

МІНІСТЕРСТВО ВНУТРІШНІХ СПРАВ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВНУТРІШНІХ СПРАВ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ УПРАВЛІННЯ, ПСИХОЛОГІЇ
ТА БЕЗПЕКИ

Кафедра інформаційних технологій

ПРОЄКТУВАННЯ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ ДЛЯ РАНЬОГО
ВИЯВЛЕННЯ ЛІСОВИХ ПОЖЕЖ

Кваліфікаційна робота
здобувача вищої освіти
4 курсу заочної форми навчання
Артура ФРАНКА

Науковий керівник:

Михайло РИЛЬНИКОВ

Рецензент:

вчене звання, науковий ступінь

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ рецензента)

Кваліфікаційна робота допущена до захисту

« ___ » _____ 2026 р., протокол № _____

Завідувач кафедри інформаційних технологій

_____ Олег ЗАЧЕК

(підпис)

Львів
2026

АНОТАЦІЯ

ФРАНКО А. Проектування сенсорної мережі для раннього виявлення лісових пожеж. – Рукопис.

Дослідження на здобуття освітнього ступеня «бакалавр» за спеціальністю 126 «Інформаційні системи та технології». – Львівський державний університет внутрішніх справ, МВС України, Львів, 2026.

В даній роботі досліджено технології та принципи функціонування бездротових сенсорних мереж (БСМ), проаналізовано їх переваги, недоліки та галузі застосування. Особливу увагу приділено алгоритмам маршрутизації в БСМ та їх порівнянню. Проведено огляд сучасних засобів моделювання бездротових сенсорних мереж. Розроблено прототип мережі для раннього виявлення лісових пожеж.

Ключові слова: бездротові сенсорні мережі, маршрутизація, раннє виявлення лісових пожеж, моделювання, CupCarbon, IoT.

ABSTRACT

FRANKO A. Design of a Sensor Network for Early Forest Fire Detection. – Manuscript.

Thesis for the degree of Bachelor in specialty 126 «Information Systems and Technologies». – Lviv State University of Internal Affairs, Ministry of Internal Affairs of Ukraine, Lviv, 2026.

This work explores the technologies and principles of operation of wireless sensor networks (WSN), analyzes their advantages, disadvantages, and areas of application. Particular attention is paid to routing algorithms in WSN and their comparison. A review of modern tools for modeling wireless sensor networks was conducted. A prototype of a network for early forest fire detection has been developed.

Keywords: wireless sensor networks, routing, early forest fire detection, modeling, CupCarbon, IoT.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1 ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТУ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА огляд ком'ютерних мереж.....	7
1.1. Інформаційне забезпечення для розроблення системи.....	7
1.2. Формування стратегічних альтернатив.....	9
1.3. Огляд комп'ютерних мереж.....	12
1.4. Бездротові сенсорні мережі.....	15
1.5. Застосування бездротових сенсорних мереж.....	16
1.6. Тенденції розвитку БСМ.....	19
1.7. Маршрутизація.....	20
РОЗДІЛ 2 проектування мережі.....	22
2.1. Побудова дерева проблеми та дерева цілей.....	22
2.2. Огляд засобів моделювання бездротових сенсорних мереж.....	24
2.3. Концептуальна модель.....	30
2.4. Моделювання процесів предметної області.....	32
2.5. Опис бізнес-процесів і потоків даних.....	33
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО РІШЕННЯ.....	36
3.1. Загальна структура програмного проекту.....	36
3.2. Опис використаного середовища проектування.....	39
3.3. Розробка та опис інтерфейсу користувача.....	41
3.4. Вимоги до апаратного забезпечення.....	43
3.5. Тестування/опис проведених експериментів.....	44
3.6. Оцінювання та аналіз експериментів.....	47
ВИСНОВКИ.....	48
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	49

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

BCM — бездротова сенсорна мережа

WSN — Wireless Sensor Network (бездротова сенсорна мережа)

IoT — Internet of Things (Інтернет речей)

Mote — сенсорний вузол (модуль)

Sink — базова станція (сток)

CH — Cluster Head (голова кластера)

GW — Gateway (шлюз)

MAC — Medium Access Control (підрівень керування доступом до середовища)

OSI — Open System Interconnection (еталонна модель взаємодії відкритих систем)

TCP/IP — Transmission Control Protocol / Internet Protocol (стек протоколів)

IP — Internet Protocol

IEEE 802.15.4 — стандарт бездротового зв'язку для сенсорних мереж

UML — Unified Modeling Language (уніфікована мова моделювання)

IDEF0 — Integrated DEFinition for Function Modeling

DFD — Data Flow Diagram (діаграма потоків даних)

CupCarbon — симулятор бездротових сенсорних мереж

LAN — Local Area Network (локальна мережа)

WAN — Wide Area Network (глобальна мережа)

ВСТУП

В умовах стрімкого розвитку технологій Інтернету речей (IoT) та необхідності оперативного реагування на природні катастрофи створення ефективних систем моніторингу навколишнього середовища є одним із ключових напрямків забезпечення екологічної безпеки. Зростання кількості лісових пожеж у світі зумовлює потребу у надійних, автономних і масштабних системах раннього виявлення загоряння, які дозволяють мінімізувати матеріальні та екологічні збитки, а також рятувати людські життя.

Значну допомогу в цьому може надати використання бездротових сенсорних мереж (БСМ), які забезпечують розподілений збір даних у важкодоступних територіях, низьке енергоспоживання та можливість роботи в реальному часі. Система моніторингу лісових пожеж на основі БСМ дозволяє оперативно виявляти аномалії температури, диму, вологості та інших параметрів і передавати інформацію на базову станцію для подальшого реагування.

Необхідність розробки такої системи обумовлюється глобальною проблемою лісових пожеж, швидким поширенням яких загрожує екосистемам, економіці та населенню. Подібні рішення можуть використовуватися лісовими господарствами, рятувальними службами, державними органами екологічного контролю та приватними компаніями, що займаються охороною природних територій.

Розроблювана мережа, оснащена датчиками температури, вологості, диму та освітленості, з використанням кластерної архітектури та ефективних алгоритмів маршрутизації, покликана забезпечити раннє виявлення пожеж та оперативне інформування відповідних служб.

Із викладеного випливає **актуальність теми** кваліфікаційної роботи — зростаюча потреба у сучасних, надійних і енергоефективних системах

моніторингу на основі бездротових сенсорних мереж для запобігання природним катастрофам.

Метою роботи проектування, моделювання та дослідження бездротової сенсорної мережі для раннього виявлення лісових пожеж у середовищі CupCarbon.

Для досягнення поставленої мети були сформовані такі завдання:

- провести аналіз предметної області та існуючі аналоги систем моніторингу пожеж;
- провести огляд алгоритмів маршрутизації в БСМ;
- здійснити системний аналіз та побудувати концептуальну модель;
- розробити прототип мережі в середовищі моделювання;
- виконати тестування та аналіз ефективності отриманого рішення.

Об'єктом дослідження дослідження є процес маршрутизації та функціонування бездротових сенсорних мереж.

Предметом дослідження дослідження виступають методи та засоби побудови БСМ для раннього виявлення лісових пожеж.

Методи дослідження. У роботі застосовано загальнонаукові методи: аналіз і синтез, порівняння, системний підхід, моделювання, а також спеціальні методи: імітаційне моделювання в CupCarbon, UML-моделювання, IDEF0 та DFD.

Структура роботи. Кваліфікаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел. Обсяг основного тексту роботи становить 43 сторінки, містить 18 рисунків та 20 бібліографічних джерел.

РОЗДІЛ 1

ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТУ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОГЛЯД КОМ'ПЮТЕРНИХ МЕРЕЖ

Метою бакалаврської роботи є розробка бездротової сенсорної мережі яка б могла виявляти лісові пожежі. Основною її функцією буде виявлення вогню ще на дуже ранніх стадіях, поки він не набув стихійного характеру.

Доцільність розробки даної мережі полягає в надзвичайно великій проблемі лісових пожеж у всьому світі. Щороку пожежі у природних екосистемах завдають великої як матеріальної, так і екологічної шкоди. До того ж часом постраждати від таких пожеж може і населення, яке проживає в зоні їх поширення. Саме тому профілактичні заходи щодо попередження природних пожеж є важливим напрямком роботи вогнеборців, а міжнародна співпраця рятувальників та обмін досвідом дають змогу продуктивніше реагувати на виникнення таких надзвичайних ситуацій.

1.1. Інформаційне забезпечення для розроблення системи

Вчасне виявлення осередків займання у лісових масивах є одним із основним завданням у сфері охорони навколишнього середовища. Лісові пожежі зможуть заподіяти великі екологічні та економічні втрати, тому для зменшення таких ризиків використовуються різні методи спостереження та контролю. Найбільшої ефективності вдається досягти поєднуючи декілька методів і технологій моніторингу в єдину систему збору та аналізу інформації.

Одним із способів є спостереження за допомогою спостережних веж, які розміщуються на території лісів. Такі вежі обладнуються засобами зв'язку та навігаційними пристроями для визначення місця виникнення загоряння. Одна така вежа проводить контроль території в радіусі до 7 км. Оператори, які здійснюють спостереження, фіксують ознаки пожежі, оцінюють

масштаби загрози та передають отриману інформацію до диспетчерських центрів.

Попри простоту реалізації, цей підхід має низку недоліків: це залежність від людського фактора, обмежена кількість спостережних пунктів і недостатня чисельність персоналу. Для підвищення ефективності на вежах встановлюються відеокамери та тепловізійне обладнання. Але навіть такі рішення часто потребують постійного контролю з боку операторів, а для забезпечення повного огляду місцевості необхідно використовувати декілька камер одночасно. Аналогічне обладнання також монтується на вежах мобільного зв'язку, що дозволяє розширити площу спостереження без будівництва нової інфраструктури.

Найсучаснішим і найдешевшим методом моніторингу є супутниковий моніторинг. Космічні апарати здійснюють дистанційне зондування поверхні Землі, отримуючи зображення в інфрачервоному діапазоні. Завдяки аналізу температурних аномалій можна оперативного визначати місця виникнення пожеж навіть на значних відстанях. Отримані дані проходять кілька етапів оброблення: корекцію похибок, географічну прив'язку, цифровий аналіз та інтерпретацію результатів. Значна частина цих процесів виконується автоматизовано, що дозволяє суттєво скоротити час реагування.

Для спостереження за пожежною ситуацією використовуються міжнародні системи дистанційного зондування Землі, зокрема METEOSAT, GOES, GMS та MODIS. Інформація з цих джерел інтегрується у спеціалізовані платформи моніторингу, які формують комплексну картину пожежної обстановки. Такі системи поєднують дані супутникових спостережень, відеонагляду та наземних пунктів контролю, забезпечуючи оперативне виявлення небезпечних осередків.

Аналіз існуючих технологій показує, що жоден із методів не є універсальним. Саме тому перспективним напрямом є створення інтегрованої мережі діагностування та раннього виявлення пожеж, яка поєднуватиме переваги різних джерел даних. Запропонована система дозволить підвищити

точність виявлення загорянь, скоротити час реагування та забезпечити користувачів актуальною інформацією без суттєвих обмежень, характерних для окремих способів моніторингу.

1.2. Формування стратегічних альтернатив

Під час формування стратегії розвитку програмного продукту було розглянуто декілька можливих напрямів діяльності, які відрізняються за типом продукту та характером його просування на ринку.

До першої групи належать стратегії, засновані на поєднанні існуючих або нових програмних рішень із додатковими сервісами. Одним із варіантів є створення принципово нового програмного продукту, орієнтованого на вирішення актуальних завдань та задоволення потреб користувачів, інший підхід передбачає вдосконалення вже існуючого програмного забезпечення шляхом розширення його функціональних можливостей, підвищення продуктивності та покращення користувацького досвіду.



Рис. 1.1. Перша група стратегічних альтернатив

Стратегія розроблення нового продукту передбачає розроблення принципово нового продукту, орієнтованого на задоволення сучасних потреб користувачів та вирішення актуальних завдань. Такий підхід дає змогу впроваджувати нові функціональні можливості та використовувати сучасні технології.

У разі модернізації вже **існуючого продукту** застосовується стратегія вдосконалення продукту. Вона передбачає внесення змін до функціоналу та покращення технічних характеристик без повної зміни концепції системи.

Окремим варіантом є розвиток існуючого програмного продукту з одночасним наданням додаткових послуг, зокрема налаштування, супроводу, технічної підтримки та адаптації під конкретні потреби користувачів.

Також можливе створення **нового продукту**, яке доповнюється сервісними послугами на етапі його впровадження та експлуатації.

Після аналізу всіх варіантів найбільш доцільною для реалізації системи моніторингу лісових пожеж було обрати стратегію створення нового програмного продукту. Такий вибір пояснюється тим, що розроблювана система не є модифікацією існуючих рішень, а являє собою самостійний проєкт, спрямований на реалізацію сучасних механізмів контролю та виявлення пожеж. Використання нових технологічних підходів дає змогу сформувати необхідний функціонал з урахуванням актуальних вимог до систем екологічного моніторингу

Ще одним напрямком стратегічного аналізу є оцінювання взаємодії між продуктом і ринковим середовищем. У цьому випадку розглядаються стратегії проникнення на існуючий ринок, освоєння нових сегментів, створення нових продуктів та диверсифікація діяльності.



Рис. 1.2. Друга група стратегічних альтернатив

Стратегія глибокого проникнення продукту на ринку полягає у збільшенні частки продажів уже існуючого продукту. Такий варіант характеризується невисоким рівнем ризику, але його ефективність залежить від рівня конкуренції та потенціалу ринку.

Стратегія розвитку ринку орієнтована на використання наявного програмного забезпечення для виходу на нові категорії користувачів або географічні регіони. Реалізація такого підходу супроводжується певними ризиками, оскільки виникає необхідність адаптації до нових умов і вимог.

Стратегія розвитку продукту передбачає створення нових програмних рішень для вже сформованого сегмента споживачів. Вона є актуальною у випадках, коли існуючі технології потребують модернізації або користувачі висувають нові вимоги до функціональних можливостей системи.

Стратегія диверсифікації пов'язана з освоєнням нових напрямків діяльності та розширенням спектра продуктів і послуг.

