

## РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

УДК 621.391

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.1/15>

**Валуйський С.В.**

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Лисенко О.І.**

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Кисіль А.І.**

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

### МЕТОД ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОЇ КЛАСТЕРИЗАЦІЇ В БЕЗПРОВОДОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ БПЛА

У статті розглядається новий підхід до підвищення енергоефективності безпроводових сенсорних мереж (WSN) шляхом інтеграції безпілотних літальних апаратів (БПЛА), що сприяє більш раціональному розподілу енергії та ефективнішому функціонуванню мережі. Безпроводові сенсорні мережі зазнають суттєвих викликів через обмежені енергетичні ресурси та статичність розташування сенсорних вузлів, що обмежує масштабованість та гнучкість їхнього використання у великих мережах. Основною метою даного дослідження є розробка енергоефективного методу кластеризації вузлів мережі з використанням БПЛА для продовження життєвого циклу мережі, а також підвищення її продуктивності та надійності. Запропонована система базується на методі серединної точки для вибору кластерних голів (КГ), що забезпечує рівномірний розподіл навантаження між вузлами мережі і, як наслідок, знижує енерговитрати.

Впровадження БПЛА в архітектуру сенсорної мережі дозволяє знизити витрати енергії сенсорних вузлів за рахунок зменшення відстані для передачі даних та забезпечити рівномірний розподіл навантаження між кластерами. У статті розглядається ефективне планування маршруту польоту БПЛА з використанням алгоритму симуляційного відпаду, що забезпечує мінімізацію витрат енергії під час збору даних. Таке планування траєкторії дозволяє оптимізувати енерговитрати на збір інформації і підвищити загальну ефективність всієї системи. Цей підхід до організації збору даних допомагає забезпечити безперервну роботу мережі протягом тривалого часу, що є критично важливим для таких застосувань, як розумні міста, промисловість 4.0, точне землеробство та екологічний моніторинг.

Порівняння запропонованого методу з традиційним підходом LEACH, який обирає голови кластерів випадковим чином, показало суттєві переваги у зниженні енергоспоживання та продовженні життєвого циклу мережі. Зокрема, за рахунок обґрунтованого вибору голів кластерів на основі середньої точки та врахування залишкової енергії вузлів, енергоспоживання було знижено на 20% порівняно з методом LEACH, а загальна тривалість роботи мережі зросла на 50%. Результати моделювання підтверджують, що запропонований метод є ефективнішим у підтримці стабільності роботи вузлів та загального функціонування мережі у порівнянні з традиційними методами.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на впровадження методів машинного навчання, зокрема, глибокого навчання та підкріплювального навчання, для підвищення точності вибору голів кластерів на основі залишкової енергії та географічного розташування. Використання методів прогнозування енергоспоживання сенсорів дозволить адаптивно корегувати топологію мережі, що допоможе динамічно пристосовувати маршрут польоту БПЛА та підвищити ефективність роботи системи загалом.

**Ключові слова:** безпроводові сенсорні мережі, енергоефективність, кластеризація, безпілотний літальний апарат, голова кластеру, метод LEACH.

**Постановка проблеми.** Швидке зростання та інтенсивний розвиток у сфері безпроводових технологій зв'язку, включаючи безпроводові сенсорні мережі (БСМ), задовольняють дедалі зростаючі потреби користувачів. БСМ відзначаються високою гнучкістю в обслуговуванні та розгортанні порівняно з традиційними сенсорними мережами, що робить їх популярними в різних сферах, таких як розумні міста, промисловість, точне землеробство та екологічний моніторинг [4].

