

РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ LEACH-PDT ДЛЯ БАГАТОКРОКОВОЇ МАРШРУТИЗАЦІЇ В ІОТ-СИСТЕМАХ НА ОСНОВІ ЗВАЖЕНИХ ГРАФІВ

Chebotarov D.V., Makarenko A.O. Development of the LEACH-PDT algorithm for multi-hop routing in IoT systems based on weighted graphs. The article addresses the problem of ensuring energy efficiency and spatial scalability of Wireless Sensor Networks (WSNs) in Internet of Things (IoT) systems. Classical single-hop protocols (e.g., LEACH) are inefficient over large coverage areas, while existing multi-hop modifications suffer from the "hot-spot" problem due to the critical overloading of transit nodes. To resolve these architectural flaws, a novel backbone routing protocol, LEACH-PDT (Parameterized Data Transfer), is proposed. The method is based on representing the network of cluster heads as a directed weighted graph, where the routing objective function integrates a smoothed radio channel quality indicator (exponential moving average of RSSI) and a developed relay node "weariness index" combined with its residual energy. The protocol's efficiency was evaluated through Monte Carlo simulation for local, medium, and large-scale topologies (up to 500x500 m) with varying spatial locations of the base station. The results confirm that multi-parameter graph optimization allows LEACH-PDT to dynamically bypass overloaded relays. This provides an exponential increase in the First Node Dead (FND) metric by up to 300% compared to standard LEACH, and preserves 30% more total operational network time compared to LEACH-MH. The developed algorithm guarantees the prolonged maintenance of 100% spatial coverage, making it an optimal architectural solution for critical industrial telemetry systems, smart agriculture, and perimeter security.

Keywords: Internet of Things, Wireless Sensor Networks, routing protocol, LEACH, multi-hop routing, graph theory, weariness index, energy efficiency

Чеботарьов Д.В., Макаренко А.О. Розробка алгоритму LEACH-PDT для багатокрокової маршрутизації в ІоТ-системах на основі зважених графів. У статті розглядається проблема забезпечення енергоефективності та просторової масштабованості бездротових сенсорних мереж (БСМ) у системах Інтернету речей (ІоТ). Класичні однокрокові протоколи (LEACH) є неефективними на великих площах покриття, тоді як існуючі багатокрокові модифікації страждають від проблеми «гарячих точок» через критичне перевантаження транзитних вузлів. Для вирішення цих недоліків запропоновано новий протокол магістральної маршрутизації LEACH-PDT (Parameterized Data Transfer). Метод базується на поданні мережі головних вузлів кластерів у вигляді орієнтованого зваженого графа, де цільова функція пошуку оптимального маршруту враховує згладжений показник якості радіоканалу (експоненційне ковзне середнє RSSI) та спеціально розроблений індекс втоми вузла-ретранслятора разом із його залишковою енергією. Ефективність протоколу досліджено шляхом імітаційного моделювання за методом Монте-Карло для локальних, середніх та масштабних топологій (до 500x500 м) з різним просторовим розташуванням базової станції. Результати підтверджують, що багатопараметрична графова оптимізація дозволяє LEACH-PDT динамічно оминати перевантажені ретранслятори. Це забезпечує експоненційне зростання показника життєздатності першого вузла (FND) до 300% порівняно зі стандартним алгоритмом LEACH та зберігає на 30% більше сумарного операційного часу мережі порівняно з LEACH-MH. Запропонований алгоритм гарантує тривале збереження стовідсоткового просторового покриття, що робить його оптимальним архітектурним рішенням для критичних систем промислової телеметрії, розумного сільського господарства та охорони периметра.

Ключові слова: Інтернет речей, бездротові сенсорні мережі, протокол маршрутизації, LEACH, багатокрокова передача, теорія графів, індекс втоми, енергоефективність

Вступ

Широкомасштабне впровадження концепції Інтернету речей (ІоТ) та кіберфізичних систем супроводжується експоненційним зростанням кількості підключених пристроїв, базовим інфраструктурним рівнем яких є бездротові сенсорні мережі. Такі мережі складаються з великої кількості автономних мініатюрних вузлів, які виконують функції збору, первинної обробки та передачі телеметричних даних до центрального шлюзу або базової станції. Фундаментальним обмеженням при проектуванні та експлуатації бездротових сенсорних мереж є жорсткий ліміт енергетичних ресурсів сенсорів. Оскільки заміна або регулярне перезарядження елементів живлення у більшості сценаріїв застосування (наприклад, у

системах індустріального моніторингу на великих площах, екологічних комплексах або системах розумного сільського господарства) є економічно та технічно недоцільною, критично важливим завданням стає розробка методів алгоритмічного енергозбереження. Відповідно, забезпечення стійкої роботи системи вимагає впровадження енергоефективних мережевих протоколів, здатних мінімізувати витрати заряду трансиверів та максимізувати загальний життєвий цикл мережі без втрати її зв'язності та територіального покриття.