Беручи до уваги динамічний розвиток бездротових сенсорних мереж БСМ та зростання потреб у системах автоматизованого контролю, найбільш

обґрунтованим варіантом є стратегія розвитку продукту. Постійне вдосконалення технологій, поява нових методів передавання та обробки даних створюють передумови для розроблення сучасних програмних рішень, які можуть успішно конкурувати на ринку. Якість подібних програмних рішень на ринку в деяких місцях може бути покращена, а у деяких рішеннях взагалі відсутній необхідний функціонал, щоб здійснювати нагляд. Тому, якісно розроблений програмний продукт приверне увагу багатьох покупців та буде користуватися популярністю серед них.

1.3. Огляд комп'ютерних мереж

Комп'ютерні мережі – це сукупність спорядження (комп'ютери, сервери, засоби комутації та інші), яка з'єднана каналами зв'язку, які являють собою систему інформацією та доступ до спільних ресурсів.

Мережу можна описати за допомогою графової моделі, де вершини відповідають мережевим пристроям, а ребра відображають канали зв'язку між ними. Вузли можуть виконувати роль кінцевих, проміжних або сусідніх елементів мережі. Способи взаємоз'єднання обладнання можуть відрізнятися. Схема фізичного або логічного з'єднання всіх компонентів мережі називається топологією. Існує велика кількість варіантів побудови мережевих структур.

Приклади найпоширеніших топологій:

Шина. Усі мережеві пристрої підключаються до спільного кабелю, на обох кінцях якого встановлюються термінатори для усунення відбиття сигналів. Дані, передані одним вузлом, отримують усі інші, проте обробляє їх лише адресат. Перевагами такої архітектури є низька вартість реалізації та простота налаштування. Недоліком виступає залежність усієї мережі від працездатності основного кабелю або термінатора. Крім того, пошук несправностей ускладнений;

Кільце. Кожний пристрій має з'єднання лише з двома сусідніми вузлами. Передавання даних здійснюється по колу в одному напрямку, що

виключає виникнення колізій. Кожен вузол отримує можливість передавання даних лише після своєї черги. Вихід з ладу будь-якого елемента призводить до порушення роботи всієї мережі, а локалізація несправності є складною;

Зірка. Усі робочі станції під'єднані до центрального пристрою. Несправність окремого вузла не впливає на функціонування решти мережі. Водночас відмова центрального елемента робить всю систему недоступною. Дана топологія характеризується високою продуктивністю, зручністю адміністрування та простотою виявлення несправностей;

Подвійне кільце. Є вдосконаленим варіантом кільцевої топології, у якому використовується додатковий контур для організації передавання даних у двох напрямках. Це підвищує надійність і відмовостійкість мережі;

Дерево. Є розширенням топології типу «зірка». Основною особливістю є багаторівнева ієрархічна структура побудови мережі;

Повнозв'язна. Передбачає наявність прямого з'єднання між кожною парою вузлів. Така структура забезпечує максимальну надійність, але потребує значних витрат ресурсів і складна в реалізації, тому на практиці частіше використовують частково зв'язні схеми.

Для забезпечення обміну даними між вузлами застосовуються спеціальні набори правил – мережеві протоколи. Кожен протокол виконує власні функції та взаємодіє з іншими відповідно до визначеної архітектури.

Міжнародна організація зі стандартизації розробила еталонну модель взаємодії відкритих систем OSI (Open Systems Interconnection), яка описує функціональне призначення мережевих рівнів. Модель складається із семи рівнів. У мережі Інтернет переважно використовується стек протоколів TCP/IP, створений Міністерством оборони США ще до появи моделі OSI. Він містить чотири рівні.

Під час передачі інформації дані послідовно доповнюються службовими заголовками на кожному рівні моделі від прикладного до фізичного. Такий процес називається інкапсуляцією. Після доставки інформації на приймальний вузол відбувається зворотний процес –

видалення службових даних від нижніх рівнів до верхніх, який отримав назву деінкапсуляції.

Комп'ютерні мережі поділяються на:

- локальні мережі (LAN, Local Area Network) – мережі, що функціонують у межах обмеженої території, наприклад кімнати, офісу або окремої будівлі;
- глобальні мережі (WAN, Wide Area Network) – мережеві структури, які об'єднують значну кількість локальних мереж на великих відстанях.

Інтернет (Internet) є найбільшою глобальною мережею, яка об'єднує тисячі корпоративних, державних, наукових і домашніх мереж по всьому світу.

Для організації обміну даними між мережевими пристроями в локальних та глобальних мережах використовується протокол мережевого рівня IP (Internet Protocol).

На сьогодні застосовуються дві його основні версії:

- IPv4 – використовує адреси довжиною 32 біти (4 байти);
- IPv6 – використовує адреси довжиною 128 біт (16 байтів, розділених на 8 груп).

IP-адреса у форматі IPv4 являє собою 32-бітне число. Для зручності запису воно поділяється на чотири октети по 8 біт, які відокремлюються крапками. Значення кожного октету переводяться з двійкової системи числення у десяткову та можуть набувати значень від 0 до 255.

13.14.49.121 = 00001101.00001110.00110001.01111001

У локальних мережах широко використовуються спеціальні приватні IP-адреси IPv4, які не маршрутизуються в мережі Інтернет:

10.0.0.0–10.255.255.255;

172.16.0.0–172.31.255.255;

192.168.0.0–192.168.255.255.

Виникнення приватних IP-адрес зумовлена стрімким зростанням кількості мережевих пристроїв та обмеженим адресним простором IPv4. Частково проблему нестачі адрес вирішує протокол IPv6.

1.4. Бездротові сенсорні мережі

Бездротові сенсорні мережі (БСМ) це одна з найбільш перспективних галузей у розвитку телекомунікаційних систем яка відкривають широкі перспективи для проведення наукових досліджень. Невеликі габарити вузлів (розміром приблизно один кубічний дюйм), вбудований радіомодуль, низьке енергоспоживання та доступна вартість роблять такі мережі ефективним рішенням для створення систем моніторингу, керування та забезпечення безпеки. Особливо актуальним використання БСМ є в умовах, де прокладання кабельної інфраструктури є технічно складним, економічно недоцільним або організаційно неможливим.

MOT (multiple object tracking, MOT) це пристрій, що включає мікроконтролер, модуль бездротового зв'язку, пам'ять, джерело живлення та один або декілька сенсорів. Як вимірювальні елементи використовуються різноманітні датчики, серед яких найчастіше застосовуються датчики температури, вологості, тиску та освітленості. Рідше використовуються сенсори вібрації, а також пристрої для виконання хімічних вимірювань. Для функціонування на мотах встановлюється спеціальне програмне забезпечення, яке забезпечує формування мережі та організацію обміну даними між вузлами. У більшості бездротових сенсорних мереж використовується операційна система TinyOS, розроблена в Університеті Берклі. Максимальна відстань безпосередньої передачі повідомлень зазвичай не перевищує 100 метрів. Для приймання та передавання інформації кожен вузол обладнується антеною.

Вузли сенсорної мережі можуть працювати як у стаціонарному режимі, будучи встановленими у фіксованих точках, так і розміщуватися на рухомих об'єктах, зберігаючи при цьому зв'язок з іншими елементами мережі.

Передача інформації здійснюється між сусідніми мотами, а вузли, які знаходяться в зоні дії шлюзу, передають йому накопичені дані для подальшої обробки. У разі виходу окремих вузлів з ладу мережа здатна автоматично перебудувати свою структуру та продовжувати функціонування.

Особлива увагу при проєктуванні мотив приділяють джерелам електроживлення. У зв'язку з тим, що вузол БСМ повинен споживати гранично малу потужність (50 мкВт і нижче), ефективними можуть бути такі альтернативні джерела енергії як сонячні елементи, перетворювачі вібрації і навіть фонового радіовипромінювання в струм. Однак ці джерела досі досить дорогі, а їх використання вимагає обов'язкової наявності відповідних властивостей зовнішнього середовища. Найбільш надійним джерелом електричної енергії до цих пір залишаються електричні акумулятори та батареї.

1.5. Застосування бездротових сенсорних мереж

Етапом подальшого розвитку сенсорних мереж стали бездротові сенсорні мережі (БСМ). Відмова від використання кабельних з'єднань дала можливість застосовувати їх у важкодоступних районах, а також на рухомих об'єктах, що суттєво розширило спектр практичного використання таких систем.

Найпоширенішим прикладом використання сенсорних мереж є інформаційно-вимірювальні комплекси та автоматизовані системи керування. Значного поширення набули мережі моніторингу медичних показників людини, які використовуються для дистанційної діагностики. У таких системах дані від контролюваного об'єкта (пацієнта) передаються до спеціалізованих медичних установ за допомогою дротових або бездротових каналів зв'язку. Сенсорні мережі застосовуються у великій кількості прикладних напрямів. Бездротові сенсорні мережі є відносно новою та перспективною технологією, тому значна частина проєктів у цій галузі ще розв'язується та вдосконалюється. Щороку актуальність використання БСМ

зростає, через збільшення потреб у моніторингу, контролі, вимірюваннях та автоматизації процесів у промисловості, медицині, комерційній діяльності, наукових дослідженнях і повсякденному житті.

Найбільш відомі області застосування БСМ:

Військова техніка: для використання у військових системах необхідні надійні та функціональні бездротові сенсори, здатні працювати в складних умовах експлуатації, зокрема за високих температур, підвищеної вологості та інших несприятливих факторів. При цьому обладнання повинно мати компактні розміри та малопомітну конструкцію. Особливого значення набуває своєчасне виявлення несправностей для забезпечення безперервної роботи військових об'єктів.

Застосування бездротових сенсорів у військовій сфері охоплює контроль транспортних засобів, спостереження за переміщенням техніки, виявлення потенційних загроз та виконання інших завдань, де використовується щільне розміщення вузлів для отримання більш точних і достовірних даних.

Медичне устаткування: бездротові сенсорні технології активно впроваджуються в медичну сферу для забезпечення ефективної взаємодії між пацієнтом і системами моніторингу. Медичні датчики застосовуються для контролю перебігу захворювань, спостереження за станом організму та автоматизованого введення лікарських засобів. Для підвищення якості дистанційного контролю життєво важливих показників постійно вдосконалюються характеристики чутливості сенсорів.

Екологічні програми: бездротові сенсорні мережі широко використовуються для спостереження за параметрами навколишнього середовища, зокрема температурою, вологістю, атмосферним тиском, рівнем освітленості та станом ґрунтів. Крім цього, вони застосовуються для моніторингу поведінки, переміщення та життєдіяльності тварин, птахів та інших живих організмів. У багатьох випадках сенсорні вузли встановлюються безпосередньо на об'єкти спостереження або розміщуються

в межах досліджуваного середовища. Окремі завдання потребують можливості дистанційного керування датчиками. Для екологічних досліджень особливо важливими є тривала автономна робота мережі та надійні механізми передачі даних із важкодоступних територій.

Побутова техніка: сучасні бездротові технології дозволяють здійснювати керування домашніми та офісними пристроями за допомогою пультів дистанційного управління, мережі Інтернет або супутникових каналів зв'язку. Користувач отримує можливість змінювати параметри роботи обладнання незалежно від місця перебування. Для забезпечення ефективної взаємодії між людиною та побутовими пристроями все частіше використовуються системи штучного інтелекту, які на основі даних від сенсорних вузлів адаптують свою поведінку до потреб користувача.

Апаратна архітектура: основними елементами бездротових сенсорних мереж є сенсорні вузли. Як і більшість сучасних систем керування, вони складаються з двох ключових складових: програмної платформи та апаратного забезпечення. Програмна частина представлена операційною системою, яка координує роботу вузла та забезпечує виконання алгоритмів збору й обробки інформації. Саме на цьому рівні реалізуються методики вимірювань та логіка функціонування сенсорного обладнання.

Інші області застосування БСМ:

- системи оборони та безпеки;
- екологічний моніторинг;
- контроль технічного стану промислового обладнання;
- системи охорони об'єктів;
- моніторинг сільськогосподарських територій;
- управління енергетичними ресурсами;
- контроль роботи систем вентиляції, кондиціонування та освітлення;
- системи пожежного сповіщення;
- автоматизація складського обліку;
- контроль процесів транспортування вантажів;

- моніторинг фізіологічних показників людини;
- контроль та управління персоналом.

1.6. Тенденції розвитку БСМ

Бездротові сенсорні мережі в цілому все ще охоплюють широку область досліджень і розробок, таких як:

- Розробка нових методів, які раціоналізують використання GPS, оскільки воно не є енергоефективним і коштує дорого для апаратного забезпечення з низькою продуктивністю всередині приміщень (проблеми поширення на лінії прямої видимості).
- Мінімізація помилок для підвищення точності оцінки місця розташування сенсорного вузла, що включає використання математичних і геометричних співвідношень і розробку нових методів вимірювання (може бути гібридною методикою між старими методиками). Мобільність сенсорних вузлів в деяких додатках може змінити топологію мережі, що призводить до нової області досліджень, яка може відстежувати зміни і зберігати оцінку місця розташування.
- Удосконалення щільності топології мережі для зменшення кількості якорів / маяків, необхідних для оцінки хорошого покриття для всіх інших вузлів датчиків.
- 3D-локалізація і раніше представляла інтерес для деяких дослідників, так як більшість досліджень концентрується на площинах поверхні, які можуть бути неефективні для моделювання в реальному світі. Нова реалізація устаткування призведе до зменшення вартості при більш високій енергоефективності, особливо для високоточних методів в категорії на основі діапазону, яка також включає збільшення продуктивності (більш тривалий час автономної роботи, більш висока швидкість обробки, більше пам'яті і мінімізація розміру апаратного забезпечення вузла датчика).

- Загрози безпеки і взлому мережі піддаються додатковим дослідженням, щоб поліпшити існуючі схеми захисту і розробити більш захищені протоколи з потужними алгоритмами виявлення.

1.7. Маршрутизація

Передавання інформації між вузлами мережі неможливе без механізму вибору шляху, яким пакети даних переміщуються від джерела до пункту призначення. Сукупність процедур, що забезпечують визначення та підтримку таких шляхів, називають маршрутизацією. Від ефективності її реалізації залежать швидкість обміну даними, навантаження на вузли, енергоспоживання та загальна надійність мережі.