Попри значний прогрес у технології БСМ, такі мережі все ще стикаються з серйозними викликами, серед яких найважливішими є обмежена енергоємність та статичність розміщення сенсорних вузлів. Статична топологія обмежує масштабованість та гнучкість БСМ, що є критичним фактором для розгортання великих мереж спостереження. Щоб вирішити ці проблеми, ми пропонуємо використовувати безпілотні літальні апарати (БПЛА), що забезпечують гнучкість та мобільність, скорочують діапазон зв'язку для сенсорів, що значно продовжує життєвий цикл мережі [5].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Безпроводові сенсорні мережі (БСМ) знайшли широке застосування в різних галузях, таких як розумні міста, точне землеробство, промисловість та екологічний моніторинг. Основною метою кластеризації в БСМ є поділ сенсорних вузлів на кластери для ефективного управління енергоспоживанням та підвищення тривалості життя мережі. Одним з найпопулярніших підходів є використання алгоритму K-means для кластеризації вузлів, де сенсорні вузли розподіляються на групи, а голова кластера обирається для збору даних від усіх вузлів у кластері. Іншим розповсюдженим підходом є протокол LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy), який вводить ієрархічну передачу даних для оптимізації енерговитрат [1].

Попри свою ефективність, традиційні алгоритми кластеризації, як-от LEACH і K-means, мають суттєві недоліки. LEACH обирає голови кластерів випадковим чином, що призводить до незбалансованого розподілу сенсорних вузлів у кластерах. Це означає, що вузли з нижчим рівнем залишкової енергії можуть бути обрані головами, що зменшує тривалість життя мережі. Крім того, через нерівномірний розподіл вузлів, голови кластерів з високою щільністю вузлів швидше вичерпують енергію, що призводить до скорочення терміну служби мережі [8].

Алгоритм K-means, хоча й ефективний для створення кластерів, має свої недоліки. Основна

проблема полягає в тому, що початкові центроїди обираються випадково, що може призвести до локальних оптимумів. Це спричиняє утворення незбалансованих кластерів, де деякі кластери мають більше сенсорних вузлів, а інші – менше, що ускладнює рівномірний розподіл енергії між вузлами. Це також не забезпечує найкращого розв'язку для вибору голів кластерів та може призвести до втрат енергії під час передачі даних.

Одним із сучасних підходів для підвищення ефективності БСМ є використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА). БПЛА забезпечують мобільність і гнучкість, що дозволяє скорочувати відстань між сенсорами та головами кластерів, зменшуючи енерговитрати на передачу даних. У багатьох випадках БПЛА використовуються для збору даних від сенсорів, що допомагає скоротити витрати енергії вузлів та забезпечити триваліший життєвий цикл мережі.

Використання БПЛА дозволяє уникнути багатьох проблем, пов'язаних зі статичною топологією мережі, таких як обмежена масштабованість і обмеження покриття. БПЛА можуть динамічно переміщуватися до різних точок для збору даних, забезпечуючи більш рівномірне навантаження на сенсорні вузли та голови кластерів. Це також допомагає зменшити кількість передач даних через багато переходів, що знижує загальні енерговитрати мережі [6].

Запропонована система моніторингу безпроводової сенсорної мережі включає кілька ключових компонентів: сенсорні вузли, голови кластерів, безпілотний літальний апарат (БПЛА) та базову станцію. Сенсорні вузли розташовані в межах певної області для збору параметрів навколишнього середовища, таких як температура, вологість тощо. Голови кластерів відповідають за збір даних від підлеглих сенсорних вузлів і передачу їх до БПЛА, який далі передає ці дані на базову станцію.

Архітектура системи складається з чотирьох рівнів. Перший рівень – це сенсорні вузли, які розташовані на місцевості і збирають інформацію про навколишнє середовище. Другий рівень – голови кластерів, що відповідають за агрегацію даних від своїх кластерів і передачу цих даних далі. Вибір голови кластеру базується на залишковій енергії вузлів та відстані між ними, що дозволяє оптимізувати процес передачі даних. Третій рівень – безпілотний літальний апарат, який є мобільним елементом системи та використовується для збору даних від голів кластерів і передачі їх на базову станцію. Завдяки використанню БПЛА зменшу-

ється діапазон зв'язку для сенсорних вузлів, що допомагає економити енергію і подовжити життєвий цикл мережі. Четвертий рівень – це базова станція, яка отримує дані від БПЛА і використовує їх для подальшого аналізу або зберігання [10].