Актуальність дослідження. Існуючі багатокрокові модифікації кластерних протоколів (наприклад, M-LEACH) здебільшого використовують для побудови маршрутів спрощені метрики: геометричну відстань між вузлами або жорстку прив'язку до рівня залишкової енергії [1, 4, 7]. Маршрутизація, що спирається на миттєві показники потужності отриманого сигналу (RSSI), у реальних індустріальних середовищах є неефективною через постійну флуктуацію радіоефіру. Це викликає нестабільність топології та призводить до невиправданих обчислювальних витрат на постійну перебудову маршрутів. З іншого боку, алгоритми, що обирають шлях виключно за критерієм найкоротшої відстані, неминуче провокують виникнення «гарячих точок», коли вузли, що знаходяться найближче до базової станції, виснажуються першими через необхідність обслуговування всього транзитного трафіку.

Запропонований у даній роботі протокол багатокрокової маршрутизації LEACH-PDT (Parameterized Data Transfer) вирішує ці суперечності шляхом впровадження нової багатопараметричної цільової функції. Актуальним науковим завданням, що вирішується в статті, є представлення мережі головних вузлів у вигляді орієнтованого зваженого графа.

Крім того, використання класичних графових алгоритмів оптимізації (алгоритм Дейкстри) у поєднанні з міжкластерним розкладом доступу до середовища (TDMA) дозволяє перенести основне навантаження з радіоефіру на локально детерміновані обчислення всередині мікроконтролерів СН. Такий підхід повністю відповідає сучасним парадигмам периферійних обчислень (Edge Computing) в IoT, усуваючи марні витрати енергії на холосте прослуховування ефіру та колізії пакетів.

Постановка завдання. Організація передачі агрегованих даних у масштабованих бездротових сенсорних мережах вимагає переходу від прямої однокрокової комунікації до багатокрокових магістральних архітектур, оскільки витрати енергії на пряму передачу на великі відстані зростають нелінійно. Проте класичні багатокрокові модифікації ієрархічних протоколів маршрутизації використовують примітивну стратегію передачі даних виключно найкоротшим геометричним шляхом. Це неминуче призводить до виникнення фундаментальної проблеми гарячих точок (Hot-spot problem), коли вузли-ретранслятори, що територіально розташовані найближче до базової станції, змушені приймати на себе весь транзитний трафік мережі. Внаслідок такого дисбалансу центральні вузли виснажуються катастрофічно швидко, що спричиняє утворення енергетичних дір та ранню втрату зв'язку з повністю працездатними периферійними сегментами мережі.

Таким чином, виникає науково-прикладна задача: необхідно розробити новий метод багатокрокової маршрутизації, який би здійснював динамічне балансування енергетичного навантаження між транзитними вузлами. Алгоритм повинен самостійно будувати обхідні маршрути навколо перевантажених ретрансляторів шляхом багатопараметричної оптимізації, забезпечуючи при цьому стійкість до флуктуацій радіоефіру та мінімізуючи обсяг додаткового службового трафіку в мережі.

Метою роботи є розробка та дослідження модифікованого протоколу багатокрокової маршрутизації LEACH-PDT (Parameterized Data Transfer) на основі оптимізації зважених графів для суттєвого підвищення просторової масштабованості, енергоефективності та загальної відмовостійкості бездротових сенсорних мереж в IoT-системах.

Для досягнення поставленої мети передбачається вирішити такі завдання: формалізувати топологію магістральної мережі у вигляді орієнтованого графа; розробити комплексну цільову функцію формування ваги маршруту, що інтегрує згладжені показники якості радіоканалу та поточний індекс втоми вузлів-ретрансляторів; а також провести експериментальний порівняльний аналіз розробленого алгоритму з класичними ієрархічними протоколами шляхом імітаційного моделювання.

Виклад основного матеріалу дослідження

Для забезпечення тривалого життєвого циклу бездротових сенсорних мереж було розроблено значну кількість ієрархічних протоколів маршрутизації [2, 5, 6]. Фундаментальною основою для переважної більшості сучасних кластерних архітектур став базовий протокол LEACH, подальші модифікації якого спрямовані на усунення його специфічних обмежень в умовах масштабування та динамічної зміни топології [4, 7, 9].

Базовий протокол LEACH. Алгоритм LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) запровадив концепцію розподілу мережі на кластери з метою локалізації трафіку та агрегації даних [4,7]. Процес функціонування мережі поділяється на раунди, кожен з яких ініціюється фазою встановлення. На цьому етапі кожен сенсорний вузол приймає незалежне рішення щодо переходу в стан головного вузла кластера (Cluster Head, CH) шляхом генерації випадкового числа в інтервалі від 0 до 1. Якщо згенероване число є меншим за розраховане порогове значення $T(n)$, вузол стає CH для поточного раунду. Порогове значення визначається за формулою:

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

де P – цільова ймовірність вузла стати CH (відсоток головних вузлів у мережі), r – номер поточного раунду, а G – множина вузлів, які не виконували роль CH протягом останніх $1/P$ раундів.

Головним недоліком базового протоколу є використання однокрокової (single-hop) передачі даних під час фази стабільного зв'язку. Кожен CH зобов'язаний передавати агреговані пакети безпосередньо до базової станції (BS). Згідно з радіоенергетичною моделлю першого порядку, якщо відстань передачі d перевищує порогове значення вільного простору d_0 , витрати енергії на передачу пакета розміром k біт підпорядковуються моделі багатопроменевого поширення:

$$E_{Tx}(k, d) = k * (E_{elec} + e_{mp} * d^4)$$

де E_{elec} – енергія, що витрачається електронними компонентами трансивера, а e_{mp} – коефіцієнт підсилення для багатопроменевої моделі. Залежність витрат енергії від четвертого ступеня відстані (d^4) призводить до того, що при масштабуванні мережі віддалені головні вузли виснажуються катастрофічно швидко, що унеможливило використання класичного LEACH на великих площах.

