

## МЕТОД ВИБОРУ ГОЛОВНОГО ВУЗЛА КЛАСТЕРУ В БЕЗПРОВОДОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

*У статті проведена класифікація і аналіз методів кластеризації в безпроводових сенсорних мережах. Розглядаються основні методи кластерного аналізу, схеми роботи цих методів і їх переваги та недоліки. Запропоновано удосконалений метод вибору головного вузла кластеру в безпроводових сенсорних мережах з використанням нечіткої логіки.*

*Стрела Т.С. Метод вибору головного вузла кластера в безпроводових сенсорних мережах з використанням нечіткої логіки. В статті проведена класифікація і аналіз методів кластеризації в безпроводових сенсорних мережах. Розглядаються основні методи кластерного аналізу, схеми роботи цих методів і їх переваги та недоліки. Предложено усовершенствованный метод выбора главного узла кластера в беспроводных сенсорных сетях с использованием нечеткой логики.*

*T. Strela The method of selecting the main cluster node in wireless sensor networks using fuzzy logic. The article classifies and analyzes clustering methods in wireless sensor networks. The main methods of cluster analysis, the schemes of work of these methods and their advantages and disadvantages are considered. An improved method for selecting the cluster head node in wireless sensor networks using fuzzy logic is proposed.*

**Ключові слова:** безпроводові сенсорні мережі, кластеризація, нечітка логіка, вибір головного вузла.

**Постановка задачі в загальному виді.** Розглядаються безпроводові сенсорні мережі (БСМ) – розподілені мережі, що складаються з маленьких сенсорних вузлів, з інтегрованими функціями моніторингу навколишнього середовища, обробки і передачі даних.

БСМ відносяться до класу радіомереж, що самоорганізуються [1]. Однак вони мають свої особливості: обмеженість ресурсів вузлів мережі (за пам'яттю, продуктивністю процесору, потужністю радіопередавача), мала дальність та пропускна здатність каналів радіозв'язку між вузлами, концентрація трафіку навколо шлюзу. Тип вузлів (стаціонарний, рухомий), кількість параметрів моніторингу, розмірність мережі, тип трафіка, організація управління (децентралізована, ієрархічна або гібридна) залежить від призначення БСМ та її функцій.

Оскільки мережа може бути призначена для роботи протягом декількох місяців в важко доступних місцях, або в місцях де заміна батарей живлення неможлива чи непрактична, тому управління споживанням енергії сенсорними вузлами (зменшення, перерозподілення та ін.) має важливе значення для функціонування БСМ, підвищення ефективності функціонування в цілому та виконання покладених на мережу завдань.

Для оптимізації роботи мережі застосовуються різні схеми її побудови та використовуються різні протоколи взаємодії між вузлами. Однією із схем організації сенсорної мережі, яка дає змогу збільшити життєвий цикл мережі є кластеризація [2].

Оскільки функціонування кластеризованої БСМ багато в чому залежить від алгоритму вибору головного вузла, основні вимоги до якого полягають забезпечення максимальної тривалості життєвого циклу мережі і забезпечення максимального відсотку покриття, тому задача вибору ГВ кластеру є дуже актуальною. Тому в статті здійснений огляд існуючих методів кластеризації та пропонується метод вибору головного вузла кластеру для безпроводових сенсорних мереж з використанням нечіткої логіки.

### **Аналіз останніх публікацій.**

Кластеризація – механізм розбиття множини об'єктів на групи, які називаються кластерами. В середині кожної групи повинні знаходитись „схожі” об'єкти, а об'єкти різних груп повинні якомога більше відрізнятись [3 – 6]. Зазначимо, що загально прийнятої класифікації методів кластеризації не існує, але можна виділити низку підходів, причому деякі методи можна віднести до декількох груп. Методи кластеризації за способом обробки даних поділяються на дві основні групи: ієрархічні та неієрархічні. Кожна група включає в себе багато алгоритмів та підходів. Значна частина неієрархічних методів – це ітеративні методи, які за способом аналізу даних поділяються на чіткі та нечіткі. Чіткі методи кластеризації розбивають вихідну множину об'єктів  $X$  на декілька підмножин, що не

перетинаються. При цьому будь-який об'єкт з  $X$  належить тільки одному кластеру. Нечіткі методи кластеризації дозволяють одному і тому ж об'єкту належати одночасно декільком (або навіть усім) кластерам, але в різній мірі. Нечітка кластеризація в багатьох ситуаціях більш „природня”, чим чітка, наприклад, для об'єктів, що розташовані на межі кластерів. За кількістю застосувань алгоритмів кластеризації методи можуть з одноетапною та з багатоетапною кластеризацією.

Зважаючи на обмеження сенсорної мережі, з точки зору потужності передавача, пропускної спроможності, ємності акумулятора (і т.д.) та для ефективного використання наявних ресурсів застосовують різні методи та алгоритми кластеризації.

1. CACC: *Clustering Algorithm based on Cell Combination* [7] Алгоритм кластеризації, в основі якого лежить використання комбінації комірок. Область моніторингу ділиться на гексогональні комірки, в залежності від місця розташування. Кожен кластер складається, в меншій мірі, з семи шестикутників. Вузли з однаковими ідентифікаторами об'єднуються в кластер. Форма комірки вважається майже круговою, щоб покращити повторне використання каналів і ефективність споживання енергії.

2. CFL: *Clustering for Localization* [8] Автори пропонують алгоритм який використовує комбіновану вагову функцію і здійснює поділ вузлів з якомога мінімальною кількістю кластерів і максимальною кількістю вузлів в кластері. Вагою вважається комбінація таких параметрів як: залишкова енергія, потужність передачі і кількість сусідів. Призначений для мереж, які розташовані локально. Може працювати коли розподілення сенсорних вузлів погане.

