

МЕТОДИКА ПОБУДОВИ НЕЧІТКИХ БАЗ ЗНАНЬ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ВУЗЛАМИ ТАКТИЧНИХ МОБІЛЬНИХ РАДІОМЕРЕЖ

У статті запропоновано методику побудови нечітких баз знань інтелектуальних систем управління вузлами тактичних мобільних радіомереж, суть якої полягає в обґрунтуванні вибору моделі подання знань та алгоритму нечіткого виводу для ідентифікації стану мобільної радіомережі і прийняття рішень щодо управління радіомережею з урахуванням умов невизначеності.

Романюк В.А., Сова О.Я., Олексенко В.П., Симоненко О.А. Методика построения нечетких баз знаний интеллектуальных систем управления узлами тактических мобильных радиосетей. В статье предложена методика построения нечетких баз знаний интеллектуальных систем управления узлами тактических мобильных радиосетей, суть которой заключается в обосновании выбора модели представления знаний и алгоритма нечеткого вывода для идентификации состояния мобильной радиосети и принятия решений по управлению радиосетью с учетом условий неопределенности.

V. Romaniuk, O. Sova, V. Oleksenko, O. Symonenko Method of fuzzy knowledge bases construction for nodal intelligent control systems in the tactical mobile radio networks. The method of fuzzy knowledge bases construction for nodal intelligent control systems in the tactical mobile radio networks is proposed in the article. The essence of the method consists in the choice substantiation of the knowledge representation model and the fuzzy inference algorithm to identify the state of the mobile radio network and making decisions on the radio network management, taking into account uncertainty environment conditions.

Ключові слова: нечітка база знань, інтелектуальна система управління, мобільна радіомережа.

Актуальність досліджень. У ході попередніх досліджень було показано, що прийняття рішень з управління вузловими та мережевими ресурсами в мобільних радіомережах (МР), що відносяться до класу MANET (Mobile Ad-Hoc Networks), ґрунтується на аналізі та оцінці великої кількості різномірних параметрів функціонування вузлів та МР у цілому [1]. Слід зауважити, що встановити кількісну залежність між окремими з параметрів дуже важко або взагалі неможливо (наприклад, якість обслуговування певного типу трафіка та швидкість чи напрямок переміщення вузлів). Крім того, через часті зміни умов функціонування МР (мобільність вузлів призводить до частих змін мережевої топології) службова інформація про параметри вузлів (радіоканалів) дуже швидко старіє, зазвичай є неточною і недостатньою для побудови чіткої математичної моделі функціонування МР.

Одним із способів забезпечення заданої якості обслуговування трафіка, що передається в МР, є використання інтелектуальної системи управління (СУ) мережею, в основі якої знаходиться система знань про стан об'єктів управління (мобільних вузлів чи МР в цілому) або ситуацію, яка склалася в МР (динаміка зміни топології, залишок вузлових чи мережеских ресурсів, тощо) [2]. При цьому, зважаючи на децентралізований принцип управління, за яким доцільно будувати СУ радіомережею класу MANET [3], зазначені знання повинні акумулюватися у вузлових базах знань, для побудови яких потрібно використовувати такі методи подання знань, які б надавали можливості адекватно відтворювати структуру об'єктів управління і характеризувалися достатньою формальністю та логічністю з метою побудови компактною, строгою та чіткою системи знань.

На сьогодні відомо багато прикладів використання баз знань для побудови інтелектуальних СУ різного роду динамічними системами, починаючи від систем підтримки прийняття рішень при формуванні цінової політики номерного фонду готелю [4] і закінчуючи системами управління перевернутим маятником [5] та прогнозування в електроенергетиці [6]. Зокрема, вирішенню завдання розробки баз знань для систем управління складними динамічними системами присвячені роботи Л. Заде, Е. Мамдані, А.В. Леоненкова, С.Д. Штовби, А.П. Ротштейна, І.О. Тарасової. Однак, частина цих робіт досліджує питання підтримки та прийняття рішень особами в різного роду економічних,

біологічних чи соціальних системах, а інша частина – не враховує особливостей функціонування МР класу MANET.

Стосовно використання БЗ для побудови ІСУ вузлами МР класу MANET, то в роботах [7, 8] здійснено спроби побудови нечітких БЗ підсистеми прийняття рішень про розмір вікна переважання та підсистеми прогнозування величини скорочення часу життя діючого маршруту. Однак, ці спроби носили фрагментарний характер, а відсутність єдиної методології та технології практичного створення баз знань про ситуацію в МР значно сповільнює процес розробки ІСУ вузлами мобільних радіомереж класу MANET.

У зв'язку з цим, мета даного дослідження полягає в розробці методики побудови баз знань інтелектуальних систем управління вузлами тактичних МР класу MANET. Об'єктом дослідження є процеси обробки знань про ситуацію в тактичних МР. Предмет дослідження – моделі подання знань, а також методи та методики побудови баз знань для інтелектуальних СУ (ІСУ).

Аналіз сучасного стану досліджень. Розглядаючи процес збору, обробки та зберігання службової інформації вузловими інтелектуальними СУ варто звернути увагу на низку аспектів, які характеризують функціонування радіомереж класу MANET.

Ресурсний аспект. Управління вузлом МР полягає в прийнятті вузловою ІСУ рішень щодо вибору певних режимів чи параметрів функціонування вузла, які забезпечать виконання цільових функцій (ЦФ) управління з урахуванням наявних вузлових та мережевих ресурсів [1].

Аспект координації та децентралізації управління. Децентралізований принцип управління, який характерний МР, означає, що кожен мобільний вузол наділений правами управляти своїми ресурсами в залежності від ЦФ, значення якої залежить від ситуації в МР та вимог до передачі того чи іншого типу трафіка в конкретний момент часу. Однак, з урахуванням того, що умови функціонування кожного мобільного вузла, так само як і їхні технічні характеристики, відрізнятимуться на кожному етапі функціонування МР, ЦФ вузлів МР також будуть відрізнятися, суперечачи одна-одній. Це означає, що під час проектування вузлових ІСУ потрібно передбачити розробку механізму координації управляючих рішень шляхом обміну службовою інформацією про стан вузлів, які взаємодіють під час передачі інформації та рішення які ними приймаються в той чи інший момент часу.

Часовий аспект. Відповідно до принципу оптимальності управління, під час збору інформації про стан вузлів та МР в цілому необхідно вирішити протиріччя між повнотою службової інформації та своєчасністю вироблення керуючих впливів на її основі [9].

Аспект нечіткості службової інформації. Даний аспект витікає з попередньо наведених аспектів і полягає в тому, що службова інформація, яка використовується вузловою ІСУ для формування системи знань про такі динамічні об'єкти управління як мобільні вузли чи МР в цілому, не може бути повною та абсолютно достовірною. Це пояснюється наступним:

неточність службової інформації – кількісні дані про параметри функціонування мобільних вузлів навіть у результаті достатньо точних вимірювань та експериментів мають статистичні оцінки достовірності та надійності;

ненадійність висновків – неможливість встановлення кількісної залежності між окремими параметрами функціонування мобільних вузлів приводить до необхідності використання якісних показників функціонування вузлових ІСУ чи їх підсистем („високий”, „середній”, „низький”, тощо). Отримання якісних показників ґрунтується на результатах опитування експертів у тій чи іншій області знань, думки яких суб'єктивні та можуть суттєво відрізнятися;

недетермінованість рішень вузловою ІСУ – полягає в тому, що наперед алгоритми (методи) вирішення вузловою ІСУ конкретної задачі визначити неможливо;

неповнота знань – викликана складністю МР як системи та динамічною природою функціонування її елементів, що призводить до швидкого „старіння” отриманих знань про ситуацію в МР. Це потребує від вузлової ІСУ постійного розширення та удосконалення

системи знань (у першу чергу з використанням методів самонавчання на власному досвіді), що дозволить ІСУ більш точно реагувати на всі зміни ситуації в радімережі.