Чотирирівнева ієрархічна система забезпечує ефективну організацію збору та передачі даних, мінімізуючи енерговитрати та збільшуючи загальний термін служби мережі.

Для забезпечення енергоефективного збору даних, БПЛА виконує оптимальне планування траєкторії польоту, яке залежить від кількох параметрів. Відстань між головами кластерів і БПЛА мінімізується для зменшення енерговитрат, а також враховується час польоту для зниження загального споживання енергії. Крім того, під час вибору траєкторії враховується залишкова енергія голів кластерів для забезпечення збалансованого навантаження. Для обчислення енергоспоживання на передачу даних застосовується радіоенергетична модель, яка використовує коефіцієнти вільного простору та багатопроменевої моделі. Використання оптимальної траєкторії польоту дозволяє мінімізувати час і енергію, необхідні для збору даних, що підвищує енергоефективність всієї системи та подовжує термін її служби.

**Постановка завдання.** Метою цієї статті є розробка енергоефективного методу кластеризації для підвищення життєвого циклу БСМ із використанням БПЛА. Запропонований підхід базується на техніці вибору кластерних голів (КГ) на основі серединної точки, враховуючи залишкову енергію та відстань між вузлами. БПЛА також використовуються для збору даних з сенсорів, що скорочує їхні енерговитрати і продовжує термін служби мережі.

**Виклад основного матеріалу.** Запропонований метод енергоефективної кластеризації включає кілька ключових аспектів для підвищення ефективності БСМ за допомогою БПЛА. Основна ідея полягає в оптимізації вибору голів кластерів для забезпечення рівномірного розподілу навантаження між сенсорами та ефективною передачі даних [3].

У запропонованому підході стратегія вибору початкових голів кластерів базується на методі серединних точок. Замість випадкового вибору початкових КГ використовується середня точка кластера, що дозволяє уникнути проблеми незбалансованого розподілу вузлів. Кожен кластер формується навколо голови, яка розташована в серединній точці, що забезпечує рівномірний розподіл сенсорних вузлів і зменшує витрати енергії на

передачу даних. Після визначення початкових голів кластерів система враховує залишкову енергію сенсорних вузлів, щоб гарантувати, що голова кластеру має достатній рівень енергії для виконання своїх завдань.

Методологія для забезпечення збалансованих кластерів передбачає алгоритм створення кластерів з урахуванням залишкової енергії вузлів. Залишкова енергія використовується як параметр для визначення, чи може вузол залишитися головою кластера або йому слід передати цю функцію іншому вузлу з вищим рівнем енергії. Таким чином, алгоритм підтримує рівномірне навантаження на голови кластерів, що сприяє продовженню терміну служби мережі. Уникнення незбалансованих кластерів також досягається за допомогою середньої точки – голови кластерів розміщуються таким чином, щоб забезпечити максимально можливий баланс між кількістю вузлів у кожному кластері [6].

Що стосується споживання енергії головами кластерів під час передачі даних, запропонована модель враховує енергоспоживання як при передачі даних між головами кластерів та БПЛА, так і при комунікації всередині кластера. Для оптимізації споживання енергії використовується модель дисипації енергії радіоканалу, яка враховує відстань між вузлами та головами кластерів. Коли відстань між головою кластера та БПЛА перевищує певний поріг, БПЛА використовує інший вузол для збору даних, що дозволяє зменшити енерговитрати на комунікацію.

Для планування траєкторії польоту БПЛА було використано метод симуляційного відпалу. Цей підхід дозволяє мінімізувати енергоспоживання під час польоту, оптимізуючи маршрут таким чином, щоб зібрати дані від усіх голів кластерів за найменший час. Використання симуляційного відпалу забезпечує ефективне планування маршруту БПЛА, враховуючи всі координати голів кластерів, що дозволяє знизити загальні енергетичні витрати та продовжити термін служби як сенсорної мережі, так і самого БПЛА.