Основним елементом, який виконує функції пересилання пакетів, є маршрутизатор. Він аналізує інформацію про доступні мережі та визначає оптимальний напрямок руху даних. Для цього використовуються таблиці маршрутизації, у яких зберігаються відомості про доступні маршрути, мережеві адреси та проміжні вузли, через які може здійснюватися передавання інформації.

Існує два підходи до формування маршрутів. У першому випадку параметри передавання задаються адміністратором вручну. Такий спосіб називають статичною маршрутизацією. Він відзначається простотою реалізації, однак є малоефективним у мережах зі змінною структурою, оскільки будь-яка зміна конфігурації потребує повторного налаштування.

Більш гнучким рішенням є динамічна маршрутизація, при якій мережеві пристрої самостійно обмінюються службовою інформацією та автоматично перебудовують маршрути у випадку змін топології або відмови окремих вузлів. Завдяки цьому забезпечується безперервне функціонування системи та можливість швидкої адаптації до нових умов.

Для визначення найкращого шляху використовуються спеціалізовані протоколи маршрутизації. Їх призначення полягає у формуванні таблиць маршрутів та організації взаємодії між мережевими пристроями. Залежно від

області застосування протоколи поділяють на внутрішні, які працюють у межах однієї автономної системи, та зовнішні, що забезпечують взаємодію між різними мережевими доменами.

При побудові маршрутів алгоритми повинні відповідати низці вимог. Насамперед вони мають забезпечувати вибір раціонального шляху, швидко реагувати на зміни структури мережі та не вимагати значних обчислювальних ресурсів. Крім того, важливою характеристикою є стійкість до відмов і здатність підтримувати працездатність навіть за умови пошкодження окремих елементів.

При виборі маршруту можуть враховуватися різні показники. До них належать кількість проміжних вузлів, пропускна здатність каналів, затримка передавання пакетів, рівень завантаження обладнання, надійність каналів зв'язку та вартість передавання даних. Сукупність цих параметрів утворює метрику маршруту, яка використовується для оцінювання його ефективності.

Маршрутизація є одним із ключових механізмів функціонування бездротових сенсорних мереж, оскільки саме вона визначає ефективність обміну даними та рівень енергоспоживання вузлів. Для БСМ розроблено значну кількість спеціалізованих протоколів, кожен із яких орієнтований на вирішення певних задач. Серед найбільш відомих підходів можна виділити SPIN, Directed Diffusion, Rumor Routing, Gradient-Based Routing та Minimum Cost Forwarding, які забезпечують раціональне використання ресурсів мережі та підтримують її стабільне функціонування в умовах обмежених енергетичних можливостей сенсорних вузлів.

РОЗДІЛ 2

ПРОЄКТУВАННЯ МЕРЕЖІ

2.1. Побудова дерева проблеми та дерева цілей

Отже, коли проведено характеристику об'єкта дослідження та встановлено завдання розроблюваної системи, потрібно визначитися зі способом виконання поставлених завдань. Очевидно, що існує кілька способів досягти бажаних цілей, але нас цікавить той, що найкраще підходить для поставленої задачі. Саме для цього здійснюється системний аналіз.

Системний аналіз — це науковий метод пізнання, що являє собою послідовність дій з установлення структурних зв'язків між змінними або елементами досліджуваної системи. Системний аналіз застосовується для визначення проблем і цілей системи, що розробляється. Також допомагає визначити альтернативні шляхи подолання проблем чи досягнення поставлених цілей.

Тож для вивчення проблем та цілей розроблюваного мобільного застосунку використовуватимемо такі методи системного аналізу як дерево проблем та дерево цілей.

Основний методом аналізу проблем у системному аналізі – це дерево проблем.

Дерево проблем – це графічно зображена ієрархічна структура проблематики системи, отримана шляхом поділу загальної проблематики на основний тип проблематики (стовбур), інші присутні типи (гілки), підтипи (відгалуження) і власне проблеми (листи).

Цей метод застосовується для отримання відносно стійкої структури пророблематики. Дерево проблеми інформаційної системи, яке розробляємо у цій бакалаврській роботі, зображено на рис. 2.1.

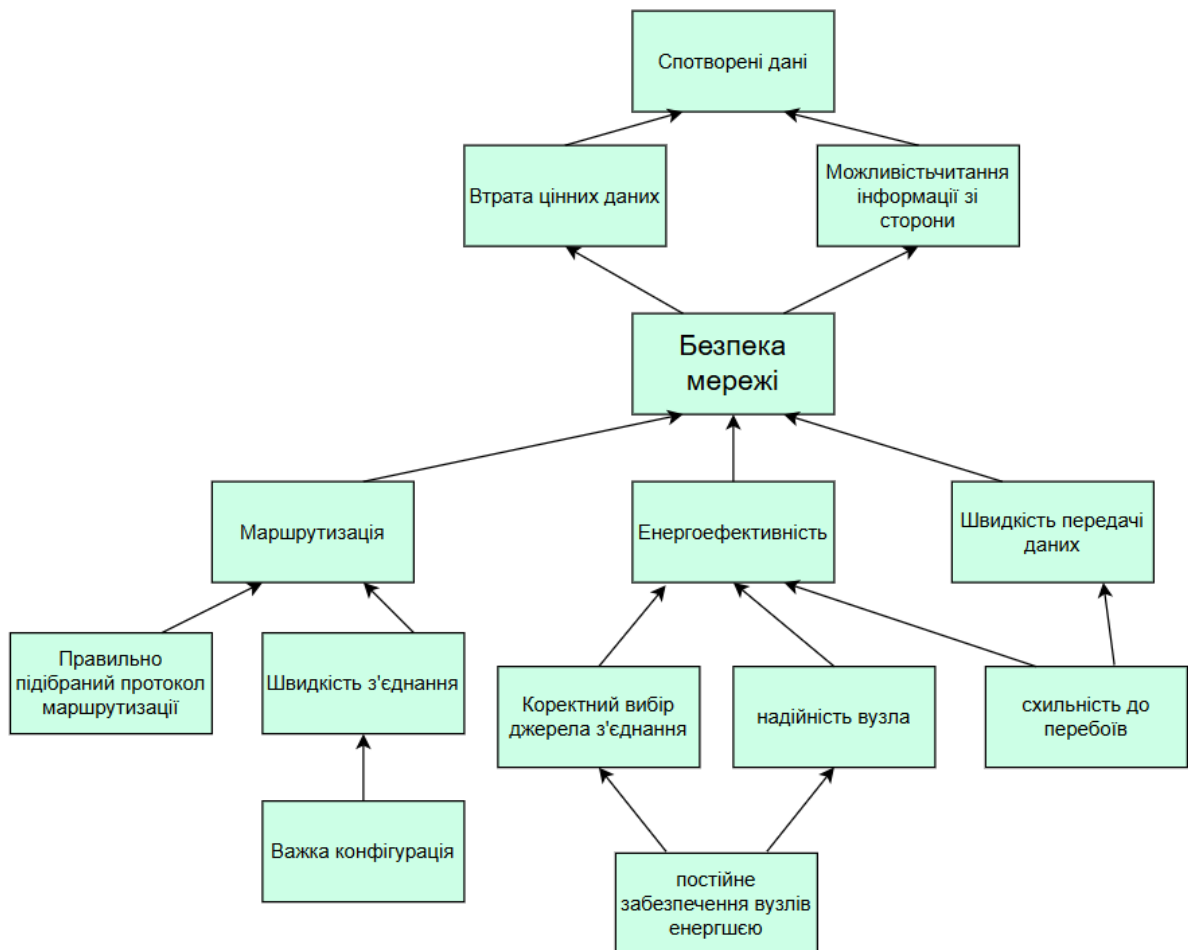


Рис. 2.1. Дерево проблем

Як бачимо, основною проблемою, що виявлено у ході дослідження системи, є безпека мережі.

Дерево цілей це ієрархічно структурована сукупність цілей системи, програми чи проєкту, де обрана головна ціль (вершина дерева) розбивається на цілі першого, другого та наступних рівнів (гілки дерева) відповідно до складності їх реалізації.

Тобто даний метод системного аналізу використовується для одержання стійкої структури цілей, напрямків розвитку чи завдань, що потрібно досягнути у рамках досліджуваної системи. Отримане дерево цілей тісно зв'язує між собою перспективні (або глобальні) цілі і конкретні задачі на кожному рівні ієрархії. При чому найголовніша ціль розташовується у вершині дерева, а в декілька рівнів розташовуються локальні цілі чи

завдання, що потрібно було виконати для досягнення цілей верхнього рівня. Виконаємо побудову дерева цілей (Рис. 2.2).

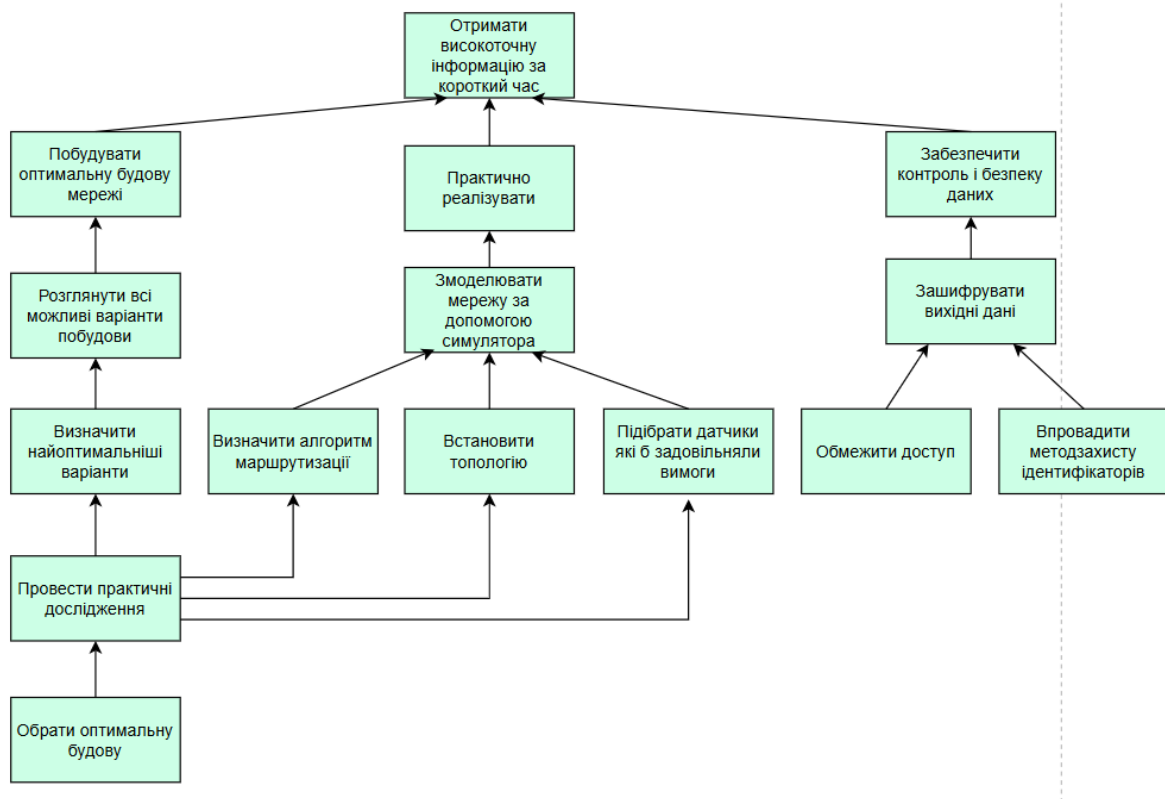


Рис. 2.2. Дерево цілей

Як бачимо, головною метою, що потрібно досягти під час розробки та роботи системи, є отримання високоточної інформації за короткий час.

2.2 Огляд засобів моделювання бездротових сенсорних мереж

Найефективнішим підходом до дослідження та оцінювання характеристик інформаційно-комунікаційних систем є імітаційне моделювання. На сьогоднішній день існує велика кількість мережевих симуляторів, призначених для аналізу роботи бездротових сенсорних мереж (БСМ). Розглянемо найбільш популярні з них.

Симулятор NS-2

NS-2 (Network Simulator 2) є програмним комплексом з відкритим вихідним кодом, який використовується для моделювання дротових і

бездротових телекомунікаційних систем на основі дискретних подій. Основу програмного середовища складають мови C++ та Tcl, а для побудови моделей застосовується об'єктно-орієнтоване розширення OTcl.

Симулятор є безкоштовним та широко використовується в наукових дослідженнях і навчальному процесі. NS-2 підтримує велику кількість мережевих технологій, моделей передавання даних і протоколів маршрутизації. Для мобільних ad hoc мереж доступні протоколи AODV, DSDV, DSR і TORA, але їх використання для сенсорних мереж часто потребує додаткової адаптації.

У складі NS-2 реалізовано підтримку стандарту IEEE 802.15.4, для багатьох бездротових сенсорних мереж. Перші версії симулятора містили окремі елементи мережевого рівня технології ZigBee, але через невідповідність специфікаціям стандарту вони були вилучені. Тому дослідникам доводиться використовувати наявні механізми маршрутизації, які не повністю враховують особливості функціонування сенсорних мереж.

Недоліком NS-2 є обмежена кількість документації та навчальних матеріалів. У більшості випадків користувачам доводиться працювати з вихідним кодом програми та звертатися до спільноти розробників.

Симулятор Сооја

Сооја є спеціалізованим інструментом моделювання, розробленим для операційної системи Contiki та орієнтованим на дослідження бездротових сенсорних мереж. За допомогою цього середовища можна оцінити працездатність мережевих рішень ще до їх практичної реалізації.

Contiki це легка операційну систему для пристроїв з обмеженими ресурсами та низьким енергоспоживанням. Під час моделювання Сооја компілює програмний код вузлів і виконує його в емуляційному середовищі, що дозволяє отримувати результати, максимально наближені до роботи реального обладнання.

Хоча симулятор створювався для сенсорних мереж, він також підтримує стек протоколів TCP/IP. Програмне забезпечення написане мовою

Java, водночас прикладні програми для сенсорних вузлів можуть розроблятися мовою C.