3. КОСА: *K-Hop Overlapping Clustering Algorithm* [9] В роботі запропонований метод кластеризації зі створенням дублюючих, перекриваючих кластерів. Метою КОСА є утворення зв'язаних перекриваючих один одного кластерів (*K-hop* покриттів), які охоплюють всю мережу з відносно середнім показником перекриття. В ході моделювання виявилось, що даний алгоритм дозволяє рівномірно розподіляти навантаження по різних кластерам. Крім того в алгоритмі передбачений детермінований проміжок часу, в який відбувається формування кластерів, незалежно від розміру мережі.

4. LEACH (*Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy*) – ієрархічний протокол адаптивної кластеризації з низьким енергоспоживанням [10] є одним з перших ієрархічних протоколів і передбачає балансування витрат енергії. Життєвий цикл мережі складається з етапу формування кластера та етапу передачі зібраної інформації до шлюзу.

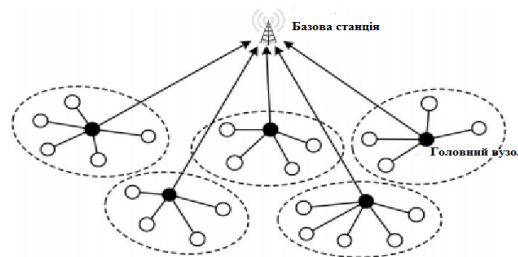


Рис.1 Топологія LEACH

В фазі формування кластера кожен сенсорний вузол генерує випадковий номер від 0 до 1. Кожен сенсорний вузол має порогове значення  $T(n)$ , яке відповідає попередньо визначеному числу головних сенсорних вузлів у мережі. Якщо інтегроване випадкове число менше, ніж  $T(n)$ , то сенсорний вузол може стати головним у поточному раунді життя БСМ, в іншому випадку цей вузол залишається тільки членом кластера. Обчислення  $T(n)$  є головною задачею при реалізації алгоритму LEACH.

$$T(n) = \begin{cases} \frac{P}{1 - P * \left( r \bmod \frac{1}{P} \right)}, & \text{якщо } n \in G \\ 0, & \text{в іншому випадку} \end{cases} \quad (1)$$

В (1)  $P$  попередній відсоток головних вузлів серед усіх сенсорних вузлів. Оптимальное значення  $P$  оцінюється в 5 % від загального числа сенсорних вузлів.

Для розподілу енергетичного навантаження по мережі головні вузли періодично змінюються, і кожен з членів кластеру має можливість стати головним вузлом.

Вижче представлені порівняння модифікованих протоколів LEACH з односкачковими і багатоскачковими переходами (табл.1). Протоколи порівнюються за такими характеристиками як: тип маршрутизації, енергоефективність, інформація про місцезнаходження, мобільність, масштабованість та формування кластерів (розподілене, централізоване або обидва (гібридні)).

Таблиця 1

Порівняльна характеристика багатоскачкових методів LEACH

LEACH модифікації	Рік розробки	Тип формування кластерів	Масштабованість	Енергоефективність	Балансування навантаження	Складність	Затримка
LEACH-В	2003	Розподілений	Низька	Висока	Добре	Помірна	Помірна
LEACH-В+	2005	Розподілений	Низька	Дуже висока	Добре	Дуже висока	Низька
TL-LEACH	2005	Розподілений	Низька	Висока	Низька	Низька	Низька
LEACH-М	2007	Розподілений	Висока	Низька	Помірна	Висока	Низька
ME-LEACH-L	2006	Розподілений	Дуже високий	Помірна	Добра	Висока	Висока
WST-LEACH	2010	Розподілений	Висока	Висока	Добра	Висока	Низька
FZ-LEACH-	2011	Розподілений	Високий	Висока	Низьке	Висока	Висока
DAO-LEACH	2013	Розподілений	Помірна	Висока	Добре	Висока	Висока
LEACH-SAGA	2014	Централізований	Висока	Висока	Добре	Дуже висока	Низька
EE-LEACH	2015	Розподілений	Дуже високий	Висока	Добре	Висока	Низька
O-LEACH	2016	Розподілений	Високий	Висока	Добре	Висока	Висока
DL-LEACH	2016	Розподілений	Високий	Висока	Добре	Низька	Помірна

5. TEEN (*Threshold-sensitive Energy Efficient Protocols*) [11] алгоритм базується на методі кластеризації LEACH. Кожен вузол в кластері періодично стає головним вузлом. Мережа з використанням алгоритму TEEN також має ієрархічну структуру на основі кластерної організації. Головний вузол посилає своїм вузлам „жорсткий” (*hard*) і „м’який” (*soft*) поріг: – жорсткий поріг: вузол надсилає інформацію головному вузлу, лише якщо значення енергії знаходиться в певних межах; – м’який поріг: вузол надсилає інформацію головному вузлу тільки тоді, коли значення енергії змінилося як мінімум на значення порогу.

#### 6. DEEC (*Distributed Energy Efficient Clustering*)

В автори пропонують розподілений енергозберігаючий алгоритм кластеризації для неоднорідних безпроводових багаторівневих сенсорних мереж, які назвали DEEC.

DEEC оцінює вірогідність вибору головного вузла в багаторівневих гетерогенних БСС відповідно до наступної формули:

$$P_i = P_{opt} \left[ 1 - \frac{E(r) - E_i(r)}{E(r)} \right] = P_{opt} \frac{E_i(r)}{E(r)}$$

При цьому в алгоритмі DEEC середня енергія мережі  $E(r)$  для довільного раунда  $r$  розраховується як :

$$E(r) = \frac{1}{N} E_{total} \left( 1 - \frac{r}{R} \right)$$

$R$  визначає загальну кількість раундів життя мережі і обчислюється наступним чином:

$$R = \frac{E_{total}}{E_{round}}$$

де  $E_{total}$  є загальною енергією в мережі, а  $E_{round}$  – витрати енергії впродовж одного раунда.

7. GMAC (*Group Mobility Adaptive Clustering*) алгоритм кластеризації груп мобільних пристроїв з використанням інформації про топологію мережі і напрямки руху вузлів, що дозволяє визначити разом або окремо переміщуються окремі сенсори і групи БСВ (безпроводовий сенсорний вузол). Число кластерів в GMAC фіксоване. У статті запропоновані оцінки для визначення оптимального розміру групи і, відповідно, числа кластерів. Головний вузол кластера вибирається на основі залишкової енергії і групи мобільності, до якої належить БСВ.