Аналіз структури кластерів показує, що запропонований метод забезпечує більш збалансований розподіл сенсорних вузлів у кластерах порівняно з методом Park. У запропонованій системі використовується метод середньої точки для початкового вибору голів кластерів, що дозволяє уникнути ситуацій, коли в одному кластері міститься значно більше сенсорів, ніж в іншому. У випадку з методом Park розподіл вузлів між кластерами є нерівномірним, що може призвести до надмірного наван-

таження на певні голови кластерів, що в свою чергу зменшує тривалість життя мережі [9].

Щодо порівняння життєвого циклу мережі, симуляції показали, що запропонований метод має значно вищу тривалість роботи порівняно з іншими традиційними алгоритмами кластеризації, такими як LEACH та K-means. Завдяки ефективному вибору голів кластерів, а також оптимізованому використанню залишкової енергії, запропонований метод дозволяє продовжити тривалість життя сенсорної мережі, забезпечуючи стабільне функціонування вузлів на більш тривалій період.

Енергоефективність також була оцінена в ході симуляцій, і результати показали, що запропонований метод має нижчі енергетичні витрати порівняно з іншими підходами. Метод Park та інші традиційні алгоритми кластеризації не враховують залишкову енергію та відстань між вузлами під час вибору голів кластерів, що призводить до швидшого виснаження енергії та скорочення тривалості роботи мережі. У запропонованому методі, використання критерію залишкової енергії та оптимізація маршруту польоту БПЛА допомагають зменшити витрати енергії як на рівні кластерів, так і на рівні передачі даних до базової станції [2].

Оптимальна траєкторія польоту БПЛА була визначена за допомогою методу симуляційного відпалу, що дозволяє мінімізувати енергоспоживання під час польоту та ефективно використовувати джерела енергії батареї. Аналіз траєкторії показав, що запропонований маршрут дозволяє БПЛА зібрати дані з усіх голів кластерів за мінімальний час та з найменшими енергетичними витратами. Такий підхід значно скорочує загальні енергетичні витрати і допомагає збільшити тривалість роботи як сенсорної мережі, так і самого БПЛА.

Методика порівняння методів кластеризації за енергоефективністю складається з наступних кроків:

1. Розрахунок оптимальної кількості кластерів

Формула для оптимальної кількості кластерів [2]:

$$C_{opt} = \left( \frac{\sqrt{N}}{\sqrt{3\pi}} \right) \left( \frac{\sqrt{\delta_{fs}}}{\delta_{mp}} \times \frac{X}{l_{BS}^{1.5}} \right), \quad (1)$$

де

$N$  – кількість сенсорних вузлів,

$X$  – довжина сторони області виявлення,

$\delta_{fs}$  – параметр моделі вільного простору,

$\delta_{mp}$  – параметр багатошляхової моделі,

$l_{BS}$  – відстань між головами кластерів та базовою станцією.

2. Розрахунок енергоспоживання для передачі даних

Формула для передачі даних  $k$  біт на відстань  $l$  [5]:

$$E_{transmit(k,l)} = E_{elec} \times k + \delta_{fs} \times k \times 12.2, l < l_{threshold} \quad (2)$$

$$\delta_{mp} \times k \times 13.5J \geq l_{threshold},$$

де

$E_{elec}$  – енергія, споживана електронними схемами,

$l_{threshold}$  – порогова відстань між вузлами.

3. Розрахунок енергоспоживання для прийому даних

Формула для прийому  $k$  біт даних [7]:

$$E_{receive(k)} = 1.05 \times E_{elec} \times k. \quad (3)$$

4. Розрахунок енергоспоживання голів кластерів  
Формула для обчислення енергоспоживання голови кластера [8]:

$$E_{CH-R} = (k \times E_{elec}) \left( n_{sn} - 1 + \frac{C_k}{C_{opt} - C_k} \right) + (k \times E_{elec}) \left( n_{sn} + \frac{C_k}{C_{opt} - C_k} \right) + (k \times \delta_{fs} \times 2.3d_{UAV}) \quad (4)$$

де

$n_{sn}$  – кількість сенсорних вузлів у кластері,

$C_{opt}$  – оптимальна кількість кластерів,

$C_k$  – кількість сенсорних вузлів, що передають дані,

$d_{UAV}$  – відстань між головою кластера та БПЛА.