Енергетично обізнана маршрутизація E-LEACH. З метою подолання проблеми «сліпої» рандомізації базового алгоритму, яка ігнорує фізичний стан елементів живлення сенсорів, було запропоновано модифікацію E-LEACH (Energy-Aware LEACH) [8]. Даний підхід оптимізує процес вибору ролей шляхом введення рівня залишкової енергії в математичну модель розрахунку порогового значення. У модифікованому алгоритмі ймовірність вузла стати CH є прямо пропорційною до його поточного енергетичного резерву:

$$T(n)_{E-LEACH} = T(n) * \frac{E_{res,n}}{E_{initial}}$$

де $E_{res, n}$ – поточна залишкова енергія вузла n , а $E_{initial}$ – його початкова ємність батареї. Такий механізм ефективно захищає виснажені вузли, відтермінуючи момент виходу з ладу першого сенсора (First Node Dead). Проте E-LEACH вирішує проблему енергозбереження виключно на етапі кластеризації. На етапі передачі агрегованих даних алгоритм зберігає однокрокову архітектуру, через що віддалені вузли продовжують зазнавати критичних енергетичних втрат при спробах встановити прямий зв'язок із базовою станцією.

Багатокрокова магістральна передача LEACH-MH. Для забезпечення просторової масштабованості бездротових сенсорних мереж було розроблено архітектуру LEACH-MH (Multi-Hop LEACH) [1]. У цій модифікації віддалені головні вузли кластерів формують між собою багатокрокову транзитну магістраль. Замість прямої передачі на базову станцію, вузол передає дані найближчому проміжному CH у напрямку шлюзу збору даних. Загальна

енергетична вартість маршруту P у такій системі розраховується як сума витрат на прийом та ретрансляцію на кожному кроці:

$$E_{path}(P) = \sum_{i \in P} (E_{Rx}(k) + E_{Tx}(k, d_{i,i+1}))$$

Хоча такий підхід радикально знижує витрати енергії віддалених сенсорів, уникаючи застосування множника d^4 , він породжує фундаментальну проблему «гарячих точок». Оскільки маршрутизація в класичному LEACH-МН здебільшого здійснюється за критерієм мінімальної геометричної відстані, транзитні вузли, що просторово розташовані найближче до базової станції, змушені постійно витрачати енергію E_{Rx} та E_{Tx} на ретрансляцію трафіку всієї мережі. Це призводить до їх стрімкого виснаження та утворення «енергетичної діри», яка ізолює периферійні сегменти мережі від центрального шлюзу.

Теоретичне обґрунтування та математична модель алгоритму LEACH-PDT. Розробка модифікації LEACH-PDT (Parameterized Data Transfer) зумовлена необхідністю подолання фундаментальних суперечностей між вимогами до просторової масштабованості бездротових сенсорних мереж та жорсткими обмеженнями їхнього енергетичного ресурсу. Головною передумовою створення даного алгоритму стало усвідомлення того факту, що використання виключно геометричної відстані як критерію маршрутизації в багатокрокових мережах є недостатнім і призводить до швидкої деградації системи. Класичні підходи генерують проблему критичних вузлів, коли сенсори, розташовані найближче до базової станції, приймають на себе весь транзитний трафік, що спричиняє їхнє передчасне виснаження та утворення енергетичних дір.

Хід думок при розробці протоколу базувався на парадигмі перенесення основного обчислювального навантаження з радіофіру на локальні мікроконтролери головних вузлів кластерів. Було висунуто думку, що мережу транзитних вузлів доцільно розглядати не як статичну геометричну структуру, а як динамічний зважений орієнтований граф. Для того щоб алгоритм був життєздатним у реальних індустриальних умовах, де радіофір піддається постійним перешкодам, необхідно було відмовитися від використання миттєвих значень потужності сигналу, які спричиняють флуктуацію маршрутів. Замість цього було прийнято рішення інтегрувати згладжування часових рядів безпосередньо в процес оцінки вартості радіоканалу.

Водночас для вирішення проблеми виснаження вузлів-ретрансляторів виникла потреба у створенні нової метрики, яка б відображала рівень втоми сенсора. Протокол LEACH-PDT має на меті вирішити ці проблеми шляхом запровадження індексу втоми вузла, який діє як штрафний коефіцієнт у графовій оптимізації. Коли транзитний вузол проводить занадто багато операцій ретрансляції, його вартість у графі штучно зростає, що змушує алгоритми пошуку шляху автоматично будувати обхідні маршрути, тим самим забезпечуючи рівномірне балансування навантаження по всій площі мережі без використання додаткових службових повідомлень.