Як наслідок, обробка службової інформації вузловими ІСУ з використанням жорстких методів формальної логіки призводить до появи протиріччя між чіткими методами логічного виводу та нечіткими знаннями про ситуацію в МР, які pojawiaються в результаті. Розв'язання цього протиріччя можливе або шляхом подолання нечіткості знань (якщо це можливо), або шляхом використання спеціальних методів обробки нечітких знань.

У результаті збору та обробки службової інформації вузла ІСУ отримує знання про стан інших вузлів та ситуацію, що склалася в МР в цілому. Ці знання являють собою сукупність відомостей про кожен вузол МР (параметри функціонування вузлів, ресурси якими володіють вузли, закономірності їх поведінки в процесі функціонування МР), а також множину правил використання цієї інформації для прийняття управлінських рішень в МР. На практиці оперування знаннями в будь-якій ІСУ здійснюється базою знань.

База знань вузлової ІСУ – це особливого роду база даних, яка містить структуровану, подану в певній формі інформацію про стан мобільних вузлів та МР, котра використовується функціональними підсистемами вузлової ІСУ для прийняття управлінських рішень на різних рівнях моделі OSI.

Основними особливостями вузлових баз знань (БЗ), які відрізняють їх від баз даних є:

- здатність формування висновків у автоматичному режимі. Тобто, крім фактичної інформації та правил її застосування, БЗ повинна містити спеціальні правила виводів, які дозволять вузловій ІСУ автоматично набувати нові знання на основі отриманих даних із середовища функціонування МР (самонавчання) [10];

- здатність БЗ знаходити протиріччя, які можуть виникнути в ній самій (інтроспекція);

- здатність БЗ адаптуватися до нових умов функціонування мобільного вузла чи МР, що аналогічно здатності людини „отримувати досвід”.

Відповідно до вищевказаного визначення, основну функцію вузлової БЗ щодо обробки знань про ситуацію в МР можна розділити на дві складові: подання знань та отримання знань (навчання) [11, 12]. Перша складова пов'язана з тим, що на відміну від соціальних систем, де знання можуть бути подані у вигляді текстів, формул чи графіків, вузла ІСУ являє собою складну технічну систему, яка потребує апаратної та програмної реалізації своїх інтелектуальних функцій. Друга складова безпосередньо пов'язана з особливостями функціонування МР, які з одного боку вимагають постійного оновлення БЗ та поповнення її новими правилами, а з іншого боку виключають людину з процесу управління вузловими та мережевими ресурсами.

Проведений в ході попередніх досліджень аналіз методів подання та отримання знань, з метою визначення можливості їх застосування при розробці БЗ вузлових ІСУ, показав, що найбільш доцільним і перспективним підходом є комплексне використання апарата нечітких множин та нейронних мереж [11]. Це пояснюється тим, що зазначений математичний апарат дає змогу оперувати з лексичними категоріями оцінок, сприйняття та способів мислення експерта, що особливо важливо на етапі проектування вузлових ІСУ, адже значно полегшить початкове навчання вузлової ІСУ, так як апарат нечіткої логіки, який оперує лінгвістичними змінними, дозволяє найбільш точно реалізувати машинну інтерпретацію знань експертів. Разом з тим, застосування методів нейронних мереж, для побудови правил нечітких продукцій, забезпечить здатність вузлової ІСУ навчатися на власному досвіді.

Методика побудови нечітких баз знань інтелектуальних систем управління вузлами тактичних мобільних радімереж. Як зазначалося вище, системи управління тактичними МР класу MANET відносяться до складних розподілених систем, які характеризуються слабкою формалізацією залежності вхідних та вихідних змінних, через що побудова чіткої математичної моделі таких систем не завжди можлива. Сьогодні одним з найпоширеніших методів моделювання погано формалізованих об'єктів та систем залишається нечітке моделювання [13], яке передбачає опис причинно-наслідкових зв'язків між вхідними та вихідними змінними тієї чи іншої підсистеми вузлової ІСУ за допомогою

нечітких баз знань. Слід зауважити, що нечіткі БЗ реалізують ці зв'язки природною мовою з використанням теорії нечітких множин та лінгвістичних змінних, що дозволяє побудувати залежності між фізично розрізненими вхідними та вихідними величинами під час моделювання вузлової ІСУ.

У зв'язку з цим, запропонована в даній статті методика побудови нечітких БЗ спрямована на спрощення та систематизацію процесу моделювання вузлових ІСУ в тактичних МР. Вихідні дані методики наступні.

Задано множину параметрів оцінки стану МР $X(t) = \{x_k\}$, $k = \overline{1, K}$, обмежень на ресурси та вимоги до якості обслуговування трафіка Ω , цільових функцій C , а також множина моделей подання знань $M = \{m_z\}$, $z = \overline{1, Z}$, структур баз даних $S = \{c_b\}$, $b = \overline{1, B}$ та алгоритмів нечіткого виводу $A = \{a_h\}$, $h = \overline{1, H}$.

Необхідно: визначити послідовність дій для побудови нечітких БЗ вузлових ІСУ, які дозволять відобразити залежність

$$w_{gn} = f_{w_{gn}}(x_1, x_2, \dots, x_k, \dots, x_K),$$

з метою реалізації управляючих впливів вузловими ІСУ на різних рівнях моделі OSI, що відповідатимуть умовам системної оптимізації

$$W^*(t) = \arg \min_{W(t) \in \Omega} V_{\text{ст}}(X(t), W(t)),$$

де $W(t) = \{w_{gn}\}$ – g -й управляючий вплив n -го вузла; x_k – k -й параметр оцінки стану МР; $W^*(t)$ – множина оптимальних управляючих впливів; $V_{\text{ст}}$ – об'єми службового трафіку, що передається в мережі.

Етапи методики. Суть методики полягає в обґрунтуванні вибору моделі подання знань та алгоритму нечіткого виводу для ідентифікації стану МР і прийняття рішень щодо управління МР з урахуванням умов невизначеності. Основні етапи методики побудови нечітких баз знань вузлових ІСУ представлені на рис. 1. Розглянемо їх детальніше.

