

УДК 004.738

doi:10.20998/2413-4295.2025.02.05

## МЕТОД ФОРМУВАННЯ ЗОН ПОКРИТТЯ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ З НЕРІВНОМІРНОЮ ЩІЛЬНІСТЮ ВУЗЛІВ

О. М. ВОРОНЕЦЬ\*, П. Є. ПУСТОВОЙТОВ

Кафедра «Системи інформації ім. В.О. Кравця», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, УКРАЇНА

\*e-mail: oleksandr.voronets@infiz.khpi.edu.ua

**АНОТАЦІЯ** Представлено новий метод формування зон покриття у бездротових сенсорних мережах з нерівномірною щільністю вузлів, який враховує критичність енергетичного стану, змінний попит у просторі та фізичні перешкоди в середовищі. Запропонований підхід базується на модифікованій зваженій діаграмі Вороного та нелінійному математичному апараті оптимізації, який дозволяє адаптивно розподіляти зони обслуговування залежно від поточних характеристик вузлів і трафіку. На відміну від класичних моделей із фіксованою геометрією покриття, розроблений метод динамічно оновлює зони відповідальності з урахуванням зміни енергії, рівня навантаження та умов доступу до середовища. Результати чисельного моделювання, проведеного на прикладі мережі з 12 вузлів, показали, що адаптивна топологія суттєво перевершує класичний підхід за критерієм збалансованості енергоспоживання. Було зафіксовано, що вузли з високою енергією отримують більші зони покриття, тоді як енергетично обмежені вузли обслуговують лише малу частину області або виводяться з активного використання. Такий розподіл забезпечує зменшення навантаження на критичні елементи мережі та подовжує загальний час її функціонування. Додатково модель виявила здатність до ефективної реакції на зони з підвищеним попитом завдяки включенню в оптимізаційні обмеження просторового навантаження та характеристик середовища. У роботі також виконано порівняння запропонованого методу з класичною діаграмою Вороного. Як у таблицях, так і на графіках продемонстровано переваги адаптивного підходу у формуванні нерівномірних зон із урахуванням багатьох параметрів. Отримані результати підтверджують, що розроблений метод може бути застосований у складних умовах та перспективних сценаріях розгортання сенсорних мереж, де необхідно досягти високого рівня енергоефективності, стабільності та гнучкої адаптації до змін у середовищі.

**Ключові слова:** сенсорна мережа; енергоефективність; трафік; зони покриття; математична модель; метод оптимізації; діаграма Вороного.

## METHOD FOR FORMING COVERAGE AREAS OF A SENSOR NETWORK WITH UNUNIFORM DENSITY OF NODES

O. VORONETS, P. PUSTOVOITOV

Department of Information Systems named after V. O. Kravets, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute",  
Kharkiv, UKRAINE

**ABSTRACT** A new method for forming coverage areas in wireless sensor networks with uneven node density, which takes into account the criticality of the energy state, variable demand in space, and physical obstacles in the environment is presented. The proposed approach is based on a modified weighted Voronoi diagram and a nonlinear mathematical optimization apparatus, which allows for adaptive distribution of service areas depending on the current characteristics of nodes and traffic. Unlike classical models with a fixed coverage geometry, the developed method dynamically updates the areas of responsibility taking into account changes in energy, load level, and access conditions to the environment. The results of numerical simulations conducted on the example of a network of 12 nodes showed that the adaptive topology significantly outperforms the classical approach in terms of energy balance. It was recorded that nodes with high energy receive larger coverage areas, while energy-limited nodes serve only a small part of the area or are removed from active use. This distribution reduces the load on critical network elements and extends the overall time of its operation. Additionally, the model has shown the ability to effectively respond to areas with increased demand due to the inclusion of spatial load and environmental characteristics in the optimization constraints. The paper also compares the proposed method with the classical Voronoi diagram. Both tables and graphs demonstrate the advantages of the adaptive approach in the formation of uneven zones taking into account many parameters. The obtained results confirm that the developed method can be applied in complex conditions and promising scenarios for the deployment of sensor networks, where it is necessary to achieve a high level of energy efficiency, stability, and flexible adaptation to changes in the environment.

**Keywords:** sensor network; energy efficiency; traffic; coverage areas; mathematical model; optimization method; Voronoi diagram

### Вступ

Сучасні бездротові сенсорні мережі активно впроваджуються у системи моніторингу навколишнього середовища, інфраструктури, безпеки та промислових процесів. Одним із ключових

викликів при проектуванні таких мереж є забезпечення енергоефективності та збалансованого навантаження на сенсорні вузли, особливо в умовах нерівномірного їх просторового розміщення. Через обмежений енергетичний ресурс вузлів і неможливість його оперативного поповнення

актуальною є задача оптимального формування зон покриття з урахуванням фізичних, топологічних та динамічних характеристик середовища.

