  функцій приналежності  $\mu^{g_j}(y)$ .

На **четвертому етапі** вузлом-відправником приймається рішення щодо можливості використання існуючого маршруту або необхідності пошуку нових маршрутів передачі. Рішення про необхідність переходу на новий маршрут (чи маршрути) приймається відправником, якщо виконується наступна умова

$$T_m(0) - T_{m_{j+1}}(t) \geq T_{m_{дон}}(t) + \xi$$

де  $T_m(0)$  – час існування маршруту на початку його виявлення;  $T_{m_{j+1}}(t)$  – прогнозований час існування маршруту;  $T_{m_{дон}}(t)$  – мінімально допустимий поріг скорочення часу існування маршруту в межах поточного сеансу передачі;  $\xi$  – коефіцієнт, який визначається терміновістю інформації, що передається, динамікою зміни топології мережі (інформаційного напрямку), навантаженням на вузлах, та ін.

**Висновки.** Таким чином, аналіз існуючих ММ показав, що на відміну від ММ, які розроблені для стаціонарних мереж, ММ для МР потребують фази підтримання маршруту в активному стані під час передачі. Методи маршрутизації, запропоновані на сьогоднішній день для використання в МР, передбачають використання поточного маршруту передачі до того часу, поки не буде втрачено зв'язок між відправником та адресатом і вже після цього розпочинають пошук нового маршруту. Це приводить до зменшення пропускної спроможності МР, затримок передачі даних та значних витрат мережевих ресурсів, спрямованих на відновлення сеансу передачі.

З метою усунення зазначеного недоліку в статті запропоновано новий метод підтримання маршрутів в активному стані в мобільних радіомережах з динамічною топологією. *Новизна* методу полягає у застосуванні системи нейро-нечіткого виводу для прогнозування часу існування маршруту. *Суть* методу полягає у прийнятті рішення щодо пошуку нових маршрутів на основі прогнозованого часу існування діючого маршруту, який обчислюється за параметром залишкової ємності вузлових батарей. Застосування методу *дозволяє* скоротити об'єми службового трафіка та збільшити пропускну спроможність МР завдяки завчасному врахуванню топологічних змін у мережі, спричинених виходом з процесу передачі вузлів з низькою залишковою ємністю батарей.

В ході подальших досліджень буде розроблена методика оцінки ефективності запропонованого методу підтримання маршрутів в активному стані.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Романюк В.А. Еволюція тактичних радіомереж: збірник матеріалів VI Науково-практичного семінару ВІТІ „Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення” / – К.: ВІТІ НТУУ „КПІ”. – 2011. – С. 45 – 52.
2. Міночкін А.І. Архітектура перспективної мобільної компоненти тактичних мереж зв'язку збройних сил України / Міночкін А.І., Романюк В.А. // Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ „КПІ”. – 2004. – № 5. – С. 107 – 115.
3. Миночкин А.И. Маршрутизация в мобильных радиосетях – проблема и пути решения / Миночкин А.И., Романюк В.А. // Зв'язок. – 2006. – № 7. – С. 49 – 55.
4. Миночкин А.И. Способы повышения эффективности функционирования зондовой маршрутизации в мобильных радиосетях / Миночкин А.И., Романюк В.А., Скрыпник Л.В. // Зв'язок. – 2003. – № 6. – С. 46 – 49.
5. Сова О.Я. Багатошляхова зондова маршрутизація в мережах MANET із динамічним формуванням метрик вибору маршруту / Сова О.Я., Міночкін А.І., Романюк В.А. // Зв'язок. – 2008. – № 2. – С. 42 – 49.
6. Alsharabi N.A. Applied Packet's Received Time Prediction to Reactive Ad-Hoc Routing Protocol / Alsharabi N.A., Fa L.R., Algamali M.H. // Journal of Applied Sciences. – 2008. – № 8(6). – P. 1035 – 1041.
7. Haas Z.J. Residual Link Lifetime Prediction with Limited Information Input in Mobile Ad Hoc Networks / Haas Z.J., Hua E.Y. // INFOCOM 2008 [The 27th Conference on Computer Communications. IEEE]; (13–18 April 2008, Phoenix, AZ) – 2008. – P. 1867 – 1875.
8. Improving Route Stability in Mobile Ad hoc Networks Based on Link Lifetime / [Wenjing Y., Xinyu Y., Shusen Y., Yage G.] // Journal of communications. – 2011. – Vol. 6, № 3. – P. 205 – 214.
9. Интеллектуальная маршрутизация в мобильных радиосетях (MANET) / [Романюк В.А., Шацило П.В., Сова О.Я. и др.] // Зв'язок. – 2011. – № 2(94). – С. 24 – 31.
10. Романюк В.А. Метод віконного управління потоками даних в мобільних радіомережах військового призначення на основі системи нейро-нечіткого виводу / Жук П.В., Сова О.Я., Жук О.В., Романюк В.А. // Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ „КПІ”. – 2011. – № 2. – С. 36 – 46.
11. Романюк В.А. Концепція ієрархічної побудови інтелектуальних систем управління мобільними радіомережами військового призначення / Сова О.Я., Романюк В.А., Жук П.В. // Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ „КПІ”. – 2010. – № 2. – С. 121 – 130.
12. Maleki M. Lifetime prediction routing in mobile ad hoc networks: [„Wireless Communications and Networking”] (New Orleans, USA, 20–20 March, 2003) / Maleki M., Dantu K., Pedram M. // – LA, USA: WCNC 2003. – vol. 2. – P. 1185 – 1190.
13. Миночкин А.И. Методология оперативного управления мобильными радиосетями / Миночкин А.И., Романюк В.А. // Зв'язок. – 2005. – № 2. – С. 53 – 58.
14. Романюк В.А. Координация и интеллектуализация уровней OSI – новая парадигма управления MANET / Романюк В.А., Миночкин А.И. // 7-международная научно-практическая конференция „Современные информационные и электронные технологии” (Одесса, 23-27 мая 2006г.). – О.: Одесса. – 2006. – С. 346.
15. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / Леоненков А.В. – СПб.: БХВ-Петербург, 2003. – 703 с.
16. Борисов В.В. Нечеткие модели и сети / Борисов В.В., Круглов В.В., Федулов А.С. – М.: Горячая линия–Телеком, 2007. – 284 с.: ил.
17. Польщикова К.О. Метод управління тайм-аутом повторної передачі в телекомунікаційній мережі військового призначення на основі використання системи нейро-нечіткого виводу / Польщикова К.О. // Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ „КПІ”. – 2008. – № 3. – С. 124 – 133.