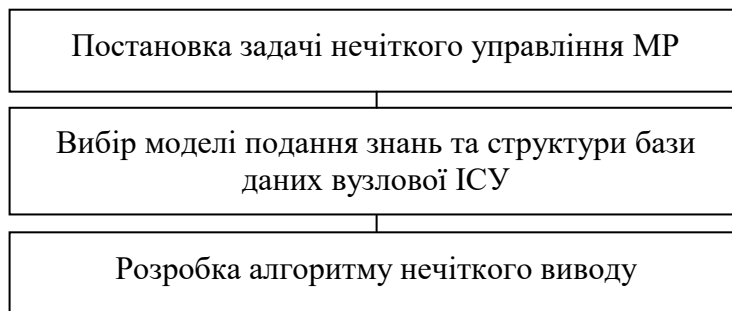


Рис. 1 Основні етапи методики побудови нечітких баз знань вузлових ІСУ

1. Постановка задачі нечіткого управління МР. Даний етап реалізується на стадії проектування (планування) МР та її елементів [14] і передбачає визначення вхідних та вихідних змінних для кожної підсистеми вузлової ІСУ. На даному етапі відбувається ініціалізація моделі МР, яка представляється направленим графом $G = (V, E)$, де $V = \{v_n\}$, $n = \overline{1, N}$ – множина випадково розташованих вузлів та $E = \{e_j\}$, $j = \overline{1, J}$ – множина каналів. Кожен вузол має ідентифікаційний номер, топологія мережі визначена, кількість вузлів $N \leq 100$; радіоканали симетричні і напівдуплексні; тип інформації – $\xi = \overline{1, 3}$, де 1 – відео, 2 – мова, 3 – дані; радіозв'язність між вузлами мережі підтримується одним з протоколів каналного рівня.

Як зазначалося вище, функціонування кожного вузла МР відбувається під управлінням вузлової ІСУ, яка передбачає розподіленість системи управління за функціональними підсистемами управління (маршрутизацією, топологією, потоками даних, безпекою, енергоресурсом, радіоресурсом та якістю передачі), які відповідають рівням моделі OSI [3]. Так як функції кожної підсистеми відрізняються, то і оцінка їх стану, і вироблення управляючих впливів здійснюватиметься за допомогою різних параметрів, вибір яких проводиться на цьому етапі. В табл. 1 наведено взаємозв'язок між параметрами оптимізації та управляючими змінними для об'єктів управління на кожному з OSI-рівнів.

Таблиця 1

Взаємозв'язок між параметрами оптимізації та управляючими змінними

Рівень OSI	Об'єкти управління	Основні параметри оптимізації (X)	Управляючий вплив вузла (W)
Фізичний	Радіоканал в межах радіозв'язності з сусідніми вузлами	Пропускна здатність, час передачі в каналі, витрати енергії батарей, потужність передачі, діаграма спрямованості антен тощо	Потужність (спрямованість) передачі, вид модуляції, тип корегуючого коду, параметри MIMO тощо
Канальний	Радіоканали в межах радіозв'язності з сусідніми вузлами	Пропускна здатність та час передачі в каналі, витрати енергії батарей, обсяг службової інформації тощо	Алгоритми обміну каналного рівня: детерміновані, випадкові, гібридні; розміри пакетів та квитанцій
Мережевий	Один або декілька маршрутів передачі	Обсяг службової інформації, параметри маршруту (час побудови та існування, кількість, пропускна здатність, час доставки, витрати енергії батарей тощо).	Алгоритми обміну мережевого рівня: табличні, зондові, гібридні, хвильові асиметричні, ієрархічні тощо. Алгоритми управління топологією.
Транспортний	Інформаційний напрямок зв'язку	Пропускна здатність, час та варіація його передачі в напрямку	Алгоритми управління чергами. Розмір вікна перевантаження, час тайм-ауту тощо.
Прикладний	Вузол, вузли-сусіди, зона мережі, вся мережа	Пропускна здатність, час та варіація часу передачі, витрати енергії батарей, безпека передачі	Алгоритми (протоколи) інформаційного обміну прикладного рівня, координація та інтелектуалізація за рівнями OSI

Відповідно до наведеного вище принципу лінгвістичності, зображені в таблиці величини представляються у вигляді лінгвістичних змінних, які, в залежності від фізичної природи, можуть бути як чіткими, так і нечіткими [15]:

$$\begin{aligned}
 X &= \{x_1, x_2, \dots, x_k\} - \text{множина вхідних змінних}, \\
 W &= \{w_1, w_2, \dots, w_g\} - \text{множина вихідних змінних}.
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Джерелами знань для цього етапу можуть бути експерти, інженери, технологи, область професійної діяльності яких має справу з експлуатацією різного роду телекомунікаційних систем, а також розробкою методів та протоколів передачі інформації в телекомунікаційних системах на різних рівнях моделі OSI. Експерименти, що формують терм-множини, як правило, описуються експертами шляхом виставлення оцінок за критеріями, які можуть мати різний характер. Тому для вирішення цієї задачі, що є завданням кластеризації,

запропоновано використовувати методологію вербального аналізу рішень [16], згідно з якою експерт визначає перелік критеріїв, за якими слід оцінювати експеримент і набір термінів, упорядкованих за його вимогами, використовуючи мову вербальних оцінок на порядкових шкалах критеріїв. З метою зниження впливу суб'єктивності експерта, для визначення виду функцій належності термів можуть використовуватися методи нечіткого кластерного аналізу, зокрема, метод нечітких с-середніх [17] та метод гірської кластеризації [18], а також їх модифікації.

2. Вибір моделі подання знань та структури нечіткої бази даних вузлової ІСУ. Як вже зазначалося, для зберігання сформованих експертами знань та реалізації нечіткого управління вузлом МР у структурі вузлової ІСУ (рис. 2) передбачено наявність бази знань. Цифрами біля стрілок позначені зв'язки між структурними елементами ІСУ, які пов'язані з реалізацією нечіткого виводу:

- 1 – інформація про результати вимірювання контрольованих параметрів вузла і МР;
- 2 – характеристики поточного стану об'єктів відповідно до рівнів моделі OSI;
- 3 – множина вхідних лінгвістичних змінних X і множина вихідних лінгвістичних змінних W ;
- 4 – множина правил нечітких продукцій;
- 5 – значення управляючих змінних у залежності від функцій підсистем вузлової ІСУ, які відповідають рівням моделі OSI;
- 6 – прийняте рішення з управління тією чи іншою функціональною підсистемою в залежності від характеристик поточного стану вузла та МР;
- 7, 8, 9, 10 – чіткі управляючі впливи по відношенню до об'єктів управління на кожному з рівнів моделі OSI (управління прийомопередавачем, якістю обслуговування, вхідними та вихідними чергами, тощо).