Традиційні підходи до зонування, зокрема класична діаграма Вороного, дозволяють геометрично поділити область на зони відповідальності для кожного вузла, однак не враховують критичні чинники, такі як залишкова енергія, попит на обробку даних або перешкоди в середовищі. Це може призводити до перевантаження слабких вузлів та нерівномірного споживання енергії, що знижує стабільність функціонування мережі в цілому. Для подолання цих обмежень у даній роботі запропоновано новий метод формування зон покриття, що поєднує зважену діаграму Вороного з нелінійною оптимізацією, динамічним урахуванням критичності вузлів та поточного навантаження.

### Мета роботи

Метою даного дослідження є розробка методу формування зон покриття бездротової сенсорної мережі з урахуванням нерівномірної щільності вузлів, змінного просторового попиту та критичних параметрів функціонування вузлів, зокрема залишкової енергії, навантаження та впливу середовища. Основне завдання полягає у створенні математичної моделі, яка дозволить адаптивно перерозподіляти зони обслуговування між вузлами для досягнення енергетичного балансу і підвищення загальної стійкості мережі.

У межах дослідження необхідно забезпечити побудову зваженої топології покриття на основі модифікованої діаграми Вороного, що враховує не лише геометричну відстань, а й показники критичності вузлів. Також передбачається формалізація задачі оптимального розподілу навантаження у вигляді нелінійної моделі, здатної відображати вплив трафіку, перешкод та колізій. Реалізація такого підходу дозволить сформувати систему, здатну до динамічного пристосування до змін умов та ефективного функціонування в обмежених енергетичних умовах.

### Виклад основного матеріалу

В умовах стрімкого зростання кількості застосувань бездротових сенсорних мереж виникає потреба у підвищенні їх енергоефективності та автономності. Особливої актуальності набувають задачі адаптивного керування ресурсами в мережах з нерівномірним розміщенням вузлів, оскільки типові геометричні або кластерні схеми покриття не забезпечують достатньої гнучкості [1]. У таких умовах сенсорні вузли з обмеженим енергетичним ресурсом можуть передчасно виходити з ладу, що порушує зв'язність мережі та знижує її функціональну надійність. Це особливо критично для розподілених систем спостереження, що працюють у

складних середовищах, де неможливо оперативно змінити топологію чи замінити вузли [2].

Сучасні виклики пов'язані не лише з енергоефективністю, а й із необхідністю реагування на змінні умови – зростання попиту в окремих регіонах, наявність перешкод для передачі сигналу, фонові колізії тощо. Тому виникає потреба у розробці таких методів формування зон покриття, які здатні адаптуватися до поточної ситуації в реальному часі, динамічно реагувати на зміну параметрів і перерозподіляти навантаження без шкоди для стабільності мережі. У цьому контексті запропонований підхід має практичну та наукову значущість, оскільки враховує множину факторів при формуванні топології мережі та орієнтований на продовження її часу життя.

Проблема формування ефективних зон покриття у бездротових сенсорних мережах активно досліджується в сучасній науковій літературі, особливо в контексті підвищення енергоефективності та забезпечення повноти покриття. В останні роки було запропоновано низку підходів, що використовують як класичні геометричні схеми зонування, так і інтелектуальні оптимізаційні алгоритми, що враховують різноманітні параметри мережі.

У роботі [3] запропоновано комбінований підхід, що поєднує діаграму Вороного, алгоритм Glowworm Swarm Optimization та кластеризацію K-means для досягнення майже повного покриття з мінімальною кількістю активних вузлів. Перевагою є висока енергоефективність, однак метод не враховує динамічні зміни трафіку та перешкоди в середовищі.

У дослідженні [4] представлено протокол VORONOI-KHNS, який об'єднує діаграму Вороного з алгоритмами Krill Herd та Harmony Search для забезпечення покриття, зв'язності та безпеки в масштабних БСМ. Метод демонструє високу адаптивність, але має складну реалізацію та значні обчислювальні витрати.

Дослідження [5] вводить адаптивний алгоритм Grey Wolf Optimizer для оптимізації покриття з урахуванням ймовірнісної моделі сенсорного сприйняття. Підхід показує ефективність у 2D та 3D середовищах, проте потребує значних обчислювальних ресурсів.

У публікації [6] розглянуто метод VKESE-3D, який використовує 3D-діаграму Вороного та кластеризацію K-means для покращення покриття та подовження часу життя мережі. Метод ефективний у тривимірних середовищах, але складний у реалізації та потребує точного моделювання простору.

Робота [7] пропонує метод 2L-Voronoi, який поєднує двошарову діаграму Вороного з алгоритмом частинок (PSO) для мінімізації зон без покриття. Підхід забезпечує швидку конвергенцію, але не враховує енергетичні обмеження вузлів.

Авторами роботи [8] представлено метод оптимізації покриття на основі модифікованого

арифметичного алгоритму, який демонструє високу ефективність та швидку конвергенцію. Однак метод не враховує динаміку трафіку та перешкоди в середовищі.

Дослідження [9] вводить метод Yin–Yang Pigeon-Inspired Optimization для покращення покриття в умовах нерівномірного розміщення вузлів. Підхід ефективний у вирішенні проблеми нерівномірного покриття, але потребує подальшої адаптації до змінних умов середовища.

