

УДК 621.396.4

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.2-2/05>**Романюк В.А.**

orcid.org/0000-0002-6218-2327

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

Лисенко О.І.

orcid.org/0000-0002-7276-9279

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Романюк А.В.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Новіков В.І.

orcid.org/0000-0003-4199-9968

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Гуйда О.Г.

orcid.org/0000-0002-2019-2615

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

МЕТОД ЗБОРУ ІНФОРМАЦІЇ З ВУЗЛІВ БЕЗПРОВОДОВОЇ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ З ВИКОРИСТАННЯМ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ АДАПТИВНИХ ЛІТАЮЧИХ ІНФОРМАЦІЙНО-ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ РОБОТІВ

У роботі розглянуто метод збору інформації з вузлів безпроводової сенсорної мережі із використанням інтелектуальних адаптивних літаючих інформаційно-телекомунікаційних роботів (ІАЛІТР). В якості мережі, яку обслуговує ІАЛІТР розглядається безпроводова сенсорна мережа (БСМ). Ключова ідея покладена в розбудову алгоритмів БСМ та ІАЛІТР полягає у гнучкій кластеризації вузлів БСМ, яка надає можливість реалізувати раціональний маршрут руху ІАЛІТР.

Реалізація зазначеної ідеї представлена у вигляді математичної постановки задачі, яка характеризується: технічними та алгоритмічними властивостями мережі, вузлів мережі, ІАЛІТР; вимоги до якості збору інформації (даних), вимоги до системи збору інформації (даних) моніторингу.

При синтезі рішення на борту ІАЛІТР стосовно вибору раціонального способу збору інформації з вузлів БСМ використовується системний підхід, який дозволив: надати алгоритмам функціонування літаючих інформаційно-телекомунікаційних роботів інтелектуальності та адаптивності; сформулювати етапи (складові) методу збору інформації з вузлів БСМ.

Проведено дослідження ефективності вдосконаленого методу збору даних моніторингу при різних вихідних даних: розмірність мережі, кількість кластерів, кількості вузлів в кластері, варіантах побудови методів збору даних, стратегії обльоту вузлів в кластері.

Проведено порівняльне моделювання вдосконаленого безпосереднього методу збору даних ІАЛІТР з існуючим центроїдним методом збору даних моніторингу.

Проведений аналіз чотирьох стратегій обльоту кластера (тільки між центрами точок збору; обліт критичних вузлів; передача в точках, ближчих до маршруту обльоту; кооперативна) показав переваги кооперованої стратегії.

Проведена оцінка ефективності вдосконаленого методу збору даних з головних вузлів кластеризованої мережі показала його переваги відносно існуючих методів даного класу.

Ключові слова: телекомунікаційна аероплатформа, безпроводова сенсорна мережа, інтелектуальний адаптивний літаючий інформаційно-телекомунікаційний робот, кластери, центр управління мережею.

Постановка проблеми. Класична телекомунікаційна аероплатформа (ТА) являє собою базову станцію, яка винесена у тривимірному просторі над підстилаючою поверхнею завдяки використанню літального апарату (“повітряна сота”) або аеростатичного, або гвинтокрилого, або літакового типу [1, 2]. Якщо на борту ТА виконується обробка інформації у режимі реального часу і на основі цієї обробки приймається рішення щодо виконання складних просторових рухів („інтелект дії”), які спрямовані на підвищення ефективності функціональних завдань мережі, яку обслуговує ця ТА, то телекомунікаційну аероплатформу можливо вважати інтелектуальним адаптивним літаючим інформаційно-телекомунікаційним роботом (ІАЛІТР).

В якості мережі, яку обслуговує ІАЛІТР розглядається безпроводова сенсорна мережа (БСМ). Завдання АЛІТР полягає у зборі інформації (даних) з БСМ. Існуючий на сьогодні тривіальний метод збору даних (метод безпосереднього збору даних з кожного сенсорного вузла БСМ окремо [2; 7]) при застосуванні ІАЛІТР не дозволяє використати усі технологічні можливості ІАЛІТР для підвищення ефективності функціонування БСМ (збільшити „час життя” та (або) зменшити час збору інформації і, у підсумку, підвищити надійність, функціональну стійкість та живучість БСМ). Основна перевага тривіального методу полягає у спрощених алгоритмах функціонування і взаємодії БСМ та ІАЛІТР, що призводить до здешевлення апаратних засобів БСМ. Але у багатьох критичних ситуаціях економічна перевага поступається своєю важливістю надійності, функціональній стійкості та живучості БСМ [3-8].

Постановка завдання. Ключова ідея, яка покладена у розробку алгоритмів взаємодії БСМ та ІАЛІТР, полягає у гнучкій (адаптивній) кластеризації вузлів БСМ, яка надає можливість реалізувати раціональний маршрут руху ІАЛІТР. Згідно із цими алгоритмами пропонується об’єднувати вузли в тимчасові кластери, де роль головного вузла кластера покладається на ІАЛІТР. Алгоритм побудови траєкторії руху ІАЛІТР за відомою інформацією про координати положення вузлів БСМ здійснює розрахунок координат точок збору даних та будує траєкторію руху ІАЛІТР („інтелект дії”). У статті, на відміну від існуючих „жорстких” центроїдних алгоритмів кластеризації, пропонується використовувати „адаптивні (гнучкі)” алгоритми кластерного аналізу, які отримали назви відповідно: алгоритм k -середніх та алгоритм фор-

мального елемента (for.el). Ці алгоритми характеризуються меншою обчислювальною складністю та надають можливість адаптивно змінювати розміри кластера і, тим самим, керувати кількістю кластерів [4-7].

Виклад основного матеріалу.

1. Математична постановка задачі

Незмінними вважаємо параметри, які характеризують:

1) технічні та алгоритмічні властивості мережі, вузлів мережі, ІАЛІТР;

2) вимоги до якості збору інформації (даних), вимоги до системи збору інформації (даних) моніторингу.

Керуючими параметрами вважаємо кількість пунктів маршруту руху ІАЛІТР (кількість точок збору інформації (даних), що співпадає із кількістю кластерів n_k) та характеристики траєкторії руху ІАЛІТР між цими пунктами та поблизу цих пунктів; схему обльоту ІАЛІТР пунктів маршруту.

Керуючі параметри впливають на критерії, в якості яких обрано: час збору інформації (даних) $T_{зб}$; час функціонування („життя”) БСМ $T_{ф}$; кількість ІАЛІТР, яку обрано для обслуговування БСМ $N_{ІАЛІТР}$.