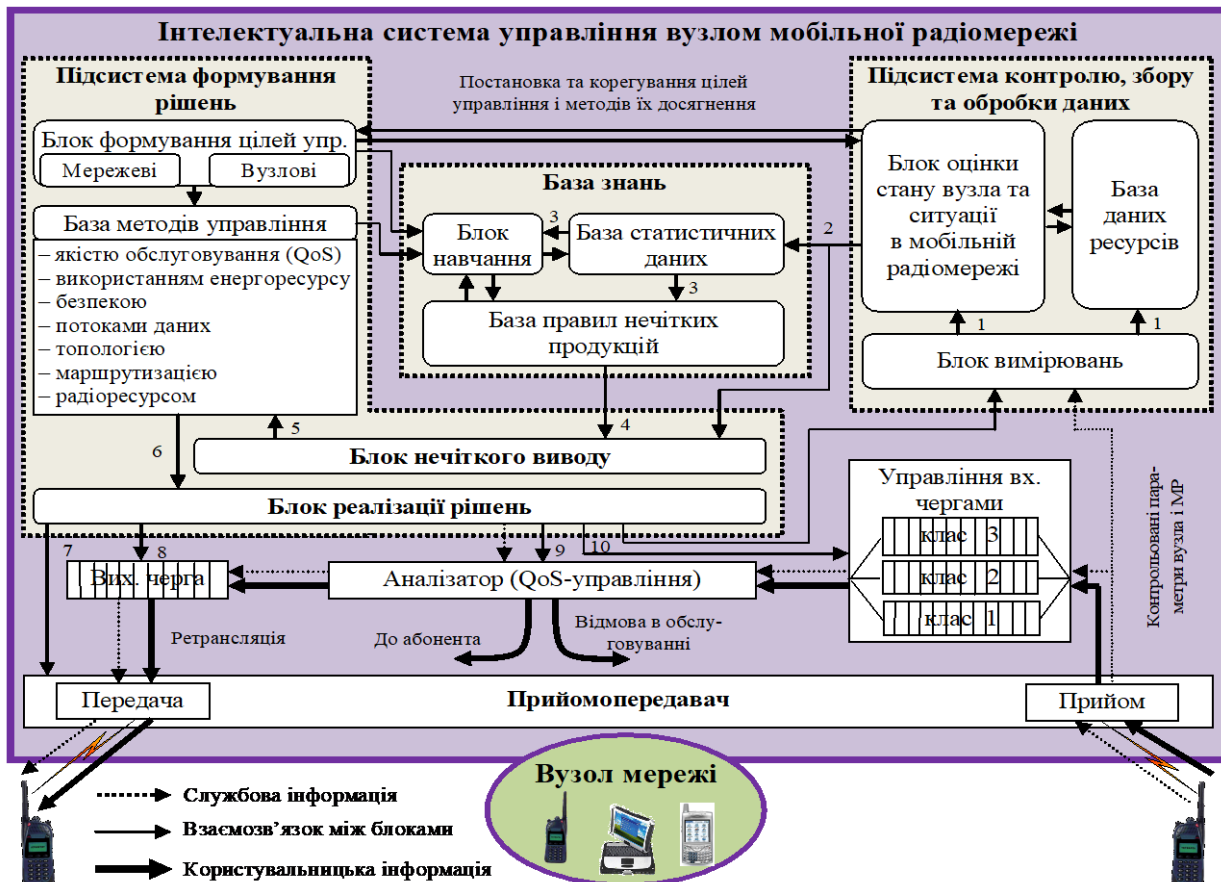


Рис. 2 Узагальнена модель інтелектуальної системи управління вузлом МР

Як видно з рис. 2, структура бази знань передбачає наявність блоку навчання, бази правил нечітких продукцій і бази даних (блок база статистичних даних), яка створена на основі нечіткої кластеризації статистичних даних про поведінку об'єкта моделювання.

Вихідні дані, які поступають від підсистеми контролю, збору та обробки даних і містять інформацію про поточний стан вузла та МР у цілому, заносяться в базу даних. У якості атрибутів бази даних виступали функції належності параметрів оцінки стану вузла та МР відповідному значенню терма („низкий”, „средний”, „высокий”), які, в свою чергу, описуються відповідними числовими інтервалами, що визначаються фізичною природою параметрів.

Приймаючи до уваги множину різнорідних параметрів, якими оцінюється стан МР на кожному з рівнів моделі OSI, а також відмінність задач управління, які необхідно вирішити на кожному з рівнів OSI, у якості структури бази даних було запропоновано використання реляційної моделі [17], яка являє собою набір таблиць, зв'язаних відношеннями асоціації (зокрема агрегації та композиції) (рис. 3). Зокрема, основними атрибутами таблиць бази даних є:

- назва функціональної підсистеми, що відповідає рівням моделі OSI;
- множина характеристик об'єктів моделювання на кожному рівні моделі OSI;
- множина ступенів належності термам лінгвістичної змінної;
- ім'я лінгвістичної змінної, якій співставленні характеристики.

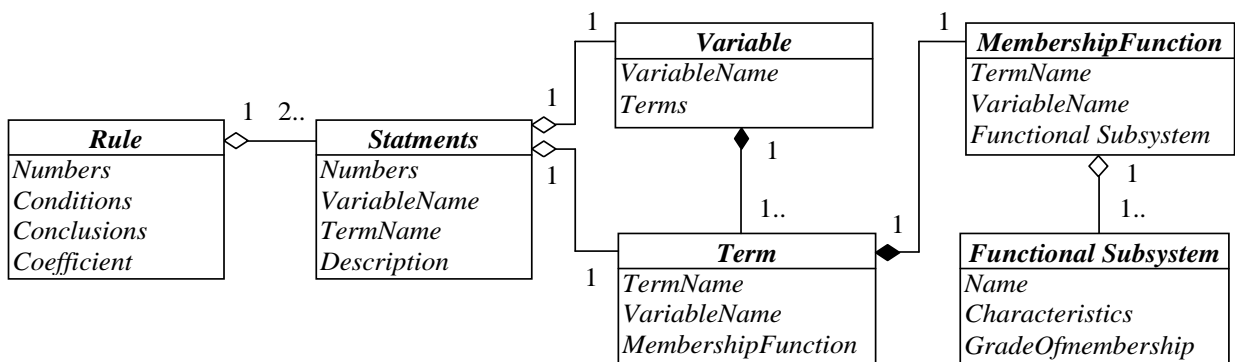


Рис. 3 Приклад діаграми класів бази знань ІСУ вузла МР

Як видно з рис. 3, основними сутностями в представленій моделі є класи Правила, Висловлювання, Змінні, Терми, Функції належності, Функціональні підсистеми.

Клас „правила” (Rule) задається за допомогою атрибутів, які містять номер правил (Number), множину підумов (Conditions) і підвисновків (Conclusions), а також ваговий коефіцієнт (Coefficient). Підумови і підвисновки складаються з множини пов'язаних між собою за допомогою логічної операції „ТА” висловлювань (Statement), які зберігаються як окремих об'єкт (таблиця) БЗ, і пов'язаних з ними об'єктів інших класів.

Нечітке висловлювання описується набором атрибутів, серед яких: Number – номер висловлювання, Description – ознака належності (ступінь істинності) виразу до підумови або підвисновку, VariableName – назва лінгвістичної змінної, TermName – назва терма.

Клас „змінні” (Variable), який відповідає лінгвістичним змінним, містить у собі назву змінної (VariableName) та об'єкт „терм-множина” (Terms), який утворює набір значень для кожної лінгвістичної змінної у вигляді нечітких змінних. У залежності від того, якою структурою буде володіти лінгвістична змінна, для неї можуть бути вибрані терми у вигляді нечітких змінних з одномірними чи багатомірними функціями належності [17].

Відповідно, клас „терми” лінгвістичної змінної (Term) включає в себе назву терма (TermName), назву лінгвістичної змінної (VariableName), до якої терм відноситься, та функцію належності (MembershipFunction). У свою чергу клас „функція належності” визначається атрибутами: назва терма (TermName), назва лінгвістичної змінної (VariableName), і множина функціональних підсистем (Functional Subsystem).