8. Алгоритм кластеризації DWENC (*Distributed Weight-based Energy-efficient Hierarchical Clustering*) [12], намагається оптимізувати внутрішню кластерну топологію. Параметрами вибору кластера виступають потужність сигналу і близькість до сусідів. DWENC формує добре збалансовані кластери з топологією з декількома ретрансляціями всередині. Для точного розрахунку відстані потрібні GPS-приймачі.

**Мета статті.** Запропонувати новий метод кластеризації для тактичних сенсорних безпроводових мереж з використанням нечіткої логіки при виборі головного вузла кластеру, який дозволить зменшити витрати енергії вузлів та збільшити час функціонування мережі.

**Виклад основного матеріалу.** Кластеризація це механізм, який використовується в безпроводових сенсорних мережах для забезпечення ефективного використання ресурсів та невід'ємна частина в ієрархічних протоколах маршрутизації, що забезпечує стабільність мережевої топології, енергозбереження, покращення зв'язності, збалансування навантаження.

Сенсорні вузли відповідно до своїх функцій можуть бути поділені на наступні три категорії :

1. Головний вузол кластера (CH): координація групи вузлів, розташованих в межах кластера, агрегація даних від членів кластера і передача зібраних або агрегованих даних.
2. Вузол-маршрутизатор: такі вузли виконують функції передачі зібраних або агрегованих даних іншими вузлами, до місця призначення.
3. Вузол моніторингу: збирає дані про стан зовнішнього середовища.

Приклад кластерної БСМ показаний на рисунку 2. Зі зображення видно, що деякі вузли можуть виконувати декілька функцій (вузол А, В, С, Д – виконують функції вузла моніторингу, вузла-маршрутизатора та головних вузлів кластеру.)

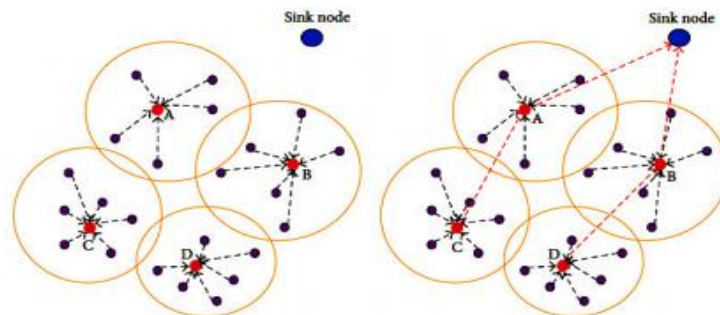


Рис. 2 Формування кластерів та збір даних із головних вузлів кластерів  
Протоколи кластеризації складаються з двох фаз, які в свою чергу діляться на два етапи (Рис.3):  
1 фаза: вибір головного вузла кластера СН (*Cluster Head*), формування кластера;  
2 фаза: агрегація/збір даних і передача даних.

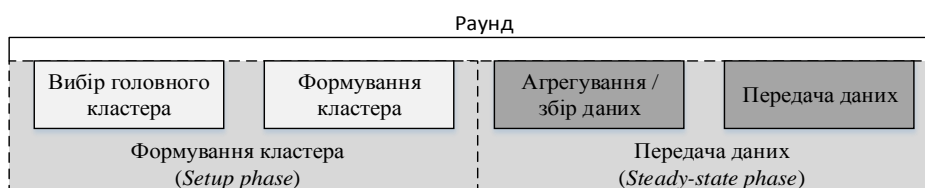


Рис. 3 Фази кластеризації

Цільовими функціями кластеризації є:

1. Збільшення часу функціонування мережі за рахунок використання головних вузлів кластеру для агрегації/збору і передачі даних на координатор;
2. Збалансування трафіку в мережі та рівномірне навантаження вузлів;
3. Підвищення якості обслуговування мережі;
4. Зменшення об'єму службового трафіку;
5. Збільшення пропускної здатності мережі;
6. Зменшення витрат заряду батарей вузлів за рахунок оптимізації кількості, розмірів кластеру, і маршрутів передачі між вузлами кластеру і головним вузлом ;
7. Побудова енергоефективної топології і маршрутів передачі в самому кластері та між кластерами.

У безпроводових мережах існує багато методів із застосуванням інтелектуальних технологій при організації управління мережею. Нечітке логічне управління дозволяє приймати рішення в режимі реального часу, навіть з неповною інформацією. Звичайні системи управління засновані на використанні точних показників навколишнього середовища, які, зазвичай, дуже важко надати. Тому, в цьому відношенні перевагу мають нечіткі логічні системи, які можуть певним чином маніпулювати лінгвістичними правилами. Більш того, їх можна використовувати, застосовуючи різні параметри – правила, для отримання потрібного результату.

Послідовність дій процесу нечіткого логічного виводу представлена на рисунку 4.

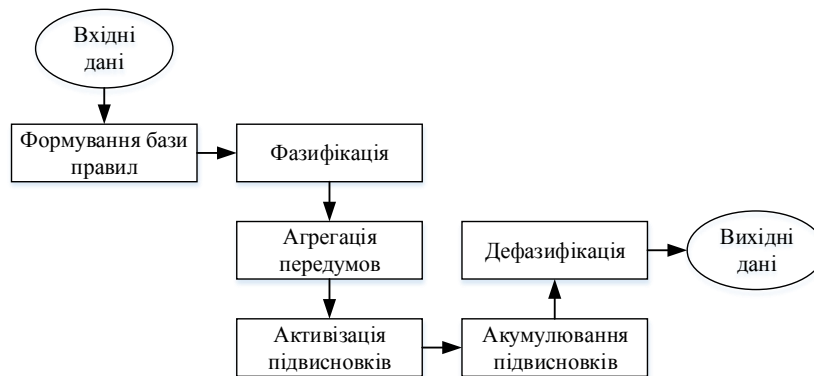


Рис.4 Послідовність процесу нечіткого логічного виводу

Найбільш часто використовується найпростіший варіант правила лінгвістичної моделі, який, записується в формі:

$$\text{ПРАВИЛО } \langle \# \rangle: \text{якщо } „\beta_1..e.. \alpha_1” \text{, то } „\beta_2..e.. \alpha_2” \quad (1.1)$$

В (1.1) нечіткий вираз « $\beta_1..e.. \alpha_1$ » це умова даного правила нечіткої продукції. Вираз « $\beta_2..e.. \alpha_2$ » – це нечіткий висновок даного правила. Вони сформульовані в термінах нечітких лінгвістичних висловлювань. При цьому передбачається, що  $\beta_2 \neq \alpha_2$ .

