

## УДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМУ ПОБУДОВИ ВІДМОВОСТІЙКОЇ СТРУКТУРИ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ

В статті розглянута сенсорна мережа та досліджено процес проектування відмовостійкої сенсорної мережі. Виділено основні етапи процесу проектування та досліджено кожен з цих етапів. Стаття базується на стратегії забезпечення відмовостійкості сенсорної мережі, орієнтованих на досягнення необхідного рівня зв'язності Ф-вузлів. Параметр зв'язності розглядається як показник якості функціонування сенсорної мережі. Розроблений інструментальний комплекс реалізує запропоновані алгоритми та функціональну схему.

**Ключові слова:** сенсорна мережа, відмовостійкість, функціональна схема, проектування, зв'язність.

### Вступ

Одним з актуальних напрямків у галузі інформаційних технологій є створення нового виду мережевих систем – сенсорних мереж (СМ).

Сенсорна мережа – це розподілена мережа необслуговуваних мініатюрних електронних пристроїв (вузлів мережі), які здійснюють збір даних про параметри зовнішнього середовища і передачу їх, на базову станцію шляхом трансляції від вузла до вузла за допомогою безпроводного зв'язку.

Проектування і реалізація сенсорних мереж потребують вирішення безлічі складних проблем, що відносяться до різних областей досліджень. Однією з основних проблем є забезпечення високої відмовостійкості СМ. Важливість цієї проблеми саме для сенсорних мереж визначається, з одного боку, відповідальністю їх застосувань, а з іншого – високою ймовірністю порушення роботи мережі внаслідок відмов вузлів і каналів зв'язку, що обумовлено великою кількістю вузлів, можливістю зовнішніх несприятливих впливів, а також обмеженнями в енергоспоживанні вузлів внаслідок обмеженості ресурсу їх джерел живлення (батареї).

### Основна частина

Розглянемо процес проектування відмовостійкої сенсорної мережі.

Основні етапи процесу проектування сенсорної мережі:

1. аналіз вимог, розробка структурної моделі СМ, тобто визначення кластерів мережі, проектування структури кластерів і мережі в цілому;
2. розробка фізичної моделі СМ, тобто вибір обладнання, протоколів і способів організації каналів передачі даних;
3. моделювання та оптимізація СМ.

На рис. 1 запропонована функціональна схема процесу проектування СМ. Вихідні дані і вимоги до СМ розрізняються залежно від прикладної задачі. Тому нижче будуть розглянуті найбільш загальні вхідні дані, що надходять в систему підтримки проектування СМ.

Розглянемо докладніше кожен етап процесу проектування [1,2].

Вихідні дані для процесу проектування СМ наступні:

- масив координат функціональних вузлів СМ,
- координата розміщення базової станції,
- опис об'єкта, на якому повинна бути розміщена сенсорна мережа (його розміри, схема розміщення, координати перешкод для проходження електромагнітних хвиль і характеристики перешкод),
- $T_p$  – період збору інформації Ф-вузлами з СМ,
- $\Delta T_p$  – допустиме відхилення періоду збору інформації,
- критерій відмови СМ.

Вимоги до СМ наступні:

- ступінь надійності СМ,

- загальний час роботи СМ),
- вартість СМ.

Всі компоненти зазначених вимог задаються за допомогою нечіткої множини.