Клас „функціональні підсистеми” характеризується назвою (Name), списком характеристик (Characteristics), які визначаються функціональним призначенням кожної підсистеми, і ступенем належності терму лінгвістичній змінній (GradeOfMembership).

З бази знань інформація про параметри, які описують стан вузла та МР поступає на вхід блоку нечіткого виводу, який на основі отриманих вихідних даних та методів управління, що відносяться до різних рівнів моделі OSI, приймає рішення з управління об’єктами на кожному рівні, для чого використовується множина правил, що містяться в базі знань. Сформовані рішення передаються до блока реалізації рішень, який реалізує чіткі управляючі впливи для кожного об’єкту управління. Для оцінки прийнятих рішень, в ІСУ передбачено зв’язок між виходом блоку реалізації рішень та входом блоку вимірювань.

3. Розробка алгоритму нечіткого виводу. Відповідно до проведеного аналізу [19], комплексне застосування апарата нечітких множин та нейронних мереж для побудови бази знань про ситуацію в МР забезпечить вузлову ІСУ такими можливостями як самонавчання, адаптація, накопичення та систематизація знань про ситуацію, яка склалася в МР. Також, об’єднання переваг, характерних цим методам, забезпечить високу функціональну гнучкість та швидкодію вузлових ІСУ, а також дозволить спростити процес перетворення знань експертів у форму, придатну для обробки машиною.

Відповідно, реалізація даного етапу методики буде здійснюватися в два кроки: перший крок передбачатиме синтез бази нечітких правил з експериментальних даних, що відповідає грубому налаштуванню БЗ; на другому кроці будуть налаштовані параметри нечіткої БЗ (точне налаштування), для чого пропонується використовувати ANFIS-алгоритм (Adaptive Networks Based Fuzzy Inference System – адаптивна мережа нечіткого виводу) [20].

3.1. З використанням визначених для кожної підсистеми вузлової ІСУ множин вхідних та вихідних змінних (1), експертами формується початкова база знань для організації нечіткого виводу вузловою ІСУ, що дозволяє знаходити такі значення управляючих змінних, які в найбільшій мірі відповідають ситуації, що склалася в МР.

Для систематизації знань експертів про об’єкти управління на кожному з рівнів моделі OSI пропонується використовувати правила продукцій, які є однією з найбільш ефективних і розповсюджених машинно-орієнтованих мов для опису логічних задач. Така форма представлення знань характеризується модульністю, наочністю, легкістю внесення доповнень, а також природністю і простотою механізму логічного висновку.

Як зазначалося вище, кожне правило БЗ записується у наступному вигляді:

ЯКЩО <вхідні змінні> – ТО <вихідна змінна/змінні>,

де перша частина правила відповідає умові (може складатися з множини підумов), а друга частина – висновку (чи підвисновкам). Це дозволяє відобразити зв’язок вхідних змінних $x_k \in X$ з однією чи декількома вихідними змінними $w_g \in W$, які відповідають певному управлінському рішення, прийнятому різними підсистемами вузлової ІСУ

$$w_g = f_{w_g}(x_1, x_2, \dots, x_k, \dots, x_K), \quad (n = \overline{1, K}), \quad (g = \overline{1, G}), \quad (2)$$

і у найбільш зручній для розуміння формі представити властивості різних підсистем вузлової ІСУ та процесів, що в них протікають.

Для побудови правил вищезгаданої структури використовується математичний апарат нечітких множин, згідно з яким кожній вхідній і вихідній змінній (1) необхідно призначити відповідні лінгвістичні терми (наприклад „високий”, „середній”, „низький”, „дуже низький”):

$$A_k = \{a_k^1, a_k^2, \dots, a_k^m\} - \text{терм-множина змінної } x_k, \quad k = \overline{1, K}, \quad m = \overline{1, M},$$

$$D_g = \{d_g^1, d_g^2, \dots, d_g^h\} - \text{терм-множина змінної } w_g, \quad g = \overline{1, G}, \quad h = \overline{1, H},$$

де a_k^m – m-й лінгвістичний терм змінної x_k ; d_g^h – h-й лінгвістичний терм змінної w_g ; M, H – кількість різних рішень в областях, які розглядаються. Детальна методика побудови бази нечітких правил буде розглянута в наступному підрозділі [21].

У загальному вигляді множину сформованих експертами правил нечітких продукцій, які відображають залежність (2) можна представити наступними чином:

$$\begin{aligned}
 & \text{ЯКЩО } (x_1 = a_1^{11}) \text{ ТА } (x_2 = a_2^{11}) \text{ ТА } \dots \text{ ТА } (x_k = a_k^{11}) \text{ АБО} \\
 & (x_1 = a_1^{12}) \text{ ТА } (x_2 = a_2^{12}) \text{ ТА } \dots \text{ ТА } (x_k = a_k^{12}) \text{ АБО} \dots \\
 & (x_1 = a_1^{1q_1}) \text{ ТА } (x_2 = a_2^{1q_1}) \text{ ТА } \dots \text{ ТА } (x_k = a_k^{1q_1}) \\
 & \text{ТО } w_g = d_g^1, \text{ ІНАКШЕ} \dots \\
 & \text{ЯКЩО } (x_1 = a_1^{m1}) \text{ ТА } (x_2 = a_2^{m1}) \text{ ТА } \dots \text{ ТА } (x_k = a_k^{m1}) \text{ АБО} \\
 & (x_1 = a_1^{m2}) \text{ ТА } (x_2 = a_2^{m2}) \text{ ТА } \dots \text{ ТА } (x_k = a_k^{m2}) \text{ АБО} \dots \\
 & (x_1 = a_1^{mq_2}) \text{ ТА } (x_2 = a_2^{mq_2}) \text{ ТА } \dots \text{ ТА } (x_k = a_k^{mq_2}) \\
 & \text{ТО } w_g = d_g^h, \text{ ІНАКШЕ} \dots \\
 & \text{ЯКЩО } (x_1 = a_1^{M1}) \text{ ТА } (x_2 = a_2^{M1}) \text{ ТА } \dots \text{ ТА } (x_k = a_k^{M1}) \text{ АБО} \\
 & (x_1 = a_1^{M2}) \text{ ТА } (x_2 = a_2^{M2}) \text{ ТА } \dots \text{ ТА } (x_k = a_k^{M2}) \text{ АБО} \dots \\
 & (x_1 = a_1^{Mq_M}) \text{ ТА } (x_2 = a_2^{Mq_M}) \text{ ТА } \dots \text{ ТА } (x_k = a_k^{Mq_M}) \\
 & \text{ТО } w_g = d_g^H,
 \end{aligned} \tag{3}$$

де d_g^h ($g = \overline{1, G}$, $h = \overline{1, H}$) – лінгвістична оцінка вихідної змінної w , яка визначена з термножини можливих рішень D ; a_k^{mq} – лінгвістична оцінка вхідної змінної x_k у q -му рядку m -ої диз'юнкції, яка вибирається з відповідної термножини A_k , $k = \overline{1, K}$; H – кількість термів, які використовуються для лінгвістичної оцінки вихідної змінної w_g .