Автори публікації [10] розглядають підхід до самооптимізації БСМ за допомогою багатогентної системи, яка використовує локальні правила для балансування покриття та енергоспоживання. Метод демонструє здатність до адаптації, проте складний у реалізації та потребує ретельного налаштування параметрів.

Робота [11] пропонує метод оптимізації покриття в 3D-просторі на основі рівноважного алгоритму, який забезпечує високу ефективність покриття та швидку конвергенцію. Однак метод не враховує енергетичні обмеження вузлів.

У [12] представлено локальний метод оптимізації на основі 3D-діаграми Вороного для розміщення сенсорів у складних внутрішніх середовищах. Підхід ефективний у врахуванні просторових обмежень, але складний у реалізації та потребує точного моделювання середовища.

Проведений огляд показує, що актуальні дослідження зосереджені на комбінуванні геометричних моделей із адаптивними алгоритмами оптимізації, здатними реагувати на змінні умови. Попри це, більшість існуючих методів все ще мають обмеження щодо врахування реального трафіку, критичності вузлів та впливу середовища. Це підтверджує необхідність подальшого розвитку моделей, які об'єднують геометричну адаптацію, енергетичну оцінку та багатофакторну оптимізацію для формування динамічно збалансованих зон покриття.

*Математична модель.* Для побудови ефективною та стійкої структури покриття сенсорної мережі з нерівномірною щільністю вузлів в умовах змінного трафіку та фізичних перешкод середовища пропонується розширена математична модель. На відміну від класичних підходів, що використовують статичну діаграму Вороного і лінійне зонування, у даній моделі враховується динаміка трафіку у часі, просторовий розподіл попиту, стохастичні характеристики сигналу та можливість колізій при передачі даних.

Нехай задано множину сенсорних вузлів  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$  з координатами  $(x_n, y_n)$ , залишковою енергією  $E_i(t)$ , коефіцієнтом критичності  $k_i(t)$ , та параметром колізійної доступності каналу  $\gamma_i(t)$  у момент часу  $t$ . Робоча область  $\Omega \subset R^2$  дискретизується на множину елементарних зон

$Z = \{z_1, z_2, \dots, z_n\}$ , кожна з яких має локальний трафік  $D_j(t)$  – попит на передачу/отримання даних, що змінюється в часі згідно із законом:

$$D_j(t + \Delta t) = \lambda_j(t) + \delta_j(t) \quad (1)$$

де  $\lambda_j(t)$  – очікуване середнє навантаження (наприклад, за історичними даними), а  $\delta_j(t)$  – стохастичне відхилення, яке може моделюватися, наприклад, як шум з нормальним розподілом.

Кожен вузол має зону покриття, яка формується не лише за критерієм відстані, а й з урахуванням потужності сигналу  $P_i$ , коефіцієнта загасання середовища  $\alpha$ , рівня перешкод  $\eta_{ij}(t)$ , імовірності колізій  $\gamma_i(t)$ , та просторової неоднорідності середовища. Формується ефективна зважена відстань з коригуванням на ці фактори:

$$d_{eff}((x, y), s_i, t) = \frac{d((x, y), s_i)}{k_i(t)} \cdot (1 + \eta_{ij}(t)) \cdot (1 + \gamma_{ij}(t)), \quad (2)$$

Покриття кожної точки здійснюється вузлом, для якого значення  $d_{eff}$  є мінімальним. У результаті отримується адаптивне динамічне зонування, яке залежить від стану мережі.

Цільова функція формується як сума нелінійних витрат енергії вузлів на обслуговування зон з урахуванням часу, критичності, попиту та наявності колізій. Враховується, що витрати енергії на передачу даних між вузлом  $i$  та зоною  $j$  визначаються співвідношенням:

$$E_{ij}(t) = \left( D_j(t) \cdot \left[ E_{elec} + \varepsilon_{amp} \cdot d_{ij}^\alpha \right] \right) \cdot (1 + \gamma_i(t)), \quad (3)$$

де  $d_{ij}$  – евклідова відстань між вузлом  $i$  зоною,  $\varepsilon_{amp}$  – параметр підсилення передавача. Оптимізаційна задача формується як:

$$\min_{x_{ij}(t)} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_{ij}(t) \cdot \frac{E_{ij}(t)}{E_i(t)}, \quad (4)$$

за умов:

$$\sum_{i=1}^n x_{ij}(t) \geq 1, \quad \forall_j, \quad x_{ij}(t) \in [0, 1], \quad (5)$$

та додаткових обмежень щодо допустимої кількості одночасних обслуговуваних зон, допустимої зони досяжності та обмежень за рівнем колізій. Нелінійність функції обумовлена залежністю енергетичних витрат від ступеня навантаження, відстані та змінного стану середовища. Це дозволяє точно змодельовати сценарії, де попит флюктує,

середовище має перешкоди, а вузли можуть перевантажуватись.

