

цього, подальший аналіз статистики результатів користування споживачами запропонованою програмою (а саме, рівень їх попиту на різні види продукції та потреба в забезпеченні товару певними значеннями показників якості) дасть можливість забезпечити КФС інформацією, необхідною представникам виробника для формування пропозицій щодо вдосконалення певного виду продукції та підвищення ефективності роботи підприємства.

1. Мельник А. О. *Кіберфізичні системи: проблеми створення та напрями розвитку* / А. О. Мельник // *Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка". Комп'ютерні системи та мережі.* – 2014. – № 806. – С. 154–161. 2. Lee, Jay; Bagheri, Behrad; Kao, Hung-An (January 2015). "A Cyber-physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems". *Manufacturing Letters* 3: 18–23. doi: 10.1016/j.mfglet. 2014.12.01. 3. Циба В. Т. *Основи теорії кваліметрії: навч. посіб.* / В. Т. Циба. – К.: Рута, 1997. – 167 с. 4. Азгальдов Г. Г. *Теорія и практика оцѣнки качества товаров (основы кваліметрії): монографія* / Г. Г. Азгальдов // – М.: Экономика, 1982. – 256 с.

О. Кузьмін, В. Федека

Національний університет "Львівська політехніка",
кафедра автоматизованих систем управління

ДОСЛІДЖЕННЯ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ БЕЗПРОВІДНИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ, ПОБУДОВАНИХ НА ОСНОВІ ДВОХ АЛГОРИТМІВ МАРШРУТИЗАЦІЇ: LEACH ТА MCF

© Кузьмін О., Федека В., 2016

Порівняно два алгоритми маршрутизації: LEACH та MCF, на основі яких побудовано сенсорні мережі. Описано програмний продукт, що реалізує вказані алгоритми відповідно до введених параметрів побудови мережі та дає змогу досліджувати структуру та життєвий цикл мережі. Порівняно структуру мереж та життєвих циклів з виявленням дефектних сенсорів під час роботи мережі.

Ключові слова: мережа, сенсор, маршрутизація, протокол.

The article presents a comparison of the two routing algorithms - LEACH and MCF, on which are based sensor networks. Described software that implements these algorithms parameters relevant to building a network and allows you to explore the structure and life cycle of the network. Comparison of network structure and life cycles in identifying defective sensors in the network.

Key words: network, sensor, routing, protocol.

Вступ

Ера безпроводних технологій спровокувала народження однієї з передових комп'ютерних мережевих технологій – безпроводних сенсорних мереж (БСМ). Головна перевага БСМ в тому, що структурні елементи мережі здатні ретранслювати повідомлення між собою. Ця перевага особливо проявляється у критерії покриття сенсорної мережі, тобто площі, яку охоплює мережа. Кожна БСМ складається з елементарних частинок – датчиків (сенсорів), що самоорганізуються у мережу пристроїв, об'єднаних між собою за допомогою радіоканалу. Будова сенсора доволі проста: комунікаційна система (радіотехнологія, приймач та передавач), система моніторингу, система сприйняття, система обробки даних та джерело живлення (зазвичай це іонно-літєва батарея), що має обмежений запас енергії. Ліва частина енергії при функціонуванні БСМ витрачається на

роботу приймача та передавача. Ця обмеженість спровокувала до пошуку та дослідження різних нестандартних методів функціонування сенсорних мереж. Такими методами є побудова топології мережі та вибір оптимального протоколу взаємодії між сенсорами. В основу побудови та моделювання життєвого циклу БСМ покладено кластерну та бескластерну структуру організації мережі з використанням двох алгоритмів маршрутизації – LEACH та MCF. У роботі порівняно алгоритми побудови БСМ та їхніх життєвих циклів після виходу з ладу сенсорів у результаті їх відмови.

Постановка задачі

У БСМ витрати на комунікацію залежать від кількості вузлів у мережі та довжини шляхів між ними. Тому для того, щоб мінімізувати втрати енергії та забезпечити максимальну життєздатність мережі, потрібно вирішити такі завдання:

- знайти мінімальну кількість вузлів (сенсорів), що покривають задану площу;
- знайти оптимальну кількість вузлів, що можуть бути головами кластерів (для алгоритму LEACH);
- сформувати найкоротшу мережу з вузлів (для алгоритму MCF) чи голів кластерів (для алгоритму LEACH).