Математична постановка задачі набуває вигляду:

$$T_{зб} \rightarrow \min \text{ або } T_{зб} \leq T_{зб\text{зад}}, \quad (1)$$

$$T_{ф} \rightarrow \min \text{ або } T_{ф} \geq T_{ф\text{зад}}, \quad (2)$$

$$N_{ІАЛІТР} \rightarrow \min \text{ або } N_{ІАЛІТР} \leq N_{ІАЛІТР\text{зад}}, \quad (3)$$

$$\text{де } T_{зб} = L_{мб} / v; L_{мр} = f((x, y)_k, h, t_{обк}, St, k = 1 \dots n_k) \quad (4)$$

при виконанні обмежень Ω на:

1) граничний час (відстань) в раунді польоту ІАЛІТР

$$T_{зб} \leq T_{пол\text{макс}} \quad (0 < L_{мб} \leq L_{мр} \leq L_{м\text{макс}}); \quad (5)$$

2) швидкість польоту

$$TA - v = [v_{\min}, v_{\max}]; \quad (6)$$

3) кількість кластерів – $1 \leq k \leq n_k$;

4) енергію батарей вузлів і ІАЛІТР – $e_i \leq e_{\max}$, $e_{ІАЛІТР} \leq e_{ІАЛІТР\text{макс}}$;

5) координати розташування (x, y) вузлів знаходяться в області покриття зони моніторингу A ;

6) висоту польоту – $h = [h_{\min}, h_{\max}]$;

7) обсяги буферів $V_{буф\text{вузл}i} \leq V_{буф\text{вузл}\text{макс}}$; $V_{буфІАЛІТР} \leq V_{буфІАЛІТР\text{макс}}$;

8) вимоги моделей обслуговування, наприклад, при гарантованій якості обслуговування час обльоту кожного k -го кластера $t_{обклk}$ повинен бути більшим ніж сумарний час передачі між всіма вузлами і ТА – $t_{обклk} \geq t_{перk}$;

9) St – множину стратегій (схем) обльоту.

2. Синтез рішення інтелектуальним адаптивним літаючим інформаційно-телекомунікаційним роботом

При синтезі рішення на борту ІАЛПТР стосовно вибору раціонального способу збору інформації з вузлів БСМ використовується системний підхід, складові якого представлені на рис. 1.

Системний підхід дозволяє:

- 1) надати алгоритмам функціонування ЛПТР інтелектуальності та адаптивності;
- 2) сформулювати етапи (складові) методу збору інформації з вузлів БСМ.

Розглянемо детальніше складові методу збору інформації з вузлів БСМ.

1. Спосіб безпосереднього збору даних з кожного вузла мережі – з обльотом кожного вузла, з обльотом території (де розташована БСМ), з обльотом кластерів БСМ.

2. Спосіб оптимізації операцій стосовно управління – ізольовано (центр управління мережею, система управління ІАЛПТР, система управління вузла БСМ або кооперовано – у взаємодії між ними; при наявності або відсутності інформації про стан вузлів БСМ у ІАЛПТР (ЦУ мережею); централізовано або децентралізовано.

3. Порядок та правила кластеризації БСМ:

а) розрахувати кількість і розміри кластерів (повинна бути проведена оптимізація кількості та розмірів кластерів в залежності від різних цільових функцій управління мережею на етапі збору даних);

б) провести кластеризацію мережі і визначити точки збору даних моніторингу за певними параметрами в залежності від цільових функцій управління мережею і ситуації в мережі;

в) визначити моделі (алгоритми) обміну даними між ІАЛПТР і вузлами кластера;

г) розрахувати стратегії та параметри обльоту ІАЛПТР вузлів в кластерах по заданим цільовим функціям (побудова, оптимізація та корегування шляху обльоту ІАЛПТР вузлів в залежності від цільових функцій управління та наявних ресурсів ІАЛПТР і вузлів БСМ).

При наявності інформації про стан БСМ ці завдання вирішуються централізовано центром управління мережею (ЦУМ). При її відсутності – децентралізовано: ІАЛПТР і вузлами мережі у взаємодії.

4. Побудувати маршрути обльоту точок збору даних ІАЛПТР: базового (обльоту всієї мережі БСМ) та маршрутів обльоту кожного з кластерів. Наприклад, базові параметри польоту розраховує ЦУМ, а ІАЛПТР здійснює коригування базового маршруту в кластерах після отримання інформації про стан вузлів кластера при підльоті до нього та наявності відповідних ресурсів.

5. Визначити критерії та їх пріоритет при управлінні процесом збору даних, а саме: мінімізація часу збору даних, максимум часу функціонування БСМ, мінімум ІАЛПТР, мінімізація витрат енергії вузлів в процесі передачі від вузлів до ІАЛПТР, тощо.

6. Визначити модель польоту на основі наявності або відсутності інформації про координати знаходження вузлів БСМ, з постійною або адаптивною швидкістю, з гарантією обслуговування або її відсутністю.

7. Моделі польоту ІАЛПТР при зборі даних моніторингу з БСМ.

Формування та реалізація параметрів польоту ІАЛПТР відбувається в два етапи.

На першому – центр управління мережею будує базовий найкоротший маршрут з обльоту

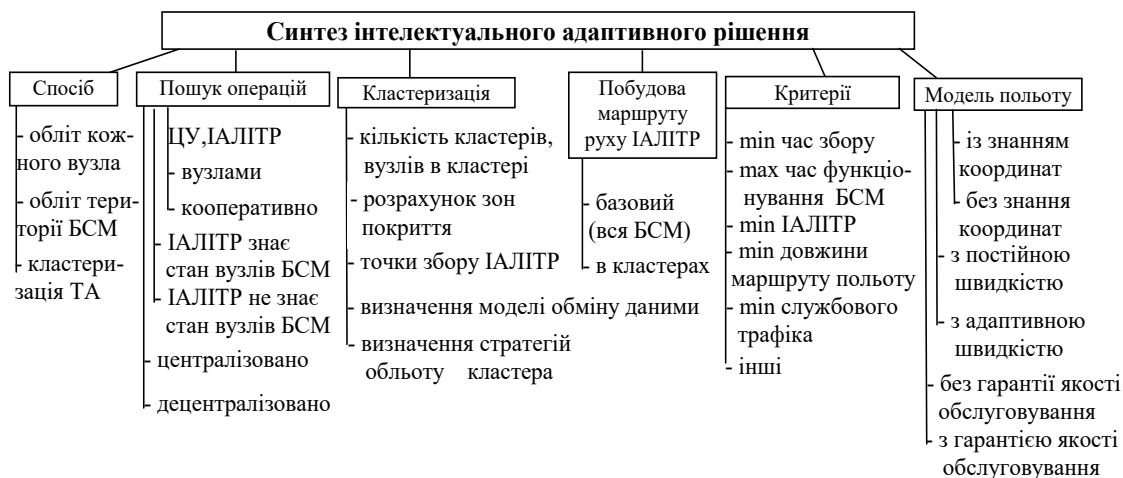


Рис. 1. Структура системного підходу стосовно вибору раціонального способу збору інформації з вузлів БСМ

точок збору даних в БСМ одним з відомих алгоритмів вирішення задачі комівояжера [7, 60, 61], (наприклад, метод найближчого сусіда) визначає середню швидкість і висоту польоту.

На другому – при підльоті до чергового кластера ІАЛІТР коригує параметри свого обльоту (траєкторію, швидкість, якість обслуговування) в залежності від кількості вузлів в кластері, параметрів вузлів кластера (місцеположення, наявна енергія батарей вузлів та обсяги даних моніторингу), наявних особистих ресурсів (енергії та часу, що залишився на політ) і цільових функцій управління мережею. Так, наприклад, при існуванні „критичних” вузлів в кластері („виснажених”, „перевантажених” тощо) їх обліт (обслуговування) пропонується здійснювати на мінімальній відстані до них з пріоритетом в обслуговуванні. Для забезпечення гарантії часу збору даних розраховується та реалізується необхідна швидкість польоту (зависання ІАЛІТР в певній точці простору на потрібний час).