Дана система логічних висловлювань утворює нечітку базу знань вузлової ІСУ, яка з використанням операцій \cup (АБО) і \cap (ТА) може бути переписана в більш компактному вигляді:

$$\bigcup_{q=1}^{k_M} \left[\bigcap_{k=1}^K (x_k = a_k^{mq}) \right] \rightarrow w_g = d_g^h, \quad g = \overline{1, G}, \quad h = \overline{1, H}. \tag{4}$$

Для формування управляючих впливів вузловою ІСУ з використанням наведеної вище нечіткої бази знань необхідно розробити етапи нечіткого виводу. Сьогодні існує значна кількість алгоритмів, які призначені для формування етапів нечіткого виводу в різного роду ІСУ, найпоширенішими серед яких є алгоритми Мамдані та Сугено [20]. Алгоритм Мамдані реалізується з використанням апроксимації залежності (2) за допомогою бази знань та операцій над нечіткими множинами.

База знань Сугено аналогічна базі знань Мамдані, крім висновків правил d_g^h , які задаються не нечіткими термами, а лінійною функцією від входів, наприклад:

$$\bigcup_{q=1}^{k_m} \left[\bigcap_{k=1}^K (x_k = a_k^{mq}) \right] \rightarrow w_g = b_{g_0} + \sum_{k=1}^K (b_{gk} \cdot x_k), \quad g = \overline{1, G}, \tag{3.5}$$

де b_{g_0} та b_{gk} – деякі коефіцієнти.

Тобто, правила в базі Сугено є свого роду перемикачами з одного лінійного закону „вхід-вихід” на інший лінійний закон. Принципова відмінність між зазначеними алгоритмами нечіткого виводу полягає в тому, що для побудови БЗ Мамдані необхідні знання експерта чи особи, яка приймає рішення, а БЗ Сугено доцільніше використовувати в тому випадку, коли такі знання отримати не можливо. У зв'язку з цим, для побудови нечіткої бази знань вузлової ІСУ пропонується використання БЗ Сугено. Реалізація нечіткого виводу вузловою ІСУ здійснюється відповідно до етапів [20], зображених на рис. 4.

Процедура фазифікації полягає у встановленні відповідності між конкретним значенням окремої вхідної змінної системи нечіткого виводу і значенням S_k^{mq} , яке відображає степінь істинності підумови правила на основі значення функції належності відповідного їй терма лінгвістичної змінної:

$$S_k^{mq} = \mu_k^m(\bar{x}_k), \quad (6)$$

де \bar{x}_k – вектор значень вхідних змінних системи нечіткого виводу; $\mu_k^m(\bar{x}_k)$ – функція належності m -го терма.

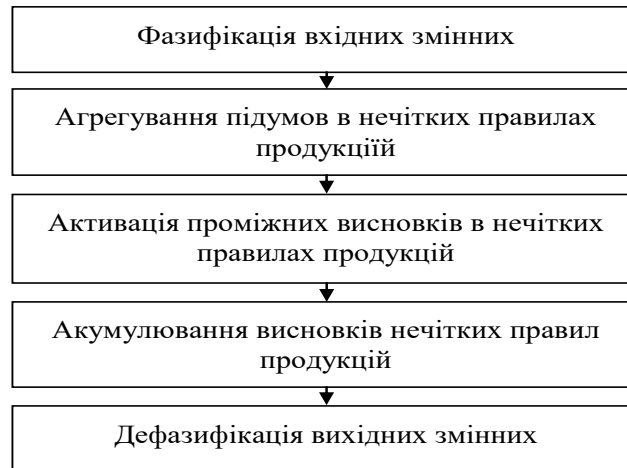


Рис. 4 Етапи алгоритму нечіткого виводу

На етапі агрегування відбувається визначення степеня істинності умов S^{hq} , $h = \overline{1, H}$ за кожним з правил системи нечіткого виводу на основі відомих значень істинності підумов S_n^{mk} , які входять до нього. Якщо умову правила задано у формі нечіткого лінгвістичного виразу виду $x_1 = a_1^m$, $m = \overline{1, M}$, етап їх агрегування залишає ступінь істинності без зміни. Якщо ж умова правила складається з декількох підумов, степінь істинності для такого правила визначається за формулами:

$$S^{hq} = \min_k S_k^{mq}; \quad (7)$$

$$S^{hq} = \max_k S_k^{mq}, \quad (8)$$

де, вираз (7) відображає логічну кон'юнкцію чи логічне „ТА” (3) нечітких підумов правила, а вираз (8) – логічну диз'юнкцію чи логічне „АБО” (3). Ті правила, степінь істинності яких не нульова, вважаються активними і використовуються для подальших розрахунків.

Етап активації передбачає визначення значень функції належності кожного з підвисновків для вихідних лінгвістичних змінних, які розглядаються. Розрахунок здійснюється за формулою:

$$\mu^{hq}(\bar{w}_g) = \min_h \{Z_g^h, \mu_g^h(\bar{w}_g)\}, \quad (9)$$

де $\mu_g^h(\bar{w}_g)$ – функція належності h -го терма вихідної змінної \bar{w}_g ; Z_g^h – степінь істинності кожного з підвисновків, що розраховується за формулою:

$$Z_g^h = S^{hq} \cdot F^q, \quad (10)$$

де F^q – ваговий коефіцієнт правила.

Етап акумуляції передбачає об'єднання і акумуляції з використанням операції max-диз'юнкції [20] всіх степенів істинності підвисновків для отримання функції належності кожної із вихідних змінних:

$$\mu_g^*(\overline{w}_g) = \bigcup_{q=1}^{k_M} \bigcup_{h=1}^H \mu^{hq}(\overline{w}_g). \quad (11)$$

Останнім етапом нечіткого виводу є дефазифікація, яка полягає в тому, що на основі результатів акумуляції всіх вихідних лінгвістичних змінних отримуються чіткі (кількісні) значення кожної із вихідних змінних, які можуть бути використані підсистемами мобільного вузла (що є зовнішніми по відношенню до системи нечіткого виводу вузлової ІСУ) в процесі його функціонування. Відповідно до алгоритму Сугено, для дефазифікації використовується модифікований варіант в формі методу центру тяжіння для одноточкових множин:

$$w_g = \frac{\sum_{h=1}^H Z_g^h \cdot d_g^h}{\sum_{h=1}^H Z_g^h}, \quad (12)$$

де w_g – результат дефазифікації у вигляді чіткого значення вихідної змінної; H – загальна кількість активних правил нечітких продукцій, в підвисновках яких є вихідна лінгвістична змінна d_g^h .

3.2. Наступним кроком на етапі розробки алгоритму нечіткого виводу є точне налаштування параметрів БЗ, для чого, як зазначалося вище, буде використано ANFIS-алгоритм. Архітектура нейронечіткої мережі ізоморфна нечіткій БЗ, а використання трикутних гладких функцій належності та диференційованих реалізацій Т-норм (операції кон'юнкції та диз'юнкції) дозволяє застосовувати для налаштування нейронечітких мереж швидкі алгоритми навчання, засновані на методі зворотного поширення помилки [20].

Зображена на рис. 5 структурна схема нечіткої нейронної мережі, яка реалізує наведений вище алгоритм нечіткого виводу Сугено, представлена у вигляді п'ятишарової ANFIS нейронної мережі. Входи мережі, які налічують K вхідних змінних, в окремий шар не виділяються. Для лінгвістичної оцінки кожної вхідної змінної (x_1, \dots, x_K) використовуються M термів.