Перевагою Cooja є його модульна архітектура. Розширення функціональності здійснюється за допомогою плагінів та інтерфейсів, які забезпечують моніторинг трафіку, керування швидкістю виконання симуляції та аналіз стану вузлів мережі. Крім того, система підтримує одночасне моделювання декількох мережевих сценаріїв.

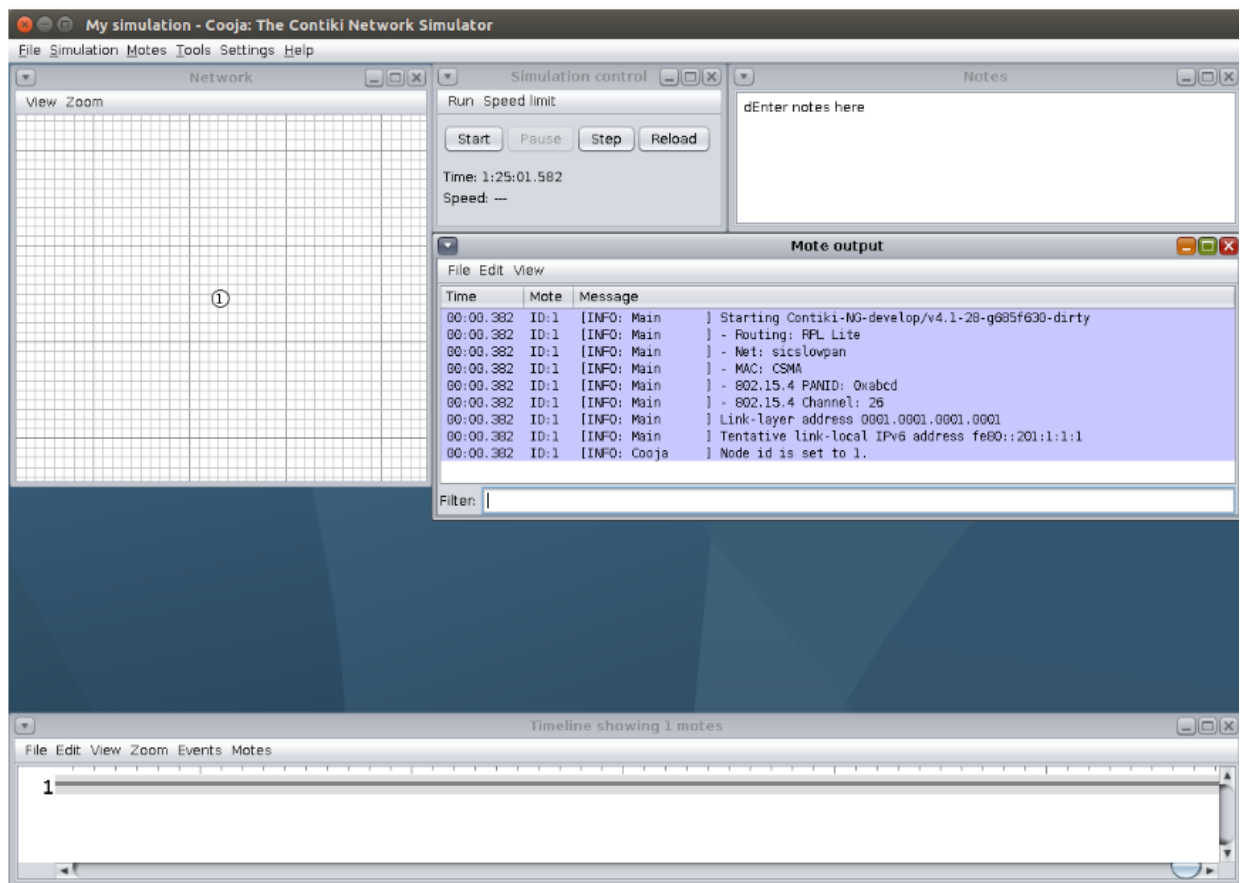


Рис. 2.3 Вікно симулятора Cooja

Симулятор TOSSIM (TinyOS Simulator)

TOSSIM є емулятором, створеним для програмного середовища TinyOS, яке спеціально розроблене для бездротових сенсорних мереж. TinyOS базується на компонентному підході та використовує мову програмування nesC для створення прикладного програмного забезпечення.

TinyOS являє собою набір програмних компонентів і сервісів для вбудованих пристроїв. TOSSIM дозволяє моделювати роботу сенсорних мереж без зміни програмного коду, який у подальшому буде використовуватися на реальному обладнанні.

Перевагою симулятора TOSSIM є можливість роботи з мережами, що складаються з кількох тисяч вузлів, забезпечує високу точність прогнозування поведінки мережі, враховуючи вплив завад, помилок передачі та інших факторів, характерних для реального середовища.

Для підвищення зручності роботи розробників TOSSIM оснащений графічним інтерфейсом, який дозволяє відстежувати процес моделювання та аналізувати отримані результати.

Основними характеристиками TOSSIM є:

масштабованість — підтримка великих мереж із різною конфігурацією вузлів;

достовірність — моделювання реальних процесів взаємодії між вузлами мережі;

інтегрованість — поєднання програмного коду з його графічною візуалізацією для зручного тестування та аналізу.

Архітектура TOSSIM включає механізм обробки дискретних подій, набір програмних компонентів для емуляції апаратного забезпечення сенсорних вузлів та засоби взаємодії із зовнішніми програмами.

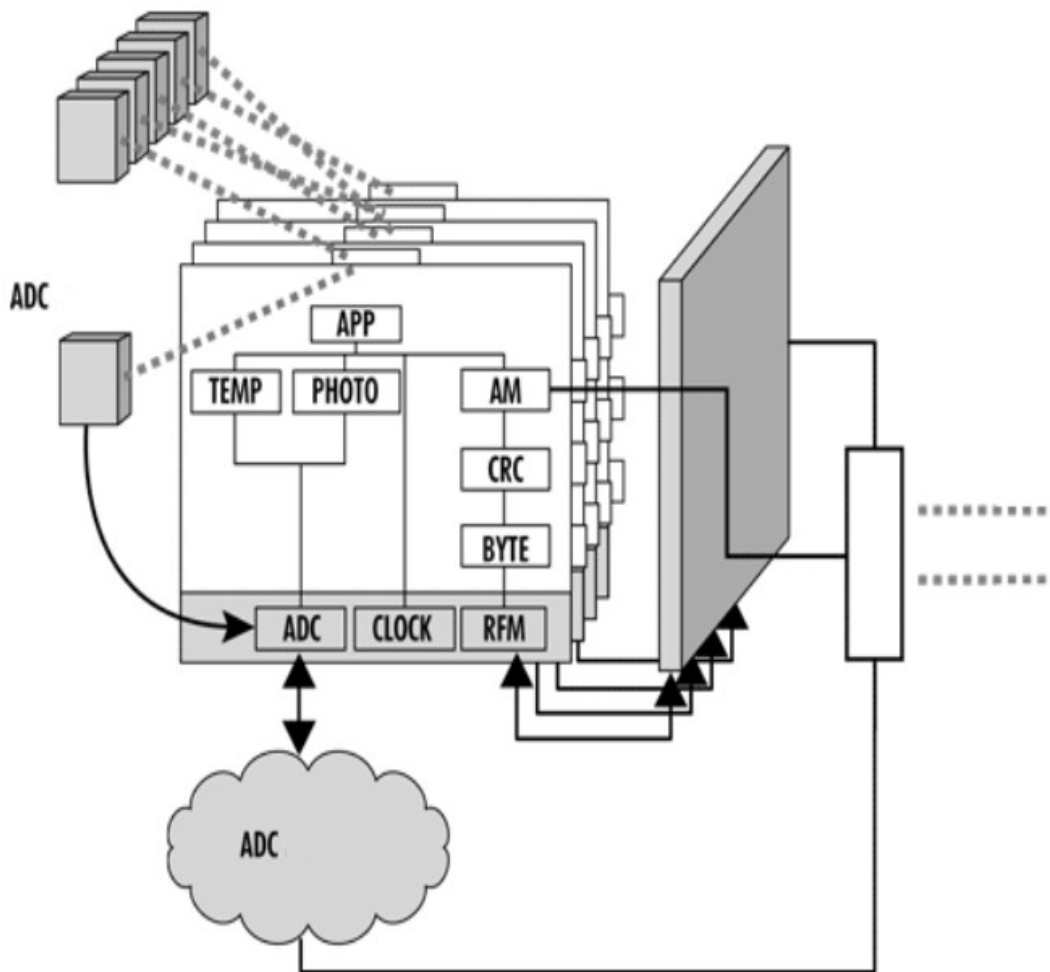


Рис 2.4 Архітектура емулятора TOSSIM

Симулятор OMNET++

OMNeT++ є універсальним середовищем дискретно-подійного моделювання, та використовується для дослідження комунікаційних мереж, телекомунікаційних протоколів і систем масового обслуговування.

Особливістю платформи є модульний підхід до побудови моделей. Будь-яка мережа розглядається як сукупність взаємопов'язаних об'єктів, що обмінюються повідомленнями. Для реалізації моделей використовується мова C++, а структура мережі описується спеціалізованою мовою NED.

Система підтримує створення складних ієрархічних моделей із багаторазовим використанням окремих модулів, що значно спрощує процес розроблення та модифікації проєктів. Взаємодія між компонентами

здійснюється через порти та канали зв'язку, а передавання даних реалізується у вигляді повідомлень довільної структури.

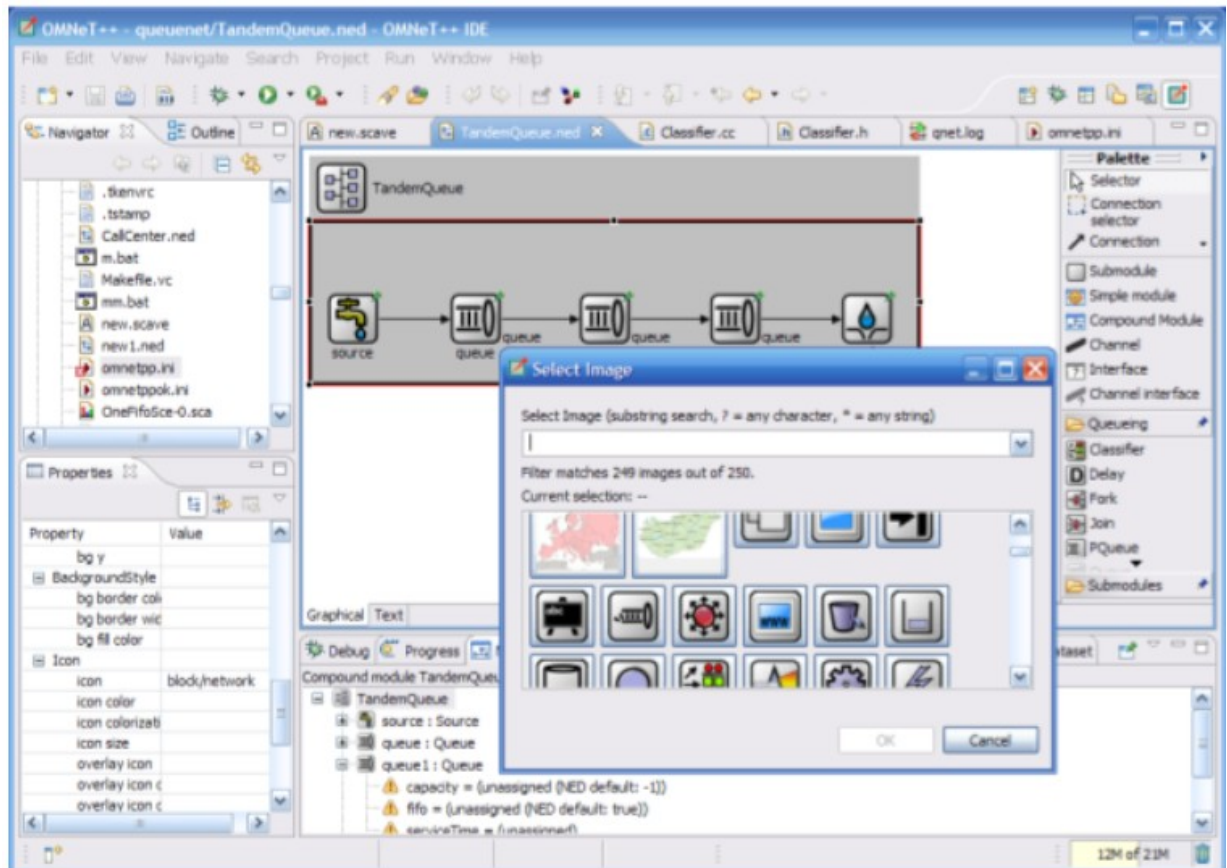


Рис 2.5. Графічний NED редактор

OMNeT++ має набір інструментів для візуалізації та аналізу результатів у режимі реального часу. Моделювання може виконуватися як у графічному середовищі, так і через командний рядок, що є ефективним під час проведення масштабних експериментів.