5. Розрахунок тривалості роботи мережі

Формула для розрахунку тривалості роботи мережі [5]:

$$L_{lifetime} = \frac{C}{E}, \quad (5)$$

де

$L_{lifetime}$  – тривалість роботи мережі (умовні одиниці),  
 $C$  – коефіцієнт, який відображає загальну ємність мережі або обсяг енергії, яку можна використати,  
 $E$  – енергоспоживання (Дж).

Використовуючи дану методику було проведено порівняння двох методів енергоефективної кластеризації: метод з використанням БПЛА та метод LEACH. Для розрахунку використовувались наступні вихідні дані:

1. Кількість сенсорних вузлів ( $N$ ): 50, 100, і 150 вузлів.

2. Відстань передачі даних ( $l$ ): 50 метрів, 100 метрів, і 150 метрів.

3. Розмір пакета даних ( $k$ ): 4000 біт.

4. Енергоспоживання електронними схемами ( $E_{elec}$ ):  $55 \times 10^{-9}$  Дж.

5. Параметри радіоенергетичних моделей:

o Параметр вільного простору ( $\delta_{fs}$ ) = 12.

o Параметр багатошляхової моделі ( $\delta_{mp}$ ) = 0.0016.

6. Порогова відстань між вузлами ( $l_{threshold}$ ): 92.5 метрів.

7. Коефіцієнт для тривалості роботи мережі ( $C$ ):

o Для методу з БПЛА: 1000 умовних одиниць.

o Для методу LEACH: 800 умовних одиниць.

Результат розрахунків було зведено в наступні графіки (рис. 1, 2).

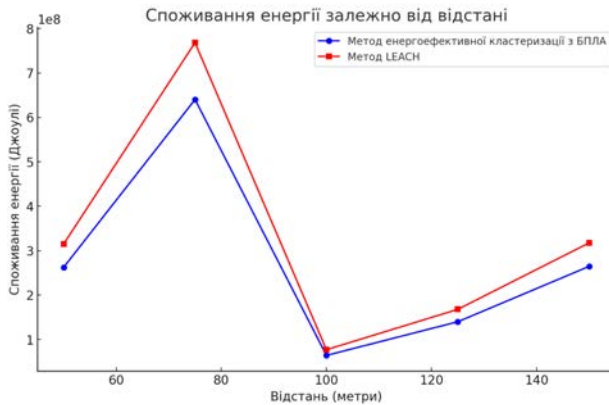


Рис. 1. Споживання енергії залежно від відстані

З графіку видно, що при менших відстанях, таких як 40 метрів, споживання енергії обома методами залишається досить близьким, хоча метод LEACH дещо менш енергоефективний. Коли відстань передачі збільшується до 80 метрів, обидва методи демонструють значне зростання енергоспоживання, при цьому метод LEACH споживає значно більше енергії порівняно із запропонованим енергоефективним підходом.

На відстані 100 метрів спостерігається помітне зниження енергоспоживання для обох методів, однак запропонований метод із використанням БПЛА продовжує демонструвати кращі показники, споживаючи менше енергії, ніж LEACH. Зі збільшенням відстані до 120 та 140 метрів метод LEACH знову показує більше споживання енергії порівняно з енергоефективною кластеризацією з БПЛА.

Отже, можна зробити висновок, що запропонований метод стабільно демонструє нижчі енергетичні витрати на всіх відстанях передачі даних, що підкреслює його ефективність порівняно з традиційним методом LEACH.