Середній час польоту (в цілому збору даних) в мережі $T_{зб}$ визначається співвідношенням довжини маршруту обльоту L_m до середньої швидкості польоту v : $T_{зб} = L_m/v$. Максимальний час обльоту визначає найпростіша стратегія збору даних ІАЛІТР – безпосередньо з кожного вузла – $T_{збmax} = L_{mmax}/v$, мінімальний час (при даному рішенні по кластеризації) дорівнює $T_{збmin} = L_{min}/v$, де L_{min} – мінімальна довжина маршруту, що охоплює всі точки збору мережі за умови, що час, необхідний для збору (передачі) даних в кожному k -му кластері, буде менше часу його обльоту $t_{перк} \leq t_{обк}$ (при гарантованому обслуговуванні всіх даних моніторингу).

Скорочення довжини маршруту польоту призводить до зменшення часу збору інформації і зменшення витрати енергії ІАЛІТР, але збільшує витрати енергії сенсорних вузлів через збільшення відстані в радіоканалах вузол- ІАЛІТР.

Більш детально час збору даних $T_{зб}$ залежить від: вимог додатків, середньої швидкості польоту v , кількості сформованих кластерів мережі $n_{кл}$, розташування $(x, y)_k$ точок збору даних, базової довжини маршруту $L_{мб}$ (реальна довжина маршруту $L_{мр}$ буде збільшуватимуся через застосування різних стратегій обльоту кластерів), висоти польоту h , часу обльоту кожного k -го кластера мережі $t_{обклk}$, швидкості передачі в радіоканалі вузол- ІАЛІТР, стратегії обльоту при обслуговуванні кожного k -кластера St_k , можливостей та ресурсу ІАЛІТР.

При цьому доцільно розглядати різні моделі польоту.

1. Базова найпростіша модель.

Політ з однаковою постійною швидкістю в кластері та між кластерами спрощує управління переміщенням ІАЛІТР, не висуває додаткових вимог до БПЛА, може використовуватися як гвинтокрилий так й літаковий тип БПЛА. Збір даних починається при встановленні радіозв'язку з першим вузлом кластера. Час збору дорівнює часу польоту через кластер. Дані, які вузли не встигли передати, зберігаються в вузлах до наступного раунду польоту. При прильоті до зони радіозв'язності з базовою станцією ІАЛІТР передає їй дані та починає новий цикл обльоту. Модель може бути реалізована як роторним так і літаковим типом БПЛА.

2. Політ ІАЛІТР з однаковою постійною швидкістю достатньою для обслуговування кластера та з підвищеною швидкістю (визначається можливостями БПЛА) при переміщенні між кластерами.

Для реалізації моделі необхідні БПЛА зі змінною швидкістю польоту. Ця модель може бути реалізована як роторним так і літаковим типом БПЛА.

3. Політ з адаптивною швидкістю в кластерах.

Для визначених типів додатків може бути необхідна різна швидкість обміну даними, яка визначається зовнішніми факторами такими як надзвичайна ситуація. Наприклад, деякі вузли можуть мати спеціальні можливості збору та передачі аудіо та відео даних, які можуть бути потрібними в певні моменти часу (поява порушника в зоні контролю, висока температура, тиск та вібрація в трубопроводі тощо). Крім цього для гарантованого збору даних необхідно адаптувати швидкість передачі до необхідного часу передачі даних.

Рішення про збільшення або зменшення часу збору інформації приймається ЦУМ або СУ ІАЛІТР разом з вузлом-джерелом цих даних. Можуть бути використані БПЛА гвинтокрилого та літакового типу.

4. Політ з гарантованим обслуговуванням вузлів кластера.

ІАЛІТР розраховує час обслуговування всіх вузлів при постійній швидкості передачі. При браку часу вираховується додатковий час. Необхідно відмітити, що ця модель може бути використана в сценаріях надзвичайних ситуацій або спеціальних місіях, де моніторинг певного географічного району або „гарячої точки ” вимагається за певний період часу.

Модель може бути використана для передачі трафіку реального часу. Використовуються БПЛА роторного типу.

5. Політ з обмеженням максимального часу обслуговування кластера (вузла).

Вузол певного кластера в змозі зібрати досить великий обсяг даних, що вимагає дуже значного часу його обслуговування. Одночасно час інші вузли теж очікують обслуговування в цьому циклі польоту, час затримки в обслуговуванні певних додатків може бути перевищений, буфери інших вузлів кластера можуть бути переповнені тощо. Тому для справедливого обслуговування встановлюється граничний час обслуговування для кожного кластера. Якщо кількість даних в кластері не може бути обслужена в період цього циклу обльоту, тоді не обслужена частина даних переноситься на наступний раунд польоту. Використовуються БПЛА гвинтокрилого типу. Ця модель також може бути застосована для забезпечення безпеки системи збору даних в цілому. Вона запобігає захопленню ІАЛПТР вузлом супротивника, який виставив вимогу безмежно великого буферу та організує атаку типу „вимога в обслуговуванні” (DoS-атака).

3. Математичне моделювання

Модель мережі: неоднорідна БСМ, наземні вузли якої випадковим чином розподілені на певній території, мають однакові функції та ресурси, стаціонарні, не обслуговуються, не змінюють свого місця розташування, оснащені системою позиціонування (наприклад, GPS).

Вважаємо, що ІАЛПТР і сенсорні вузли оснащені однаковим радіообладнанням і підтримують однакові протоколи інформаційного обміну (наприклад, IEEE 802.11), мають обмежені дальність радіозв'язку і швидкість обміну. Кожен вузол мережі має власну систему управління, діє в кооперації з ІАЛПТР (при необхідності з іншими вузлами мережі), має достатній об'єм пам'яті для зберігання даних моніторингу.

ІАЛПТР має можливість переміщатися в трьох вимірах із постійною або змінною швидкістю на обмеженій висоті та обмежений час. ІАЛПТР має власну систему управління, яка дозволяє самостійно приймати свої рішення в умовах відсутності зв'язності з центром управління мережею. Коли в зону радіозв'язку вузла входить ІАЛПТР, він відправляє йому зібрані дані моніторингу згідно прийнятої моделі обміну.

Вважається, що ІАЛПТР має інформацію про координати вузлів, які можуть бути отримані одним із таких способів:

1. На етапі розгортання наземних мереж при детермінованому розміщенні вузлів фіксуються координати кожного з вузлів при його розміщенні.

2. У разі випадкового розгортання вузлів мережі ІАЛПТР здійснює первинний обліт території, що покривається наземними вузлами БСМ, і збирає дані про координати вузлів в припущенні наявності в вузлах системи позиціонування. В цьому випадку маршрут польоту будується з метою покриття всієї території спостереження. В процесі обльоту ІАЛПТР збирає як інформацію моніторингу, так інформацію про стан вузлів і кластерів для подальшого планування завдань управління.

3. При наявності зв'язної топології вузлів БСМ з наземним шлюзом з'являється можливість збору центром управління інформації про стан і координати розташування сенсорних вузлів.