Ці задачі можна вважати задачами комбінаторної оптимізації та пошуку оптимальних шляхів. Найточніше розв'язати ці задачі можна, використовуючи глобальну інформацію про мережу. Враховуючи те, що кожен вузол мережі має лише локальну інформацію, використовують два алгоритми маршрутизації (LEACH та MCF), що забезпечують наближений розв'язок задач.

Опис алгоритмів маршрутизації

LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy) – ієрархічний алгоритм кластеризації з низьким споживанням енергії, що забезпечує баланс розходу енергії в БСМ. Ідея алгоритму доволі проста. Найближчі вузли, що знаходяться в одній зоні радіодоступу, об'єднуються, формуючи таким чином окрему комунікаційну групу – кластер. Кожен кластер складається з головного вузла (Cluster Head – CH) та вузлів нижчого рангу (Cluster Member – CM). На головний вузол кластера покладено функції маршрутизації для всіх інших вузлів кластера. Множина головних вузлів є основою комунікаційної інфраструктури сенсорної мережі (рис. 1).

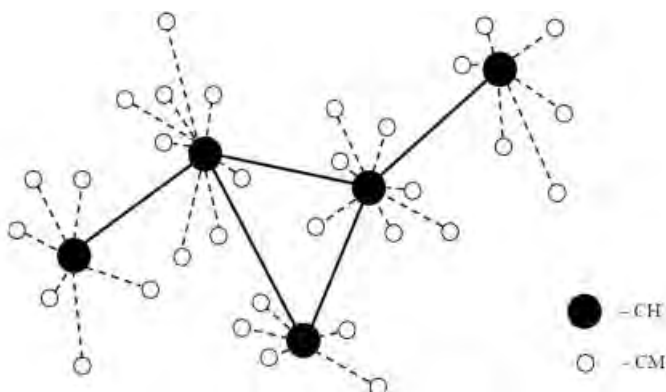


Рис. 1. Ілюстрація методу LEACH

Базова ідея алгоритму LEACH полягає в тому, що сенсорні вузли можуть бути випадково вибрані як головні на основі попередньої інформації про їх функціонування. Для цього в кожен вузол генерує випадкове число в діапазоні від 0 до 1. Кожен сенсорний вузол має свій поріг чутливості $TH(LEACH)$, що відповідає попередньо визначеному числу головних вузлів мережі. Сенсорний вузол може стати головним тоді, коли інтегроване число менше за числове значення порогу $TH(LEACH)$, в іншому випадку цей вузол залишається тільки членом кластера. Визначають числове значення порогу $TH(LEACH)$ за формулою (1).

$$TH(LEACH) = \begin{cases} \frac{p}{1 - p \times (r \times \text{mod} \frac{1}{p})} & \text{if } n \in G \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

У формулі (1) p – наперед визначений відсоток головних вузлів серед усіх сенсорних вузлів. Поточний інтервал функціонування сенсорної мережі визначається як r , G – число сенсорних вузлів, що не були вибрані головними за останні $1/p$ інтервалів. З наведеної формули випливає, що вузол, який був головним, в останніх інтервалах не має шансів (або вони є мінімальними), щоб знову стати головним вузлом мережі. Результатом такого алгоритму вибору головного вузла є баланс енергетичних можливостей кожного сенсорного вузла мережі.

Після остаточного формування кластера головний вузол широкосмуговим способом розсилає розклад передачі і “запитує” своїх членів кластера про передавання даних на основі відомого TDMA підходу. Наступна фаза функціонування сенсорної мережі проходить у режимі агрегування даних головними вузлами кластерів та передавання їх на шлюз і в мережу зв’язку спільного користування. Мережа переходить у стадію переформування після певного часу знаходження в стабільній фазі.

Алгоритм LEACH є надзвичайно ефективним алгоритмом. За його допомогою можна знизити енергозатратність на 7 % порівняно з прямою взаємодією вузлів, і від 4 до 8 разів порівняно з іншими алгоритмами маршрутизації [3]. Основним же недоліком алгоритму LEACH є те, що він не гарантує вибору найкращого вузла як головного, оскільки в результаті його функціонування головним вузлом може бути обрано той вузол, в якого найменший рівень енергії.