Математична модель маршрутизації на основі зважених графів. В архітектурі LEACH-PDT топологія магістрального зв'язку на етапі передачі даних формалізується у вигляді зваженого орієнтованого графа $G = (V, E)$. Множина вершин V складається з усіх активних головних вузлів кластерів поточного раунду та базової станції. Множина ребер E відображає наявні радіоканали між цими вузлами. Процес визначення оптимального маршруту зводиться до розрахунку комплексної цільової функції, яка складається з двох компонентів: ваги ребра та ваги вершини.

Вага ребра відображає енергетичну вартість транзакції між вузлом-відправником та проміжним вузлом. Для усунення впливу апаратного шуму та перешкод базове значення потужності отриманого сигналу піддається фільтрації за допомогою ковзного середнього. Згладжене значення перераховується мікроконтролером при отриманні кожного нового пакета за формулою:

$$RSSI_{ema}(t) = A * RSSI_{new} + (1 - A) *$$

$$RSSI_{ema}(t-1)$$

де A виступає коефіцієнтом згладжування в діапазоні від 0 до 1, $RSSI_{new}$ є миттєвим значенням потужності сигналу, а $RSSI_{ema}(t-1)$ відображає історичне значення якості каналу. Отриманий згладжений показник конвертується в оціночну відстань, після чого вага ребра $W_e(i, j)$ для передачі від вузла i до вузла j обчислюється на основі радіомоделі першого порядку:

$$W_e(i, j) = c_1 * E_{Tx}(RSSI_{ema_{ij}})$$

де c_1 є нормуючим ваговим коефіцієнтом, а функція E_{Tx} визначає витрати енергії трансивера на подолання оціненої відстані.

Вага вершини характеризує здатність вузла-ретранслятора обробляти транзитний трафік без ризику передчасного виходу з ладу. Цей параметр базується на запровадженому індексі втоми та рівні залишкової енергії. Математично вага транзитної вершини $W_v(j)$ подається у вигляді:

$$W_v(j) = c_2 * WI_j + c_3 * \frac{E_{max}}{E_{res,j}}$$

де WI_j позначає індекс втоми, який інкрементується з кожною виконаною транзакцією прийому-передачі, E_{max} є номінальною ємністю батареї, $E_{res,j}$ відображає поточний залишок енергії вузла j , а коефіцієнти c_2 та c_3 дозволяють калібрувати чутливість алгоритму до історії транзакцій та стану живлення відповідно. Для базової станції вага вершини завжди дорівнює нулю, оскільки вона не має обмежень енергетичного ресурсу.

Загальна комбінована ціна переходу від вузла i до транзитного вузла j розраховується як сума визначених компонентів:

$$W_{total}(i, j) = W_e(i, j) + W_v(j)$$

Завдання локальної маршрутизації полягає у пошуку такого шляху P , який складається з послідовності головних вузлів від джерела до базової станції, для якого сумарна вартість переходів буде мінімальною:

$$Cost(P) = \sum_{(i,j) \in P} W_{total}(i, j) \rightarrow min$$

Кожен головний вузол кластера самостійно ініціює алгоритм Дейкстри у своїй локальній пам'яті, використовуючи зібрану матрицю суміжності з розрахованими вагами W_{total} . Інформація про індекс втоми сусідніх вузлів оновлюється без генерації додаткового службового трафіку шляхом вбудовування цього значення у заголовки стандартних пакетів даних. Після визначення оптимального шляху мережа формує глобальний міжкластерний розклад доступу до середовища на основі розфарбовування графів, що дозволяє приймачам транзитних вузлів активуватися виключно у заздалегідь визначені тайм-слоти, повністю усуваючи марні витрати енергії на холосте прослуховування радіоэфіру.

Методологія та аналіз результатів імітаційного моделювання. Експериментальне дослідження запропонованого алгоритму багатокрокової маршрутизації LEACH-PDT та його порівняльний аналіз із класичним ієрархічним протоколом LEACH і багатокроковою модифікацією LEACH-MH здійснювалося шляхом програмного імітаційного моделювання. Для уникнення топологічної упередженості та забезпечення статистичної достовірності отриманих даних тестування проводилося із застосуванням методу Монте-Карло. Програмний комплекс виконував сто незалежних ітерацій моделювання для кожного з досліджуваних сценаріїв. У кожній ітерації просторове розташування ста сенсорних вузлів генерувалося наново на основі зміни псевдовипадкового базису. Фінальні усереднені значення метрик життєвого циклу розраховувалися за такою формулою:

$$M_{avg} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N M_i$$

де M_{avg} – усереднене цільове значення досліджуваної метрики, N – загальна кількість виконаних ітерацій моделювання (у даному дослідженні $N = 100$, а M_i – числове значення відповідної метрики, зафіксоване під час окремої i -ї ітерації експерименту).

Для моделювання витрат енергії трансиверами використовувалася класична радіоенергетична модель першого порядку, яка автоматично перемикається між моделлю вільного простору та моделлю багатопроменевого поширення радіосигналу залежно від порогової відстані між передавачем і приймачем. Розмір агрегованого пакета даних для всіх тестових сценаріїв був суворо зафіксований на рівні 2000 біт. Побудова магістральних шляхів та оптимізація маршрутів для багатокрокових алгоритмів реалізовувалася з використанням математичного апарату теорії графів, де мережа головних вузлів кластерів представлялася як зважений орієнтований граф.