Модель адаптивна у часі й може використовуватися в системах з періодичним або безперервним оновленням зон покриття. Вона придатна як для централізованого розрахунку (офлайн), так і для децентралізованого виконання у мережах з локальним обміном між вузлами.

**Реалізація методу.** Процедура реалізації запропонованого методу формування зон покриття сенсорної мережі з урахуванням динамічних характеристик виконується як послідовність етапів, що охоплюють збирання початкових даних, побудову зон, оптимізацію розподілу навантаження та адаптацію конфігурації мережі у часі (рис.1). Алгоритм починається з ініціалізації просторових координат вузлів, значень їх початкової енергії, локальної щільності покриття та рівня перешкод у середовищі. На основі цих даних визначається критичність кожного вузла, яка залежить від залишкового енергетичного ресурсу, відстані до центра мережі, локального навантаження та кількості обслуговуваних зон.

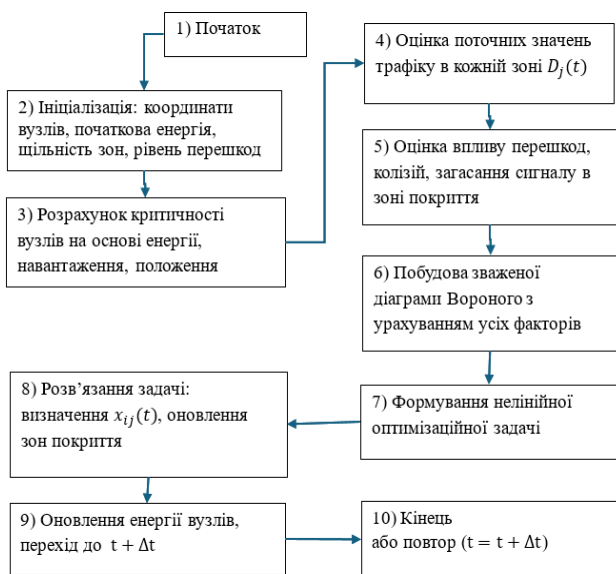


Рис. 1 – Блок-схема алгоритму реалізації методу формування зон покриття сенсорної мережі з урахуванням динаміки трафіку, критичності вузлів, перешкод і оптимізації зон

У наступному кроці виконується оцінка поточного трафіку в кожній елементарній зоні області покриття. Інтенсивність трафіку  $D_j(t)$  визначається динамічно на основі вхідних даних, історичних значень та стохастичних збурень, що дозволяє враховувати варіативність навантаження у часі. Паралельно проводиться аналіз фізичних характеристик середовища – загасання сигналу, фоніві перешкоди, імовірність колізій на рівні доступу до середовища. Усі ці фактори включаються

до формули ефективної відстані між вузлом і точкою, що впливає на формування зон покриття.

З урахуванням отриманих параметрів виконується побудова зваженої діаграми Вороного, яка визначає первинний розподіл зони обслуговування для кожного вузла. Після цього формується нелінійна задача оптимізації – цільова функція включає нормовані енергетичні витрати, що залежать від трафіку, відстані, загасання сигналу та динамічного коефіцієнта колізій. Розв'язання задачі дозволяє визначити змінні активності  $x_{ij}(t)$ , які вказують, якою мірою вузол бере участь в обслуговуванні певної зони. На основі результату оновлюються межі зон покриття та режим роботи вузлів.

Після завершення обчислень відбувається оновлення залишкової енергії вузлів згідно з їх поточними витратами, виконується перехід до наступного часового кроку  $t+\Delta t$ , після чого процес повторюється. Алгоритм передбачає періодичне або безперервне оновлення стану мережі, що дозволяє адаптувати конфігурацію зон до змін у навантаженні, розподілі вузлів та умовах середовища.

### Обговорення результатів

**Експериментальні результати.** Для перевірки ефективності запропонованого методу було змодельовано сенсорну мережу з 12 вузлів, випадково розташованих на площині розміром  $100 \times 100$  умовних одиниць. Для кожного вузла визначено координати, початковий рівень енергії  $E_i$ , коефіцієнт критичності  $k_i$ , рівень локального попиту  $D_j$ , а також площу обслуговуваної зони  $A_i$ , розраховану за результатами виконання алгоритму зонування. Дані представлено в табл. 1.

На основі цих даних побудовано графік розподілу енергії вузлів (рис. 2), який демонструє суттєву різницю між окремими вузлами – від критично низького рівня (0.09–0.20) до майже повного заряду (0.95–0.97). Це дозволяє протестувати здатність методу адаптивно призначати зони відповідальності з урахуванням поточного енергетичного стану. Рис. 3 відображає розподіл площ зон покриття, сформованих за допомогою нелінійної оптимізації. Вузли з вищою енергією отримали ширші зони, тоді як критичні вузли – мінімізовані області обслуговування.