Опишемо алгоритм функціонування ANFIS-мережі відповідно до етапів алгоритму Сугено. Входи мережі x_1, \dots, x_K з'єднані тільки зі своїми термами, кожен з яких утворює один вузол першого шару, представлений трикутною функцією належності (у залежності від фізичного змісту вхідних змінних можуть використовуватися і інші форми функцій належності [20]). Кількість вузлів першого шару дорівнює сумі потужностей терм-множин усіх вхідних змінних. Виходом вузлів першого шару є ступінь належності значення вхідної змінної відповідному нечіткому терму $\mu^{a_k^m}(x_k^*)$, $m = \overline{1, M}$, $k = \overline{1, K}$.

Кількість вузлів другого шару H рівна кількості нечітких правил. Кожен вузол другого шару з'єднаний лише з тими вузлами першого шару, які формують антецеденти (підумови) відповідного правила, тобто, кожен вузол другого шару може приймати від 1 до K вхідних сигналів. Вузли даного шару виконують функцію агрегування ступенів істинності умов за кожним правилом системи нечіткого виводу у відповідності до операції Т-норми, в якості якої може використовуватися операція \min -кон'юнкції (7) чи \max -диз'юнкції (8). У результаті виконання цієї процедури визначаються рівні „відсікання” для умов кожного з правил. Виходи вузлів цього шару позначаються α_h , $h = \overline{1, H}$.

Кількість вузлів третього шару також рівна H . Кожен вузол цього шару розраховує відносний степінь виконання нечіткого правила, здійснюючи нормалізацію значень α_h за формулою:

$$\beta_h = \frac{\alpha_h}{\sum_{h=1}^H \alpha_h}. \quad (13)$$

Кількість вузлів четвертого шару також дорівнює H . Кожен вузол з'єднаний з одним вузлом третього шару, а також з усіма входами мережі. Вузли четвертого шару здійснюють активізацію нечітких правил продукцій, обчислюючи вклад кожного нечіткого правила у загальний вихід мережі:

$$w_h = \beta_h \left[b_{g0} + \sum_{k=1}^K (b_{gk} \cdot x_k) \right] \quad (14)$$

Єдиний вузол п'ятого шару підсумовує вклади всіх правил і формує на виході мережі дефазифіковане (чітке) значення вихідної змінної w^* :

$$w_g^* = w_1 + w_2 + \dots + w_h + \dots + w_H \quad (15)$$

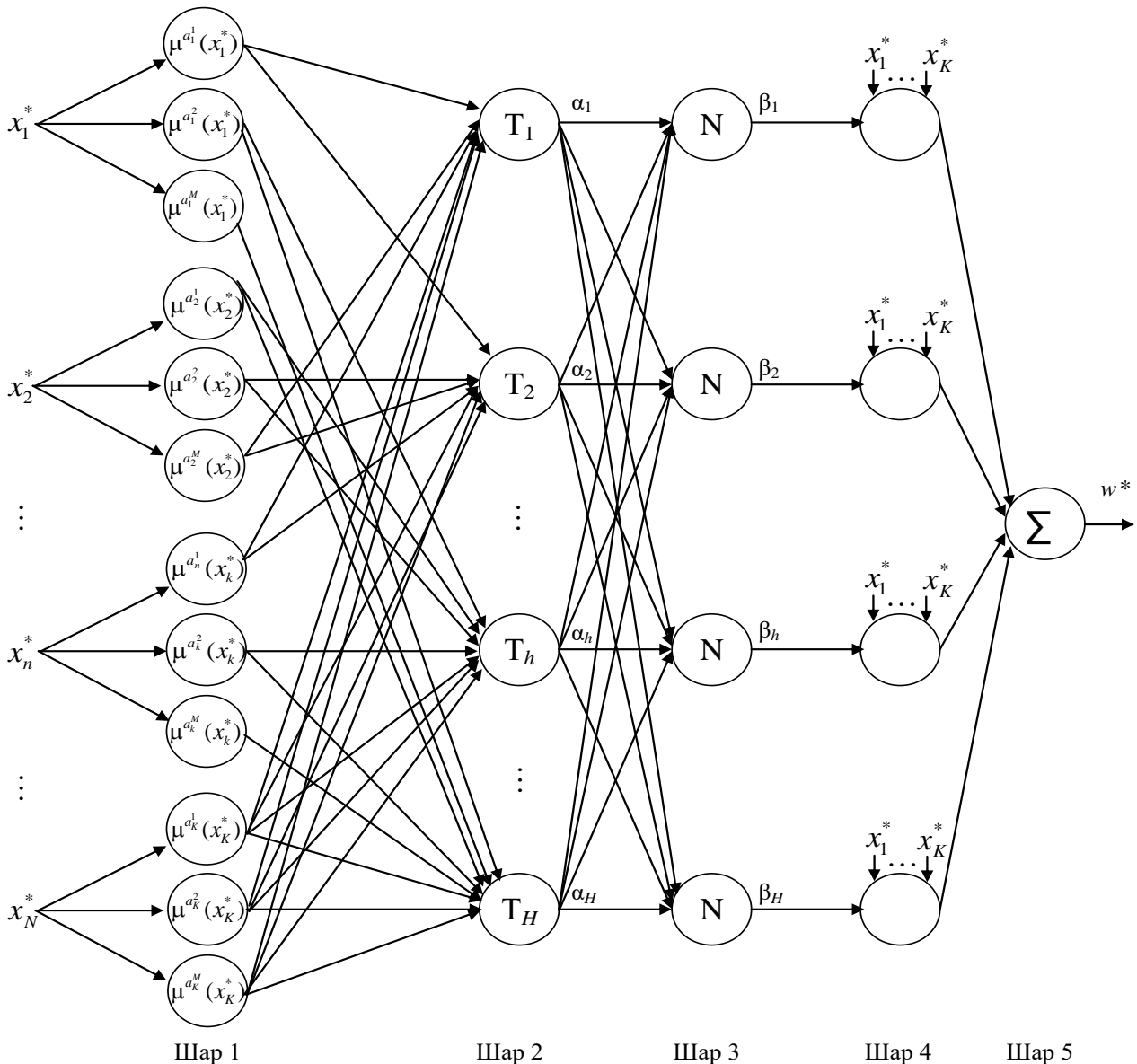


Рис. 5 Приклад структури нечіткої нейронної мережі для реалізації алгоритму Сугено

Запропонована нейронна мережа містить два параметричні шари – перший і четвертий шари, а параметрами, які будуть налаштовуватися в процесі навчання ϵ : в першому шарі –

нелінійні параметри функцій належності нечітких множин підумов правил; в четвертому шарі – параметри b_{g_0} та b_{g_n} лінійних функцій (14) підвисновків правил.

Для навчання може бути застосована комбінація градієнтного спуску у вигляді алгоритму зворотного поширення помилки і методу найменших квадратів [18, 20]. Алгоритм зворотного поширення помилки налаштовує параметри підумов правил, тобто функцій належності. Методом найменших квадратів оцінюються коефіцієнти висновків правил, тобто вони лінійно пов'язані з виходом мережі.

