

## КЛАСИФІКАЦІЯ МЕТОДІВ КЛАСТЕРИЗАЦІЇ В БЕЗПРОВОДОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ

*У статті проведена класифікація і аналіз методів кластеризації в безпроводових сенсорних мережах. Розглядаються основні методи кластерного аналізу, схеми роботи цих методів та їх переваги та недоліки. Визначені фактори, які необхідно враховувати при розробці алгоритмів маршрутизації та плануванні безпроводових сенсорних мереж.*

*Романюк В.А., Стрела Т.С. Методы кластеризации в беспроводных сенсорных сетях. В статье проведена классификация и анализ методов кластеризации в беспроводных сенсорных сетях. Рассматриваются основные методы кластерного анализа, схемы работы этих методов и их преимущества и недостатки. Определены факторы, которые необходимо учитывать при разработке алгоритмов маршрутизации и планировании беспроводных сенсорных сетей.*

*V.Romaniuk, T. Strela Clustering methods in wireless sensors networks. The article classifies and analyzes clustering methods in wireless sensor networks. The main methods of cluster analysis, schemes of work of these methods are considered and their advantages and disadvantages. The factors that must be taken into account when developing routing algorithms and planning wireless sensor networks are determined.*

**Ключові слова:** безпроводові сенсорні мережі, кластеризація, енергозбереження, кластерний аналіз.

**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.

Сенсорні вузли, які застосовуються в мережах спеціального призначення, конструюються з якомога меншими витратами енергоспоживання акумуляторів, оскільки вони функціонують в таких умовах, де заміна джерела живлення може бути неможливою. Очевидно, що сенсорний вузол може вийти з ладу як через вплив зовнішніх чинників так і внаслідок втрати живлення. Однак сенсорна мережа може містити тисячі сенсорних вузлів, і найбільш важливою вимогою до БСМ є виконання мережею своїх завдань навіть при виході з ладу максимально допустимого числа сенсорних вузлів [1].

Для оптимізації роботи мережі застосовуються різні схеми її побудови та використовуються протоколи взаємодії між вузлами.

Однією із схем організації сенсорної мережі, яка дає змогу збільшити життєвий цикл мережі та зменшити енерговитрати є кластеризація [2]. Однією з основних цілей ієрархічної або кластерної маршрутизації є ефективне використання енергії сенсорними вузлами.

Головною причиною розряду акумуляторів та однією із основних проблемних питань функціонування безпроводової сенсорної мережі, є затрати енергії на передачу та прийом даних вузлами, тому питання кластеризації, а саме аналіз існуючих методів та протоколів, що використовуються для налагодження процесу маршрутизації є важливим та актуальним завданням.

**Аналіз останніх публікацій.** Кластеризація – механізм розбиття множини об'єктів на групи, які називаються кластерами. Всередині кожної групи повинні знаходитись „схожі” об'єкти, а об'єкти різних груп повинні якомога більше відрізнитись [3 – 6].

Основна відмінність кластеризації від класифікації полягає в тому, що перелік груп (класів), на які можна поділити вузли, чітко не заданий та визначається в процесі роботи алгоритму.

Розглянемо існуючі методи кластеризації. Зазначимо, що загально прийнятої класифікації методів кластеризації не існує, але можна виділити низку підходів, причому деякі методи можна віднести до декількох груп, тому запропоновану класифікацію можна представити у вигляді наступної схеми (рис. 1).