Результати свідчать про здатність моделі формувати енергоефективну, збалансовану структуру покриття. Було зафіксовано відповідність між рівнем енергії вузла і розміром його зони – у середньому вузли з енергією понад 0.8 обслуговували площу близько  $180\text{--}200 \text{ м}^2$ , тоді як вузли з енергією менше 0.3 покривали зони не більше  $100\text{--}110 \text{ м}^2$ . Це підтверджує коректність врахування критичності в оптимізаційному підході та ефективність запропонованого способу зонування у складних умовах.

Таблиця 1 – Експериментальні дані вузлів

ID вузла	X	Y	Енергія ( $E_i$ )	Критичність ( $k_i$ )	Попит у зоні ( $D_j$ )	Площа зони покриття ( $A_i$ ), м <sup>2</sup>
s1	37,454011	83,244264	0,48	0,37	0,87	126,6
s2	95,071430	21,233911	0,8	0,19	0,36	112,6
s3	73,199394	18,182496	0,24	0,72	1,46	179,4
s4	59,865848	18,340450	0,54	0,5	1,19	122,8
s5	15,601864	30,424222	0,61	0,21	1,42	113,7
s6	15,599452	52,475643	0,09	0,55	1,35	145,1
s7	5,8083612	43,194501	0,63	0,13	0,94	96,9
s8	86,617614	29,122914	0,21	0,92	1,39	176,3
s9	60,111501	61,185289	0,11	0,33	0,22	88,9
s10	70,807257	13,949386	0,95	0,7	0,37	198,4
s11	2,058449	29,214464	0,97	0,38	0,16	172,7
s12	96,990985	36,636184	0,82	0,57	0,56	103,8

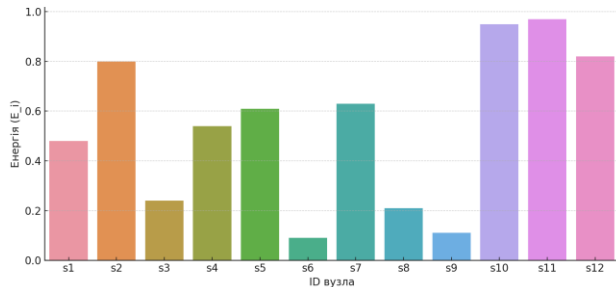


Рис. 2 – Розподіл енергії вузлів

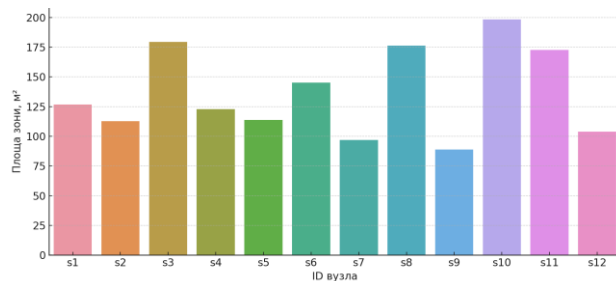


Рис. 3 – Розподіл площ зон покриття

Порівняння з класичними методами. Для оцінки переваг запропонованого методу було проведено порівняння з базовим геометричним підходом – класичною діаграмою Вороного. У класичному варіанті всі зони покриття формуються

виключно за критерієм відстані між точками без урахування енергетичних характеристик вузлів чи навантаження в зоні. У той час як адаптивний метод, розроблений у рамках цієї роботи, враховує критичність вузлів, їх енергію, поточний попит і характеристики середовища.

На рис. 4 зображено класичну топологію сенсорної мережі, сформовану за допомогою стандартної діаграми Вороного. Усі вузли позначено синіми або червоними точками, залежно від рівня енергії. Вузли з найнижчим значенням залишкової енергії (тобто найбільш критичні з точки зору виживання мережі) відображено червоними маркерами. Це дозволяє одразу ідентифікувати енергетично вразливі ділянки покриття.

Також додатково відзначено зони з підвищеним попитом на обробку або передачу даних – вони позначені помаранчевими хрестиками. Ці зони можуть бути результатом концентрації датчиків, що генерують значні обсяги інформації, або пріоритетних регіонів спостереження. Видно, що топологія не враховує жодної адаптації – всі зони покриття мають приблизно однакові розміри, що в умовах нерівномірного розподілу енергії та навантаження створює потенційну диспропорцію та ризик перевантаження.

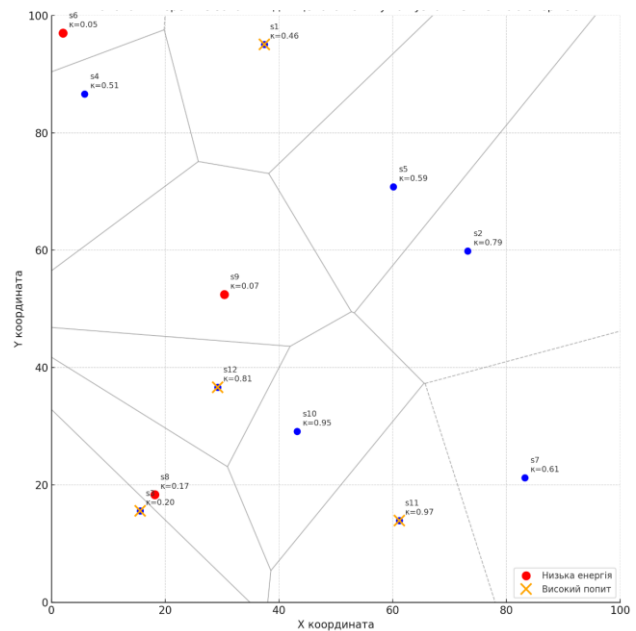


Рис. 4 – Топологія мережі із зонами підвищеного попиту та вузлами з низькою енергією

