Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____Комп'ютерної інженерії та управління_____
(повна назва)

Кафедра _____Автоматизації проектування обчислювальної техніки_____
(повна назва)

АТЕСТАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

другий(магістерський)
(рівень вищої освіти)

ГЮИК. ХХХХХХ.01ПЗ
(позначення документа)

Комп'ютерна сенсорна мережа для довгострокового моніторингу навколишнього середовища

Виконав: студент II курсу, групи СКС-19-1
Спеціальність 123–Комп'ютерна інженерія

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Спеціалізовані комп'ютерні системи
(повна назва освітньої програми)

_____Богомазов Є.М._____
(прізвище, ініціали)

Керівник _____проф. Кривуля Г.Ф._
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри _____ Чумаченко С.В.__
(підпис) (прізвище, ініціали)

2020 р.
Факультет Комп'ютерної інженерії та управління

Кафедра Автоматизації проектування обчислювальної техніки
Рівень вищої освіти другий(магістерський)перший
Спеціальність 123 – Комп'ютерна інженерія
(шифр і назва)
Харківський національний університет радіоелектроніки

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Зав. кафедри _____
(підпис)
____ _____2020 р.

ЗАВДАННЯ

НА АТЕСТАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЕКТ)

студентові Богомазову Єгору Михайловичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи (проекту) Комп'ютерна сенсорна мережа для довгострокового моніторингу навколишнього середовища
затверджена наказом по університету від ___ _____ 2020 р. № Ст
2. Термін подання студентом роботи (проекту) 03 09 2020 р.
3. Вихідні дані до роботи (проекту)
Використання стандарту ZigBee
Технічна реалізація на мікроконролерах Arduino
Реалізація інтерфейсу датчиків для аналізу стану навколишнього середовища

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, що потрібно розробити)
Аналіз предметної області
Розробка алгоритму
Розробка архітектури
Вибір компонентів
Написання програмної реалізації
Тестування та експериментальні дослідження

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів)
15 слайдів

6. Консультанти розділів роботи (проекту)

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		(підпис)	(дата)

7. Дата видачі завдання __03 вересня_____ 2020 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи (проекту)	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання завдання	03.09.2020 -10.09.2020	
2	Аналіз предметної області	10.09.2020 -30.09.2020	
3	Аналіз джерел з проблемної галузі	30.09.2020 -15.10.2020	
4	Постановка задачі	15.10.2020-15.11.2020	
5	Розробка системи	15.11.2020 -25.11.2020	
6	Створення функціонального пристрою	25.11.2020 -05.12.2020	
7	Проведення дослідження	05.12.2020 -08.12.2020	
8	Оформлення пояснювальної записки	08.12.2020 -12.12.2020	
9	Оформлення графічного матеріалу	12.12.2020 -14.12.2020	
10	Перевірка виконаного проекту керівником	14.12.2020 -15.12.2020	
11	Захист проекту	16.12.2020 -23.12.2020	

Дата видачі завдання _03_ ___09___ 2020 р.

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____ _____проф. Кривуля Г. Ф.__
(підпис) **(посада, прізвище, ініціали)**

РЕФЕРАТ

Атестаційна робота магістра оформлена на 77 с., включає 30 рис., 3 табл., 2 додатка, 11 посилань.

Метою роботи є створення сенсорної мережі з використанням стандарту IEEE802.15.4 ZigBee на основі мікроконтролерів Arduino для довгострокового моніторингу навколишнього середовища.

Об'єкт дослідження – бездротова сенсорна мережа . для моніторингу навколишнього середовища.

Предмет дослідження – вибір компонентів сенсорної мережі для існуючої приладової бази.

В результаті роботи розроблені основні елементи сенсорної мережі екологічного призначення. Основною сферою застосування даного апаратно - програмного комплексу є моніторинг параметрів повітря закритих приміщень, повітря робочої зони, фізичних середовищ і об'єктів при проведенні лабораторних робіт.

Сенсорна мережа, ZigBee модуль, мікроконтроллер, передача даних, радіоканал, координатор мережі, вузол мережі.