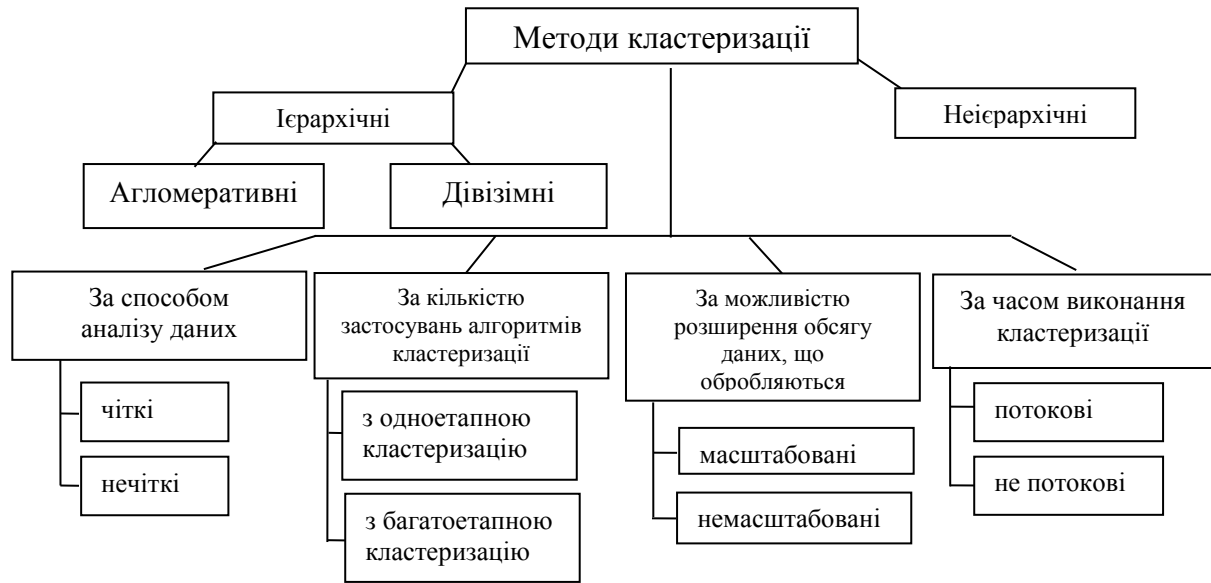


Рис.1 Класифікація методів кластеризації

Методи кластеризації за способом обробки даних поділяються на дві основні групи: ієрархічні та неієрархічні. Кожна група включає в себе багато алгоритмів та підходів. Ієрархічні методи кластеризації розрізняються правилами побудови кластерів. В якості умов правил виступають критерії, які використовуються при вирішенні питання „подібності” об’єктів. При ієрархічній кластеризації виконується послідовне об’єднання менших кластерів у великі (агломеративні методи) або розбиття (розділення) великих кластерів на менші (дівізімні методи). В графічній аналогії ієрархічні методи базуються на побудові дендрограм (з грецької *dendron* – „дерево”), які описують відстані між окремими точками та кластерами по відношенню один до одного. Застосування неієрархічних методів кластеризації (алгоритм *k*-середніх, алгоритм PAM, CLOPE) полягає в розділенні набору даних на визначену кількість окремих кластерів. Існує два підходи застосування даних методів. Перший полягає у визначенні меж кластерів як найбільш щільних ділянок в багатомірному просторі вихідних даних, тобто визначення кластера там, де є велике „згущення точок”. Інший підхід полягає в мінімізації міри різниці вузлів.

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. Одноетапні методи розбивають вихідну множину об’єктів з використанням певної обмеженої кількості їх характеристик та з залученням мінімальних обчислювальних ресурсів. Багатоетапними методами передбачається виконання ряду операцій з метою поступового розбивання кожної окремої множини об’єктів, з числа утворених на попередніх етапах, на підмножини характеристики яких найбільше відповідають критеріям поділу. Багатоетапні методи потребують використання більших обчислювальних ресурсів або затрат часу, однак результат їх роботи більш точний у порівнянні з одноетапними.

За можливістю розширення обсягу даних, що обробляються – масштабовані та немасштабовані. В масштабованих методах передбачається наявність здатності системи щодо залучення додаткових ресурсів при збільшенні обсягу даних що обробляються. Обсяг ресурсів, що додатково залучаються, прямо пропорційний збільшенню обсягу даних.

Немасштабовані методи застосовуються за наявності чітких обмежень щодо здатності обробки даних певного обсягу, які поступають за визначений час.

За часом виконання кластеризації – потокові (*on-line*) та непотокові (*off-line*). Поточкові методи кластеризують дані, що в режимі реального часу постійно поповнюються. Причому, дані, що надходять, можуть бути продовженням попередньої послідовності або новою. Непотокові методи застосовуються при наявності даних певного незмінного обсягу.

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.

**Мета статті.** Провести класифікацію та аналіз основних методів кластеризації, а також особливостей їх застосування для тактичних сенсорних безпроводових мереж.

**Виклад основного матеріалу.** Кластеризація це механізм, який може використовуватися в безпроводових сенсорних мережах для забезпечення ефективного використання ресурсів та невід'ємна частина в ієрархічних протоколах маршрутизації, що забезпечує стабільність мережевої топології, енергозбереження та збільшення строку життя мережі.