Будемо вважати, що зона радіозв'язку ІАЛПТР з вузлами являє собою коло (кластер) радіуса R , а зчитування інформації з вузлів БСМ може проводитися в довільних точках кластера.

Необхідно: знайти мінімальну кількість точок збору інформації (центрів кластерів) з вузлів БСМ та координати цих точок у просторі.

Завдання полягає в покритті вихідної множини точок (вузлів) мережі мінімальною кількістю кіл радіуса R . Задано:

зона покриття A , множина сенсорів $S = \{s_1, s_2, \dots, s_i, \dots, s_n\}$, $i = 1 \dots n$ та їх координати на місцевості $X = \{x_1, \dots, x_i, \dots, x_n\}$;

h – висота польоту ІАЛПТР;

d_{\max} – дальність радіозв'язку між сенсорним вузлом і ІАЛПТР у припущенні граничної моделі радіоканалу;

R – радіус зони покриття ІАЛПТР, $R = \sqrt{d_{\max}^2 - h^2}$;

множина ІАЛПТР $U = \{u_1, u_2, \dots, u_k, \dots, u_K\}$, $k = 1 \dots K$, проекція їх положення на місцевості $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_k, \dots, y_K\}$.

Необхідно: знайти мінімальну кількість ІАЛПТР (кластерів $C = \{C_1, C_2, \dots, C_j, \dots, C_J\}$, $j = 1, J$) і розташування їх у просторі (центрів зон покриття ІАЛПТР з радіусом R), для покриття всіх вузлів мережі (рис. 2).

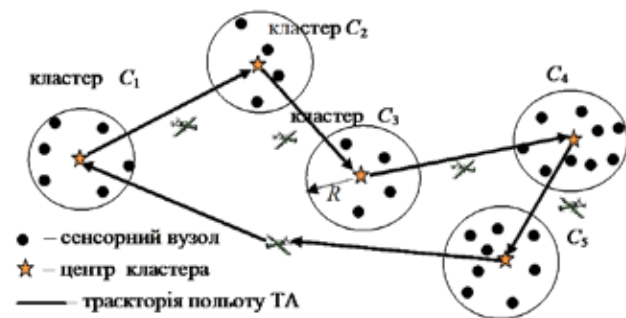


Рис. 2. Варіант кластеризації мережі та переміщення ІАЛПТР між точками збору – центрами кластерів

Математична постановка задачі щодо мінімізації кількості кластерів:

$$K \rightarrow \min \quad (7)$$

при виконанні обмежень

$$\min_{y_1, y_2, \dots, y_K} \max_j \min_{x \in C_j} |x - y_k| \leq d_{\max}, k = \overline{1, K}, j = \overline{1, J}, \quad (8)$$

$$q_j \leq q_{j\max}, \quad (9)$$

$$K \leq K_{\max}, R = [R_{\min} \dots R_{\max}], h = [h_{\min} \dots h_{\max}], \quad (10)$$

де $|x - y|$ – Евклідова відстань між крапками x та y на місцевості, q_j – кількість сенсорних вузлів в j -му кластері. Фізичний зміст обмежень полягає в наступному: нерівність (8) – максимальна відстань між центром зони покриття та сенсорними вузлами повинна бути мінімізована; нерівність (9) визначає граничну кількість вузлів в кластерах; (10) – задає ресурсні обмеження.

Ця задача відноситься до класу обчислювальної геометрії та близька до задачі розміщення p -центрів – знаходження мінімальної кількості кіл фіксованого радіуса та їх положення, що покривають задану кількість точок [64]. Завдання є NP -повним, одержання точного рішення задачі для мереж великої розмірності є складним, тому для її вирішення необхідно використовувати евристичні методи пошуку. Для отримання рішення пропонується використовувати ітераційні алгоритми кластерного аналізу формального елементу (for-el) та k -середніх [65; 66].

Результати моделювання

Розглянемо результати моделювання для наступних основних вихідних даних. Однорідні вузли БСМ розташовані випадковим чином на певній площині. Кількість сенсорних вузлів – $N = 400$. Кількість вузлів в кластері – $n_k = 10, 20, 50$. Початкова енергія вузлів – $e_0 = 0.1$ J. Дальність радіозв'язку – $d_{\max} = 250$ м, максимальна висота польоту ІАЛІТР – $h_{\max} = 250$ м, максимальна швидкість польоту – $v_{\max} = 10$ м/с, кількість раундів обльоту – $NR_{\text{зад}} = 700$. Протокол доступу до каналу IEEE 802.11g, розмір даних моніторингу вузла – 100 Кб.

Будем розглядати та порівнювати наступні методи збору даних за відповідними класами:

1. Відомий метод безпосереднього збору при центроїдній кластеризації.

2. Вдосконалений (запропонований у статті) метод безпосереднього збору даних з вузлів ІАЛІТР при реалізації різних стратегій (правил обльоту та обміну даними в кластерах):

а) стратегія № 1 – точка збору даних ІАЛІТР тільки в центрі кластера;

б) стратегія № 2 – збір інформації ІАЛІТР з врахуванням правил обльоту „критичних” вузлів;

в) стратегія № 3 – збір інформації ІАЛІТР з врахуванням правил обміну з вузлами, ближчими до траєкторії обльоту кластера;

г) стратегія № 4 – збір інформації ІАЛІТР з вузлів при кооперативній роботі по створенню міні-кластерів та побудови енергоефективних маршрутів до вузлів, які знаходяться ближче до маршруту обльоту кластера;

Ефективність функціонування методів будемо порівнювати за критеріями: час збору даних моніторингу $T_{\text{зб}}$ та час функціонування БСМ – $T_{\text{ф}}$ (за фізичним змістом – це час від початку роботи БСМ до моменту часу, коли в наслідок інформаційного обміну буде витрачено увесь запас енергії акумуляторної батареї останнього вузла. Якщо $T_{\text{ф}} = 100\%$ – це означає що немає працездатних вузлів для передачі даних, тобто в останньому вузлі залишок енергія споживання $e_{\text{ст}}$ стає нулем. Чим вище значення $T_{\text{ф}}$, тим менша кількість працездатних вузлів залишається в мережі). Моделювання та розрахунки здійснено в системі комп'ютерної математики MATLAB.

На рис. 3 наведені залежності часу збору даних від методу збору (центроїдний та вдосконалений методи збору даних) при різній кількості вузлів в віртуальному кластері $n_k = 10, 20, 50$. Можемо спостерігати переваги вдосконаленого методу безпосереднього збору даних. Час збору даних при цьому методі зменшується на 10 – 15% за рахунок зменшення кількості точок обльоту (застосування алгоритму кластерного аналізу for-el).

На рис. 4. наведені залежності часу функціонування БСМ від методу збору (центроїдний та безпосереднього збору даних) при різній кількості вузлів в віртуальному кластері $n_k = 10, 20, 50$. Вдосконалений метод безпосереднього збору даних дозволяє збільшити час функціонування мережі на 12 – 17 % за рахунок застосування правил зменшення витрат енергії вузлами при обміні з ТА.