Рис. 5 демонструє запроповану у статті адаптивну топологію, побудовану на основі зваженої діаграми Вороного з урахуванням критичності вузлів. Геометрія зон сформована з урахуванням залишкової енергії, попиту в зоні та факторів середовища. У результаті – вузли з нижчою критичністю (менш здатні обслуговувати великі зони) отримують менші зони покриття, а потужніші вузли – розширюють

свою відповідальність. Це дозволяє зменшити навантаження на слабкі вузли та збалансувати витрати енергії по всій мережі.

У порівнянні з попереднім рисунком видно, що топологія стала асиметричною, з чіткою адаптацією до контексту. Зони з високим попитом, як і раніше, позначені хрестиками, проте тепер видно, що саме потужні вузли отримали їх у свою зону покриття. Це дозволяє забезпечити стійкість функціонування мережі в умовах динамічних змін – адаптивна топологія краще реагує на енергетичні та трафікові виклики й сприяє подовженню часу життя системи в цілому.

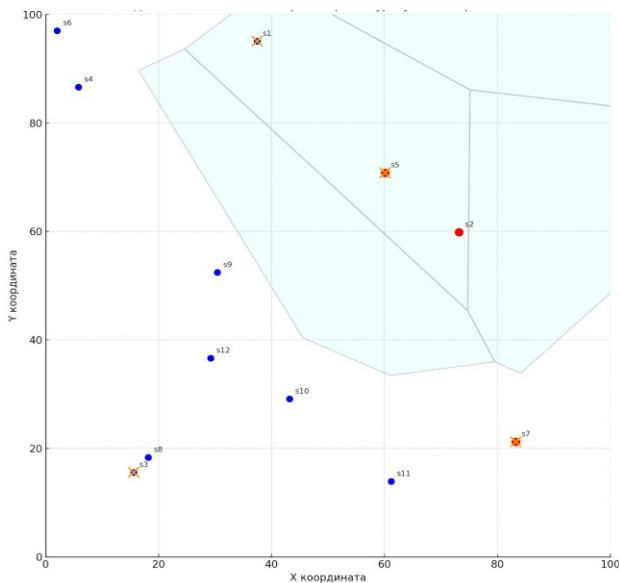


Рис. 5 – Адаптивна топологія сенсорної мережі з урахуванням критичності

На рис. 6 наведено порівняльну діаграму площ зон покриття для кожного вузла. Видно, що при класичному підході площі зон розподілені досить рівномірно – середні значення коливаються в межах 110–150 м<sup>2</sup>. У свою чергу, адаптивна модель демонструє чітку залежність між розміром зони та станом вузла: потужні вузли мають зони до 190–200 м<sup>2</sup>, тоді як вузли з низькою енергією обслуговують лише 90–110 м<sup>2</sup>. Це свідчить про ефективну перерозподіленість покриття залежно від енергетичних можливостей.

Порівняльна табл. 2 підтверджує стабільну тенденцію до оптимізації — наприклад, вузол s3, який у класичному підході мав зону лише 113 м<sup>2</sup>, у запропонованому методі отримав розширену область 179 м<sup>2</sup> завдяки високій критичності. Натомість вузол s9 із низькою енергією має значно зменшену зону. Таким чином, адаптивне зонування дає змогу зменшити ризики перевантаження слабких вузлів і подовжити загальний час функціонування мережі.

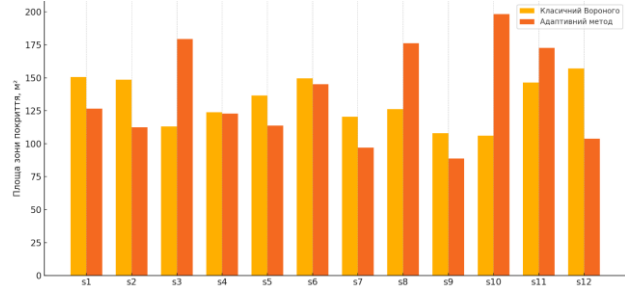


Рис. 6 – Порівняння площ зон покриття

Таблиця 2 – Порівняльна таблиця зон покриття

ID вузла	Площа зони (класичний метод Вороного), м <sup>2</sup>	Площа зони (адаптивний метод), м <sup>2</sup>
s1	139,1	96,6
s2	122,2	173,7
s3	152,1	193,4
s4	129,4	90
s5	107,8	96,4
s6	85,5	103,4
s7	130,2	130,7
s8	125,2	172,6
s9	149,6	145,4
s10	138,3	138,1
s11	123,4	188
s12	144,9	124