Алгоритм MCF (Minimum Cost Forwarding) ґрунтується на припущенні, що напрямок маршрутизації завжди відомий. Це припущення відкидає необхідність використання для маршрутизації адресної схеми з унікальною ідентифікацією вузла. Замість ідентифікатора вузол зберігає параметр найменшої ціни (least cost), який оцінює мінімальну відстань від цього вузла до центрального в заданій метриці. Ціну доставки зазвичай визначають у термінах енергоспоживання та в одиницях лінійної відстані. Повідомлення, що надійшло на вузол, передається сусіднім вузлам тоді і тільки тоді, коли він (вузол-приймач) знаходиться на маршруті з мінімальною ціною. До цього маршруту включають усі вузли від джерела до центру, в яких виконується умова: сума витраченої ціни доставки повідомлення повинна бути еквівалентною найменшій ціні джерела.

Перед початком маршрутизації проводять попередній етап визначення параметра найменшої ціни для кожного вузла (рис. 2).

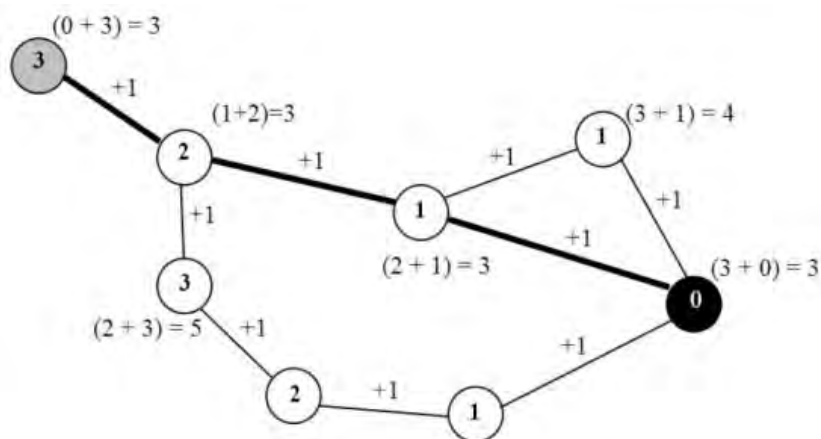


Рис. 2. Ілюстрація методу MCF

Послідовність дій попереднього етапу така:

- 1) нульова ініціалізація головного вузла;
- 2) ініціалізація усіх вузлів мережі (крім головного) знаком нескінченності;

- 3) передавання головним вузлом свого параметра усім сусіднім вузлам;
- 4) приймання параметра та коригування його шляхом інкрементного збільшення на одиницю.
- 5) якщо нове отримане значення є меншим від старого, старе значення замінюється новим;
- 6) якщо параметр оновився, отримане повідомлення повторно ретранслюється сусіднім вузлам.

Програмна реалізація

Для реалізації програмного продукту було обрано таке середовище програмування, як Borland Builder6 C++. Це середовище якнайкраще підходить для проектування інтерфейсних компонентів. Як можна побачити з середовища реалізації системи, мовою програмування є мова високого рівня програмування – C++. Ця мова об'єктно-орієнтованого програмування має низку переваг порівняно з іншими мовами. Розроблений продукт є комплексом основних функцій процесу відтворення та відображення структурної схеми сенсорної мережі та імітацією життєвого циклу сенсорної мережі. Головне вікно програми можна побачити на рис. 3.