Основні етапи отримання нечіткого логічного виводу та особливості кожного з етапів розглянуті нижче: [13]

1) Формування бази правил.

База правил систем нечіткого логічного висновку призначена для формального опису емпіричних знань або знань експертів в тій чи іншій проблемній області і являє собою сукупність правил нечітких продукцій виду:

$$\text{ПРАВИЛО } \langle 1 \rangle: \text{якщо } „\text{Умова..1}” \text{, то } „\text{Висновок..1}” \quad (F1)$$

$$\text{ПРАВИЛО } \langle 2 \rangle: \text{якщо } „\text{Умова..2}” \text{, то } „\text{Висновок..2}” \quad (F2)$$

$$\dots \text{ПРАВИЛО } \langle \# \rangle: \text{якщо } „\text{Умова..n}” \text{, то } „\text{Висновок..n}” \quad (Fn)$$

де  $F_i$  ( $i$  належить  $\{1, 2, \dots, n\}$ ) це коефіцієнти визначеності або вагові коефіцієнти відповідних правил. Вони можуть приймати значення з інтервалу  $[0, 1]$ . Якщо не вказано іншого, то  $F_i = 1$ .

База правил вважається заданою, якщо для неї визначено множина правил нечітких продукцій, а також множина вхідних лінгвістичних змінних і множина вихідних лінгвістичних змінних.

2) Фазифікація (введення нечіткості) це процес або процедура отримання значень функцій приналежності нечітких множин (термів) на основі заданих (чітких) вихідних даних. В результаті завершення цього етапу для всіх вхідних змінних повинні бути визначені конкретні значення функцій приналежності для кожного з лінгвістичних термів, які використовуються в наборі умов бази правил системи нечіткого логічного виводу.

3) Агрегація це процедура в ході якої визначається ступінь істинності умов по кожному з правил системи нечіткого логічного виводу. Коли умова правила має просту форму, то його істинність дорівнює відповідному значенню функції приналежності вхідної змінної до терму, який використовується в даній умови.

Якщо умова складається з декількох підумов виду:

*ПРАВИЛО <#>: якщо „ $\beta_1..e..a_1$ ”, і „ $\beta_2..e..a_2$ ” то „ $\beta_3..e..v$ ” чи*

*ПРАВИЛО <#>: якщо „ $\beta_1..e..a_1$ ”, або „ $\beta_2..e..a_2$ ” то „ $\beta_3..e..v$ ”*

то визначається ступінь істинності складного висловлювання. Воно визначається на основі відомих значень істинності підумови. При цьому застосовуються відповідні вирази для виконання операцій нечіткої кон'юнкції і нечіткої диз'юнкції:

Операція нечіткої логічної кон'юнкції (І)

$$\mu_C(x) = \min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}$$

Операція нечіткої логічної диз'юнкції (АБО)

$$\mu_C(x) = \max\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}$$

де,  $\mu_C(x)$  – функція приналежності множини  $C$ .

4) Активізація це процес знаходження ступеня істинності кожного з підвисновків правил нечітких продукцій. Перед початком цього етапу передбачається, що відомі ступінь істинності і ваговий коефіцієнт ( $F_i$ ) для кожного з правил. Далі розглядається кожне з висновків правил системи нечіткого логічного висновку.

Коли висновок правила є одним нечітким висловлюванням, ступінь його істинності прирівнюється алгебраїчному виразу відповідного ступеня істинності умови на ваговий коефіцієнт.

Коли висновок складається з декількох підвисновків виду:

*ПРАВИЛО <#>: якщо „ $\beta_1..e..a_1$ ”, то „ $\beta_2..e..a_2$ ” і „ $\beta_3..e..v$ ” чи*

*ПРАВИЛО <#>: якщо „ $\beta_1..e..a_1$ ”, то „ $\beta_2..e..a_2$ ” або „ $\beta_3..e..v$ ”*

то ступінь істинності кожного з підвисновків дорівнює алгебраїчному виразу відповідного значення ступеня істинності умови помноженого на ваговий коефіцієнт.

5) Акумуляція це процес знаходження функції приналежності для кожної з вихідних лінгвістичних змінних. Мета етапу акумуляції об'єднати всі ступені істинності висновків (підвисновків) для отримання функції приналежності кожної з вихідних змінних. Необхідність цього етапу полягає в тому, що підвисновки, які відносяться до однієї і тієї ж вихідної лінгвістичної змінної, належать різним правилам системи нечіткого логічного висновку. Об'єднання нечітких множин отримують за допомогою виразу:

$$y = \min\{x_m\}$$

де  $x_m$  – модальне значення (мода) нечіткої множини, відповідної вихідної змінної після етапу акумуляції, отримане відповідно з виразу:

$$x_m = \arg \max\{\mu(x)\}, x \in [a, b]$$

б) Дефазифікація (приведення до чіткості) являє собою процедуру визначення звичайного (чіткого) значення для кожної з вихідних лінгвістичних змінних. Мета цього етапу полягає в тому, що, використовуючи результати акумуляції всіх вихідних лінгвістичних змінних, отримати звичайне кількісне значення кожної з вихідних змінних.

На основі проведеного аналізу пропонується новий метод вибору головного вузла кластеру *ключовими особливостями* якого є:

1. Використання нечіткої логіки при виборі головного вузла кластеру, що надає переваги при неповноті даних та прийнятті рішень в реальному часі;

2. Призначення ГВ здійснюється на основі таких метрик вузлів, як: рівень енергії акумулятора, центроїдність вузла по відношенню до всього кластеру, концентрація вузлів та відстань до БС.