З метою всебічного аналізу алгоритмів експериментальна база була розділена на три блоки, що імітували різні площі розгортання бездротової сенсорної мережі. Перший блок передбачав локальне поле розміром сто на 100 метрів із мінімальним початковим зарядом вузлів 0.05 Джоуля. Другий блок імітував поле середнього масштабу триста на 300 метрів із зарядом 0.1 Джоуля. Третій блок представляв масштабне індустріальне поле розміром п'ятсот на 500 метрів зі стартовим ресурсом 1 Джоуль на кожен сенсор. У межах кожного масштабу досліджувалися три варіанти просторового розташування шлюзу збору даних: ідеалізована центральна базова станція, наближена базова станція на відстані п'ятдесят метрів від межі поля та віддалена станція на відстані сто метрів від межі поля. Оцінка ефективності здійснювалася за трьома ключовими показниками: моментом виходу з ладу першого вузла мережі, моментом втрати половини активних сенсорів та раундом повного виснаження енергетичного ресурсу системи.

Аналіз роботи у локальній мережі (Площа розгортання 100x100 м). В умовах малого розміру поля із віддаленою базовою станцією класичний алгоритм LEACH починає втрачати свою ефективність через необхідність долати значні відстані за межами кластерів. Кількісні показники життєвого циклу мережі для цього сценарію наведено в Таблиці 1.

Таблиця 1

Показники життєвого циклу мережі (Поле 100x100 м, базова станція 100 м від межі)

	LEACH	LEACH-MH	LEACH-PDT
FND	71.5	92.0	87.6
HND	173.7	193.7	175.9
LND	257.5	251.9	251.0

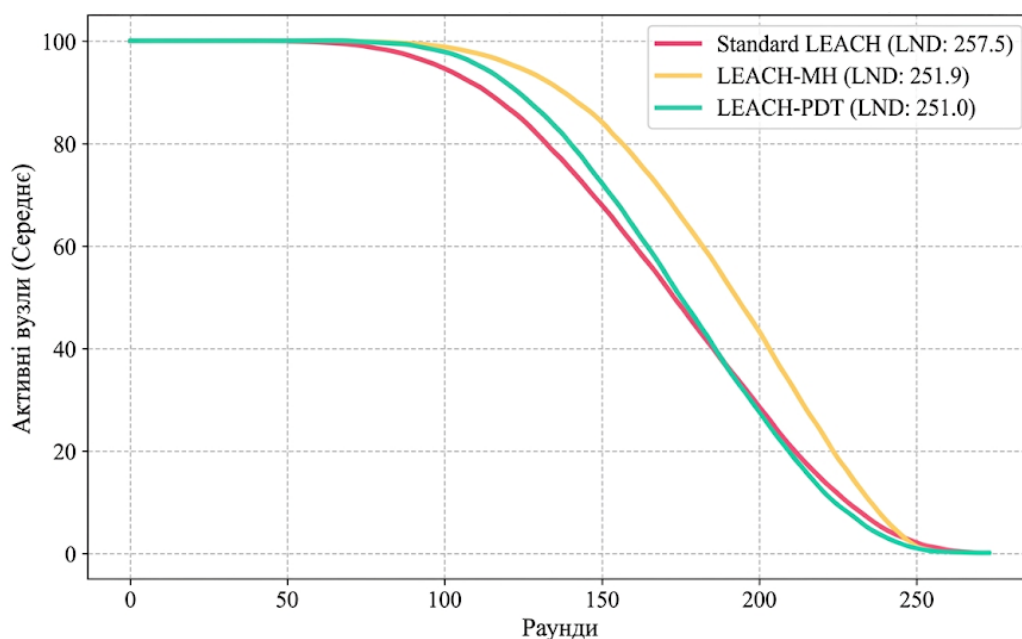


Рис. 1. Динаміка кількості живих вузлів (Площа 100x100 м, базова станція 100 м від межі)

Як демонструє динаміка збереження активних сенсорів (Рис. 1), застосування багатопараметричної маршрутизації в алгоритмі LEACH-PDT дозволяє відтермінувати вихід з

ладу першого вузла (FND) на понад 22% порівняно зі стандартним підходом LEACH, показуючи результати, співставні з багатокроковою модифікацією LEACH-МН. Проте цей вигравш у тривалому збереженні стовідсоткового просторового покриття супроводжується математично очікуваним зниженням загальної тривалості роботи мережі: обидва багатокрокові алгоритми повністю виснажують систему (показник LND) приблизно на 2–3% швидше за класичний LEACH через додаткові витрати енергії на транзитний прийом даних.

Аналіз роботи в мережі середнього масштабу (Площа розгортання 300x300 м). При масштабуванні площі моніторингу алгоритм LEACH-PDT повноцінно розкриває свій потенціал у балансуванні енергетичного навантаження, наочно демонструючи архітектурну перевагу над логікою маршрутизації найкоротшого шляху, що використовується в LEACH-МН.