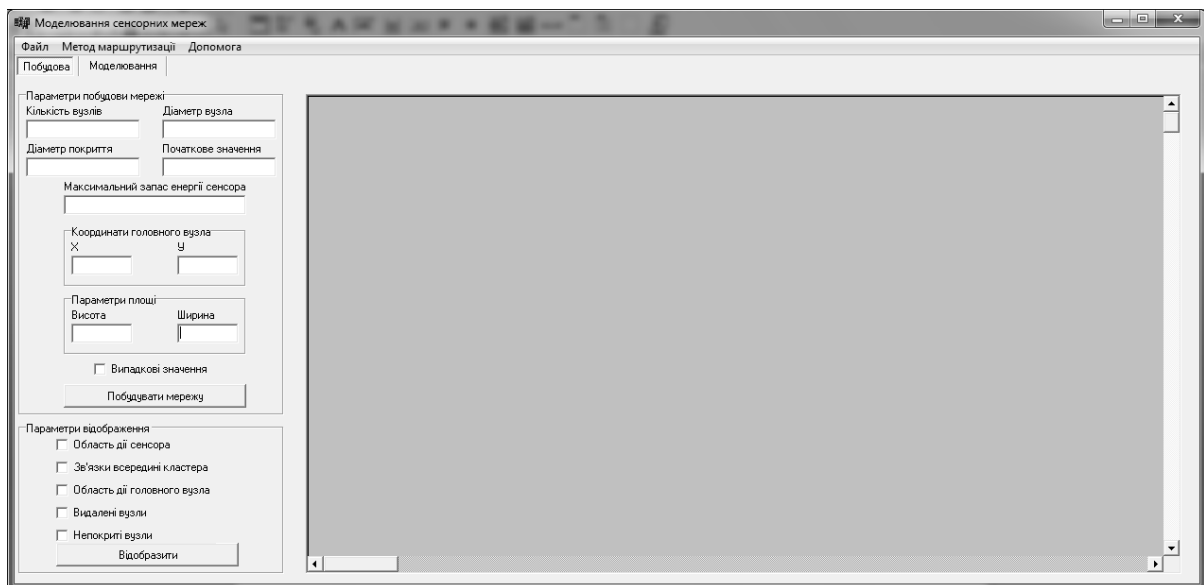


Рис. 3. Головне вікно програми

Склад головного вікна такий:

- Меню програми (пункти “Файл”, “Метод маршрутизації” та “Допомога”);
- Область відображення структурної схеми сенсорної мережі;
- Панелі вкладених сторінок (“Побудова” та “Моделювання”);

Початковим етапом є введення параметрів мережі у відповідні поля редагування:

- Кількість вузлів;
- Діаметр вузла;
- Діаметр покриття;
- Початкове значення;
- Максимальний запас енергії сенсора;
- Координати головного вузла (X та Y);
- Параметри площі (Висота і Ширина).

Іншим методом введення параметрів мережі є генерування випадкових значень. Для цього потрібно поставити відповідну позначку зліва від поля “Випадкові значення”.

Обирають алгоритм маршрутизації, натиснувши пункт головного меню “Метод маршрутизації”.

Щоб розпочати побудову мережі, достатньо натиснути кнопку “Побудувати мережу”. Результат побудови буде показано в області відображення структурної схеми (для побудови обрано алгоритм маршрутизації – LEACH) сенсорної мережі (рис. 4).

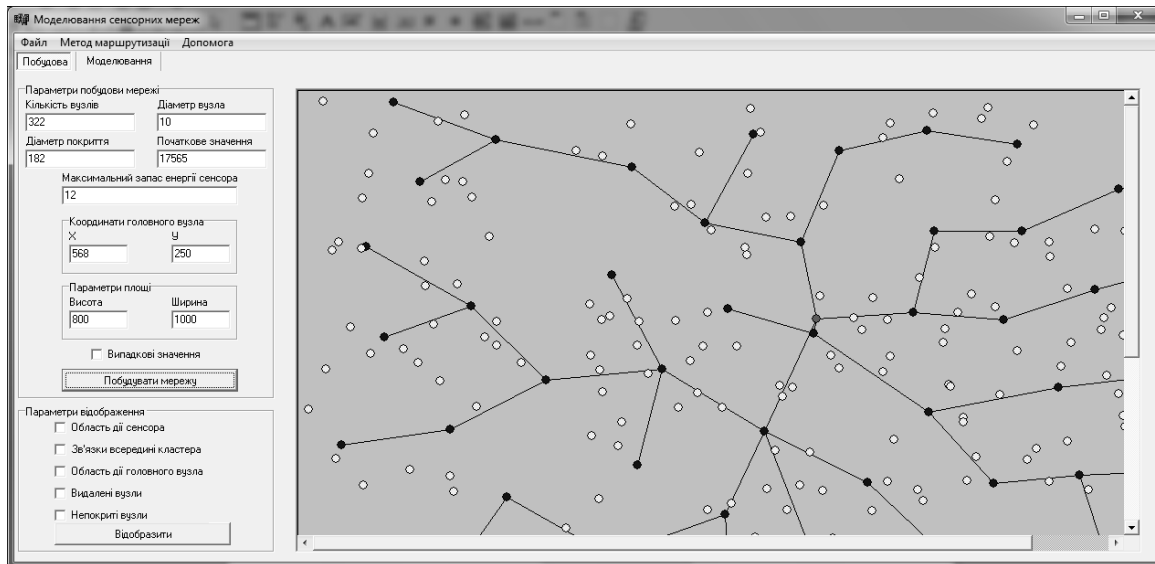


Рис. 4. Видяд побудованої мережі відповідно до введених параметрів

Система здійснює контроль за введеними даними, тобто при введенні невідповідних даних система відправляє повідомлення користувачеві, не виконуючи при цьому поставленого завдання.