3. Збільшення часу функціонування мережі за рахунок оптимізації призначення головних вузлів, параметрів та кількості кластерів, відповідність вибору ГВ відносно цільових функцій БСМ.

4. Метод кластеризації, час проведення та кількість ітерацій, а також кількість кластерів визначаються на етапі планування.

В результаті кластеризації та призначення ГВ кожен вузол є або головним вузлом або членом кластеру(відсутні окремі вузли);

*Модель мережі.* Розглядається однорідна безпроводна сенсорна мережа, яка має такі обмеження:

Наземні вузли розташовані випадковим чином на певній території, мають систему позиціонування (наприклад, GPS), підтримують однакові протоколи інформаційного обміну (наприклад, IEEE 802.11).

Базова станція розташована далеко від вузлів датчиків і стаціонарна.

Всі вузли в мережі є однорідними і з обмеженою енергією, кожен вузол може виконувати функції вузла моніторингу та маршрутизатора, вузли взаємодіють один із одним в мережі;

Вибір головних вузлів та організація кластеру здійснюється базовою станцією;

Вузли відсилають до базової станції дані про своє місце знаходження та залишок заряду, вузли мало або взагалі немобільні.

Вибір головних вузлів кластеру базовою станцією має певні переваги перед локальним вибором ГВ кожним кластером окремо, зокрема БС (базова станція) має більш високі обчислювальні потужності, пам'яті та більше заряду енергії батарей, крім того, передбачається, що БС буде мати більш глобальні дані про всю мережу, а не про окремі її частини.

*Алгоритми функціонування.*

Основними функціями СУ мережею є: збір даних про стан мережі, її аналіз, прийняття рішення і реалізація його виконання.

Етапи планування, оперативне управління процесами кластеризації, вибір ГВ кластерів і процес збору даних моніторингу.

При цьому вирішуються наступні задачі:

1. Розрахунок необхідної кількості кластерів в мережі та головних вузлів цих кластерів.

Задано: множина сенсорних вузлів і їх параметри, БСМ та її параметри, час збору даних, метеоумови, цільова функція мережі та необхідні метрики.



Необхідно: розрахувати ймовірність та призначити відповідні вузли головними вузлами кластерів та провести кластеризацію мережі.

Для цього розраховується центроїдність вузла, концентрація вузлів навколо, відстань до базової станції та визначається рівень заряду. Відповідно до цільової функції мережі визначається кількість кластерів. Формуються окремі задачі по моніторингу, збору даних в кожному кластері, побудова топології та маршрутів передачі даних.

2. Призначення ГВ здійснюється системою управління на основі методу нечіткої логіки по отриманим даним. В кожному раунді роботи мережі проводиться збір службової інформації та перепризначення ГВ та кластерів.

*Загальний алгоритм вибору головного вузла кластеру.*

1. Мережа розбивається на певну кількість кластерів у відповідності з цільовою функцією, кількість яких визначається на етапі планування мережі.

2. Проводиться збір даних про сенсорні вузли мережі за допомогою службових повідомлень (кількість вузлів, енергія батарей, дані позиціонування та ін.)

3. Проводяться відповідні розрахунки для прийняття рішення:

Розрахунок відстані до базової станції обчислюється за формулою:

$$d(BS, N) = \sqrt{(x_N - x_{BS})^2 + (y_N - y_{BS})^2},$$

де  $x_{BS}$  і  $x_N$  – координати БС і координати сенсорного вузла по осі  $x$ ;

$y_{BS}$  і  $y_N$  – координати БС і координати сенсорного вузла по осі  $y$ .

Розрахунок значення центроїдності сенсорних вузлів.

Центроїдність – значення яке класифікує вузол, в залежності від того, наскільки центральне положення він займає в кластері.

Розраховується за формулою:

$$d(S_i, C_j) = \sqrt{(S_i - C_j)^2}$$

де  $S_i$  – сенсорний вузол  $i$  в кластері ( $i=1...m$ ) і  $C_j$  – центральна точка  $j$  кластеру ( $j=1...k$ ).

Концентрація – це кількість вузлів, які знаходяться поблизу. Оскільки передача даних здійснюється передавачем на відстань до 300 м. [14], то максимальну дальність для визначення даної метрики приймемо 100 м. для першого раунду роботи мережі, це значення буде зменшуватись у відповідності зі зменшенням заряду акумулятора.

4. Всі дані поступають на вхід контролера нечіткої логіки (рис.5).

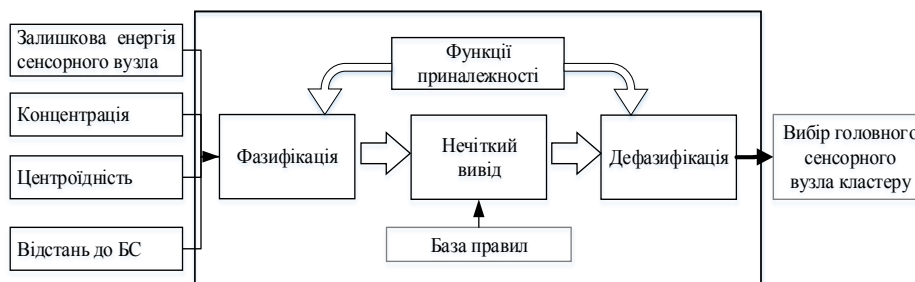


Рис.5 Контролер нечіткої логіки вибору головного вузла

Перший етап: Фазифікація (перетворення точних значень вхідних змінних в значення лінгвістичних (нечітких) змінних шляхом застосування певних функцій приналежності).

В таблиці 2 показані вхідні та вихідні змінні, а також їх нечіткі значення. На основі цієї таблиці для нечітких множин вказаних параметрів, використовуючи програмне забезпечення *MatLab*, можна отримати функції приналежності. В якості функцій приналежності для кожного терма всіх лінгвістичних змінних обираємо трикутні та Z-типу функції приналежності. Після визначення функцій приналежності і вхідних параметрів необхідно визначити базу правил, для відповідних параметрів.