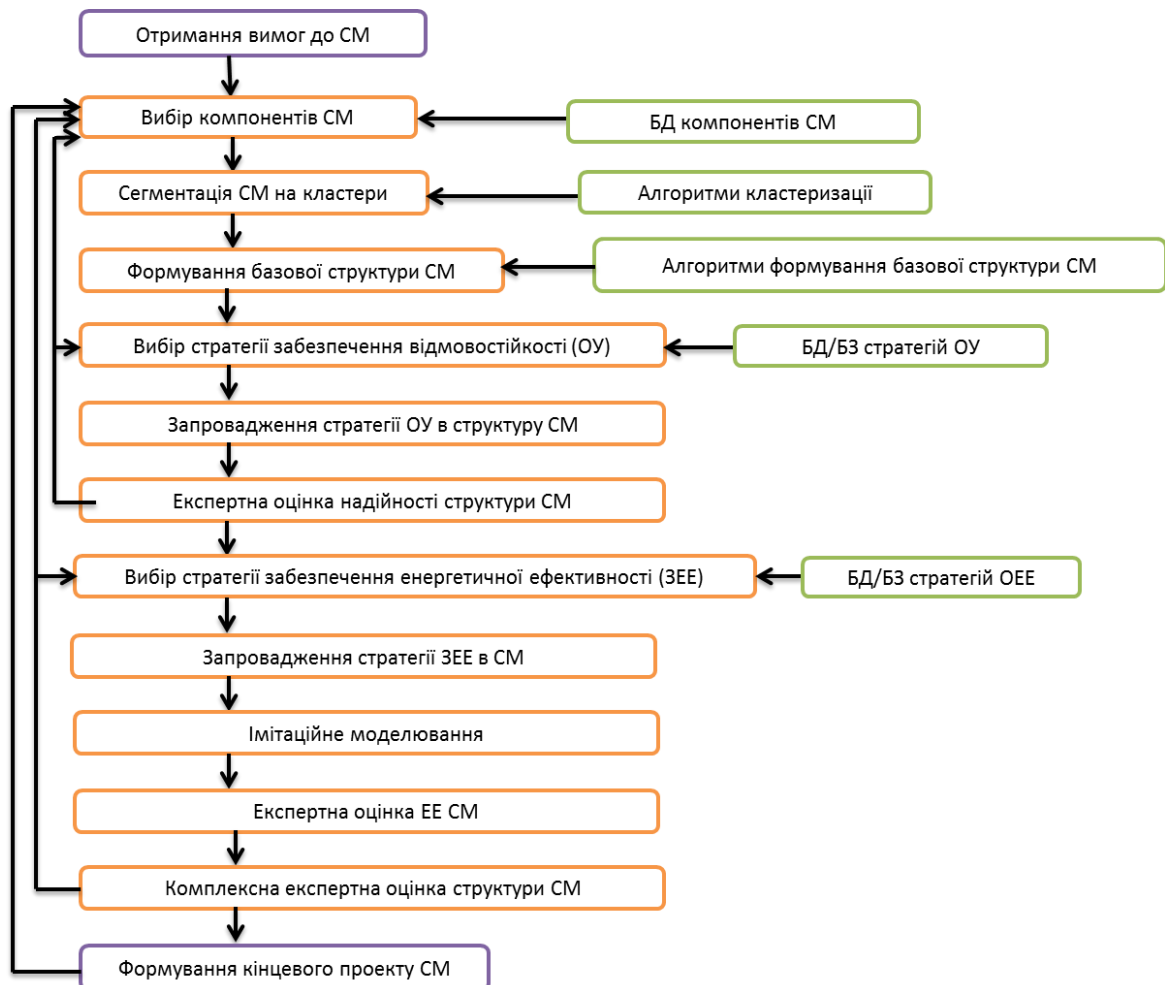


Рис.1. Функціональна схема процесу проектування відмовостійкої СМ.

Функціональний блок вибору компонентів СМ здійснює відповідно до вимог проектувальника підбір з бази даних (БД) набору сумісних один з одним типів використовуваних вузлів в поточному проекті. Вибір всіх наборів сумісних вузлів здійснюється за допомогою пошуку з обмеженнями, заданими проектувальником, по БД вузлів. Після цього здійснюється сортування наборів сумісних вузлів за критеріями, заданим проектувальником. Інтелектуальна система підтримки прийняття рішень (ІСПП), що реалізує функціональну схему, повинна або видати рекомендацію щодо використання конкретного набору вузлів для проекту, або надати проектувальнику самому здійснити свій вибір. В БД, пов'язаної з цим блоком, міститься наступна інформація про

1. доступні до використання вузли мережі: type – тип вузла (Ф-вузол, Т-вузол, БС); price – вартість; model – модель і виробник вузла;  $\lambda_0$  – інтенсивність апаратних відмов компонентів вузла (без обліку відмови батареї); speed – швидкість передачі даних; compatibility – список сумісності вузлів;  $P_{t, \text{обМВТ}}$  – потужність передавача;  $G_{t, \text{обБ}}$  – коефіцієнт посилення передавальної антени;  $G_{r, \text{обБ}}$  – коефіцієнт посилення приймальної антени;  $P_{\text{min, обМВТ}}$  – чутливість приймача на даній швидкості; SOM – запас в енергетиці радіозв'язку;  $L_{t, \text{об}}$  – втрати сигналу в коаксіальному кабелі і роз'ємах передавального тракту;  $L_{r, \text{об}}$  – втрати сигналу в коаксіальному кабелі і роз'ємах приймального тракту;