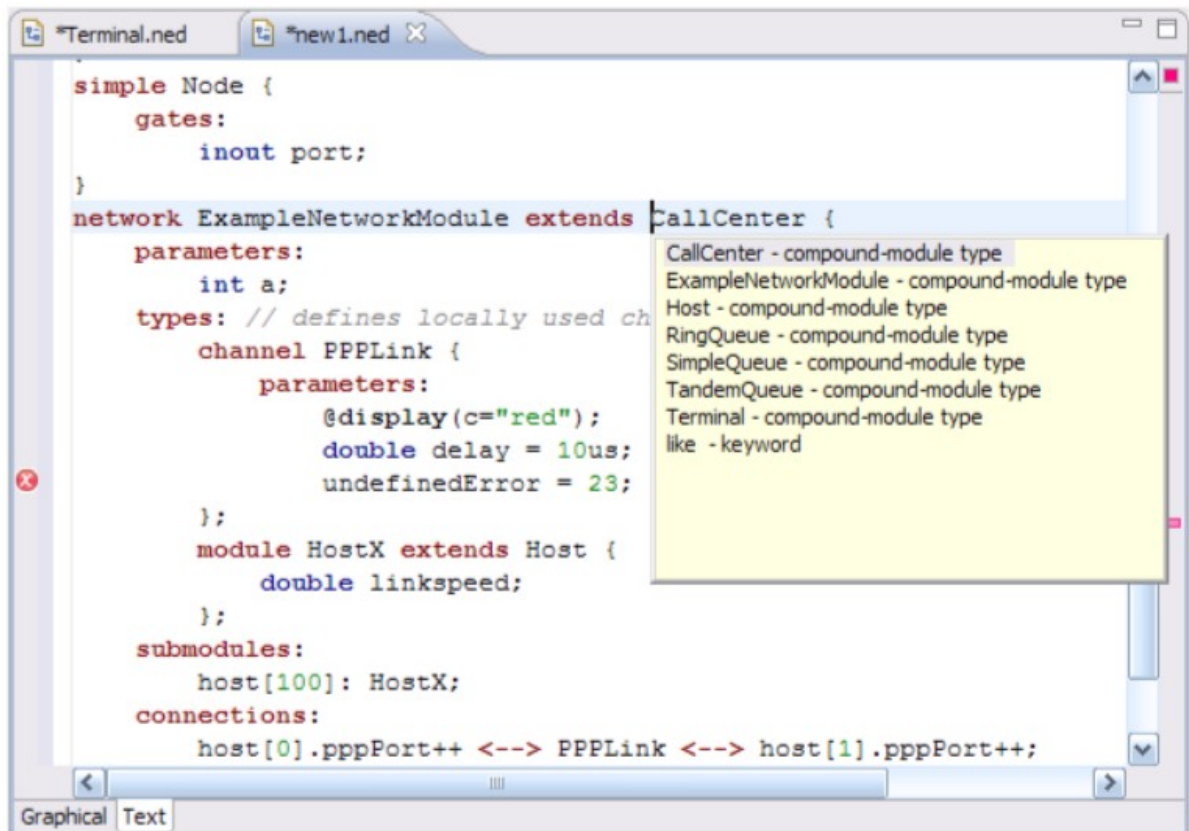


Рис. 2.6. Редактор вихідного коду NED

До складу програмного комплексу входять:

- базова бібліотека моделювання;
- інтегроване середовище розробки на основі Eclipse;
- графічне середовище виконання моделей Tkenv;
- консольне середовище виконання Cmdenv;
- документація та приклади реалізації моделей.

Платформа є кросплатформною та підтримує роботу в операційних системах Linux, Windows і macOS, що забезпечує її широке використання в наукових дослідженнях та освітніх проектах.

2.3. Концептуальна модель

Концептуальну модель системи варто виконувати у вигляді структурної моделі. Структурна схема відображає складові частини програмного продукту та взаємозв'язки між ними в процесі функціонування.

Зазвичай така схема демонструє архітектуру майбутнього програмного забезпечення, включаючи підсистеми та окремі програмні модулі.

До структурних компонентів системи можуть належати програмні модулі, функціональні підсистеми, бази даних, бібліотеки, сховища ресурсів та інші елементи, необхідні для забезпечення роботи програмного комплексу.

Структурну схему системи наведено на рис. 2.7.

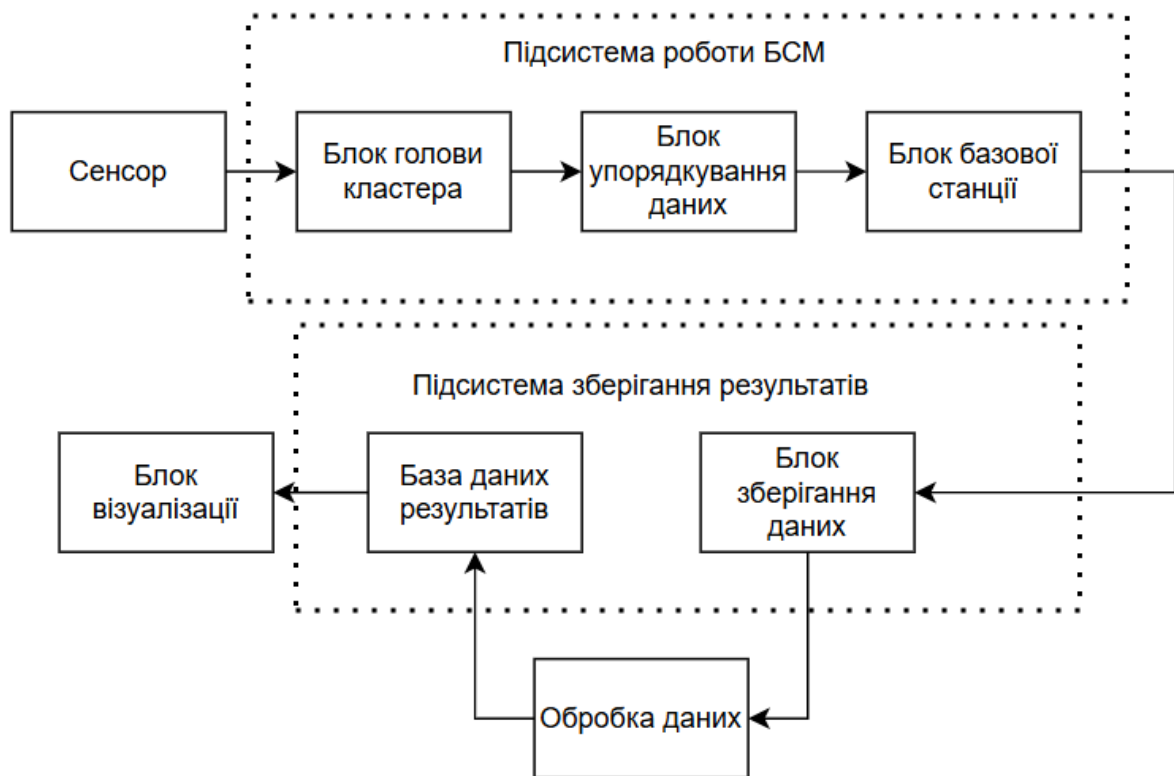


Рис. 2.7. Концептуальна модель

Відповідно до побудованої схеми система складається з двох основних підсистем і набору функціональних блоків. Кожна підсистема містить окремі програмні компоненти, які реалізують певний набір взаємопов'язаних функцій. Усі складові системи об'єднані інформаційними зв'язками, що відображені стрілками.

Інформаційний потік являє собою сукупність повідомлень, даних, запитів та інших інформаційних об'єктів, які передаються між компонентами системи. Саме такі потоки забезпечують взаємодію між модулями програмного застосунку та ініціюють виконання відповідних процесів.

2.4. Моделювання процесів предметної області

Для аналізу та опису процесів предметної області використовуються спеціалізовані CASE-засоби, що підтримують стандарти моделювання та графічні нотації. Найпоширенішими серед них є IDEF0, IDEF3, UML та інші.

Застосування перелічених стандартів дає можливість формалізувати процеси функціонування системи, відобразити рух інформації та документів, визначити взаємодію між окремими компонентами й інформаційними потоками, а також описати функціональні можливості системи з точки зору користувача.

Для отримання цілісного уявлення про роботу проєктованої інформаційної системи необхідно побудувати набір діаграм, які відображають її структуру та поведінку.

Важливим етапом проєктування інформаційної системи є її опис із позиції кінцевого користувача. Такий опис охоплює функціональні можливості системи, сценарії її використання, а також структуру окремих програмних компонентів, зокрема класів, модулів і підсистем.

Для виконання цього завдання використовується UML (Unified Modeling Language) — уніфікована мова моделювання, що є стандартом об'єктно-орієнтованого проєктування програмного забезпечення. UML являє собою універсальний графічний інструмент для побудови абстрактних моделей системи, її візуалізації, проєктування та документування.

Мова UML включає чотирнадцять типів діаграм, однак для опису розроблюваної системи достатньо використати три основні: діаграму варіантів використання, діаграму послідовності та діаграму класів.

Діаграма варіантів використання (Use Case Diagram) відображає взаємодію між користувачами системи та функціями, які вона надає. На такій діаграмі показуються актори, прецеденти та зв'язки між ними.

Діаграми варіантів використання призначені для формалізації функціональних вимог до програмного продукту. Сукупність усіх

прецедентів визначає набір функцій, які повинні бути реалізовані в системі, і може слугувати основою для формування технічного завдання.

Діаграму варіантів використання для розроблюваної інформаційної системи наведено на рис. 2.8.

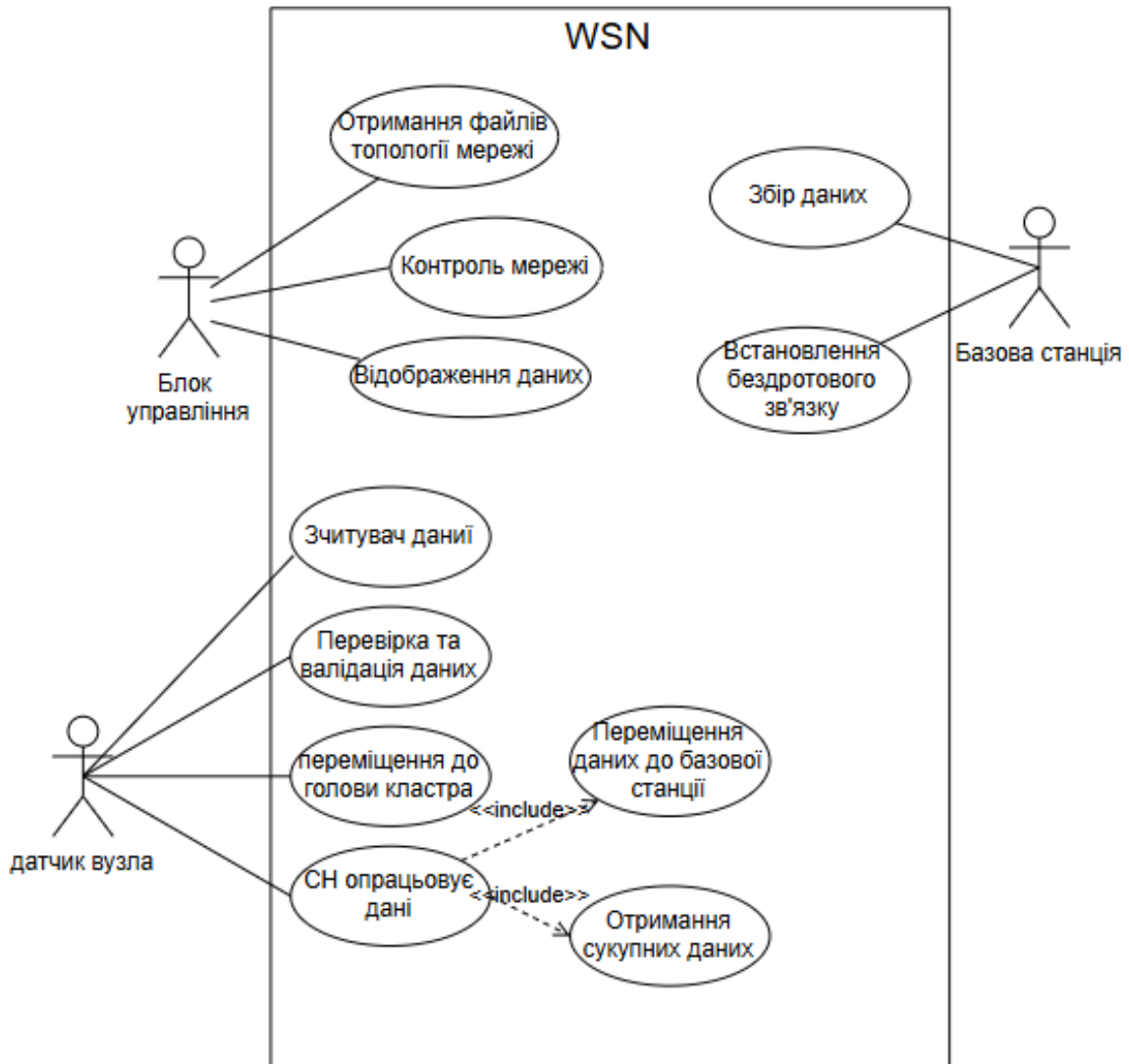


Рис. 2.8. Use case діаграма WSN

2.5. Опис бізнес-процесів і потоків даних

IDEF0 є методологією функціонального моделювання, призначеною для графічного представлення та аналізу бізнес-процесів. Основною особливістю цього підходу є ієрархічна організація процесів, що забезпечує зручність їх дослідження та розуміння.

IDEF0 акцентує увагу не на часовій послідовності виконання операцій, а на логічних взаємозв'язках між процесами, ресурсами та керуючими впливами.

Найвищим рівнем представлення системи є контекстна діаграма, яка відображає основне призначення системи, її ключову функцію та взаємодію із зовнішнім середовищем.

Контекстну діаграму проектованої системи наведено на рис. 2.9.

1. Побудова контекстної діаграми

На початковому етапі створюється модель інформаційної системи в середовищі AllFusion Process Modeler відповідно до стандарту IDEF0. Насамперед формується контекстна діаграма, яка характеризує систему як єдине ціле (рис. 2.9). Для більш детального аналізу виконується функціональна декомпозиція основного процесу.