Таблиця 2

Вхідні і вихідні змінні і їх нечіткі значення

Значення змінних системи		Лінгвістичні змінні	Лінгвістичні значення	Нечіткі інтервали
Вхідні змінні	x1	Залишкова енергія [0-9]В	Мала	6-7.5
			Середня	6.5-8.5
			Висока	7.5-9.0
	x2	Центроїдність [0-200]м	Мала	150-200
			Середня	80-150
			Висока	0-80
	x3	Концентрація [0-100]м	Мала	0-20
			Середня	21-29
			Висока	30-100
	x4	Відстань до БС [0-900]м	Мала	0-100
			Середня	100-600
			Велика	600-900
Вихідні змінні	у	Ймовірність вибору головного вузла [0-100]%	Дуже мала	0-15
			Мала	5-25
			Більше малої	15-35
			Менше середньої	25-45
			Середня	35-65
			Більше середньої	55-75
			Невелика	65-85
			Велика	75-95
Дуже велика	85-100			

Другий етап: Визначення бази правил. Базу правил, іноді називають лінгвістичною моделлю, яка представляє собою множину нечітких правил  $R^k, k = 1, \dots, N$  виду:

$$R^k : \text{якщо } (x_1 \dots \epsilon \alpha_1, i \quad x_2 \dots \epsilon \alpha_2 \dots i \quad x_n \dots \epsilon \alpha_n^k), \text{ то}$$

$$(y_1 \dots \epsilon \beta_1, i \quad y_2 \dots \epsilon \beta_2 \dots i \quad y_n \dots \epsilon \beta_n^k),$$

де  $n$  – кількість нечітких правил.  $\alpha_i^k$  – нечіткі множини,  $\alpha_i^k \subseteq X_i \subset R, i=1 \dots n$

Таблиця 3

Правила нечіткого виводу

№ пр..	(Якщо) Залишкова енер.	(І) Відстань БС	(І) Центроїдність	(І) Концентрація	(Тоді) Ймовірність вибору ГВ
1	Мала	Велика	Мала	Мала	Дуже мала
2	Мала	Середня	Мала	Мала	Мала
3	Мала	Мала	Мала	Мала	Мала
4	Мала	Велика	Мала	Середня	Мала
5	Мала	Середня	Мала	Середня	Мала
...	.....	.....	.....	.....	.....
12	Мала	Мала	Середня	Мала	Менше середньої
13	Мала	Велика	Середня	Середня	Мала
14	Мала	Середня	Середня	Середня	Менше середньої
15	Мала	Мала	Середня	Середня	Більше малої
...	.....	.....	.....	.....	.....
71	Велика	Середня	Середня	Велика	Більше середньої
72	Велика	Мала	Середня	Велика	Невелика
73	Велика	Велика	Велика	Мала	Середня
74	Велика	Середня	Велика	Мала	Більше середньої
75	Велика	Мала	Велика	Мала	Невелика
76	Велика	Велика	Велика	Середня	Більше середньої
77	Велика	Середня	Велика	Середня	Більше середньої
78	Велика	Мала	Велика	Середня	Невелика
79	Велика	Велика	Велика	Велика	Велика
80	Велика	Середня	Велика	Велика	Дуже велика
81	Велика	Мала	Велика	Велика	Дуже велика

Третій етап: в якості правила для блоку нечіткого виводу будемо використовувати правило Мамдані, алгоритм нечіткого логічного виводу Мамдані (*Mamdani*) передбачає, що імплікація моделюється мінімумом, а агрегація максимумом. Можна назвати цю схему базовою для всіх інших, так як історично вона була першою [15]:

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \mu_R(x, y) = \mu_A(x) \cap \mu_B(y) = \min[\mu_A(x), \mu_B(y)],$$

де  $A$  і  $B$  – нечіткі множини  $A \subseteq X, B \subseteq Y$ , відношення  $R$  визначається  $X * Y$ .

В результаті отримуємо, що:

$$\mu_{B'}(y) = \max_{k=1 \dots N} \{ \min[\mu_{A_1^k}(\bar{x}_1), \mu_{A_2^k}(\bar{x}_2), \mu_{A_3^k}(\bar{x}_3), \mu_{A_4^k}(\bar{x}_4), \mu_{B_1^k}(y)] \},$$

де  $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3, \bar{x}_4$  – відповідно, вхідні параметри (залишкова енергія, відстань до БС, центроїдність і концентрація);  $A_{1,2,3,4}^k$  – відповідні їм нечіткі множини;  $k=1, \dots, N$  – правила нечіткого виводу,  $N$  – кількість правил нечіткого виводу ( $N=3^4=81$ );  $y$  – вихідний параметр (ймовірність вибору головного вузла),  $B_1^k$  – відповідна йому множина.

У відповідності з отриманою базою правил можна виконується операція нечіткого виводу. В якості виводу для кожного правила використовується лінгвістична змінна „ймовірність вибору головного вузла”  $y$ , множина значень, яка складається з дев'яти термів: „дуже мала”, „мала”, „більше малої”, „менше середньої”, „середня”, „більше середньої”, „невелика”, „велика”, „дуже велика”.

Четвертий етап: Значення ймовірності вибору головного вузла отримується в результаті операції дефазифікації вихідної нечіткої множини. Дефазифікацію вихідного значення контролера (значення ймовірності вибору ГВ) будемо виконувати по методу центра ваги. Метод центра ваги (*Centre of Gravity*) вважається одним з найпростіших по обчислювальній складності, але досить точним методом, який виконується за формулою:

$$\bar{y} = \frac{(\sum_{k=1}^N \alpha_k \int_y \mu_{B^k}(y) dy)}{(\sum_{k=1}^N \int_y \mu_{B^k}(y) dy)},$$

де  $\mu_{B^k}(y)$  – функція приналежності правила вхідного нечіткої множини  $k$ -го правила бази правил,  $k=1, \dots, n$ ;  $\alpha_k$  – точка, в якій дана функція приймає значення 1.