2. часові параметри – тривалість часу виконання вузлом необхідних операцій (час перебування вузла в відповідних станах):  $\Delta_s$  – збір і обробка інформації,  $\Delta_R$  – прийом пакета,

$\Delta_T$  – передача пакету,  $\Delta_{WU}$  – перехід зі стану сну в активний стан,  $\Delta_{SL}$  – перехід в сон з активного стану,  $T_p$  – період збору інформації Ф-вузлами,  $\Delta_{TP}$  – допустиме відхилення періоду збору інформації; параметри енергоспоживання: струм споживання в різних режимах:  $I_{Tx}$  – в режимі передачі,  $I_{Rx}$  – в режимі прийому,  $I_{IDLE}$  – в режимі сну,  $I_{wu}$  – під час пробудження,  $I_{SL}$  – під час переходу в сон з активного стану.

Використовувана в розрахунках дальність  $D$  впевненої передачі радіосигналу вузла обчислюється наступним чином [3]:

$$D = 10 \cdot \left( \frac{FSL}{20} - \frac{33}{20} \lg F \right), \quad (1)$$

де:  $D$  – відстань між двома точками (км),

- FSL (free space lose) – втрати у вільному просторі (дБ),

-  $F$  – центральна частота каналу, на якому працює вузол (МГц).

Параметр FSL визначається наступним чином:

$$FSL = Y_{\text{дБ}} - \text{SOM}, \quad (2)$$

де  $Y_{\text{дБ}}$  – сумарне посилення системи, що обчислюється за формулою:

$$Y_{\text{дБ}} = P_{t,\text{дБмВт}} + G_{r,\text{дБ}} + G_{t,\text{дБ}} - P_{\text{min},\text{дБмВт}} - L_{t,\text{дБ}} - L_{r,\text{дБ}}, \quad (3)$$

SOM (System Operating Margin) – запас в енергетиці радіозв'язку (дБ).

Функціональний блок сегментації СМ на кластери формує кластери на основі вимог до мережі і заданого розміщення Ф-вузлів, а також здійснює розміщення БС всередині кожного кластера. Кластери формуються за допомогою обраного проектувальником алгоритму кластеризації. Для формування кластерів проектувальник також може обрати один з наступних класичних алгоритмів кластеризації: алгоритм  $k$ -середніх ( $k$ -means), алгоритми ієрархічної кластеризації (single link і complete link), алгоритми кластеризації методами теорії графів [4].

Алгоритм  $k$ -середніх розбиває безліч елементів векторного простору (Ф-вузлів) на заздалегідь відоме число кластерів  $k$ . Дія алгоритму така, що він прагне мінімізувати середньоквадратичне відхилення на точках кожного кластера:

$$V = \sum_{i=1}^k \sum_{x_j \in S_i} (x_j - \mu_i)^2, \quad (4)$$

де  $k$  – число кластерів,  $S_i$  – безліч кластерів,  $i = 1, 2, \dots, k$  та  $\mu_i$  – центри мас векторів  $x_j \in S_i$ .

Основна ідея полягає в тому, що на кожній ітерації перераховується центр мас для кожного кластера, отриманого на попередньому кроці, потім Ф-вузли розбиваються на кластери знову відповідно до того, який з нових центрів виявився ближчим за обраною матрицею. Алгоритм завершується, коли на якійсь ітерації не відбувається зміни кластерів.

Алгоритми кластеризації методами теорії графів здійснюють спочатку побудову мінімального остовного дерева з використанням одного з алгоритмів – алгоритм Краскала, алгоритм Борувики, алгоритм MST [5]. Після чого формуються  $k$  кластерів, за допомогою видалення з мінімального остовного дерева  $k$  ребер максимальної ваги.

Було розглянуто генетичний алгоритм для кластеризації СМ. Функція пристосованості здійснює комплексну оптимізацію наступних параметрів: максимізація трафіку в кожному кластері; мінімізація трафіку між різними кластерами; усереднення трафіку в різних

кластерах; мінімізація просторового розсіювання вузлів в кожному кластері; максимізація відстані між різними кластерами.