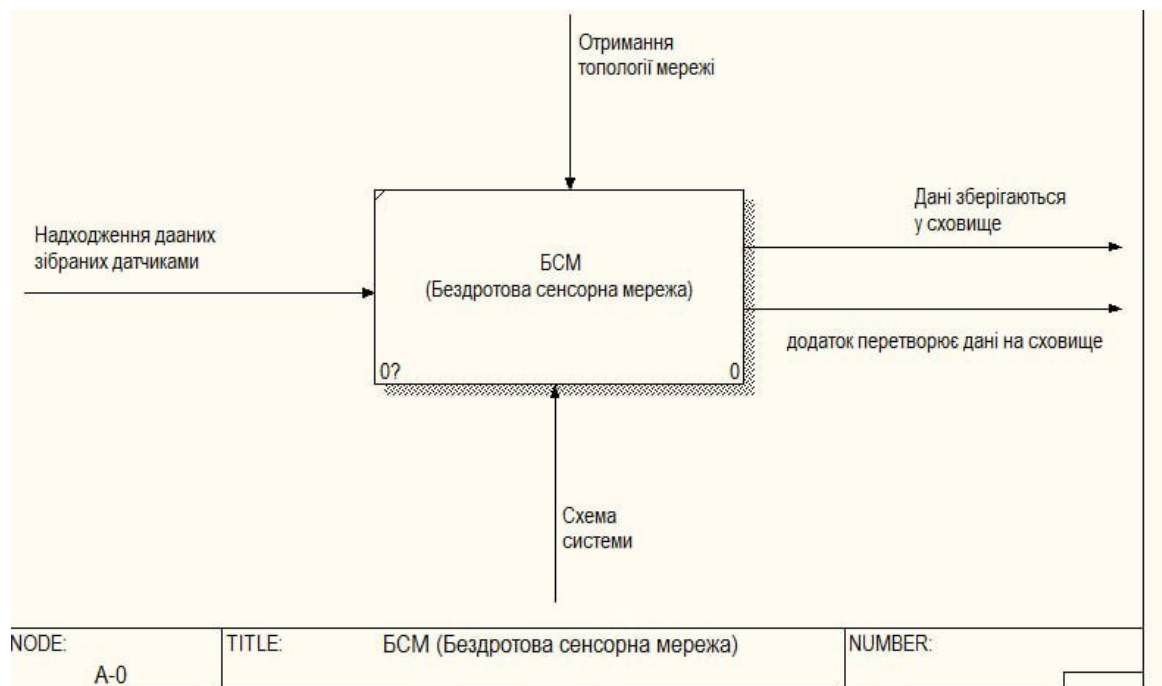


Рис. 2.9. Контекстна діаграма ІС

2. Побудова діаграми декомпозиції першого рівня.

Наступним кроком є деталізація контекстної діаграми шляхом її розбиття на три основні функціональні процеси. У результаті формується діаграма декомпозиції першого рівня (рис. 2.10).

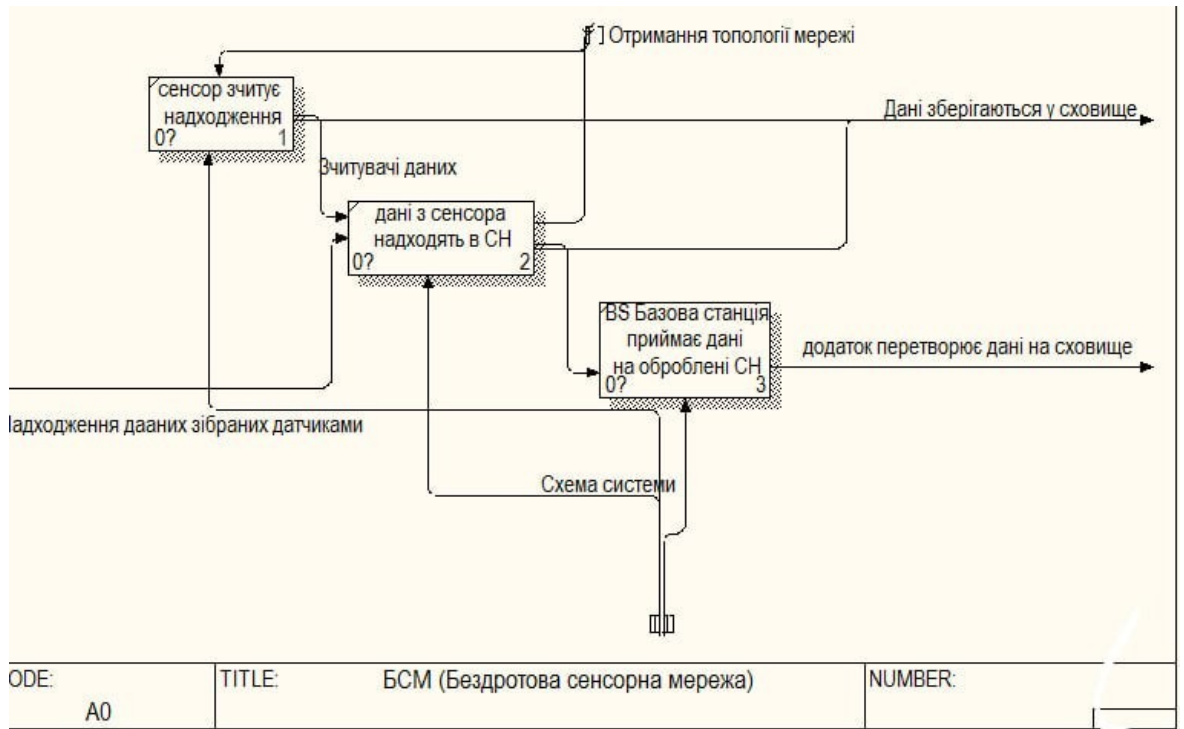


Рис. 2.10. Діаграма декомпозиції 1-го рівня

Отримана модель дозволяє чіткіше визначити процеси, які реалізуються в системі, встановити механізми їх виконання, виявити керуючі впливи, а також проаналізувати вхідні та вихідні дані кожного процесу.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО РІШЕННЯ

3.1. Загальна структура програмного проєкту

У цій частині описано запропоновану архітектуру для виявлення лісових пожеж. Як показано на рис 3.1, велике число вузлів датчиків розгортається вручну в лісі. Ці вузли датчика організовані як кластери, так що кожен вузол має відповідну кластерну головку. Кожен вузол датчика може вимірювати температуру навколишнього середовища, відносну вологість, дим і світло.

Отже, уникнути накладних зв'язків між сусідніми вузлами, і кожний вузол датчика може самостійно виявляти вогонь локально. Для того, щоб точно визначити джерело пожежі і зменшити споживання енергії ми припускаємо, що базова станція знає точне положення вузлів датчиків на початку разом з відповідними іdі. Кожен вузол датчика прогнозує вогонь, використовуючи техніку Data Mining, і посилає попередження, що містить його іdі, у відповідну голову кластера. Кластер-голова обчислює ступінь небезпеки і посилає іdі і коефіцієнт пошкодження в раковину через шлюзовий вузол.

Базова станція виявляє розташування вогню, використовуючи збережену координату, що відповідає отриманим іdі для можливих дій, таких як попередження місцевих жителів або пожежників, і зберігає попередження на сервері для статистичного аналізу.

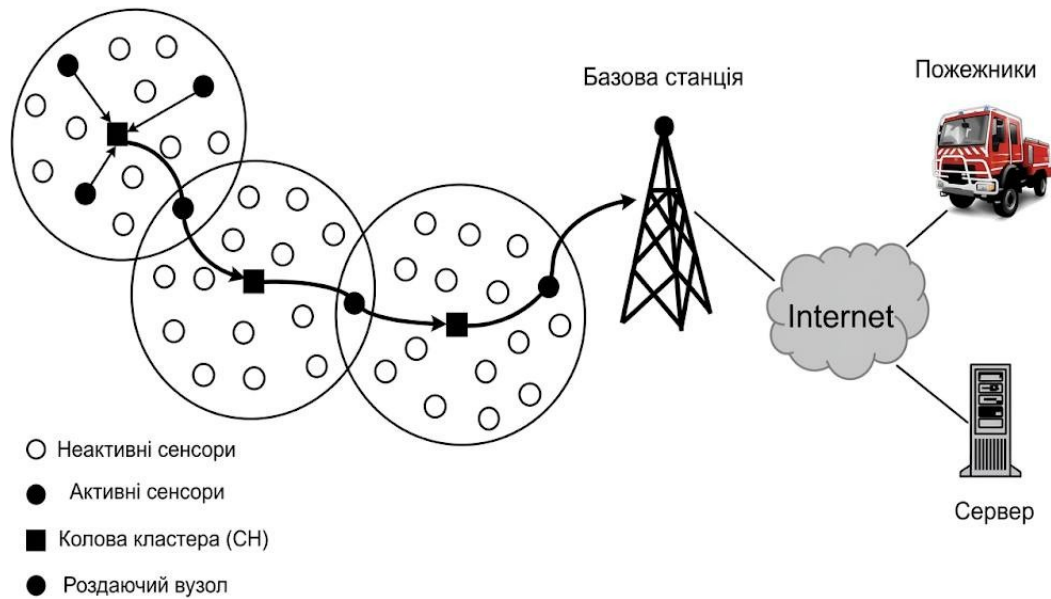


Рис. 3.1 Модель архітектури мережі

Кластеризація

Ефективне функціонування WSN залежить від топології мережі. Архітектура, заснована на кластерній топології, надає важливі переваги для виявлення лісових пожеж. Отже, можна скористатися швидким виявленням пожежної небезпеки, максимізувати термін служби мережі, досягти зв'язності і відмовостійкості.

Щоб забезпечити максимальний термін служби WSN, необхідно виконати хороше керування енергією, щоб впоратися з виснаженням сенсорних вузлів. Мета підключення полягає в тому, щоб гарантувати, що найважливіші вузли мережі можуть зв'язуватися з іншими вузлами, які розташовані в їх кластерах. Ми також приділяємо особливу увагу низькій обчислювальній складності та високій точності. Ці властивості досягаються методами Data Mining, які ефективно виявляють вогонь з мінімальними обчисленнями.

Ми вибрали алгоритм розподіленого кластеризації, який може допомогти нам прокласти дані в рамках WSN і досягти вищезазначених

цілей. Наш алгоритм базується тільки на інформації про околиці, яка є кращою для WSN, як показано нижче:

1. Кожен вузол передає свою інформацію своїм сусідам.
2. Кожен вузол приймає рішення відповідно до своєї локальної інформації топології, бути кластерною головою чи ні,
3. Вузол, обраний головою кластера, передає свій стан своїм сусідам і запрошує їх приєднатися до його кластера.
4. Якщо вузол отримує щонайменше два повідомлення для об'єднання двох різних кластерів, то він оголошує себе як шлюз, інакше він оголошує себе як вузол-член.

Вузол, що має найбільшу вагу в межах цієї околиці, оголошується як кластерна голова. Шлюзові вузли в кластері використовуються для передачі даних між кластерними головами. Вузли членів просто обробляють виявлення пожежі і надсилають оповіщення до відповідної кластерної головки.

Необхідно повторно вибрати нову голову кластера серед вузлів, щоб не перевантажувати кілька вузлів щодо інших. Існує кілька досліджень для акумулятора, що залишився, для запуску алгоритму кластеризації в локальних регіонах. Коли батарея головки кластера знаходиться нижче заданого порогу, вона передає повідомлення своїм сусідам для вибору нової кластерної головки серед них.

Маршрутизація

У літературі є кілька алгоритмів маршрутизації. У нашій роботі ми адаптуємо алгоритм, заснований на кластерній мережі, щоб максимізувати термін служби, забезпечити найкращу продуктивність мережі і дозволити якнайшвидше направити попередження від вузла до раковини.

Після застосування алгоритму кластеризації кожен вузол визначається як голова кластера або як шлюз, що включає таблицю маршрутизації. На початку таблиця маршрутизації порожня. Коли радіоприймач поширює повідомлення маршруту виявлення, що містить його id, то відповідні шлюзи

отримають повідомлення і збережуть ідентифікатор у своїй таблиці маршрутизації. Кожен шлюзовий вузол приймача пересилає повідомлення про маршрут потоку, який містить їх ідентифікатори, до наступних кластерних головок, за винятком базової станції. Коли голова кластера отримає повідомлення про маршрут виявлення, вони зберігають ідентифікатор шлюзу в таблиці маршрутизації в хронологічному порядку. Таким же чином кожна голова кластера пересилає повідомлення виявлення на наступний шлюз, за винятком попереднього. Як тільки всі голови кластера та шлюзи отримали повідомлення про відкриття, вони готові направити повідомлення до Базової станції. За допомогою даної методики кластерні голови та шлюзи можуть використовувати кілька шляхів для маршрутизації повідомлень у БС мережі. Багатоканальні комунікації спрямовані на підвищення надійності, відмовостійкості та продуктивності мережі. Для цього перший записаний вузол встановлюється як активна маршрутизація зв'язку, в той час як інші вузли зберігаються для майбутньої потреби, наприклад, коли поточний активний вузол розривається або виходить з ладу. З іншого боку, можна використовувати інші вузли для маршрутизації даних.

3.2. Опис використаного середовища проєктування

Виявлення пожежі

Робота ґрунтується на вимірюванні реальних даних від датчиків (температура, вологість, світло та дим) і прогнозування вогню за допомогою методів класифікації даних Mining на рівні вузла-члена, відкидаючи нормальні значення і передаючи лише аномальні значення до голови кластера. Цей процес зменшує кількість обмінних повідомлень, видаляє надмірність, покращує швидкість системи та зменшує потенційний мережевий трафік, розширює термін служби мережі і дозволяє ранній виявлення пожежі.

У роботі використано Data Mining для обробки даних зондування у вузлі датчика з урахуванням обмежених можливостей комп'ютера та зберігання.

Ми зацікавлені в методах пошуку та опису структурних даних у даних як інструменту, що допомагає пояснити дані та зробити з них прогноз. Класифікація є однією з популярних методів Data Mining, яка полягає у правильному прогнозуванні ймовірності того, що новий екземпляр належить визначеному класу, використовуючи набір атрибутів, що описують цей екземпляр. Існує багато методів класифікації / прогнозування, і в цій частині ми зосередимося на методі класифікатора.

Опис середовища моделювання

У розділі представлені основні характеристики та функціональні можливості цього симулятора мережі, графічний інтерфейс користувача та приклад, виконаний у CupCarbon.

Cupcarbon – це симулятор, спеціально розроблений для мереж WSN. Її метою є розробка, візуалізація та валідація алгоритмів моніторингу навколишнього середовища, збору даних тощо. Це дозволяє створювати сценарії з екологічними стимулами як пожежі, гази та рухомі об'єкти в рамках наукових та освітніх проектів. Він пропонує два середовища моделювання. З одного боку, він дозволяє розробляти сценарії з мобільністю та генерацією природних подій, а з іншого моделювати дискретні події у WSN.

Мережа може бути розроблена завдяки інтуїтивному графічному інтерфейсу, який використовує OpenStreetMap (OSM), де сенсори можуть бути розміщені безпосередньо. Крім того, кожен датчик може бути індивідуально налаштований за допомогою командного рядка з використанням мови, спеціально розробленої для CupCarbon під назвою SenScript. CupCarbon не реалізує всі шари протоколу. З цієї причини сказано, що її справжня функціональність полягає в доповненні існуючих тренажерів спостереженню споживання природних ресурсів і впливу будівель і вулиць у міських мережах.