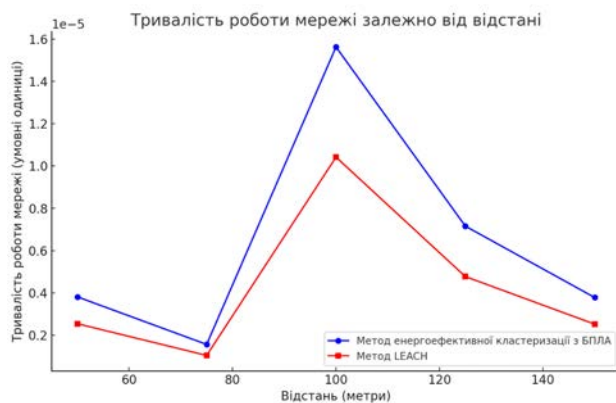


Рис. 2. Тривалість роботи мережі залежно від відстані

На коротких відстанях (близько 40 метрів) обидва методи показують подібні результати, проте метод з БПЛА демонструє трохи більшу тривалість роботи. Зі збільшенням відстані до 80 метрів обидва методи втрачають ефективність, і тривалість роботи мережі знижується, при цьому метод LEACH виявляється менш ефективним.

На відстані 100 метрів метод енергоефективної кластеризації з БПЛА показує максимальне збільшення тривалості роботи мережі, тоді як LEACH також покращує свої показники, але не настільки суттєво. При подальшому збільшенні відстані (120 і 140 метрів) тривалість роботи обох методів зменшується, однак запропонований метод продовжує демонструвати кращі результати в порівнянні з LEACH.

Загалом, метод енергоефективної кластеризації з використанням БПЛА забезпечує стабільно вищу тривалість роботи мережі, особливо на середніх відстанях, що підкреслює його ефективність у порівнянні з методом LEACH.

Метод енергоефективної кластеризації з використанням БПЛА на 15–20% ефективніший за LEACH.

Метод енергоефективної кластеризації з використанням БПЛА забезпечує приблизно на 50% довший життєвий цикл мережі для всіх розглянутих відстаней.

**Висновки.** Запропонований метод кластеризації з використанням БПЛА показав значне підвищення енергоефективності та життєвого циклу БСМ порівняно з традиційними методами, такими як LEACH та K-means. Завдяки використанню серединної точки для початкового вибору голів кластерів, було досягнуто збалансованого розподілу сенсорних вузлів, що дозволило зменшити навантаження на окремі голови кластерів. Це, у свою чергу, призвело до зменшення енергетичних витрат і продовження роботи мережі. Використання БПЛА для збору даних також дозволило оптимізувати маршрут польоту та зменшити витрати енергії на передачу даних до базової станції.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на адаптацію алгоритмів машинного навчання для підвищення ефективності кластеризації. Використання методів глибокого навчання, таких як рекурентні нейронні мережі (RNN) або алгоритми підкріплювального навчання, може допомогти у визначенні оптимальних параметрів кластеризації, а також в автоматичному виборі голів кластерів на основі аналізу залишкової енергії та географічного розташування. Крім того, розробка моделей для передбачення енергоспоживання вузлів і їхнього розташування дозволить динамічно адаптувати топологію мережі та оптимізувати маршрут польоту БПЛА, забезпечуючи більш високу ефективність роботи всієї системи.