Функціональний блок формування базової структури СМ здійснює розміщення Т-вузлів в кожному кластері таким чином, щоб кожен Ф-вузол мав хоча б один шлях до ВС кластера. Розглядаються існуючі (TRP, TPRR, CRP) і пропонуються більш ефективні алгоритми базового розміщення Т-вузлів (БАЗ-1, БАЗ-2, ОУ-3), а також процедура оптимізації базової структури СМ.

Функціональний блок вибору стратегії забезпечення відмовостійкості призначений для вибору відмовостійкої (ВС) стратегії, яку доцільно використовувати для проекрованої ВС СМ (тобто раціональної ВС-стратегії). У базі даних, пов'язаної з цим блоком, містяться ВС-стратегії, які можуть бути використані при розробці відмовостійкої СМ. Також зберігаються рекомендації по вибору ВС-стратегії в залежності від вимог проектувальника.

В результаті дослідження було отримано та пропонуються, стратегії забезпечення відмовостійкості СМ, орієнтовані на досягнення необхідного рівня зв'язності Ф-вузлів з ВС. Параметр зв'язності розглядається як показник якості функціонування СМ. Розглянуто існуючий алгоритм NTRRP та пропонуються більш ефективні алгоритми ВС-розміщення Т-вузлів (ОУ-1, ОУ-2, ОУ-3), а також процедура оптимізації ВС-структури СМ.

Кожну з рекомендованих ВС-стратегій необхідно оцінити з точки зору, надійності СМ і додаткових витрат, пов'язаних з застосуванням цієї стратегії. Для цього здійснюється впровадження кожної з рекомендованих ВС-стратегій в структуру відмовонестійкої СМ, отриману раніше, для чого використовується спеціальний функціональний блок. Даний блок має базу правил і алгоритмів модифікації вихідної структури відмовонестійкої СМ відповідно до кожної з ВС-стратегій. Результатом роботи даного блоку є структурна схема надлишкової СМ, яка повинна бути проаналізована на надійність і вартість. Для цього призначена експертна система оцінки надійності структури СМ, яка буде розглянута в наступному розділі. При невиконанні поставлених вимог до надійності і вартості отриманого варіанту надлишкової структури СМ виконуються нові ітерації цього процесу при інших варіантах структури і компонентів СМ, і інших стратегіях забезпечення відмовостійкості (генерованих відповідними блоками) аж до отримання рішення, задовольняючого поставлені вимоги.

Функціональний блок вибору стратегії забезпечення енергетичної ефективності (ЗЕЕ) призначений для вибору такої стратегії ЗЕЕ, яку доцільно використовувати для проекрованої енергоефективної СМ. Завдання ЗЕЕ зводиться до збільшення загального часу роботи всієї мережі в цілому. Обмеження в енергоспоживанні вузлів мережі є основною особливістю роботи СМ. Ф-вузли і Т-вузли мережі можуть перебувати в чотирьох режимах – передачі, прийому, обчислень і сну. При проектуванні слід також враховувати витрати енергії на переходи з одного режиму в інший, особливо перехід в режим сну і повернення з нього в режим прийому або передачі.

У базі даних, пов'язаної з функціональним блоком вибору стратегії ЗЕЕ, містяться такі стратегії ЗЕЕ, які можуть бути використані при розробці відмовостійкості СМ. Тут же зберігаються рекомендації щодо вибору стратегії ЗЕЕ в залежності від вимог проектувальника. На основі отриманих результатів дослідження пропонуються два алгоритми збільшення загального часу роботи СМ до моменту її відмови. Перший пропонований алгоритм ЕЕ-1 збільшує структурну енергоефективність СМ за допомогою резервування Т-вузлів (або пропорційного збільшення ємності їх батарей) з урахуванням інтенсивності їх енергоспоживання. Другий пропонований алгоритм ЕЕ-2 збільшує загальний час роботи СМ і мінімізує конфлікти при передачі повідомлень за допомогою формування розкладу доступу в бездротову СМ.

Функціональний блок впровадження стратегії ЗЕЕ працює аналогічно блоку впровадження стратегії ВС в структуру СМ. При цьому в надлишкову структуру СМ впроваджується стратегія ЗЕЕ. Результатом роботи даного блоку є побудована

енергоефективна СМ. Щоб здійснити експертну оцінку енергоефективності потрібно попередньо провести процедуру імітаційного моделювання. Статистичні результати функціонального блоку імітаційного моделювання СМ надходять на вхід експертної системи оцінки енергоефективності СМ. Основним результатом блоку імітаційного моделювання є отримані величини загального часу роботи СМ до моментів відмови як самої СМ, так і транспортної структури СМ. Блок імітаційного моделювання надає також інформацію про тривалість роботи та час відмови кожного з вузлів СМ. Пропонується процедура імітаційного моделювання роботи за розкладом сенсорної мережі періодичного збору інформації.