У програмі реалізовано можливості комбінованого відображення атрибутів сенсорної мережі. Для встановлення відповідних параметрів відображення достатньо поставити відповідну позначку зліва від таких полів:

- Область дії сенсора – на області відображення мережі з'являється область дії сенсора;
- Зв'язки всередині кластера – відображається кластер з усіма зв'язками;
- Область дії головного вузла – відображається область дії головного вузла сенсорної мережі;
- Видалені вузли – відображаються вузли, що в результаті імітації життєвого циклу були видалені з мережі;
- Непокриті вузли – відображаються вузли, що не охоплюються мережею.

Після визначення критерію відображення потрібно натиснути кнопку "Відображення". Наприклад, оберемо критерії "Видалені вузли", "Непокриті вузли" та алгоритм маршрутизації LEACH і натиснемо на кнопку "Відображення" (рис. 5).

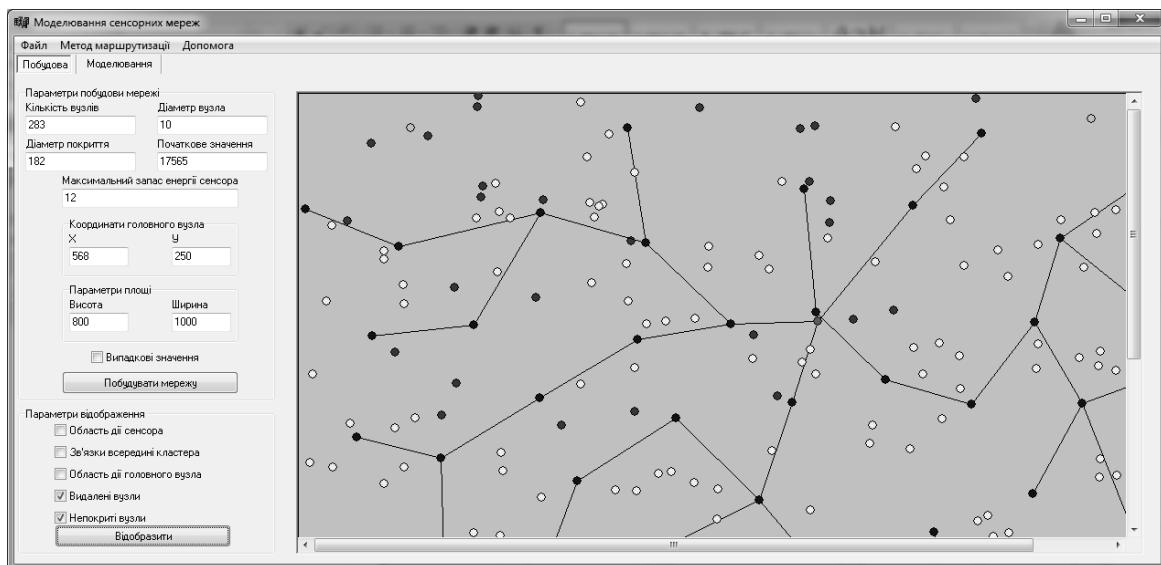


Рис. 5. Відображення видалених та непокритих вузлів

При відображенні вузла враховується його тип. Відповідний тип має відповідний йому колір відображення:

- Зелений – головний вузол мережі;
- Синій – центр кластера;
- Жовтий – вузол нижчого рангу;
- Червоний – видалений вузол;
- Сірий не зафарбований – вузол, що не покривається мережею.

Після побудови мережі можна переглянути властивості кожного сенсорного вузла побудованої мережі. Для цього достатньо натиснути праву клавішу миші по сенсору. З'явиться вікно з інформацією про сенсорний вузол (рис. 6).