ABSTRACT

The aim of the work is to create a sensor network using the standard IEEE802.15.4 ZigBee based on Arduino microcontrollers for long-term environmental monitoring.

The object of research - a wireless sensor network. for environmental monitoring.

The subject of research - the choice of components of the sensor network for the existing instrument base.

As a result of work the basic elements of a sensory network of ecological purpose are developed. The main area of application of this hardware - software complex is monitoring of parameters of air of the closed rooms, air of a working zone, physical environments and objects when carrying out laboratory works.

Sensor network, ZigBee module, microcontroller, data transmission, radio channel, network coordinator, network node.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ.....8
ВСТУП.....9
1 ВИКОРИСТАННЯ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ ДЛЯ МОНІТОРИНГГУ 12
1.1 Огляд можливостей сенсорних мереж для моніторінгу.....12
1.2 Вимоги до сенсорних мереж для екологічного моніторингу.....16
1.3 Постановка завдань дослідження.....18
2 СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПОБУДОВИ БЕЗДРОТОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ.....20
2.1 Базовий стандарт для бездротових сенсорних мереж.....20
3 ПЕРСПЕКТИВНІ СТАНДАРТИ І ПРОТОКОЛИ БЕЗДРОТОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ.....29
3.1 Особливості мережі ZigBee.....30
3.2 Протоколи обміну даними 31
3.2.1 Шина 1-Wire для зв'язку з пристроями.....37
3.2.2. Аналого-цифровий перетворювач.....38
4.ПЛАНУВАННЯ УЗЛІВ У СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ: З ВИКОРИСТАННЯМ ДІАГРАМ ВОРОНОГО.....39
4.1 Діаграми Вороного.....39
4.2. Використання діаграми Вороного для розташування вузлів.....41
4.3 Системна модель для планування вузлів.....44
4.4 Планування розміщення вузлів.....45
4.5 Діаграма Вороного для розміщення вузлів.....47
4.5.1 Алгоритм .побудови діаграми Вороного.....48
5 АППАРАТНО–ПРОГРАМНА РЕАЛИЗАЦІЯ КОМПОНЕНТІВ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ.....54
5.1 Координатор.....55
5.2 Вузол сенсорної мережі.....57

5.2.1 Вимірювання температури навколишнього середовища.....59
5.2.2 Вимірювання тиску навколишнього середовища.....60
5.2.3 Вимірювання відносної вологості повітря навколишнього середовища 61
5.2.4 Вимірювання освітленості.....62
5.2.5 Вимірювання радіаційного фону навколишнього середовища.....63
5.3 Програмне забезпечення для візуалізації даних в сенсорній мережі.....66
ВИСНОВКИ.....71
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....72
ДОДАТОК А.....74
ДОДАТОК В.....77

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

МК - Мікроконтроллер;

ОС - Операційна Система

ШІМ - Широтно-імпульсна модуляція

ADC - Analog to Digital Converter

АЦП - Аналогово-цифровий перетворювач

P2P - peer-to-peer

PAN - Personal Area Network

ДР- Датчик тиску

ДВ - Датчик вологості

ДТ - Датчик температури

ДНСВ - Датчик напрямку і швидкості вітру

ДО - Датчик освітленості

ДРФ - Датчик радіаційного фону

БСМ – Бездротова сенсорна мережа.

WLAN - Wireless Local Area Network (Бездротова локальна мережа)

ВСТУП

Контроль поточного стану навколишнього середовища потребує комплексної системи моніторингу розподілених об'єктів в реальному часі. Рішення такої задачі може бути ефективно реалізовано на основі БСМ, використання яких дозволяє створити систему, що забезпечує безперервний доступ до інформації про стан контрольованого об'єкта. Для організації бездротової мережі, що складається з вузлів і шлюзу, використовуються малопотужні радіочастотні приймачі. Дальність зв'язку між сусідніми вузлами визначається умовами поширення радіохвиль (відкритий простір, всередині приміщень і т.д.) і може досягати декількох сотень метрів в залежності від потужності передавачів. БСМ утворюється безліччю бездротових вузлів, має багатокомірну топологію, в якій кожен вузол виконує як функцію передавача, так і функцію маршрутизатора. Вузли БСМ здатні в разі потреби ретранслювати пакети для їх доставки шлюзу. При цьому можлива побудова розподілених систем зі значною площею покриття.