При невиконанні поставлених вимог до енергоефективності та вартості отриманого варіанту виконуються нові ітерації процесу проектування, або при інших стратегіях забезпечення енергоефективності або при інших варіантах надлишкової структури СМ аж до отримання рішення, що задовольняє поставленим вимогам.

У статті пропонується використовувати механізм нечіткого логічного висновку для здійснення оцінок різних параметрів СМ, таких як надійність, вартість, енергоефективність, а також для комплексної оцінки структури СМ. Використання механізму нечіткого логічного висновку надає проектувальнику зручний інструмент, що дозволяє гнучко налаштовувати і вибирати правила для оцінки параметрів СМ, задавати нечіткі множини, що характеризують ступінь приналежності різних параметрів СМ до необхідної величини.

Проектування потрібної ВС СМ виконано за допомогою розробленого інструментального комплексу, що реалізує запропоновані алгоритми та функціональну схему побудови ВС СМ. Основними реалізованими компонентами системи є:

- модуль взаємодії з проектувальником (призначений для користувача інтерфейс);
- модуль обчислення дальності впевненої передачі радіосигналу за характеристиками вузла;
- модуль збереження і завантаження робочого проекту;
- модуль здійснення кластеризації СМ (алгоритми ГРУП-1, k-means, ієрархічної кластеризації);
- модуль побудови базової структури СМ (алгоритми TRC, БАЗ-1, БАЗ-2);
- модуль обчислення ймовірності зв'язності між Ф-вузлами і БС; модуль оптимізації базової структури СМ;
- модуль побудови надлишкової і енергоефективної структури СМ (алгоритми ОУ-1, ОУ-3, ЕЕ-1);
- модуль демонстрації інтенсивності енергоспоживання вузлів СМ;
- модуль оптимізації збиткової структури СМ;
- модуль формування розкладу доступу в бездротову СМ (алгоритм ЕЕ-2);
- модуль імітаційного моделювання роботи СМ за розкладом;
- модуль інтеграції з EC Drools;
- модуль здійснення нечіткої експертної оцінки параметрів СМ;
- модуль тестування і порівняння результатів роботи алгоритмів.

### **Висновок**

Оцінка часу роботи СМ до моменту відмови обчислюється за допомогою запропонованої в роботі процедури імітаційного моделювання при  $\lambda_0 = 1.8 \cdot 10^{-6}$ . В результаті імітаційного моделювання СМ пропрацювала до моменту відмови 47112 годин. Коефіцієнт достовірності того, що спроектована СМ є високо надійною, енергоефективною і має "низьку вартість" був обчислений за допомогою нечіткої комплексної експертної системи і виявився рівним 0.985.

### Список використаної літератури

1. Мочалов, В.А. Интеллектуальная САПР сенсорных сетей / В.А. Мочалов, Е.Н. Турута // Труды конгресса по интеллектуальным системам и информационным технологиям «AIS-IT09». Научное издание в 4-х томах. — М.: Физматлит, 2009. — Т . 3. — С . 268-276.
2. Мочалов, В.А. Функциональная\*- схема процесса проектирования беспроводных сетей мониторинга / В.А. Мочалов, Е.Н. Турута // Датчики и системы, 2010. — №2 — С.40-44.
3. Пролетарский, А.В. Беспроводные сети Wi-Fi / А.В. Пролетарский, И.В. Баскаков, Д.Н. Чирков // Интернет-университет информационных технологий, 2007. — С . 137-145.
4. Теодоридис, С. Распознавание образов, пер. с англ. / С. Теодоридис, К.Коутрумбас — М.: Издательский Дом «Интеллект», 2009.
5. Асанов, М.О. Дискретная математика: графы, матроиды, алгоритмы / М.О. Асанов, В.А. Баранский, В.В. Расин // Ижевск : НИЦ "РХД", 2001. — 288 с.

Надійшла 16.07.2017 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Казакова Н.Ф.