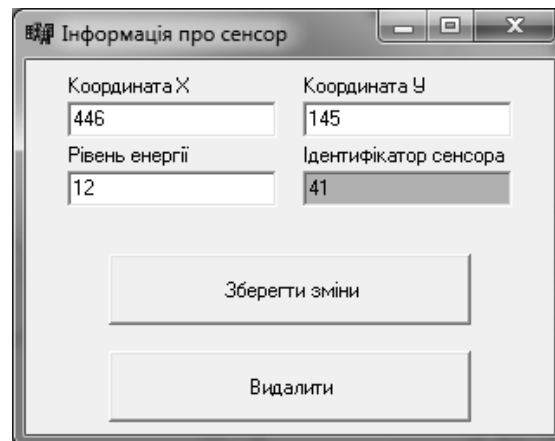


Рис. 6. Вікно інформації про сенсор

У вікні відображення інформації про сенсор показано основні атрибути сенсора:

- Координата X;
- Координата Y;
- Рівень енергії;
- Ідентифікатор сенсора.

Можна змінювати значення атрибутів сенсора. Для цього достатньо редагувати відповідні поля. Неможливо редагувати лише поле “Ідентифікатор сенсора”. Після редагування параметрів потрібно натиснути “Зберегти зміни”, щоб зміни вступили в дію. Після натиснення система перевіряє введені дані на відповідність, зберігає їх та здійснює реконфігурацію мережі.

Видалити вузол мережі доволі просто. Достатньо натиснути кнопку “Видалити”. Після цього вузол видаляється і здійснюється реконфігурація мережі. Один вузол мережі не може бути видаленим – головний вузол сенсорної мережі.

Додавати вузол можна за допомогою кліку лівою клавішею миші на області відображення мережі. При цьому новий вузол відразу визначає свою приналежність сенсорній мережі.

Для імітаційного моделювання життєвого циклу мережі потрібно перейти на вкладку “Моделювання”. Початковим етапом є введення параметрів моделювання:

- Кількість раундів;
- Кількість точок;
- Початкове значення;
- Покриття до.

Поля “Крок збільшення щільності” та “Кількість випробувань” будуть доступні лише після встановлення відповідної позначки зліва від поля “Запуск обох алгоритмів”. Ця позначка означає,

що імітація буде проводитись відповідну кількість випробувань і будуть запускатись алгоритми імітації відповідно до зміни кількості вузлів мережі.

Етап введення параметрів моделювання можна скоротити, поставивши відповідну позначку зліва від поля “Випадкові значення”. При цьому усі параметри буде визначено автоматично відповідно до ймовірнісних значень.

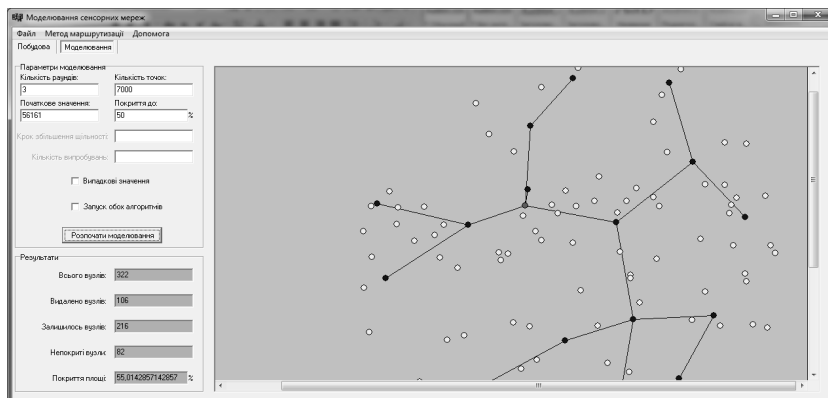


Рис. 7. Вигляд мережі після імітації життєвого циклу

Результати моделювання виводяться у відповідні поля, а саме “Всього вузлів”, “Видалено вузлів”, “Залишилось вузлів”, “Непокриті вузли” та “Покриття площі”. В області відображення структурної схеми мережі представлено вигляд сенсорної мережі після моделювання (рис. 7).

Аналіз результатів

Досліджено життєвий цикл БСМ, побудованих за допомогою двох алгоритмів маршрутизації – LEACH та MCF.

Для дослідження було обрано сенсор з такими параметрами:

- Діаметр вузла – 6;
- Діаметр покриття – 149;
- Максимальний запас енергії сенсора – 59;
- Час роботи до відмови – 12 місяців.