Сенсорні вузли відповідно до своїх функцій можуть бути поділені на наступні три категорії [7]:

1. Головний вузол кластера (СН): Координація групи вузлів, розташованих в межах кластера, агрегація даних від членів кластера і передача зібраних або агрегованих даних на наступний вузол є основними функціями СН.

2. Вузол-маршрутизатор: такі вузли виконують функції передачі зібраних або агрегованих даних іншими вузлами, до місця призначення.

3. Вузол збору даних: Більшість вузлів в мережі, які тільки забезпечують збір даних.

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 збору даних, вузла-маршрутизатора та головних вузлів кластеру.)

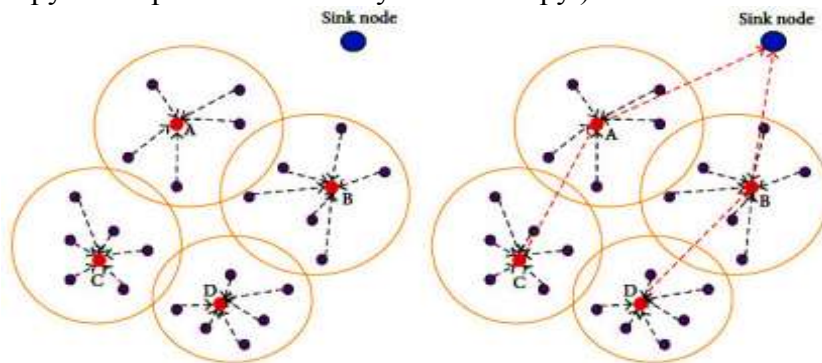


Рис. 2 Формування кластерів та збір даних із головних вузлів кластерів

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

На сьогоднішній час розроблено багато алгоритмів та методів кластеризації, які направлені на покращення показників функціонування БСМ, зокрема: балансування

навантаження, зменшення затримок передачі даних, оптимізацію кількості кластерів, зменшення витрат енергії батарей і т.д. Як правило, методи кластеризації класифікують, в загальному виді, по таким атрибутам: характеристики кластерів, характеристики головних вузлів кластеру, за процесом проведення кластеризації, за стадіями кластеризації [8–10]. На рис.4 представлена більш детальна класифікація методів кластеризації.