Важливою задачею моніторингу віддалених та розподілених об'єктів є створення системи збору, накопичення та аналізу даних від сенсорних датчиків з метою визначення діагностичного стану контрольованого об'єкта, виявлення аномалій в його роботі, забезпечення спостереження за розвитком ситуації і своєчасного попередження про необхідність прийняття рішень для надійної і безпечної експлуатації.

БСМ можуть надавати широкий спектр послуг: від надання даних про значення контрольованого параметра (пасивні датчики) до управління процесами (активні датчики - активатори). Відсутність проводів уможливлює застосування БСМ в важкодоступних місцях або на мобільних об'єктах, що значно розширює коло застосування сенсорних мереж.

БСМ є мережею просторово розподілених автономних датчиків, що використовуються для моніторингу будь-яких фізичних параметрів, зокрема параметрів навколишнього середовища, і спільної передачі даних на головний

сервер. Контрольовані параметри залежать від функції сенсорних вузлів в мережі, наприклад фізичні датчики (температури, вологи, радіохвильової частоти датчиків), хімічні датчики (розчиненого кисню, електропровідності, датчик pH), біологічні датчики (наприклад, датчик мікроорганізмів), датчики, орієнтовані на національну безпеку, а також багато інших видів датчиків..

БСМ зазвичай складаються з двох основних частин: системи для генерації і збору значень з розподілених датчиків; системи обробки і локального зберігання значень з датчиків, перед відправкою цих даних користувачеві. – система генерації та збору значень (сенсорна мережа) складається з сотень самоорганізованих сенсорних вузлів, які взаємодіють і обмінюються інформацією між собою за допомогою радіосигналів, і створюють мережу типу ad-hoc. Ці датчики здатні зберігати обмежена кількість даних, мають обмежену швидкість обробки даних і ширину каналу радіозв'язку. Сенсорні вузли можуть бути розгорнуті певним, або випадковим чином, можуть покривати значну площу з високою щільністю в залежності від необхідних вимог до розміщення.

Система обробки та локального зберігання може бути звичайним сервером, що зберігають значення датчиків і перетворює їх в формат, зручний для розпізнання та подальшого відтворення користувачеві.

Незважаючи на те, що бездротові сенсорні мережі вже тривалий час широко використовуються в багатьох сферах, все ще існують деякі значні недоліки, які не дозволяють їм стати вибором у багатьох випадках.

Можна виділити два основних недоліки це значне енергоспоживання, а також необхідність наявності надмірності й використання великої кількості резервних вузлів для підтримки стабільної роботи мереж.

Як правило БСМ розгортаються для контролю або моніторингу протягом тривалого періоду часу (кілька місяців або років), в разі чого заміна джерел живлення сенсорних пристроях є неможливою. Тобто енергія, споживана кожним сенсорним вузлом мережі є одним з обмежень, які слід враховувати при проектуванні БСМ. При зменшенні витрат енергії вузла мережі

збільшується термін служби БСМ. Відповідно, споживана потужність БСМ може бути оптимізована шляхом вибору оптимальної топології мережі і протоколу маршрутизації. Наприклад, для забезпечення максимальної ефективності роботи, сенсорний вузол повинен знаходитися в сплячому режимі 90% робочого часу і «прокидатися» лише згідно з розкладом, або в зв'язку з примусовою активацією.

Для постійного автономного живлення БСМ можуть використані сонячні батареї. Ефективнішими пристроями для перетворення сонячної енергії у електричну є напівпровідникові фотоелектричні перетворювачі, оскільки дозволяють здійснити прямий, одноступінчатий перехід енергії. Перетворення енергії в фотоелектричних перетворювачах ґрунтується на фотоефекті, що виникає в неоднорідних напівпровідникових структурах при вплив ними сонячного випромінювання [1].