На рис. 5–8 наведені результати моделювання застосування запропонованих правил зменшення витрат вузлів при реалізації вдосконаленого методу безпосереднього збору даних ІАЛІТР. На цих рисунках горизонтальна вісь являє собою кількість ітерацій, що означає кількість раундів обльоту ІАЛІТР.

Зменшення середньої енергії споживання вузлом $e_{\text{ст}}$ зі збільшенням раундів обльоту обумовлюється тим, що залишається менша кількість працездатних вузлів. Це пояснюється тим, чим менша кількість вузлів, тим менше мож-

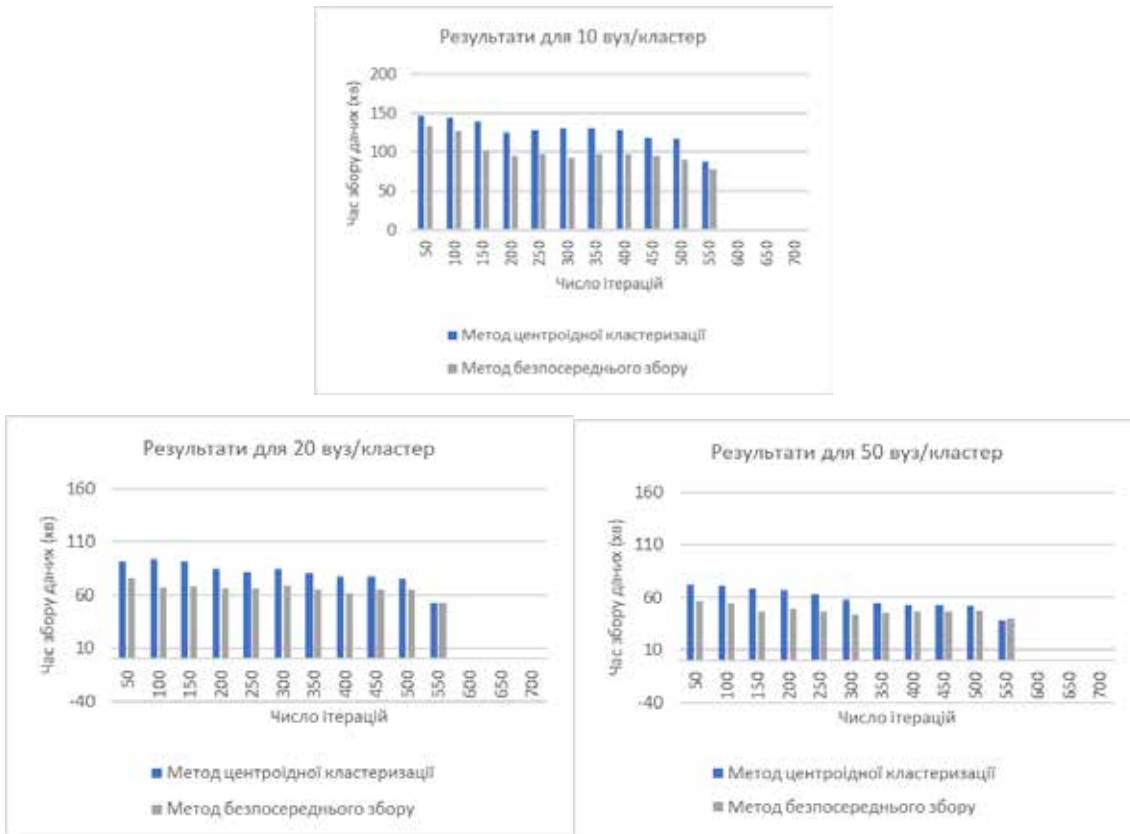


Рис. 3. Залежність часу збору даних від методу збору при різній кількості вузлів в кластері $n_k=10, 20, 50$

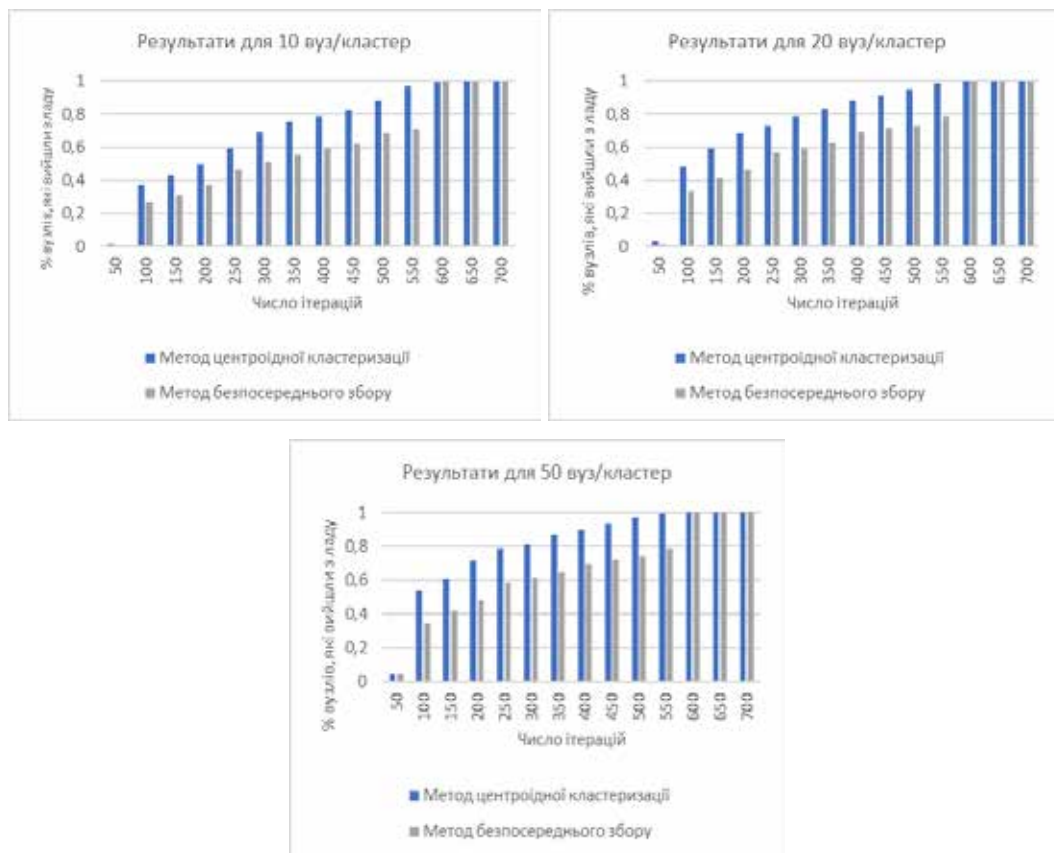


Рис. 4. Залежність часу функціонування БСМ від методу збору при різній кількості вузлів в кластері $n_k=10, 20, 50$