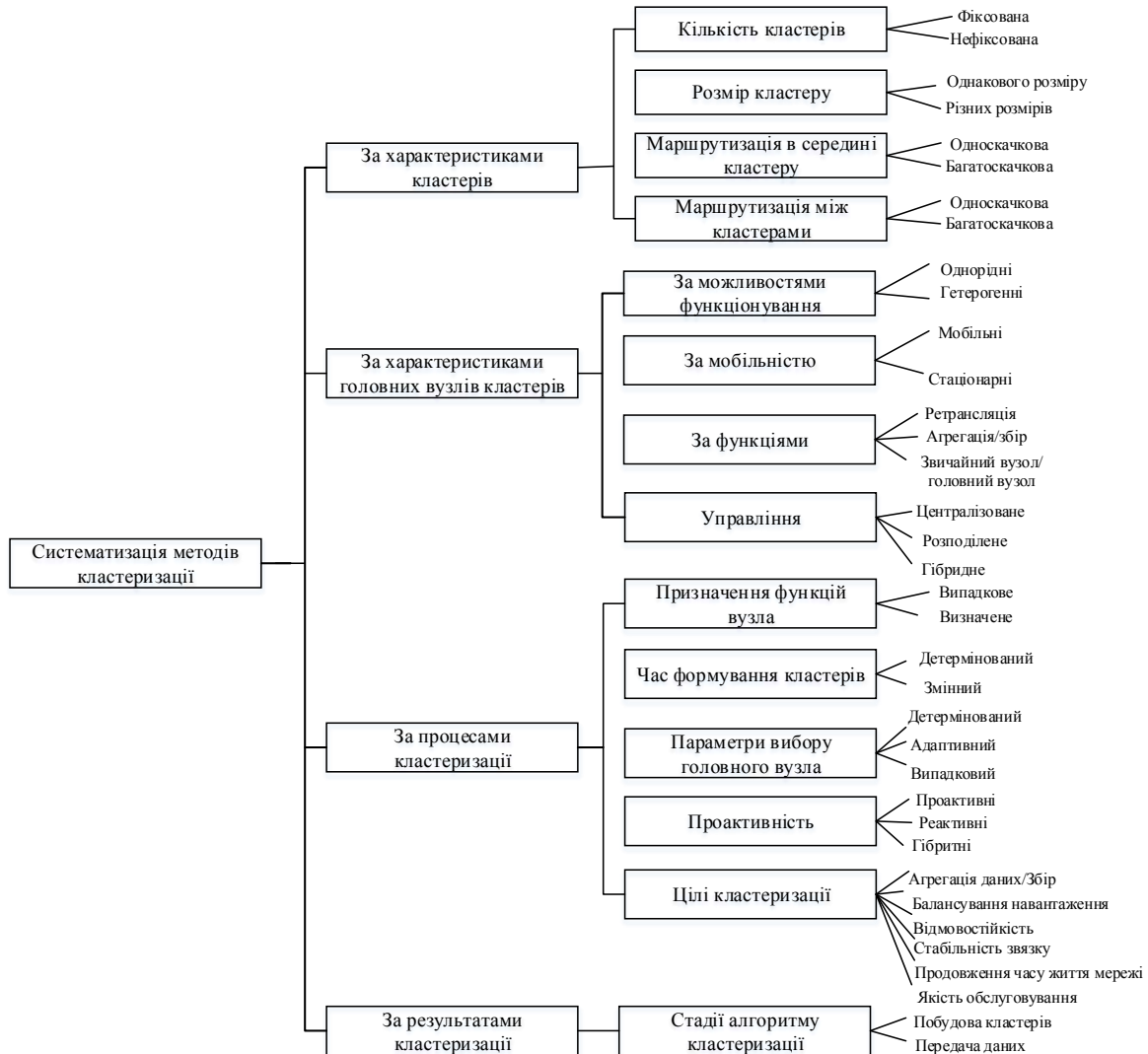


Рис. 4 Класифікація методів кластеризації в БСМ

Розглянемо 10 основних механізмів кластеризації, які застовуються в БСМ:

1. CACC: *Clustering Algorithm based on Cell Combination* [11] 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. VAP-E: *Energy-Efficient Clustering – Virtual Area Partition* [12] Алгоритм енергоефективної кластеризації, який базується на розділенні на віртуальні області гетерогенну мережу, що передбачає різну потужність передачі для різних сенсорних вузлів. Цей алгоритм може балансувати навантаження між кластерами, підвищувати енергоефективність окремих вузлів мережі, продовжувати строк служби мережі, а також підвищувати ефективність зв'язку. Порівнюючи цей алгоритм з алгоритмами LEACH та LEACH-E, автори встановили, що VAP-E підвищує період стабільності та строк служби мережі з однаковими умовами моделювання.

3. CFL: *Clustering for Localization* [13] 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.

4. КОСА: *K-Hop Overlapping Clustering Algorithm* [14] 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 різним кластерам. Крім того в алгоритмі передбачений детермінований проміжок часу, в який відбувається формування кластерів, незалежно від розміру мережі.

5. *Hausdroff Clustering* [15] Авторами передбачається, що кластери формуються на початку і зберігаються протягом всієї роботи мережі в тому ж складі сенсорних вузлів. Алгоритм збільшує тривалість роботи кожного кластера для підвищення тривалості роботи всієї мережі цілому. Час функціонування кластеру може бути збільшено за рахунок зміни ролі головного вузла між складовими кластеру, між сенсорними вузлами всередині кластеру. Головний вузол обирається по параметрам залишку енергії батареї, а також відстані до сусідів.

6. LEACH (*Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy*) - ієрархічний протокол адаптивної кластеризації з низьким енергоспоживанням [16] 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.

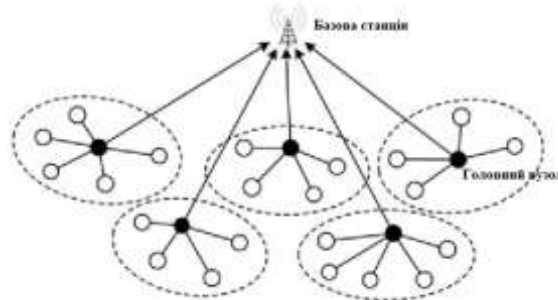


Рис.5 Топологія LEACH

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.