Таблиця 2

Показники життєвого циклу мережі (Поле 300x300 м, базова станція 100 м від межі)

	LEACH	LEACH-МН	LEACH-PDT
FND	8.2	31.1	23.5
HND	81.5	111.7	90.7
LND	227.3	163.3	190.3

Для віддаленої станції класичний протокол LEACH стрімко деградує практично на початку симуляції, що чітко відображено на кривій вимирання вузлів (Рис. 2). Згідно з даними Таблиці 2, використання LEACH-PDT покращує виживання першого вузла (FND) майже на 186% відносно стандарту. Водночас у цьому складному сценарії алгоритм LEACH-МН скорочує загальний час життя мережі (LND) на 28% через виникнення проблеми «гарячих точок» та локальні перевантаження центральних ретрансляторів. Натомість інтелектуальний обхід перевантажених вузлів у LEACH-PDT успішно згладжує цей штраф багатокроковості: алгоритм втрачає лише близько 16% загального операційного часу порівняно з LEACH, значно перевершуючи показники LEACH-МН.

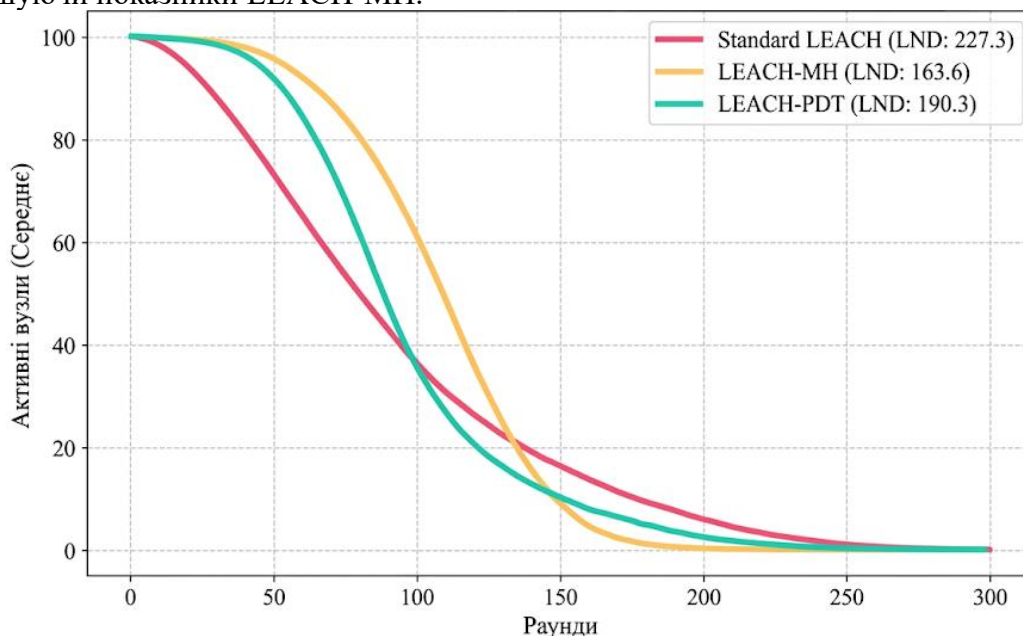


Рис. 2. Динаміка кількості живих вузлів (Площа 300x300 м, базова станція 100 м від межі)

Аналіз роботи у масштабній мережі (Площа розгортання 500x500 м). В екстремальних умовах великого індустріального поля найбільш яскраво підтверджується недієздатність класичного протоколу LEACH на великих дистанціях та критична незбалансованість алгоритму LEACH-МН.

Як ілюструє загальна динаміка (Рис. 3), стандартний однокроковий алгоритм починає втрачати периферійні вузли практично одразу після розгортання мережі (на 19-му раунді).

Застосування багатопараметричної маршрутизації LEACH-PDT дозволяє підвищити показник виживання першого вузла на вражаючі 299% відносно базового протоколу.

Таблиця 3

Показники життєвого циклу мережі (Поле 500x500 м, базова станція 100 м від межі)

	LEACH	LEACH-MH	LEACH-PDT
FND	19.6	79.3	78.3
HND	159.0	238.9	201.1
LND	834.8	462.8	612.0

Аналіз показника моменту повної відмови системи (LND) у Таблиці 3 беззаперечно доводить якість графової оптимізації. Класичний багатокроковий LEACH-MH втрачає майже 45% від потенційного життєвого циклу мережі порівняно з однокроковим LEACH через масове та стрімке виснаження транзитних вузлів біля базової станції. Розроблений алгоритм LEACH-PDT успішно відновлює значну частину цих енергетичних втрат, зберігаючи на понад 32% більше сумарного операційного часу системи у прямому порівнянні з LEACH-MH.