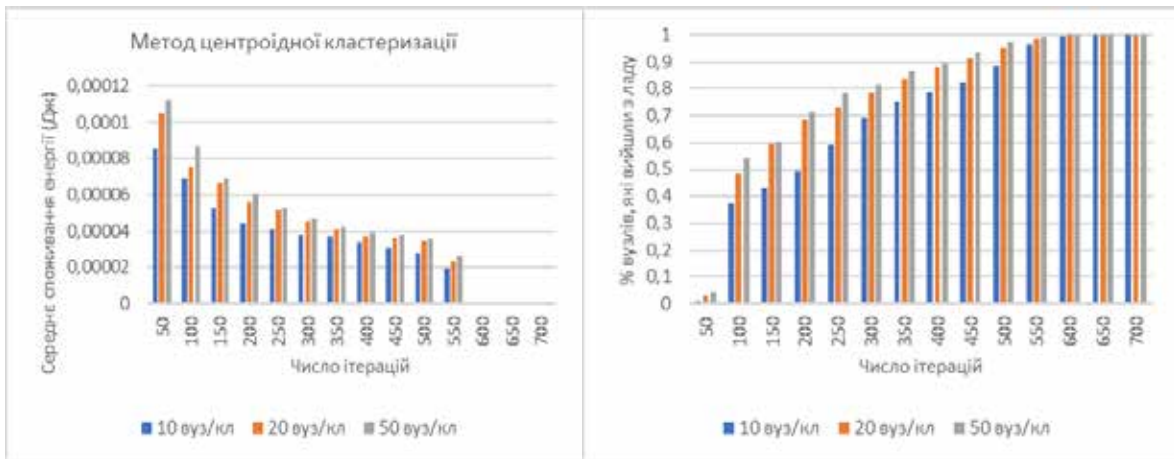


Рис. 5. Середнє споживання енергії вузла і відсоток виходу з ладу вузлів при обльоті ІАЛІТР тільки центрів кластерів (стратегія № 1)

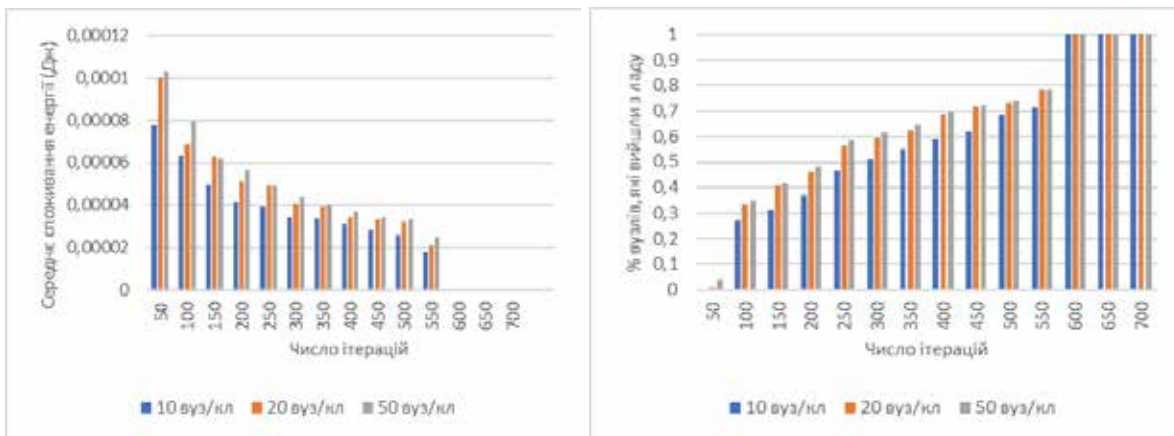


Рис. 6. Середнє споживання енергії вузла і відсоток виходу з ладу вузлів при обльоті критичних вузлів (стратегія № 2)

ливостей витратити багато енергії завдяки відокремленим вузлам. Отже, значення середньої енергії, яка споживається всіма вузлами в кластері незначне.

На рис. 5 (зліва) показані значення $e_{\text{сп}}$ і $T_{\text{ф}}$ для стратегії № 1 (ТА летить над центром кластера), на рис. 5 (справа) – для стратегії № 2 (ТА летить над вузлом, який має найменший рівень енергії та потім через центр кластера).

На рис. 7 наведені результати моделювання стратегії № 3 (вузли, які ближчі до маршруту обльоту кластера, передають дані).

З результатів моделювання, які наведені на рис. 5–7, спостерігається загальна тенденція – зі збільшенням раундів збору даних ІАЛІТР зменшується середня енергія споживання та збільшується кількість непрацездатних вузлів в мережі. Це пояснюється наступним: на початкових раундах обльоту кожний кластер містить багато працездатних вузлів, але ця кількість зменшується зі зростанням кількості раундів обльоту.

Кращі результати серед трьох стратегій продемонструвала стратегія № 3 (рис 5) (найменше споживання енергії і найменший відсоток непрацездатних вузлів) у порівнянні з результатами у попередніх двох стратегій.

Застосування кооперативної стратегії № 4 (маршрутизація даних з вузлів кластера до вузла, який знаходиться ближче до траєкторії польоту ІАЛІТР з використанням енергоефективних метрик пошуку маршруту) показало помітну перевагу в низькому споживанні енергії та часі функціонування мережі (рис. 8).

Так після 600 раундів, в усіх трьох стратегіях різко знижується кількість працездатних вузлів (стратегії № 1 – 3), але 40% працездатних вузлів залишається при використанні стратегії № 4. Показано, що щільніше розташування вузлів призведе до меншого енергоспоживання і більшої тривалості часу функціонування. Це є результатом використання енергоефективної метрики побудови маршруту для пошуку маршрутизатора з більшою енергією батареї.

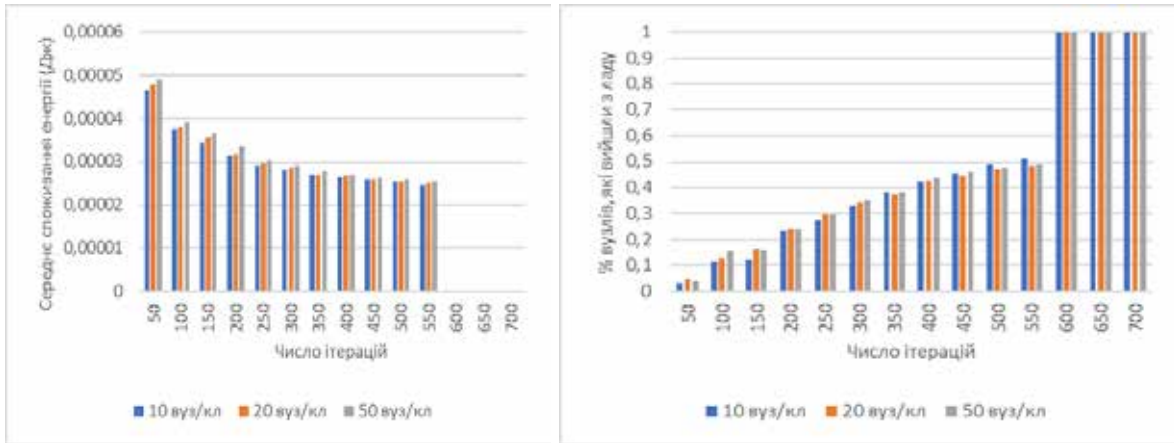


Рис. 7. Середня витрата енергії на вузол та відсоток виходу з ладу вузлів при кооперованій стратегії обльоту (стратегія № 3)