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

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

Змінна  $r$  відповідає поточному інтервалу функціонування сенсорної мережі,  $G$  позначає кількість сенсорних вузлів, які не були вибрані головними за останні  $1/P$  інтервалів. Крім того, при виборі головного вузла інші сенсорні вузли вибирають в який кластер вони приєднуються на основі потужності отриманого сигналу (*RSS - Received Signal Strength*) від головного вузла. Коли всі вузли організувались в кластери, головний вузол створює розклад

передачі інформації на основі TDMA методу, що гарантує відсутність колізій при передачі повідомлень. Передача даних (стаціонарна фаза). Головний вузол широкополосним методом розсилає розклад передачі та створює запит до членів кластеру про передачу даних. Вузли передають дані у відведені для цього інтервали TDMA. Після отримання повідомлень від усіх вузлів головний вузол формує свої повідомлення і передає ці повідомлення на шлюз або базову станцію. Для розподілу енергетичного навантаження по мережі головні вузли періодично змінюються, і кожен з членів кластеру має можливість стати головним вузлом.

Таблиця 1

### Порівняльна характеристика односкачкових методів LEACH

| LEACH модифікації | Рік розробки | Тип формування кластерів | Масштабованість | Енергоефективність | Балансування навантаження | Складність  | Затримка |
|-------------------|--------------|--------------------------|-----------------|--------------------|---------------------------|-------------|----------|
| LEACH             | 2000         | Розподілений             | Низька          | Помірна            | Погане                    | Низька      | Низька   |
| LEACH-C           | 2002         | Централізований          | Низька          | Висока             | Помірне                   | Помірна     | Низька   |
| Solar-LEACH       | 2004         | Гібридний                | Помірна         | Дуже висока        | Помірне                   | Висока      | Низька   |
| SLEACH            | 2005         | Розподілений             | Помірна         | Дуже висока        | Помірне                   | Висока      | Низька   |
| Sec-LEACH         | 2006         | Розподілений             | Висока          | Низька             | Помірна                   | Дуже висока | Низька   |
| ME-LEACH          | 2008         | Розподілений             | Низька          | Помірна            | Погана                    | Висока      | Низька   |
| LEACH-B           | 2010         | Розподілений             | Низька          | Висока             | Добра                     | Висока      | Низька   |
| LEACH-G           | 2013         | Гібридний                | Висока          | Висока             | Добра                     | Висока      | Низька   |
| Cog-LEACH-C       | 2015         | Централізований          | Низька          | Висока             | Добра                     | Помірна     | Низька   |
| LEACH-MAC         | 2016         | Розподілений             | Помірна         | Висока             | Добра                     | Висока      | Низька   |

Таблиця 2

### Порівняльна характеристика багатоскачкових методів LEACH

| LEACH модифікації | Рік розробки | Тип формування кластерів | Масштабованість | Енергоефективність | Балансування навантаження | Складність  | Затримка |
|-------------------|--------------|--------------------------|-----------------|--------------------|---------------------------|-------------|----------|
| LEACH-B           | 2003         | Розподілений             | Низька          | Висока             | Добре                     | Помірна     | Помірна  |
| LEACH-B+          | 2005         | Розподілений             | Низька          | Дуже висока        | Добре                     | Дуже висока | Низька   |
| TL-LEACH          | 2005         | Розподілений             | Низька          | Висока             | Низька                    | Низька      | Низька   |
| LEACH-M           | 2007         | Розподілений             | Висока          | Низька             | Помірна                   | Висока      | Низька   |
| ME-LEACH-L        | 2006         | Розподілений             | Дуже високий    | Помірна            | Добра                     | Висока      | Висока   |
| LEACH-L           | 2008         | Розподілений             | Висока          | Дуже висока        | Добра                     | Висока      | Висока   |
| WST-LEACH         | 2010         | Розподілений             | Висока          | Висока             | Добра                     | Висока      | Низька   |
| FZ-LEACH-         | 2011         | Розподілений             | Високий         | Висока             | Низьке                    | Висока      | Висока   |
| WISE-LEACH        | 2012         | Розподілений             | Помірна         | Висока             | Добра                     | Висока      | Низька   |
| 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   |
| CL-LEACH          | 2016         | Розподілений             | Помірний        | Висока             | Добре                     | Висока      | Висока   |
| DL-LEACH          | 2016         | Розподілений             | Високий         | Висока             | Добре                     | Низька      | Помірна  |

Вижче представлені порівняння модифікованих протоколів LEACH з односкачковими і багатоскачковими переходами (табл.1, табл.2). Протоколи порівнюються за такими характеристиками як: тип маршрутизації, енергоефективність, інформація про

місцезнаходження, мобільність, масштабованість та формування кластерів (розподілене, централізоване або обидва (гібридні)).