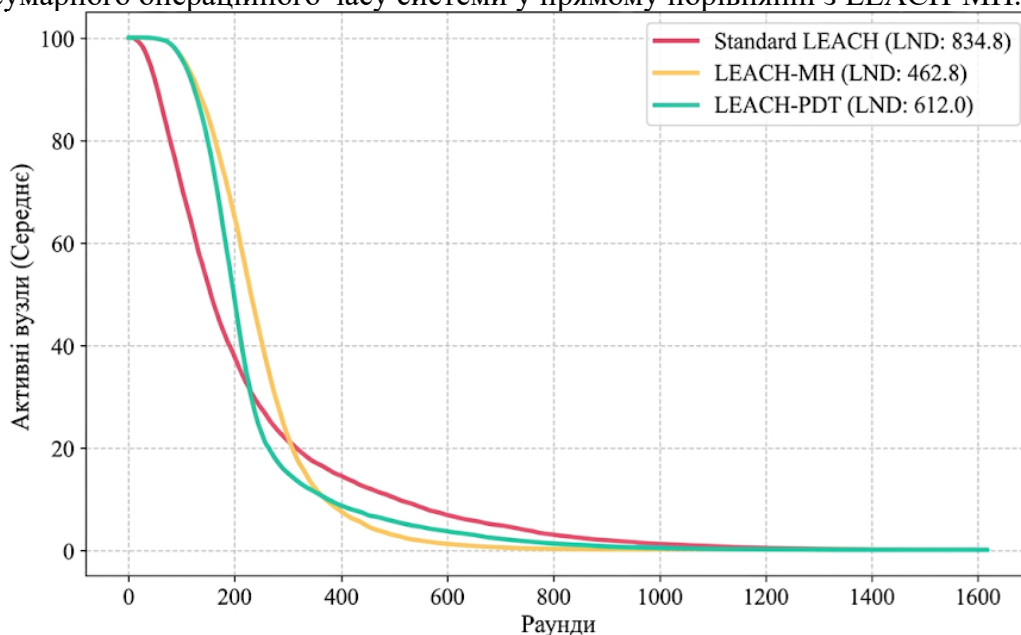


Рис. 3. Динаміка кількості живих вузлів (Площа 500x500 м, базова станція 100 м від межі)

Аналіз результатів імітаційного моделювання. Результати проведеного імітаційного моделювання дозволяють комплексно оцінити експлуатаційні характеристики запропонованої модифікації LEACH-PDT. Головною перевагою розробленого алгоритму є його здатність ефективно вирішувати проблему гарячих точок, яка є критичним архітектурним недоліком більшості багатокрокових протоколів, зокрема LEACH-MH. Введення індексу втоми вузла у цільову функцію графа дозволяє системі динамічно прокладати магістральні маршрути в обхід перевантажених ретрансляторів, розподіляючи транзитний трафік. Як наслідок, алгоритм забезпечує зростання показника життєздатності першого вузла мережі порівняно зі стандартним однокроковим підходом, досягаючи покращення до 300 відсотків на великих площах. Це гарантує стовідсоткове збереження просторового покриття підконтрольної території впродовж значно довшого часу. Основним і математично передбачуваним недоліком LEACH-PDT є зниження загального часу роботи мережі до повного виснаження в середньому на 5-15 відсотків відносно стандарту LEACH. Ця різниця зумовлена податком на ретрансляцію, тобто неминучими витратами проміжних транзитних вузлів на прийом пакетів даних, а також штучним подовженням маршрутів алгоритмом Дейкстри задля балансування мережевого навантаження.

З огляду на виявлені переваги та обмеження, цільові сфери застосування розробленого алгоритму суттєво відрізняються від його попередників. Враховуючи переваги та недоліки, його найкраще застосовувати коли фундаментальною вимогою є недопущення виникнення

сліпих зон та гарантія того, що кожен датчик залишатиметься на зв'язку. Здатність LEACH-PDT підтримувати повну цілісність топології значно довше робить його гарним вибором для систем безпеки, повністю виправдовуючи незначне зменшення сумарного обсягу пакетів, згенерованих мережею за весь її життєвий цикл.

Важливо зауважити, що наведені висновки ґрунтуються на математичному та програмному імітаційному моделюванні. Незважаючи на те, що отримані результати є статистично значущими та достовірно підтверджують теоретичну перевагу багатопараметричної оптимізації графів, вони не можуть вважатися остаточно конклюзивними без проведення натурних випробувань на апаратному рівні. Ідеалізована програмна модель не здатна абсолютно точно відтворити нелінійну деградацію хімічних джерел живлення під впливом температурних коливань, накладання колізій на рівні доступу до середовища чи затримки при виконанні ресурсоємних графових обчислень мікроконтролерами з обмеженою продуктивністю. Проте отримана аналітична база формує надійне наукове підґрунтя для переходу до етапу створення фізичних прототипів, підтверджуючи високий прикладний потенціал протоколу LEACH-PDT для використання у сучасних відмовостійких системах Інтернету речей.

Висновки

У даній роботі вирішено актуальне науково-прикладне завдання щодо підвищення енергоефективності та просторової масштабованості бездротових сенсорних мереж шляхом розробки модифікованого протоколу багатокрокової маршрутизації LEACH-PDT. В основу запропонованого рішення покладено багатопараметричну графову оптимізацію магістральних шляхів передачі даних, яка інтегрує згладжений показник якості радіоканалу та розроблений індекс втоми транзитних вузлів.

Проведене імітаційне моделювання за методом Монте-Карло у трьох масштабних сценаріях переконливо довело, що розроблений алгоритм ефективно усуває архітектурні недоліки своїх попередників. Для локальних мереж малої площі алгоритм демонструє здатність до самоадаптації, автоматично обираючи пряму маршрутизацію та показуючи результати, ідентичні базовому протоколу. Проте справжній потенціал LEACH-PDT розкривається в умовах значного просторового масштабування та віддалення шлюзу збору даних.