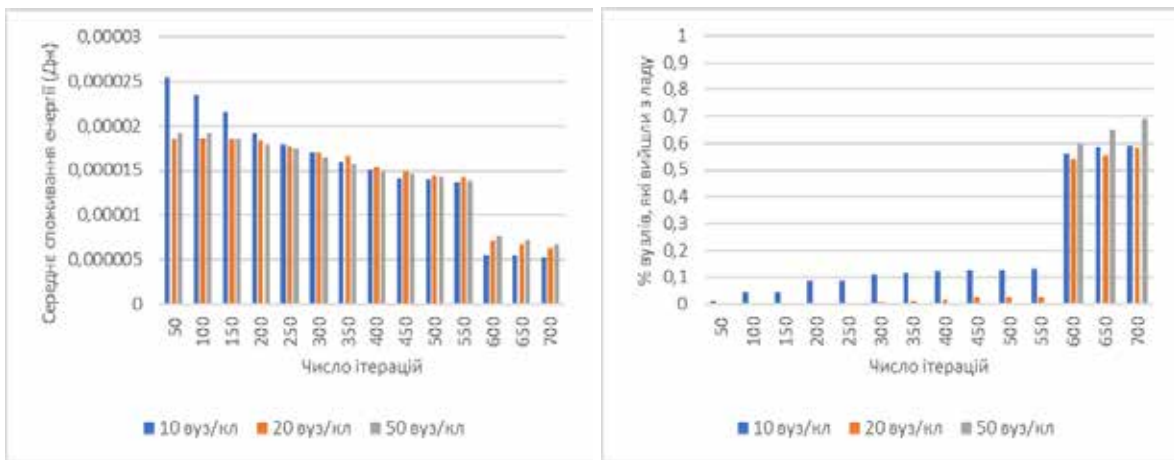


Рис. 8. Середнє споживання енергії та відсоток непрацездатних вузлів при використанні енергоефективних метрик вибору маршруту (стратегія № 4)

На рис. 9 та 10 наведені результати моделювання вдосконаленого методу збору даних ІАЛІТР з головних вузлів кластера в порівнянні з методом свого класу (HEED) за показниками час збору даних та час функціонування мережі.

У запропонованого методу в порівнянні з методом HEED час збору даних менший в середньому на 14% за рахунок використання та пріоритету метрики вибору головного вузла кластера – коротша відстань до траєкторії польоту ІАЛІТР. Виграш збільшується з зростанням частки вузлів, які відмовили. Витрати енергії вузлів при реальній кластеризації в запропонованому методі зменшуються на 10 – 15% внаслідок застосування енергозберігаючих правил побудови топології кластерів, вирівнювання витрат енергії вузлів при побудові маршрутів передачі в кластері (вибираються з множини можливих маршрутів передачі між вузлом та ГВК маршрути, які мають мінімум витрат енергії на передачу та вузли, рівень батареї яких не перевищують граничний рівень).

Висновки. Проведено дослідження ефективності вдосконаленого методу збору даних моніторингу при різних вихідних даних: розмірність мережі, кількість кластерів, кількості вузлів в кластері, варіантах побудови методів збору даних, стратегії обльоту вузлів в кластері.

Результати порівняльного моделювання вдосконаленого безпосереднього методу збору даних ІАЛІТР з існуючим центроїдним методом збору даних моніторингу продемонстрували, що час збору даних з вузлів ІАЛІТР при застосуванні вдосконаленого методу зменшується на 10 – 15% за рахунок зменшення точок обльоту (застосування алгоритму кластерного аналізу for-el). Вдосконалений метод дозволяє збільшити час функціонування мережі на 12 – 17% за рахунок застосування правил зменшення витрат енергії вузлами при обміні з ІАЛІТР.

Проведений аналіз чотирьох стратегій обльоту кластера (тільки між центрами точок збору; обліт критичних вузлів; передача в точках, ближчих до

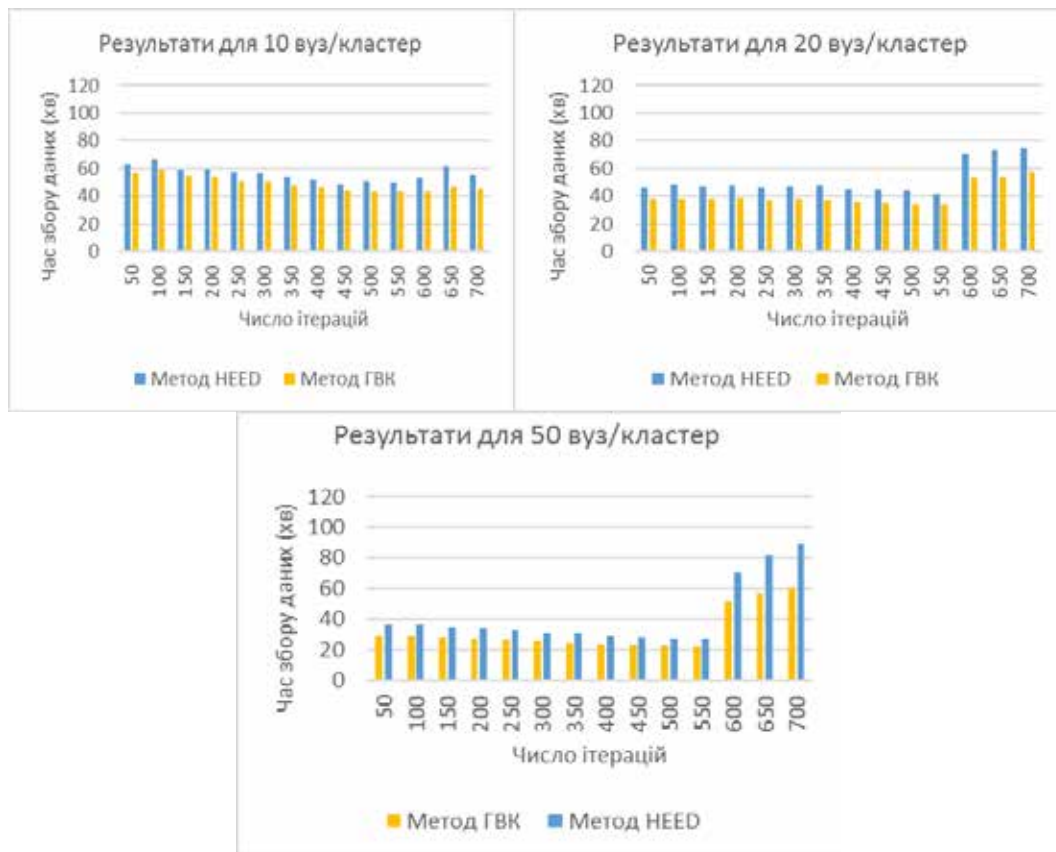


Рис. 9. Залежності часу збору даних з БСМ ІАЛІТР для методу HEED та запропонованого вдосконаленого методу збору з головних вузлів