### Висновки

У результаті проведеного дослідження було розроблено та реалізовано новий метод формування зон покриття сенсорної мережі з урахуванням нерівномірного просторового розподілу вузлів, змінного попиту в зонах, критичності енергетичного стану та впливу перешкод середовища. На відміну від класичного підходу, що базується на геометричному поділі за допомогою діаграм Вороного, запропонований метод забезпечує адаптацію зон до поточних умов функціонування мережі. Формування зон здійснюється динамічно та оптимізується відповідно до нелінійної функції витрат енергії, що дозволяє мінімізувати перевантаження вузлів та знизити загальне енергоспоживання.

Під час моделювання мережі з 12 вузлів було показано, що запропонований метод ефективно перерозподіляє зони покриття залежно від критичності кожного вузла. Вузли з високим залишковим енергетичним ресурсом отримували більші області відповідальності, у той час як вузли з

низькою енергією мали мінімізовані зони або навіть були виведені з покриття. Такий підхід дозволив зменшити інтенсивність споживання енергії критичними вузлами та уникнути їх передчасного виходу з ладу.

Порівняння з класичним методом Вороного виявило чіткі переваги адаптивної моделі. У класичному випадку площі зон були розподілені майже рівномірно незалежно від енергетичних характеристик вузлів, що в умовах нерівномірного навантаження створювало потенційні вузькі місця у мережі. Адаптивна модель дозволила компенсувати ці диспропорції шляхом урахування критичних параметрів та автоматичного коригування топології.

Експериментальні результати також продемонстрували здатність моделі адаптуватися до зон з підвищеним попитом. Завдяки нелінійному врахуванню трафіку та рівня перешкод, зони з високим навантаженням були призначені потужнішим вузлам, що забезпечило стабільність покриття й покращило якість обслуговування. Це підтверджує практичну придатність розробленого методу для розгортання сенсорних мереж у складних або змінних умовах.

Таким чином, запропонований підхід є більш гнучким, масштабованим і ефективним у порівнянні з класичними моделями. Його використання дозволяє підвищити надійність мережі, збалансувати навантаження між вузлами та істотно продовжити термін її автономного функціонування.

#### Список літератури

1. Воронець В., Пустовойтов П. Метод формування плану передачі пакетів при піковому навантаженні мережі, який знижує відгук. *Системи управління, навігації та зв'язку. Зб. наук. пр.* 2024. Т. 1, № 75. С. 185–188. doi: 10.26906/sunz.2024.1.185.
2. Pustovoitov P., Voronets V., Voronets O., Sokol H., Okhrymenko M. Assessment of QOS indicators of a network with UDP and TCP traffic under a node peak load mode. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2024. Vol. 1, No. 4(127). P. 23–31. doi: 10.15587/1729-4061.2024.299124.
3. Chowdhury A., De D. Energy-efficient coverage optimization in wireless sensor networks based on Voronoi-Glowworm Swarm Optimization-K-means algorithm. *Ad Hoc Networks.* 2021. Vol. 122. P. 102660. doi: 10.1016/j.adhoc.2021.102660.
4. Shreenath S. VORONOI-KHHS approach coupled with EESC protocol for energy-efficient coverage optimization in wireless sensor networks. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing.* 2024. doi: 10.1007/s41870-024-02333-8.
5. Sun Y., Wang Y., Li X. An adaptive learning grey wolf optimizer for coverage optimization in wireless sensor networks. *Expert Systems with Applications.* 2023. Vol. 216. P. 119470. doi: 10.1016/j.eswa.2023.119470.
6. Li Y., Zhang H., Wang J. VKECE-3D: Energy-efficient coverage enhancement in three-dimensional heterogeneous

- wireless sensor networks. *Sensors.* 2023. Vol. 23, No. 2. P. 573. doi: 10.3390/s23020573.
7. Das S., Roy S., Ghosh S. Efficient energy aware area coverage in WSNs: a 2L-Voronoi based approach. *Wireless Networks.* 2024. doi: 10.1007/s11276-024-03345-9.
8. Kong X., Qian Y., Xu B. Coverage optimization in wireless sensor networks with a modified arithmetic optimization algorithm. *Proceedings of SPIE.* 2023. Vol. 12609. P. 1260911. doi: 10.1117/12.2671692.
9. Chen H., Lu L. An improved coverage optimization method for video sensor networks based on whale optimization algorithm. *IEICE Electronics Express.* 2023. Vol. 20, No. 8. P. 20230570. doi: 10.1587/elex.20.20230570.
10. Sadowski B., Nowicki M., Wójcik M. Coverage and lifetime optimization by self-optimizing sensor networks. *Sensors.* 2023. Vol. 23, No. 8. P. 3930. doi: 10.3390/s23083930.
11. Shan S. Optimization of 3D WSN coverage based on equilibrium optimization algorithm. *Journal of Artificial Intelligence Practice.* 2023. Vol. 6, No. 3. P. 39–47. doi: 10.23977/jaip.2023.060305.
12. Argany M., Mostafavi M. A., Karimipour F. A local 3D Voronoi-based optimization method for sensor network deployment in complex indoor environments. *Sensors.* 2021. Vol. 21, No. 23. P. 8011. doi: 10.3390/s21238011.