Критично важливою перевагою LEACH-PDT є успішне вирішення проблеми гарячих точок, яка є фатальною для класичних багатокрокових протоколів. Дослідження показало, що протокол LEACH-MH маршрутизує трафік найкоротшим шляхом, що призводить до масового вигорання центральних вузлів-ретрансляторів та падіння загального часу роботи мережі майже на 45 відсотків відносно стандарту. Натомість інтелектуальний обхід перевантажених вузлів в алгоритмі LEACH-PDT дозволяє зберегти приблизно на 30 відсотків більше сумарного операційного часу системи порівняно з LEACH-MH. Водночас експериментально підтверджено наявність очікуваного інженерного компромісу: загальний життєвий цикл мережі до повного виснаження у LEACH-PDT залишається на 5-15 відсотків нижчим за показники стандартного LEACH через податок на ретрансляцію – витрати енергії на транзитний прийом чужих пакетів даних.

Зафіксовані експлуатаційні характеристики формують чітку нішу для практичного застосування запропонованого протоколу. Алгоритм LEACH-PDT є оптимальним вибором для систем індустриальної телеметрії, екологічного моніторингу на великих площах, розумного сільського господарства та комплексів охорони периметра. У таких архітектурах критичною вимогою є недопущення виникнення сліпих зон. Здатність LEACH-PDT підтримувати повну цілісність топології значно довше повністю виправдовує локальні енергетичні втрати на транзитний трафік.

Слід зазначити, що наведені результати спираються виключно на програмне імітаційне моделювання. Незважаючи на високу статистичну достовірність, вони не є остаточно конклюзивними для фізичного рівня, оскільки ідеалізована математична модель не враховує нелінійну деградацію батарей, апаратні колізії на MAC-рівні та вплив перешкод реального індустриального середовища. Однак виявлені змістовні тенденції підтверджують життєздатність гіпотези.

Перспективи подальших досліджень у цьому напрямку передбачають поєднання алгоритму LEACH-PDT з методами нерівномірної кластеризації [3] для додаткового пом'якшення навантаження на вузли поблизу базової станції, а також апаратне прототипування алгоритму з використанням парадигми периферійних обчислень для прискорення графових розрахунків на мікроконтролерах.

Список використаної літератури:

1. Alnawafa E., Marghescu I. New Energy Efficient Multi-Hop Routing Techniques for Wireless Sensor Networks: Static and Dynamic Techniques. *Sensors*. 2018. Vol. 18, no. 6. P. 1863. URL: <https://doi.org/10.3390/s18061863>.
2. Al-Sulaifanie A. I., Al-Sulaifanie B. K., Biswas S. Recent trends in clustering algorithms for wireless sensor networks: A comprehensive review. *Computer Communications*. 2022. URL: <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2022.05.006>.
3. An Unequally Clustered Multi-hop Routing Protocol Based on Fuzzy Logic for Wireless Sensor Networks / M. Adnan et al. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 38531–38545. URL: <https://doi.org/10.1109/access.2021.3063097>.
4. Daanoun I., Abdennaceur B., Ballouk A. A comprehensive survey on LEACH-based clustering routing protocols in Wireless Sensor Networks. *Ad Hoc Networks*. 2021. Vol. 114. P. 102409. URL: <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2020.102409>.
5. Daanoun I., Baghdad A., Ballouk A. Improved LEACH protocol for increasing the lifetime of WSNs. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. 2021. Vol. 11, no. 4. P. 3106. URL: <https://doi.org/10.11591/ijece.v11i4.pp3106-3113>.
6. Fanian F., Kuchaki Rafsanjani M. Cluster-based routing protocols in wireless sensor networks: A survey based on methodology. *Journal of Network and Computer Applications*. 2019. Vol. 142. P. 111–142. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2019.04.021>.
7. Tyagi S., Kumar N. A systematic review on clustering and routing techniques based upon LEACH protocol for wireless sensor networks. *Journal of Network and Computer Applications*. 2013. Vol. 36, no. 2. P. 623–645. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2012.12.001>.
8. Verma C. P. Enhancing Parameters of LEACH Protocol for Efficient Routing in Wireless Sensor Networks. *Journal of Computers, Mechanical and Management*. 2023. Vol. 2, no. 1. P. 26–31. URL: <https://doi.org/10.57159/gadl.jcmm.2.1.23040>.
9. Zhou Y., Wang N., Xiang W. Clustering Hierarchy Protocol in Wireless Sensor Networks Using an Improved PSO Algorithm. *IEEE Access*. 2017. Vol. 5. P. 2241–2253. URL: <https://doi.org/10.1109/access.2016.2633826>.

Автори статті

Чеботарьов Дмитро – аспірант, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна.

ORCID: 0009-0006-7738-8199

Макаренко Анатолій – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна.

ORCID: 0000-0002-4081-328X

Authors of the article

Chebatarov Dmytro – postgraduate, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine.

ORCID: 0009-0006-7738-8199

Makarenko Anatoliy – Doctor of Sciences (technical), Professor, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine.

ORCID: 0000-0002-4081-328X

Надійшла до редакції: 10.04.2026

Прийнята до друку: 18.04.2026

Опубліковано: 25.05.2026

© 2026 Чеботарьов Д.В., Макаренко А.О.

Цей матеріал ліцензовано за умовами CC BY 4.0. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>