Споживання енергії може бути обчислено та графічно відображено як функція часу моделювання. Крім того, він дозволяє спостерігати видимість і

інтерференційні моделі. CupCarbon здатний імітувати протоколи Bee, LoRa і WiFi. З іншого боку, хоча CupCarbon не виділяється широким спектром інтегрованих протоколів, той факт, що він був реалізований за допомогою Java, дозволяє створювати різні алгоритми.

3.3. Розробка та опис інтерфейсу користувача

Коли вузол 1 виявляє вогонь, він посилає попередження на свою кластерну голову S32, яка сама посилає попередження на шлюз 57, який відповідає першому вузлу, записаному в його таблиці маршрутизації.

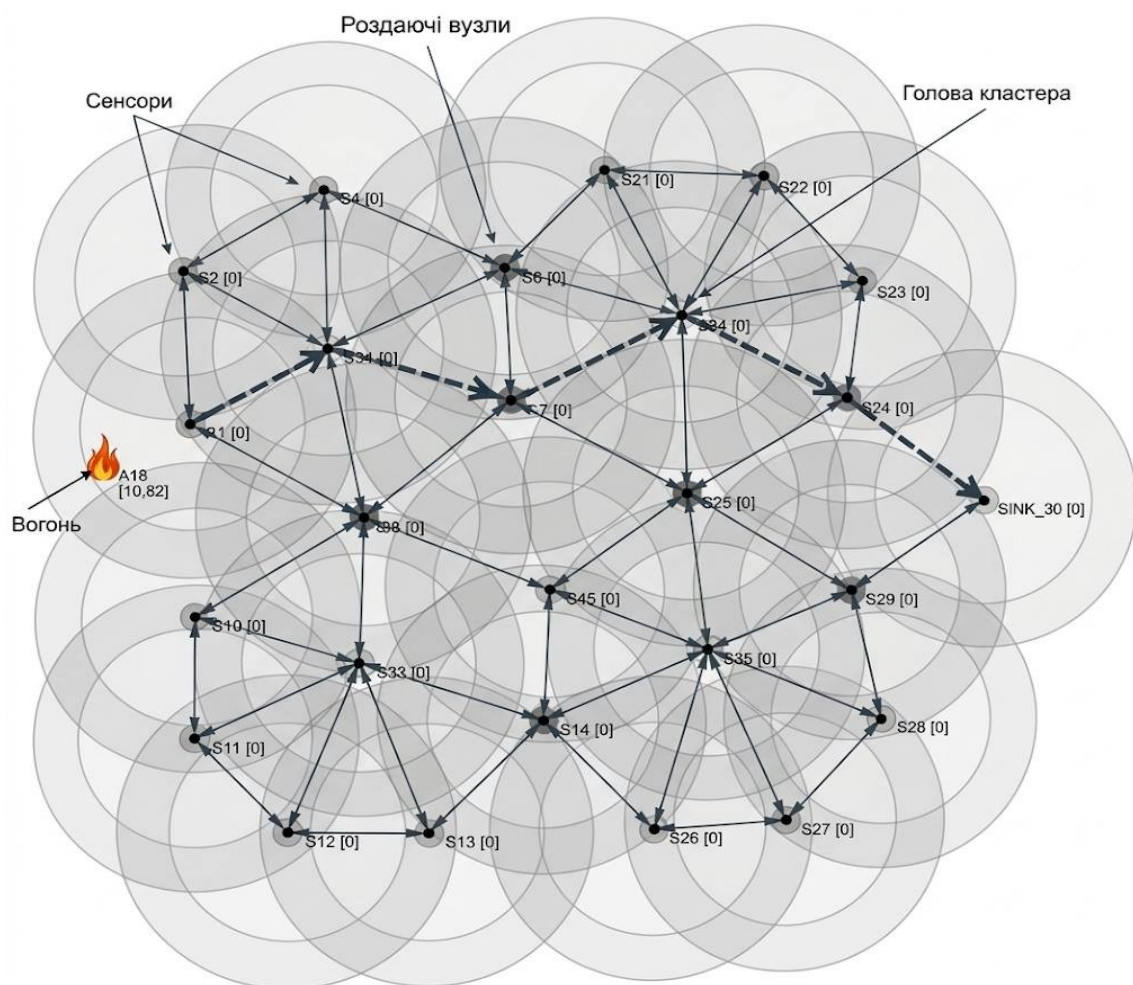


Рис. 3.2. Проектована мережа

Таким же чином шлюз 17 перенаправляє попередження на наступну кластерну голову S34, з S34 попередження надсилається до S24 і, нарешті, шлюз S24 пересилає попередження на базову станцію.

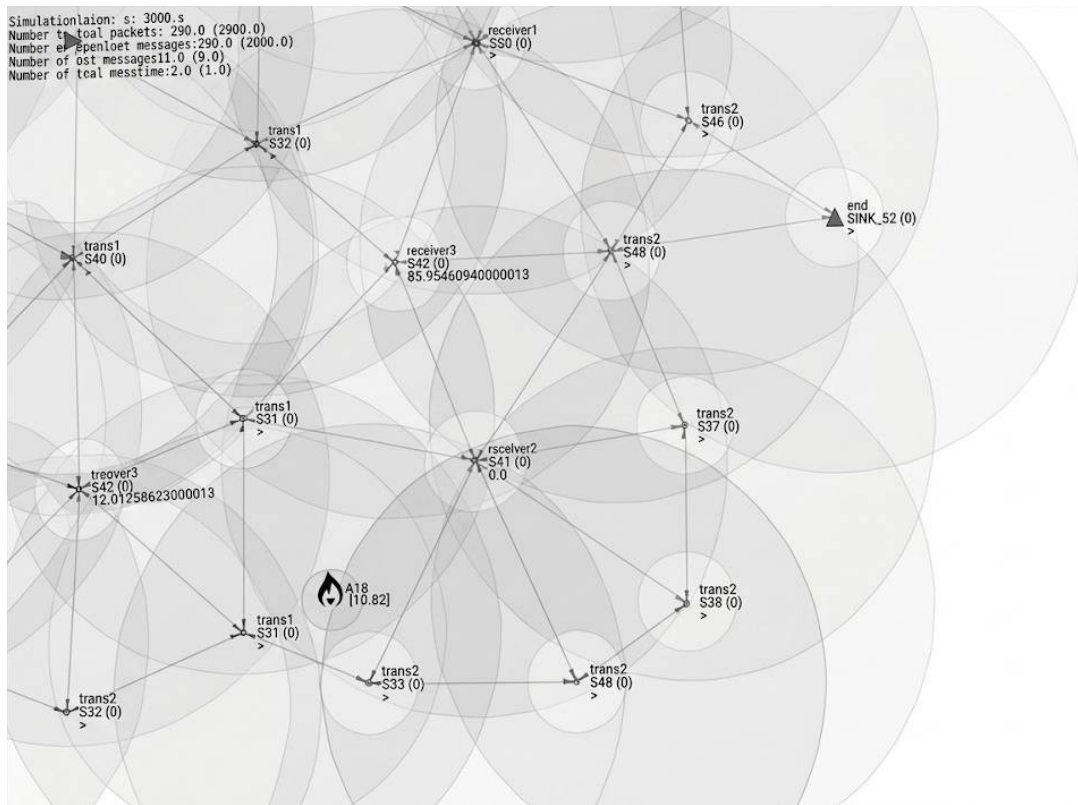


Рис. 3.3. Симуляція в реальному часі

Щоб оцінити ефективність нашого підходу для виявлення лісових пожеж, вузли розгортаються в площині, що представляє ліс. Максимальний діапазон зв'язку кожного вузла встановлюється рівним 100м. Кожен сенсорний вузол обладнаний акумуляторними і мультисенсорними пристроями, які використовуються для збору даних, таких як температура, вологість, світло і дим, тобто TMP36, 808Н5V5, GL5537 IDR 1 MQ-135 відповідно. Протокол MAC, який використовується в моделюванні, становить 802.15.4 реалізований у симуляторі CupCarbon. Щоб оцінити споживання енергії запропонованим підходом, ми обчислюємо споживання енергії при передачі / прийомі, зондуванні та обчисленні і не враховуємо споживання енергії в режимі очікування, простою та сну. По-перше, для оцінки споживання енергії передачі / прийому ми використовуємо енергетичну модель сенсорного вузла TelosB. Його енергоспоживання оцінюється як 59, 2 мкДж для передачі одного байта, а 28, 6 мкДж для отримання одного байта.

Ми використовували батарею Super Alkaline AALR6, яка є портативним

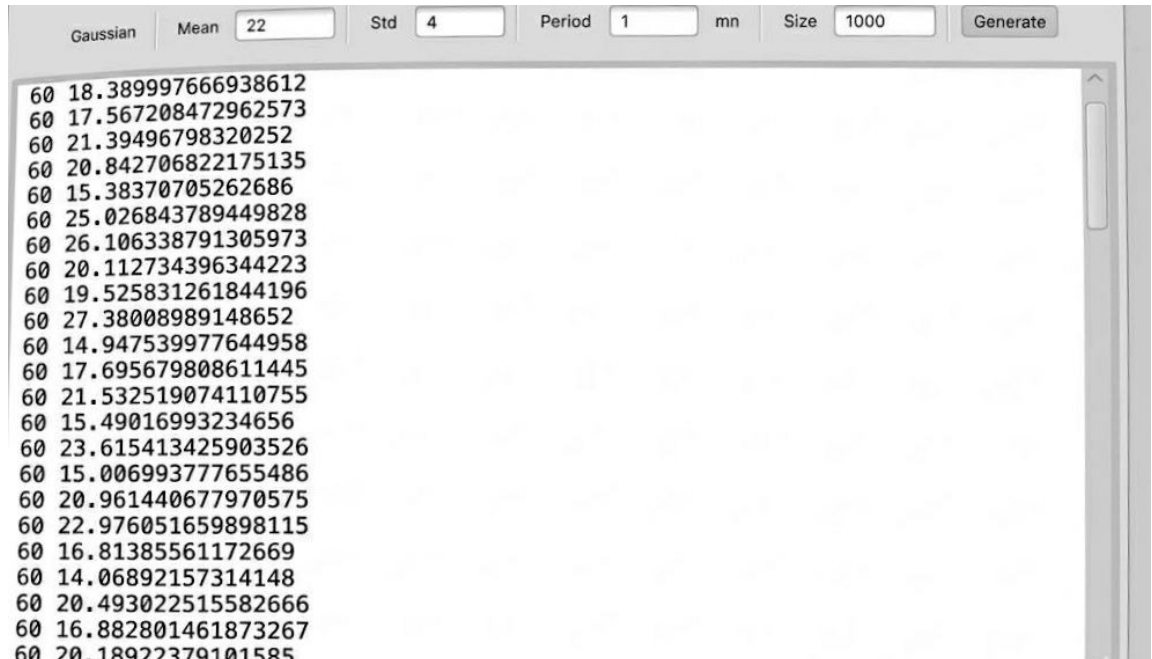


Рис. 3.3 Отримані виміри температур

3.4. Вимоги до апаратного забезпечення

Вимоги до продукту:

- Система повинна підтримувати систему Mac OS та MS Windows
- Комп'ютер-сервер повинен мати SSD накопичувач на 512 GB, HDD накопичувач на 3 TB, 16 GB RAM, 4 Thunderbolt порти, операційну систему MacOS

- Локальну мережу
- Датчик температури TMP36
- Карту типу Arduino UNO
- Датчик освітленості GL5537 IDR
- Датчик диму MQ-135
- Батарею типу Super Alkaline AALR6

Клієнтський комп'ютер:

- Вихід в інтернет
- MS Windows
- HDD 2 TB
- RAM 8

- Відеокарта 1 GB

3.5. Тестування/опис проведених експериментів

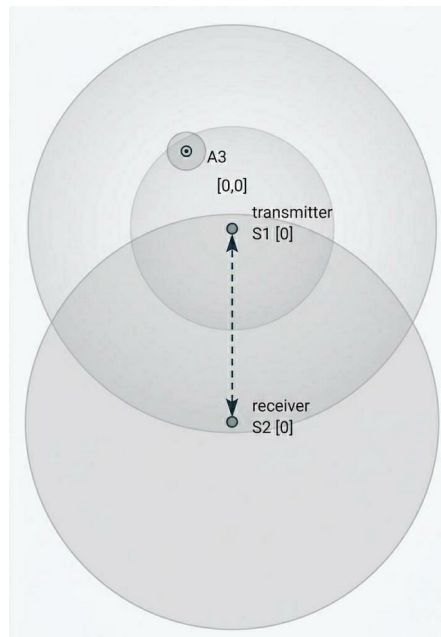


Рис. 3.4. Приклад роботи сенсора

На Рис. 3.4. ми можемо спостерігати процес роботи сенсора в CupCarbon.

Джерело вогню потрапляє в зону дії датчика S1, він змінює свій колір, це означає Що сенсор виявив вогонь і збирається передати данні в датчик S2.