7. TEEN (*Threshold-sensitive Energy Efficient Protocols*) [17] 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.

8. Алгоритм SEP (*Stable Election Protocol*) розроблений для вибору головного вузла в БСМ виходячи з допущення, що в мережі можлива наявність двох типів вузлів з точки зору їх енергії: звичайні та особливі (зі збільшеною ємністю батареї) вузли. Останні відразу вказують, що в даному випадку мережа є гетерогенною. Енергія особливих вузлів більше, ніж енергія звичайних. При цьому для звичайних вузлів початкова енергія рівна  $E_0$ , в той час як для особливих  $E_0(1 + a)$ .

Припустимо, що ми маємо вузли в мережі, а процент особливих вузлів дорівнює  $m$ .

$$\text{Тоді:} \quad n(1 - m)E_0 + nmE_0(1 + a) = nE_0(1 + am)$$

#### 9. 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.

10. 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.

*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, покращення якості функціонування та ін. Приведена класифікація, основні переваги останніх модифікацій протоколів кластеризації.

Методи кластеризації, які застосовуються для безпроводових сенсорних мереж цивільного призначення не в повній мірі підходять для їх використання у мережах спеціального призначення. Тому в подальшому пропонується удосконалення існуючих

методів кластеризації для їх використання у безпроводових сенсорних мережах тактичного призначення з урахуванням їх основних особливостей.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Стрела Т.С. Аналіз методів підвищення та забезпечення якості обслуговування в безпроводових сенсорних мережах / Т.С. Стрела, В.А. Романюк, О.В. Жук, В.П. Олексенко // Збірник наукових праць Військового інституту телекомунікацій та інформатизації ім. Героїв Крут – Київ: ВІТІ, 2018. Випуск № 1 – С. 141 – 148.
2. Sukhkirandeep Kaur, Roohie Naaz Mir „Computer Network and Information Security”, Published Online, 2016. – P. 38 – 51.
3. Knowledge Discovery in Databases – Part III – Clustering , Heidelberg University, 2017 P. 3 – 430.
4. Pourrajabi, M.; Moulavi, D.; Campello, R. J. G. B.; Zimek, A.; Sander, J.; Goebel, R. „Model Selection for Semi-Supervised Clustering”. Proceedings of the 17th International Conference on Extending Database Technology (EDBT), 2014. P. 331 – 342.
5. Huth, R.; et al. „Classifications of Atmospheric Circulation Patterns: Recent Advances and Applications”. Ann. N.Y. Acad. Sci. 1146: 2008, P. 105 – 152.
6. Auffarth, B. „Clustering by a Genetic Algorithm with Biased Mutation Operator”, 2010. P.18 – 23,
7. Сова О.Я. Аналіз методів кластеризації для визначення вузла-координатора в мобільних радіомережах класу MANET/ О.Я. Сова, К.В. Лукіна, В.П. Олексенко, О.М. Шаповал // Збірник наукових праць Військового інституту телекомунікацій та інформатизації – Київ: ВІТІ, 2017. Випуск № 4 – С. 141 – 148.
8. Abbasi, A.A.; Younis, M. A survey on clustering algorithms for wireless sensor networks. Comput. Commun. 2007.
9. 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.
10. Xuxun Liu „A Survey on Clustering Routing Protocols in Wireless Sensor Networks,” 2012. P. 1 – 41.
11. 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.
12. 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, 372 – 376.
13. S. Zainalie and M. Yaghmaee „CFL: A clustering algorithm for localization in wireless sensor networks”. In International Symposium on Telecommunications, 2014. P 435 – 439.
14. 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.
15. X. Zhu, L. Shen, and T. Yum „Hausdorff clustering and minimum energy routing for wireless sensor networks”. IEEE transaction on vehicular technology, 58, 2, 990 – 997.
16. H. Junping, J. Yuhui and D. Liang „A Time-based ClusterHead Selection Algorithm for LEACH” IEEE Symposium on Computers and Communications, 2008, P. 1172 – 1178.
17. Ge, Y., Wang, S. & Ma, J. J Wireless Com Network (2018) 2018: 27. <https://doi.org/10.1186/s13638-018-1039-z>.