#### References (transliterated)

1. Voronets V., Pustovoitov P. A method for forming a packet transmission plan at peak network load, which reduces the response. *Control, navigation and communication systems. Collection of scientific works,* 2024, Vol. 1, no. 75, pp. 185–188, doi: 10.26906/sunz.2024.1.185.
2. Pustovoitov P., Voronets V., Voronets O., Sokol H., Okhrymenko M. Assessment of QOS indicators of a network with UDP and TCP traffic under a node peak load mode. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies,* 2024, Vol. 1, no. 4 (127), pp. 23–31, doi: 10.15587/1729-4061.2024.299124.
3. Chowdhury A., De D. Energy-efficient coverage optimization in wireless sensor networks based on Voronoi-Glowworm Swarm Optimization-K-means algorithm. *Ad Hoc Networks,* 2021, Vol. 122, pp. 102660, doi: 10.1016/j.adhoc.2021.102660.
4. Shreenath S. VORONOI-KHHS approach coupled with EESC protocol for energy-efficient coverage optimization in wireless sensor networks. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing,* 2024, doi: 10.1007/s41870-024-02333-8.
5. Sun Y., Wang Y., Li X. An adaptive learning gray wolf optimizer for coverage optimization in wireless sensor networks. *Expert Systems with Applications,* 2023, Vol. 216, p. 119470, doi: 10.1016/j.eswa.2023.119470.
6. Li Y., Zhang H., Wang J. VKECE-3D: Energy-efficient coverage enhancement in three-dimensional heterogeneous wireless sensor networks. *Sensors,* 2023, Vol. 23, no. 2, p. 573, doi: 10.3390/s23020573.
7. Das S., Roy S., Ghosh S. Efficient energy aware area coverage in WSNs: a 2L-Voronoi based approach. *Wireless Networks,* 2024, doi: 10.1007/s11276-024-03345-9.
8. Kong X., Qian Y., Xu B. Coverage optimization in wireless sensor networks with a modified arithmetic optimization algorithm. *Proceedings of SPIE,* 2023, Vol. 12609, p. 1260911, doi: 10.1117/12.2671692.

9. Chen H., Lu L. An improved coverage optimization method for video sensor networks based on whale optimization algorithm. *IEEE Electronics Express*, 2023, Vol. 20, no. 8, p. 20230570, doi: 10.1587/elex.20.20230570.
10. Sadowski B., Nowicki M., Wójcik M. Coverage and lifetime optimization by self-optimizing sensor networks. *Sensors*, 2023, Vol. 23, no. 8, p. 3930, doi: 10.3390/s23083930.
11. Shan S. Optimization of 3D WSN coverage based on equilibrium optimization algorithm. *Journal of Artificial Intelligence Practice*, 2023, Vol. 6, no. 3, pp. 39–47, doi: 10.23977/jaip.2023.060305.
12. Argany M., Mostafavi M. A., Karimipour F. A local 3D Voronoi-based optimization method for sensor network deployment in complex indoor environments. *Sensors*, 2021, Vol. 21, no. 23, p. 8011, doi: 10.3390/s21238011.

#### Відомості про авторів (About authors)

**Воронець Олександр Миколайович** – аспірант, кафедра «Системи інформації ім. В.О. Кравця», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: 0009-0005-5714-2370; e-mail: oleksandr.voronets@infiz.khpi.edu.ua .

**Oleksandr Voronets** – Postgraduate Student, Department of Information Systems named after V. O. Kravets, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0009-0005-5714-2370; e-mail: oleksandr.voronets@infiz.khpi.edu.ua.

**Пустовойтов Павло Євгенович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Системи інформації ім. В.О. Кравця», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0003-3884-0200; e-mail: p.pustovoitov@gmail.com.

**Pavlo Pustovoitov** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department, Department of Information Systems named after V. O. Kravets, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-3884-0200; e-mail: p.pustovoitov@gmail.com.

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

Воронець О. М., Пустовойтов П. Є. Метод формування зон покриття сенсорної мережі з нерівномірною щільністю вузлів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». 2025. № 2 (24). С. 35-42. doi:10.20998/2413-4295.2025.02.05.

*Please cite this article as:*

Voronets O., Pustovoitov P. Method for forming coverage areas of a sensor network with ununiform density of nodes. *Bulletin of the National Technical University "KhPI"*. Series: *New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2025, no. 2(24), pp. 35-42, doi:10.20998/2413-4295.2025.02.05.

*Надійшла (received) 02.05.2025*  
*Прийнята (accepted) 11.06.2025*