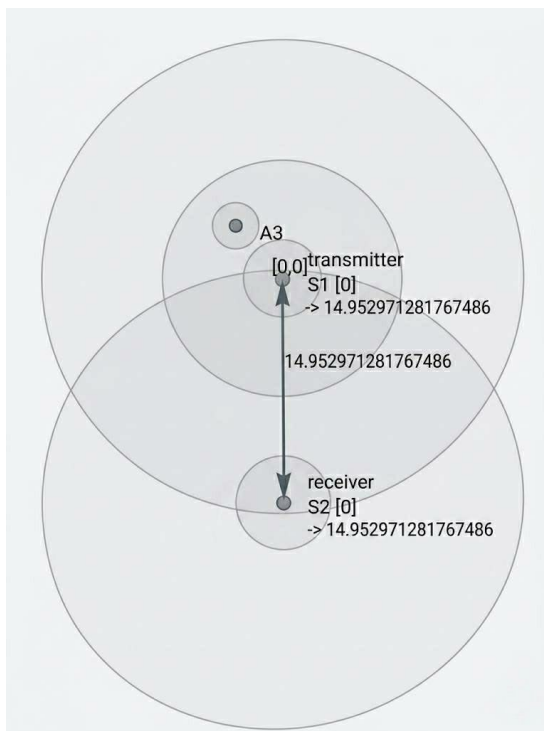


Рис. 3.5. Вказує час передачі пакету даних, для налаштування №1

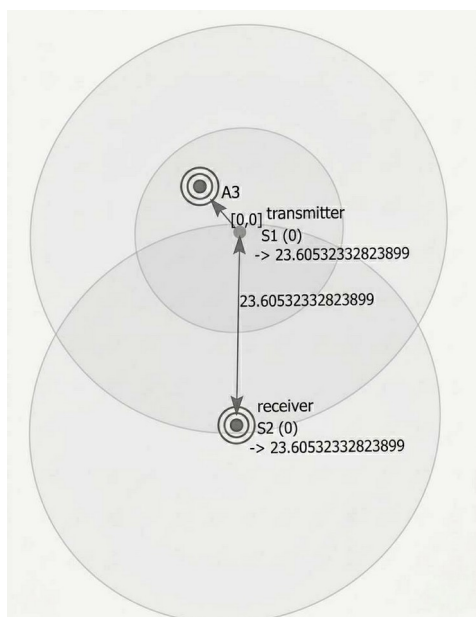


Рис 3.6. Вказує час передачі пакету даних, для налаштування №2

Для порівняння роботи в двох різних режимах, проведемо наступний експеримент, змінимо в кодї частоту оновлення інформації на датчику щоб порівняти, як це вплине на кінцевий час за який дані надходять з сенсора в голову кластера. Як бачимо в режимі №1 (Рис. 3.5) знадобилося 0.014с а в режимі №2 (Рис.3.6) 0.023с відповідно для передачі даних.

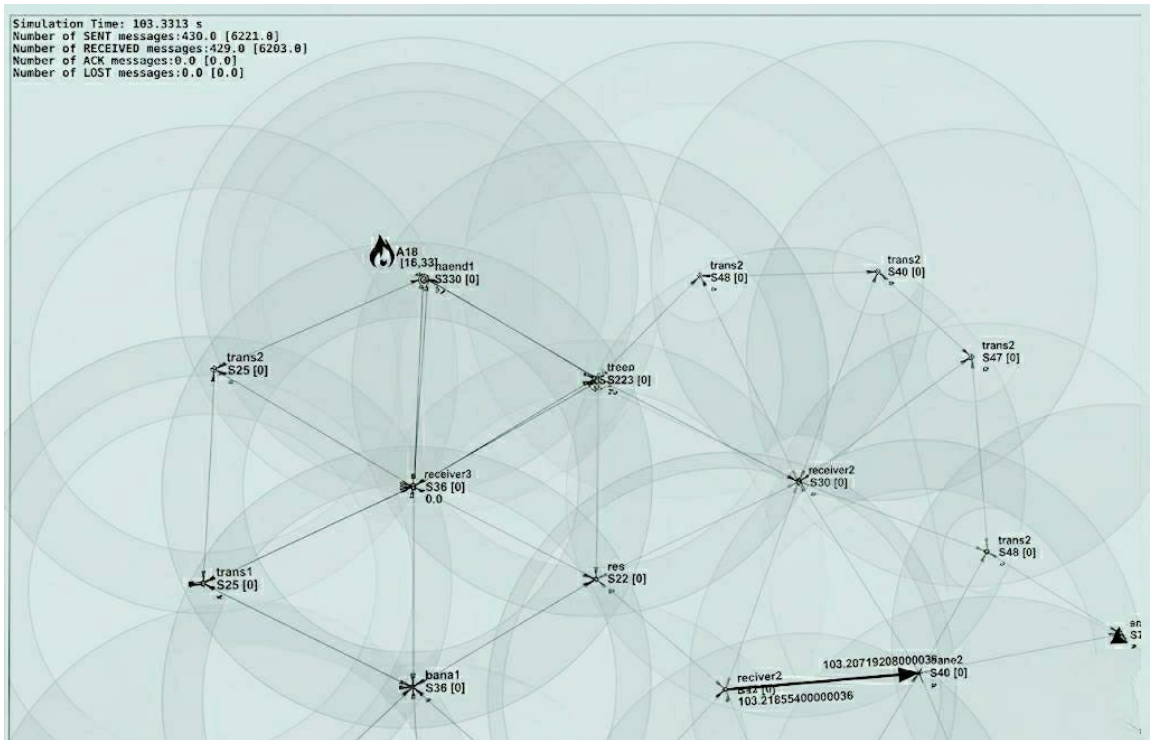


Рис.3.7. Виявлення вогню сенсором S26

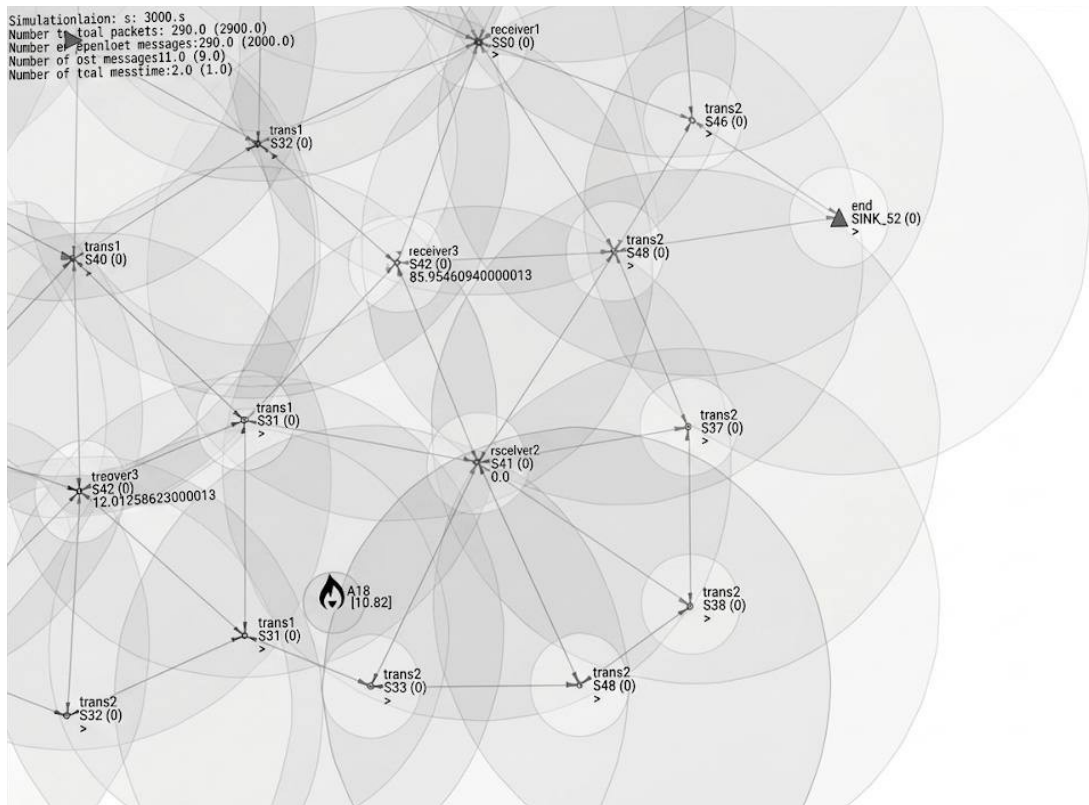


Рис. 3.8. Виявлення вогню сенсором S 33

Порівнюємо час надходження даних з різних частин мережі. На Рис.3.7. знадобилось 1.03с для того щоб перенести дані з сенсора на базову станцію, а на Рис. 3.8. 0.93с. З цих результатів можна зробити висновок що відстань до базової станції має мінімальний вплив на швидкість роботи системи.

3.6. Оцінювання та аналіз експериментів

Поставлене завдання виконано в повному обсязі. В результаті отримано робочу модель мережі, протестовано, знято виміри. Звичайно не можна стверджувати що мережа працює бездоганно, так як до повноцінно працюючого комплексу потрібно доопрацювати енергоефективність, швидкодію, оптимізувати протокол маршрутизації, та захистити мережу від можливого злому. Але для цього потрібно більш професійне і вузьконаправлене програмне забезпечення, адже CupCarbon це симулятор початкового рівня.

ВИСНОВКИ

У роботі застосовано новий підхід, який полягає у використанні бездротові сенсорних мереж для моніторингу та виявлення лісових пожеж. Враховано всі характеристики WSN, що стосуються низьких енерговитрат, обчислювальних обмежень, низького об'єму пам'яті сенсорних вузлів та екологічних умов, які можуть впливати на виявлення пожежі та продуктивність WSN.

Робота базується на вимірюванні та комбінуванні реальних даних з різних датчиків (температура, вологість, світло та дим) та використання класифікатора, що застосовується до даних для виявлення пожежі. Вузол виявляє вогонь локально, тоді він відкидає нормальні значення і передає в раковину для локалізації пожежі тільки аномальні значення і повідомляє пожежникам.

Застосування методів Data Mining зменшує розмір даних, видаляє надмірність, підвищує швидкість WSN і зменшує мережевий трафік, щоб продовжити термін служби мережі, щоб гарантувати короткий час розпізнавання та виявлення пожежі якомога раніше. Наша майбутня робота буде базуватися на вивченні та виборі найкращих класифікаторів для порівняння різних методів Data Mining, що застосовуються для виявлення пожежі з точки зору точності, часу відгуку та енергії.

Крім того, ми маємо намір знайти найкращий алгоритм кластеризації, щоб гарантувати ефективний розподіл сенсорних вузлів, щоб уникнути великих кластерів з великою кількістю сенсорних вузлів. Ми також хочемо забезпечити обмін повідомленнями між вузлами, щоб мати належним чином захищену мережу.

Розроблений прототип може бути основою для створення реальної системи моніторингу лісів та використовуватися державними структурами та лісовими господарствами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Kulik J. Negotiation-Based Protocols for Disseminating Information in Wireless Sensor Networks. J. Kulik, W. R. Heinzelman, H. Balakrishnan. *Wireless Networks*. – 2022. – Vol. 8. – P. 169–185.
2. Математична теорія зв'язку URL: http://car-vip.at.ua/index/matematiczna_teorija_zv_39_jazku/0-15
3. Maksimovic M. Comparative analysis of data mining techniques applied to wireless sensor network data for fire detection. M. Maksimovic, V. Vujovic. *JITA – Journal of Information Technology and Applications*. 2013. Vol. 6, No. 2. P. 88–96.
4. Younis O. Node clustering in wireless sensor networks: recent developments and deployment challenges. O. Younis, M. Krunz, S. Ramasubramanian. *IEEE Network*. 2006. Vol. 20, No. 3. P. 20–25.
5. Singh S. K. Routing protocols in wireless sensor networks – a survey. S. K. Singh, M. P. Singh, D. K. Singh. *International Journal of Computer Science & Engineering Survey*. 2010. Vol. 1, No. 2. P. 63–83.
6. Cupcarbon simulator. ANR Project PERSEPTEUR. URL: <https://cupcarbon.com>
7. Mehdi K. Cupcarbon: A multi-agent and discrete event wireless sensor network design and simulation tool. K. Mehdi, M. Lounis, A. Bounceur, T. Kechadi. *Proceedings of the 7th International Conference on Simulation Tools and Techniques (SIMUTools' 14)*. Lisbon, Portugal, 2014. P. 126–135.
8. Dampage U. Forest fire detection system using wireless sensor networks and machine learning. U. Dampage, L. Bandaranayake, R. Wanasinghe [et al.] *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12, Article number: 46. DOI: 10.1038/s41598-021-03882-9.

9. Almarri S. Optimized Wireless Sensor Network Architecture for AI-Enabled Early Wildfire Detection. S. Almarri [et al.]. *Fire*. – 2025. – Vol. 8, No. 7. – P. 245. DOI: 10.3390/fire8070245.
10. Lloret J. A wireless sensor network deployment for rural and forest fire detection and verification. J. Lloret, M. Garcia, D. Bri, S. Sendra. *Sensors*. – 2019. – Vol. 9, No. 11. – P. 8722–8747. DOI: 10.3390/s91108722.
11. Yetgin H. A survey of network lifetime maximization techniques in wireless sensor networks. H. Yetgin, K. T. K. Cheung, M. El-Hajjar, L. Hanzo. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2017. Vol. 19, No. 2. P. 828–854. DOI: 10.1109/COMST.2017.2650979.
12. Del-Valle-Soto C. A survey of energy-efficient clustering routing protocols for wireless sensor networks based on metaheuristic approaches. C. Del-Valle-Soto [et al.]. *Artificial Intelligence Review*. 2023. Vol. 56. P. 9699–9770. DOI: 10.1007/s10462-023-10402-w.
13. Yang L. Energy efficient cluster-based routing protocol for WSN using multi-strategy fusion snake optimizer and minimum spanning tree / L. Yang, D. Zhang, L. Li [et al.] *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14, Article number: 16786. DOI: 10.1038/s41598-024-66703-9.
14. Pan L. Preventing forest fires using a wireless sensor network. L. Pan. *Journal of Forest Science*. 2020. Vol. 66, No. 3 P. 97–104. DOI: 10.17221/151/2019-JFS.
15. Garcia M. Practical deployments of wireless sensor networks: a survey / M. Garcia, D. Bri, R. Sendra, J. Lloret. *International Journal on Advances in Networks and Services*. 2010. Vol. 3, No. 1–2. P. 170–185.
16. Fall K. The ns Manual (formerly ns Notes and Documentation) . Fall, K. Varadhan. – URL:https://www.isi.edu/nsnam/ns/doc/ns_doc.pdf
17. Rajaram M. L. Wireless sensor network simulation frameworks: A tutorial review M. L. Rajaram, E. Kougianos, S. P. Mohanty, U. Choppali. *IEEE Consumer Electronics Magazine*. – 2016. – Vol. 5, No. 2. – P. 63–69. DOI: 10.1109/MCE.2016.2519051.

18. Ns-3 Network simulator. URL: <https://www.nsnam.org>
19. OMNeT++ Network simulator URL: <https://www.omnetpp.org>
20. Bekal P. A comprehensive review of energy efficient routing protocols for wireless sensor networks / P. Bekal [et al.]. F1000Research. 2024. Vol. 12. Article 644.