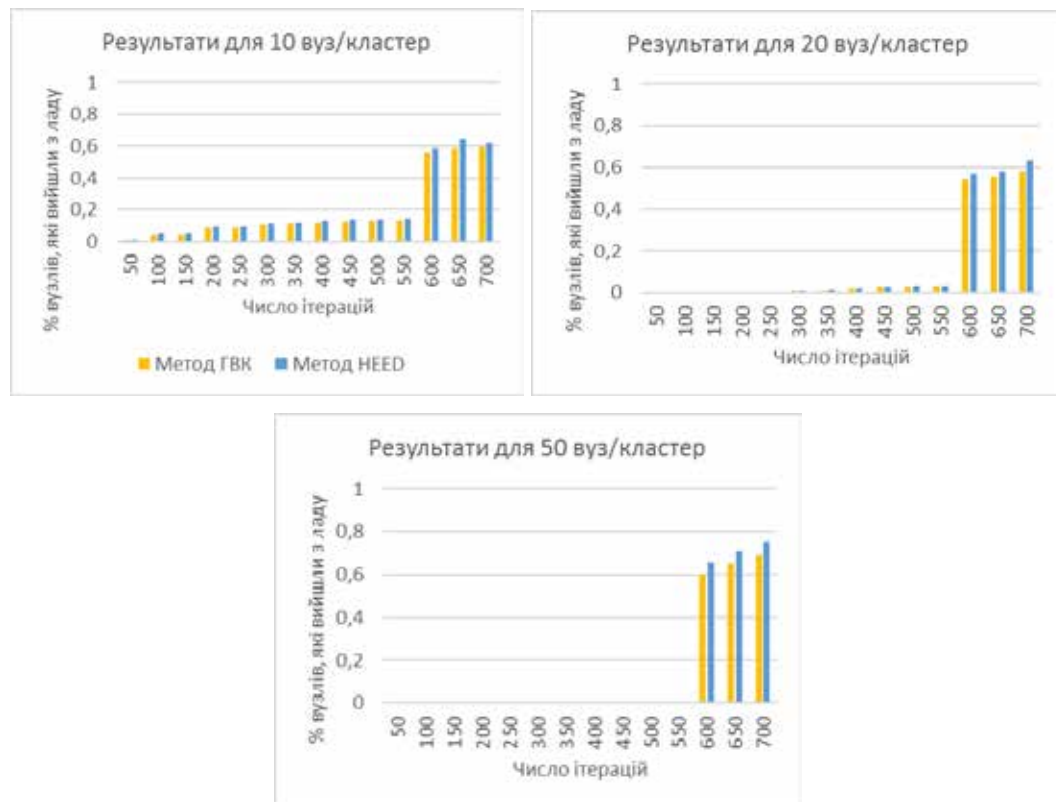


Рис. 10. Залежності часу функціонування БСМ для методу HEED та запропонованого методу збору з головних вузлів ТА

маршруту обльоту; кооперативна) показав переваги кооперованої стратегії, яка дозволяє в порівнянні з іншими до 15 % зменшити витрати енергії вузлів в кластерах.

Проведена оцінка ефективності вдосконаленого методу збору даних з головних вузлів

кластеризованої мережі показала його переваги відносно існуючих методів даного класу. В порівнянні з методом кластеризації HEED вдосконалений метод дозволяє скоротити час збору даних моніторингу в середньому на 14 %, збільшити час функціонування мережі на 10 – 15 %.

Список літератури:

1. Dan Popescu, Florin Stoican, Grigore Stamatescu, Oana Chenaru and Loretta Ichim A Survey of Collaborative UAV–WSN Systems for Efficient Monitoring. *Sensors* 2019, 19 (21), 4690, <https://doi.org/10.3390/s19214690>.
2. Бунин С.Г. Самоорганізуючіся радіосети со сверхширокополосными сигналами / С.Г. Бунин, А.П. Войтер, М.Е. Ильченко, В.А. Романюк. – К: НПП „Издательство „Наукова думка” НАН України”. – 444 с.
3. Романченко І.С. Моделі застосування інформаційно-телекомунікаційних технологій на основі безпілотних авіаційних комплексів у надзвичайних ситуаціях / І.С. Романченко, С.Л. Данилюк, С.М. Чумаченко [та ін.]. – К: НАУ, 2016. – 232 с.
4. Романюк А.В. Алгоритм временной кластеризации узлов беспроводных сенсорных сетей для сбора информации мониторинга с использованием БПЛА / А.В. Романюк // Міжвідомчий науково-технічний збірник „Адаптивні системи автоматичного управління”. – № 2 (33). – 2018. – С. 106 – 117. <https://doi.org/10.20535/1560-8956.33.2018.164680>.
5. Романюк А.В. Метод доступу до радіоканалу вузлами безпроводної сенсорної мережі при зборі даних моніторингу телекомунікаційними аероплатформами / А.В. Романюк // Збірник наукових праць ВІТІ. – 2018. – № 4. – С. 84 – 91.
6. Романюк А.В. Задачі управління збором даних моніторингу БПЛА в безпроводових сенсорних мережах / А.В. Романюк // Збірник наукових праць ВІТІ. – 2018. – № 2. – С. 103 – 112.
7. Романюк А.В. Цільові функції управління вузлами безпроводних сенсорних мереж для моніторингу об'єктів критичної інфраструктури / А.В. Романюк // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Том 28 (67). – № 2, – 2017. – С. 49 – 54. ISSN 1606-3721.
8. Lysenko O. Optimal control of telecommunication airplatforms in the area of emergency / O. Lysenko, S. Valuiskyi, P. Kirchu, A. Romaniuk // *Telecommunication Sciences*. – 2013. – vol. 4. – № 1. – P. 14 – 20.

Romaniuk V.A., Lysenko O.I., Romaniuk A.V., Novikov V.I., Guida O.H. METHODS OF GATHERING INFORMATION FROM A NODE OF WIRELESS SENSOR NETWORKS WITH INTELLIGENT ADAPTIVE INFORMATION AND TELECOMMUNICATION FLYING ROBOT

The paper considers the method of collecting information from the nodes of the wireless sensor network using intelligent adaptive flying information and telecommunication robots (IAFITR). The wireless sensor network (WSN) is considered as a network served by IAFITR. The key idea is to build algorithms WSN and IAFITR is a flexible clustering of nodes WSN, which provides an opportunity to implement a rational route of movement IAFITR.

The implementation of this idea is presented in the form of a mathematical formulation of the problem, which is characterized by: technical and algorithmic properties of the network, network nodes, IAFITR; requirements for the quality of information (data) collection, requirements for the system of information (data) monitoring.

When synthesizing the solution on board IAFITR regarding the choice of a rational method of collecting information from the nodes of BSM, a systematic approach is used, which allowed: to give algorithms to the functioning of flying information and telecommunication robots intelligence and adaptability; formulate the stages (components) of the method of collecting information from the nodes of the WSN.

A study of the effectiveness of the improved method of monitoring data collection with different source data: network size, number of clusters, number of nodes in the cluster, options for constructing data collection methods, flight strategy of nodes in the cluster.

Comparative modeling of the improved direct method of data collection IAFITR with the existing centroid method of data collection of monitoring is carried out.

The analysis of the four cluster flight strategies (only between the centers of collection points; flight of critical nodes; transmission at points closer to the flight route; cooperative) showed the advantages of the cooperative strategy.

The evaluation of the efficiency of the improved method of data collection from the main nodes of the clustered network showed its advantages over the existing methods of this class.

Key words: telecommunication air platform, wireless sensor network, intelligent adaptive flying information and telecommunication robot, clusters, network control center.