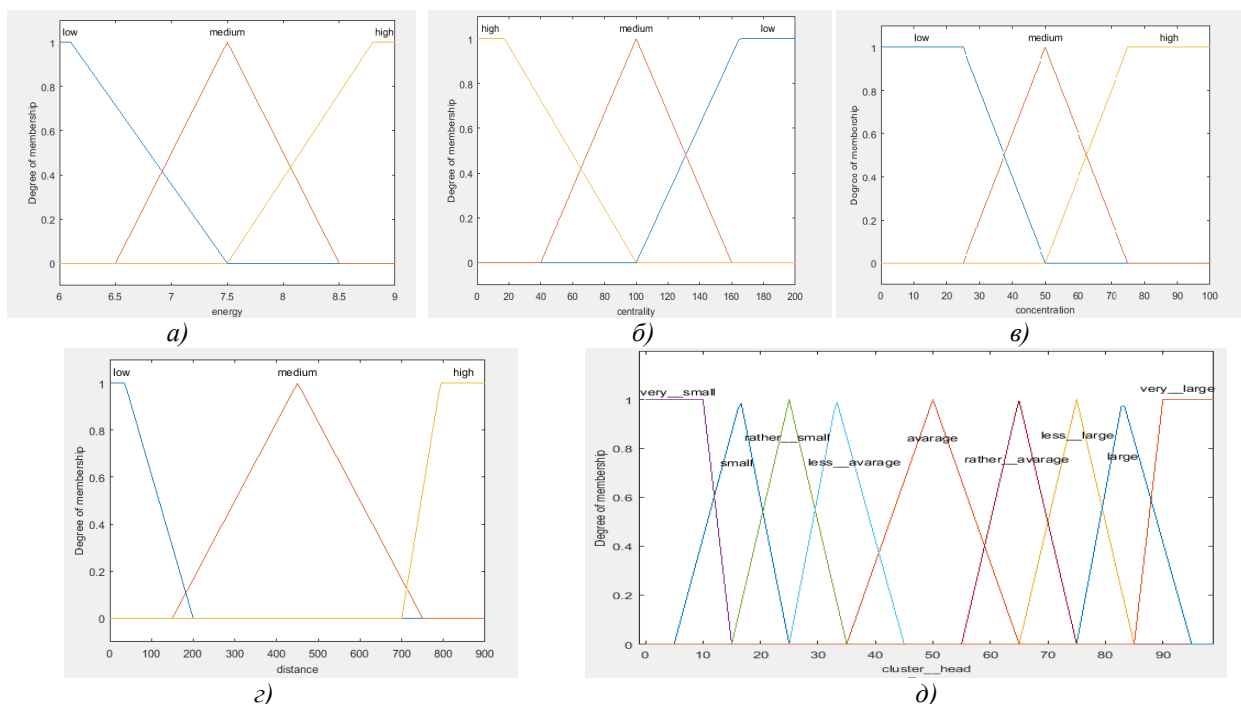


Рис.6 Функції приналежності лінгвістичних змінних

а) залишкової енергії, б) центроїдності, в) концентрації, г) дистанції, д) ймовірності вибору ГВ

В якості прикладу використання розглянутого методу приведемо наступний:

**ЯКЩО** (залишкова енергія вузла – велика) **І** (концентрація – велика) **І** (центроїдність – велика) **І** (відстань до БС – мала), **ТО** (ймовірність вибору ГВ – дуже велика).

Запропонований метод ефективно використаний для вибору ГВ кластеру в БСМ, результати моделювання представлені на рисунку 8, де показана залежність ймовірності вибору головного вузла кластеру від залишкової енергії при значеннях: 1) центроїдності – 80 м., концентрації – 60 м., дистанції до БС – 120 м.; 2) центроїдності – 150 м., концентрації – 50 м., дистанції до БС – 200 м.; 3) центроїдності – 180 м., концентрації – 20 м., дистанції до БС – 750 м.. Моделювання здійснювалось в середовищі *MatLab*.

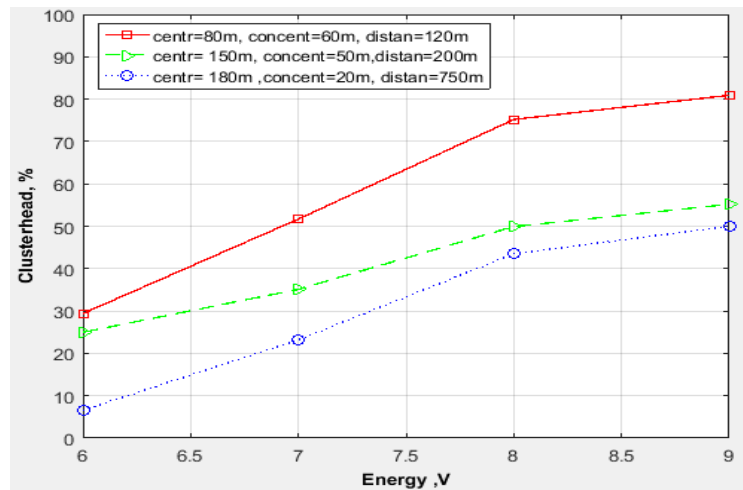


Рис 7. Залежність ймовірності вибору головного вузла при різних значеннях центроїдності, концентрації та відстані до БС