Дослідження проводили на площі розкиду сенсорів – $538 \times 988 \text{ м}^2$, що становить 531544 м^2 . Координати головного вузла – (545;478).

Дослідження проводили за таким алгоритмом:

Після відмови сенсора мережі перевіряють, чи був цей вузол головою кластера або з’єднував голови двох кластерів.

Якщо так, то проводимо реконфігурацію мережі та обчислюємо площу покриття.

Процес моделювання зупиняється, якщо досягнуто мінімальної площі покриття, інакше моделювання продовжується.

Моделювання проводили для десяти щільностей: 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 30 та мінімальною площею покриття – 50 %.

На рис. 8 наведено результати моделювання.

По осі X – щільність (кількість нодів(вузлів)/10000 м^2), Y – час роботи мережі (місяців).

На графіку показано криві двох кольорів – червоного та зеленого, що відповідають результатам моделювання з використанням алгоритмів маршрутизації LEACH та MCF відповідно.

За результатами моделювання можна підтвердити перевагу евристичного LEACH алгоритму маршрутизації над безкластерним алгоритмом MCF.

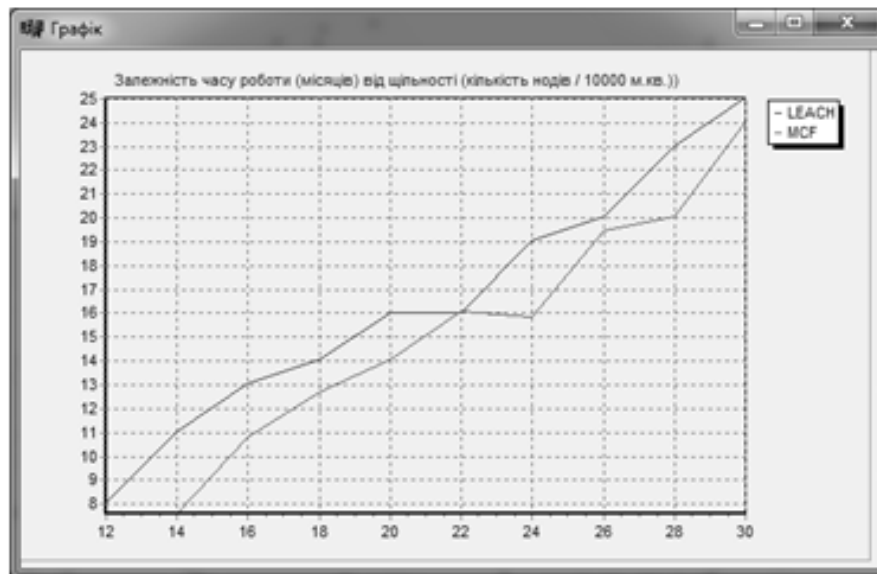


Рис. 8. Графік порівняльної характеристики роботи кожного з алгоритмів маршрутизації

Висновки

Досліджено життєвий цикл БСМ, побудованих на основі двох алгоритмів маршрутизації: LEACH та MCF. Описано розроблений програмний продукт, що дає змогу будувати структуру мережі та проводити імітаційне моделювання життєвого циклу мережі. Результати показали перевагу евристичного алгоритму маршрутизації LEACH, що використовує кластерну структуру мережі, над безкластерним алгоритмом MCF.

1. David Culler, Deborah Estrin, Mani Srivastava, "Overview of Sensor Networks", *IEEE Computer Society*, p. 9, 2004.
2. Anna Hać, "Wireless Sensor Network Designs", John Wiley & Sons Ltd. pp.184–231, 2003.
2. Biradar, R. Inter-Intra Cluster Multihop-LEACH Routing In Self-Organizing Wireless Sensor Networks / R. Biradar, S. R. Sawant, R. Mudholkar, V. C. Patil // *International Journal of Research and Reviews in Computer Science (IJRRCS)*. – 2011. – March. – Vol. 2, No 1. – P. 124–130.
3. Ye F. A Scalable Solution to Minimum Cost Forwarding in Large Scale Sensor Networks / F. Ye, A. Chan, S. Lu, L. Zhang // *Proceedings of the 10th International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN)*, October 2001. – Scottsdale, Arizona, 2001. – P. 304–309.