Кожна ітерація процедури налаштування виконується в два етапи. На першому етапі на входи подається навчальна вибірка і за неузгодженістю між бажаною і дійсною поведінкою мережі ітераційним методом найменших квадратів знаходяться оптимальні параметри вузлів четвертого шару. На другому етапі залишкова неузгодженість передається з виходу мережі на її входи, в наслідок чого з використанням методу зворотного поширення помилки налаштовуються параметри вузлів першого шару. При цьому знайдені на першому етапі коефіцієнти висновків правил не змінюються. Ітераційна процедура налаштування триває, поки неузгодженість перевищує заздалегідь встановлене значення.

Висновки. Таким чином, центральне місце в структурі вузлової ІСУ займає база знань про стан (парметри) мобільних вузлів чи МР в цілому, або ситуацію, яка склалася в МР (динаміка зміни топології, залишок вузлових чи мережевих ресурсів, тощо). Запропонована в статті методика побудови нечітких БЗ інтелектуальних систем управління вузлами МР передбачає обґрунтування вибору моделі подання знань та алгоритму нечіткого виводу для ідентифікації стану МР і прийняття рішень щодо управління МР з урахуванням умов невизначеності.

Зокрема, проведений аналіз методів обробки знань показав, що найбільш перспективними методами для побудови бази знань про ситуацію в МР при проектуванні вузлових ІСУ є комплексне застосування апарата нечітких множин та нейронних мереж. Це забезпечить вузлову ІСУ такими можливостями як самонавчання, адаптація, накопичення та систематизація знань про ситуацію, яка склалася в МР. Також, об'єднання переваг, характерних цим методам, забезпечить високу функціональну гнучкість та швидкодію вузлових ІСУ. У якості алгоритму нечіткого виводу методикою запропоновано використання алгоритму Сугено, який, у порівнянні з іншими алгоритмами, не потребує знань експерта чи особи, яка приймає рішення, для побудови нечіткої бази знань.

Застосування методики дозволить систематизувати процес розробки елементів вузлових ІСУ, а запропоновані до використання моделі подання знань та алгоритми нечткого виводу, дозволять ефективно реалізувати необхідні процедури під час розробки методів управління на різних рівнях моделі OSI, що і є напрямком подальших досліджень.

ЛІТЕРАТУРА

1. Романюк В.А. Цільові функції оперативного управління тактичними радіомережами / Романюк В.А. // Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ „КПІ”. – 2012. – № 1. – С. 109 – 117.
2. The MANET`s Hierarchical Control System Using Fuzzy Logic / [O. Sova, V. Romanyuk, A. Romanyuk, S. Salnyk] // 13th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science, 23 – 26 February 2016p. – Slavske in Lviv region. – P. 922 – 925.
3. Архітектура системи управління мережами MANET: Тези доповідей та виступів учасників V Міжнародної конференції [„Проблеми телекомунікацій – 2011”], (Київ, 19 – 22 квітня 2011р.) / В.А.Романюк, О.Я. Сова, О.В. Жук – К.: ІТС НТУУ „КПІ”, 2011. – С. 58 – 60.
4. Шевченко И.В. Построение нечеткой базы знаний для поддержки принятия решений при формировании ценовой политики номерного фонда предприятия гостиничной индустрии / И.В. Шевченко // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – 2011. – № 49. – С. 221 – 227.

5. Ротштейн А.П. Управление динамической системой на основе нечеткой базы знаний / А.П. Ротштейн, С.Д. Штовба // Автоматика и вычислительная техника. – 2001. – № 2. – С. 23 – 30.
6. Мітюшкін Ю.І. Soft Computing: ідентифікація закономірностей нечіткими базами знань: монографія / Ю.І.Мітюшкін, Б.І.Мокін, О.П. Ротштейн – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2002. – 145 с.
7. Метод віконного управління потоками даних в мобільних радіомережах військового призначення на основі системи нейро-нечіткого виводу (MANET) / [В.А. Романюк, П.В. Жук, О.В. Жук, О.Я. Сова] // Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ „КПІ”. – 2011. – № 2. – С. 36 – 46.
8. Метод підтримання діючих маршрутів на основі прогнозованого часу їх існування в радіомережах типу MANET / А.І. Міночкін, В.А. Романюк, П.В. Жук, О.Я. Сова // Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ „КПІ”. – 2011. – № 3. – С. 34 – 43.
9. Бушуев С.Н. Теоретические основы создания информационно-технических систем / С.Н.Бушуев, А.С.Осадчий, В.М.Фролов – СПб.: ВАС, 1998. – 404 с.
10. Гаврилова Т.А. Базы знаний интеллектуальных систем / Т.А. Гаврилова, В.Ф. Хорошевский. – СПб: Питер, 2000. – 384 с.
11. Рубанов В.Г. Интеллектуальные системы автоматического управления. Нечеткое управление в технических системах: учебное пособие / В.Г. Рубанов, А.Г. Филатов. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В. Г. Шухова, 2010. – 170 с.
12. Мітюшкін Ю.І. Soft Computing: ідентифікація закономірностей нечіткими базами знань: монографія / Ю.І. Мітюшкін, Б.І. Мокін, О.П. Ротштейн – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2002. – 145 с.
13. Методи обробки знань про ситуацію в мобільних радіомережах класу MANET для побудови вузлових інтелектуальних систем управління / [О.Я.Сова, В.А.Романюк, Д.А. Міночкін, А.В. Романюк] // Збірник наукових праць ВІТІ ДУТ. – 2014. – № 1. – С. 97 – 110.
14. Міночкін А.І. Концепція управління мобільною компонентою мереж зв'язку військового призначення / А.І. Міночкін, В.А. Романюк // Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ „КПІ”. – 2005. – № 3. – С. 51 – 60.
15. Борисов В.В. Нечеткие модели и сети. / В.В.Борисов, В.В.Круглов, А.С.Федулов – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 284 с.
16. Ларичев О.И. Качественные методы принятия решений. Вербальный анализ решений / О.И. Ларичев, Е.М. Мошкович. – М.: Наука, 1996. – 208 с.
17. Тарасова І.О. Принципи побудови та архітектура бази знань системи нечіткого управління на основі багатовимірних функцій належності / І.О. Тарасова // Вісник КрНУ ім. Михайла Остроградського. – 2013. – № 2 (79). – С. 56 – 61.
18. Савельев А.Н. Построение продукционной базы знаний с использованием адаптивной нейронной сети / А.Н. Савельев // Вестник АГТУ. – 2007. – № 1 (36). – С. 144 – 148.
19. Методи обробки знань про ситуацію в мобільних радіомережах класу MANET для побудови вузлових інтелектуальних систем управління / О.Я. Сова, В.А. Романюк, Д.А. Міночкін, А.В. Романюк // Збірник наукових праць ВІТІ ДУТ. – 2014. – № 1. – С. 97 – 110.
20. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzy TECH / А.В. Леоненков. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.: ил.
21. Методика побудови правил нечітких баз знань інтелектуальних систем управління вузлами радіомереж класу MANET / [О.Я. Сова, Д.А. Міночкін, П.В. Жук, В.М. Ошурко] // Сучасний захист інформації. – 2015. – № 1. – С. 74 – 85.