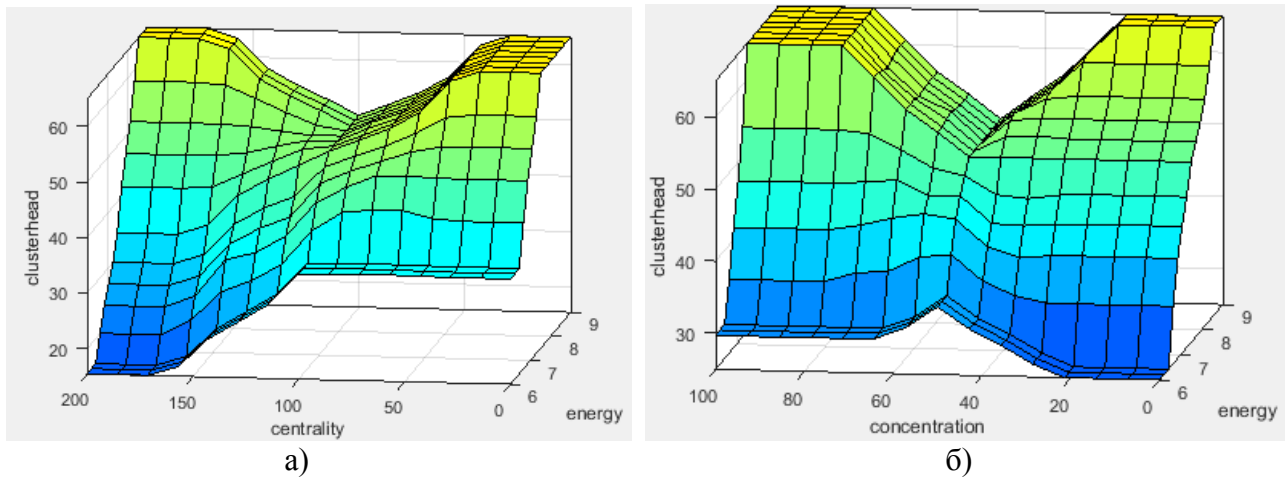


Рис 8. Залежність ймовірності вибору головного вузла:

а) від центроїдності вузла та залишкової енергії, б) від концентрації та залишкової енергії

5. Згідно отриманих розрахунків призначаються головні вузли всіх кластерів безпроводової сенсорної мережі. Які здійснюють збір та агрегацію даних з інших сенсорних вузлів та передають дані до базової станції.

*Висновки.* Таким чином в статті був проведений аналіз методів кластеризації, який показав, що на даний час розроблена значна кількість методів, які застосовуються для оптимізації роботи мережі, енергозбереження, збільшення часу функціонування мережі та ін. Приведена класифікація та вказані основні переваги останніх модифікацій протоколів кластеризації.

Запропонований новий вдосконалений метод вибору головного вузла кластеру в БСМ, який використовує в якості параметрів нечіткого вибору залишкову енергію, концентрацію,

центроїдність, відстань до базової станції. Прийняття рішення про призначення ГВ здійснюється методами нечіткої логіки з використанням правила Мамдані і методу центра ваги для дефазифікації. Даний метод дозволяє збільшити тривалість життя мережі та збалансувати розподіл затрат енергії вузлів.

Напрямом подальших досліджень є застосування запропонованої методики при маршрутизації даних моніторингу в БСМ.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Бунин С.Г. Самоорганизующиеся радиосети со сверхширокополосными сигналами / С.Г. Бунин, А.П. Войтер, М.Е. Ильченко, В.А. Романюк. – К.: Наукова думка, 2012. – 430 С.
2. Ping Ding , Joanne Holliday , Aslihan Çelik, „Distributed Energy-Efficient Hierarchical Clustering for Wireless Sensor Networks”, Proceedings of the IEEE International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems, pp. 322 – 339, 2005.
3. H. Junping, J. Yuhui and D. Liang „A Time – based ClusterHead Selection Algorithm for LEACH” IEEE Symposium on Computers and Communications, 2008, pp.1172 – 1178.
4. Sukhkirandeep Kaur, Roohie Naaz Mir „Computer Network and Information Security”, Published Online, 2016. – P. 38 – 51.
5. Сова О.Я. Аналіз методів кластеризації для визначення вузла-координатора в мобільних радіомережах класу MANET/ Сова О.Я., Лукіна К.В., Олексенко В.П., Шаповал О.М.// Збірник наукових праць ВІТІ. – Випуск № 4 – Київ: ВІТІ, 2017. – С. 141 – 148.
6. Kumarawadu, P.; Dechene, D.J.; Luccini, M.; Sauer, A. „Algorithms for Node Clustering in Wireless Sensor Networks: A Survey. In Proceedings of 4th International Conference on Information and Automation for Sustainability”, Colombo, Sri Lanka, 12 – 14 December 2008. P 295 – 300.
7. Xuxun Liu „A Survey on Clustering Routing Protocols in Wireless Sensor Networks”, 2012. pp. 1 – 41.
8. L. Chang-RI, Z.. Yun, Z. Xian-ha, and Z. Zibo „A clustering algorithm based on cell combination for wireless sensor networks” In Second International Workshop on Education Technology and Computer Science, 2011, P 74 –77.
9. R. Wang, L. Guozhi, and C. Zheng „A clustering algorithm based on virtual area partition for heterogeneous wireless sensor networks”, In International Conference on Mechatronics and Automation, pp. 372 – 376.
10. S. Zainalie and M. Yaghmaee „CFL: A clustering algorithm for localization in wireless sensor networks”. In International Symposium on Telecommunications, 2014. P 435 – 439.
11. M. Youssef, A. Youssef, and M. Younis, „Overlapping multi-hop clustering for wireless sensor networks” IEEE transactions on parallel and distributed systems, 20, 12, 1844 – 1856.
12. X. Zhu, L. Shen, and T. Yum „Hausdorff clustering and minimum energy routing for wireless sensor networks”. IEEE transaction on vehicular technology, 58, 2, pp. 990 – 997.
13. H. Junping, J. Yuhui and D. Liang „A Time-based ClusterHead Selection Algorithm for LEACH” IEEE Symposium on Computers and Communications, 2008, pp.1172 – 1178.
14. Штовба, С. Д. Введение в теорию нечетких множеств и нечеткую логику [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://matlab.exponenta.ru/fuzzylogic/book1/> (дата обращения 15.01.2014).
15. Аль-Наггар, Я. М. Методы нечеткой логики для кластеризации во всепроникающих сенсорных сетях [Электронный документ] / Я. М. Аль-Наггар // Электронный научный журнал „Информационные технологии и телекоммуникации”. Выход 2 (6) – 2014. СПбГУТ, – С. 34 – 41.