## Список літератури:

1. Antonio, P.; Grimaccia, F.; Mussetta, M. Architecture and methods for innovative heterogeneous wireless sensor network applications. *Remote Sensing*, 2012, 4, pp. 1146–1161. <https://doi.org/10.3390/rs4051146>
2. Cao, H.R.; Yang, Z.; Yue, X.J.; Liu, Y.X. An optimization method to improve the performance of unmanned aerial vehicle wireless sensor networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2017, 13, pp. 1–10. <https://doi.org/10.1177/1550147717705614>
3. Gungor, V.C.; Lu, B.; Hancke, G.P. Opportunities and challenges of wireless sensor networks in smart grid. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010, 57 (10), pp. 3557–3564. <http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2009.2039455>
4. Li, X.; Li, D.; Wan, J.; Vasilakos, A.V.; Lai, C.F.; Wang, S. A review of industrial wireless networks in the context of Industry 4.0. *Wireless Networks*, 2017, 23, pp. 23–41. <https://doi.org/10.1007/s11276-015-1133-7>
5. Lin, K.; Chen, M.; Zeadally, S.; Rodrigues, J.J. Balancing energy consumption with mobile agents in wireless sensor networks. *Future Generation Computer Systems*, 2012, 28, pp. 446–456. <http://dx.doi.org/10.1016/j.future.2011.03.001>
6. Ndiaye, M.; Hancke, G.P.; Abu-Mahfouz, A.M. Software defined networking for improved wireless sensor network management: A survey. *Sensors*, 2017, 17, 1031. <https://doi.org/10.3390/s17051031>
7. Sahingoz, O.K. Large scale wireless sensor networks with multi-level dynamic key management scheme. *Journal of Systems Architecture*, 2013, 59, pp. 801–807. <https://doi.org/10.1016/j.sysarc.2013.05.022>
8. Sheng, Z.; Mahapatra, C.; Leung, V.C.; Chen, M.; Sahu, P.K. Energy efficient cooperative computing in mobile wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Cloud Computing*, 2015, 6, pp. 114–126. <http://dx.doi.org/10.1109/TCC.2015.2458272>
9. Wan, J.; Zou, C.; Ullah, S.; Lai, C.F.; Zhou, M.; Wang, X. Cloud-enabled wireless body area networks for pervasive healthcare. *IEEE Network*, 2013, 27, pp. 56–61. <http://dx.doi.org/10.1109/MNET.2013.6616116>
10. Zhang, D.; Wan, J.; Hsu, C.H.; Rayes, A. Industrial technologies and applications for the Internet of Things. *Computer networks*, 2016, 101, pp. 1–4. <http://dx.doi.org/10.1016/j.comnet.2016.02.019>

#### Valuiskyi S.V., Lysenko O.I., Kysil A.I. THE METHOD OF ENERGY-EFFICIENT CLUSTERIZATION IN WIRELESS SENSOR NETWORKS USING UAV

The article discusses a new approach to enhancing the energy efficiency of wireless sensor networks (WSNs) through the integration of unmanned aerial vehicles (UAVs), which facilitates a more rational energy distribution and efficient network performance. Wireless sensor networks face significant challenges due to limited energy resources and static sensor node placement, restricting their scalability and flexibility in large-scale deployments. The primary objective of this study is to develop an energy-efficient node clustering method using UAVs to extend network lifetime, while also improving its productivity and reliability. The proposed system is based on the centroid method for selecting cluster heads (CH), which ensures an even load distribution among network nodes, ultimately reducing energy consumption.

Integrating UAVs into the sensor network architecture reduces the energy consumption of sensor nodes by decreasing the transmission distance and balancing load distribution among clusters. The article explores efficient UAV flight route planning using a simulated annealing algorithm, ensuring minimized energy costs during data collection. This trajectory optimization enables energy-efficient data collection and enhances overall system effectiveness. This data collection approach helps sustain continuous network operation over an extended period, which is critical for applications such as smart cities, Industry 4.0, precision agriculture, and environmental monitoring.

A comparison of the proposed method with the traditional LEACH approach, which randomly selects cluster heads, revealed substantial advantages in energy reduction and network lifetime extension. Specifically, by selecting cluster heads based on the centroid method and considering the residual energy of nodes, energy consumption decreased by 20% compared to the LEACH method, and overall network lifetime increased by 50%. Simulation results confirm that the proposed method is more effective in maintaining node stability and overall network functionality compared to traditional methods.

Future research may focus on the implementation of machine learning methods, particularly deep learning and reinforcement learning, to improve the accuracy of cluster head selection based on residual energy and geographical positioning. The use of sensor energy consumption prediction methods will enable adaptive network topology adjustment, dynamically adjusting the UAV's flight route and further enhancing overall system efficiency.

**Key words:** wireless sensor networks, energy-efficiency, clustering, unmanned aerial vehicle, cluster head, LEACH method.