Таким чином, на теперішній час контроль поточного стану навколишнього середовища є задачею вельми актуальною й потребує комплексної системи моніторингу розподілених об'єктів в реальному часі.

1 ВИКОРИСТАННЯ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ ДЛЯ МОНІТОРИНГГУ

1.1 Огляд можливостей сенсорних мереж для моніторінгу

Сенсорна мережа – це розподілена, самоорганізована мережа низки датчиків і виконавчих пристроїв, об'єднаних між собою за допомогою радіоканалу. Такі мережі можуть використовувати у різних прикладних застосуваннях: охоронно-пожежних системах, контролюванні мікроклімату, автоматизації бізнес-процесів, обліку та оптимізації споживання водо та інших ресурсів тощо. Сфера покриття таких мереж складає від одного метра до кількох кілометрів. Наприклад, IEEE 802.11 – це стандарт бездротових локальних мереж Wi-Fi на частотах 5-6 ГГц.

Все різноманіття протоколів бездротового передавання даних можна класифікувати за кількома різними ознаками, обравши як параметр, наприклад, топологію мережі, швидкість роботи чи алгоритм підтримання безпеки.

Найбільш поширений метод класифікації – це радіус дії бездротової мережі. WWAN (Wireless Wide area network), в основному – це мережі стільникового в'язку, їх радіус дії становить десятки кі- лометрів, до цих мереж відносять такі протоколи як GSM, CDMAone, iDEN, PDC, GPRS, UMTS.WMAN (Wireless Metropolitan Area Networks) – це бездротові мережі масштабу міста, радіус дії таких мереж кілька кілометрів, прикладом протоколу цієї мережі є Wi-Fi та WiMAX мережі. Wireless LAN (Wireless Local Area Network) – це бездротова локальна обчислювальна мережа, радіус дії цього класу мереж кілька сотень метрів. До них належать такі протоколи як UWB, Wi-Fi. WPAN застосовують для зв'язку різних пристроїв, включаючи комп'ютери, побутові прилади та оргтехніку, засоби зв'язку, радіус дії WPAN становить від кількох метрів до декількох десятків метрів. Його використовують як для об'єднання

окремих пристроїв між собою, так і для зв’язку їх з мережами на основі протоколів RuBee, X10, Insteon, Bluetooth, ZigBee, Z-Wave, ANT, RFID.

Одним із базових стандартів цих мереж є стандарт IEEE 802.15.4 ZigBee, який, згідно з Альянсом ZigBee [2], має значно більшу гнучкість порівняно зі своїми аналогами. Реалізація стандарту ZigBee базується на трьох типах пристроїв: координаторі, маршрутизаторі та виконавчому пристрої (сенсорі чи датчику) [3]. Головним елементом у бездротовій сенсорній мережі стандарту ZigBee є єдиний координатор. Він керує всією мережею і до нього надходить вся інформація з мережі. Маршрутизатори керують потоками інформації між пристроями мережі і забезпечують найоптимальніші маршрути для подальшого передавання інформаційних пакетів, збиранням інформації та передаванням її в мережу.

Використання мікроконтролера Arduino для підключенні кінцевих пристроїв є є достатньо ефективним в процесі організації бездротової сенсорної мережі. Це відкрита електронна платформа, призначена для швидкого створення інтерактивних електронних пристроїв, сформована на основі мікроконтролерів Atmel, використовуваних для отримання сигналів від аналогових і цифрових датчиків, керування різними виконавчими пристроями та обміну інформацією з комп’ютером за допомогою різних інтерфейсів.

Модулі XBee з’єднують згідно з конфігурацією PAN, базовою топологією таких систем є point-to-point або point-to-multipoint. Коли необхідно замінити дротовий послідовний зв'язок між двома віддаленими пристроями бездротовим зв’язком, тоді є зручною схема point-to-point, в інших випадках за використання розподілених мереж датчиків використовують конфігурацію point-to-multipoint. Схему бездротової сенсорної мережі стандарту IEEE802.15.4 ZigBee на основі мікроконтролерів Arduino зображено на рисунку 1.1.

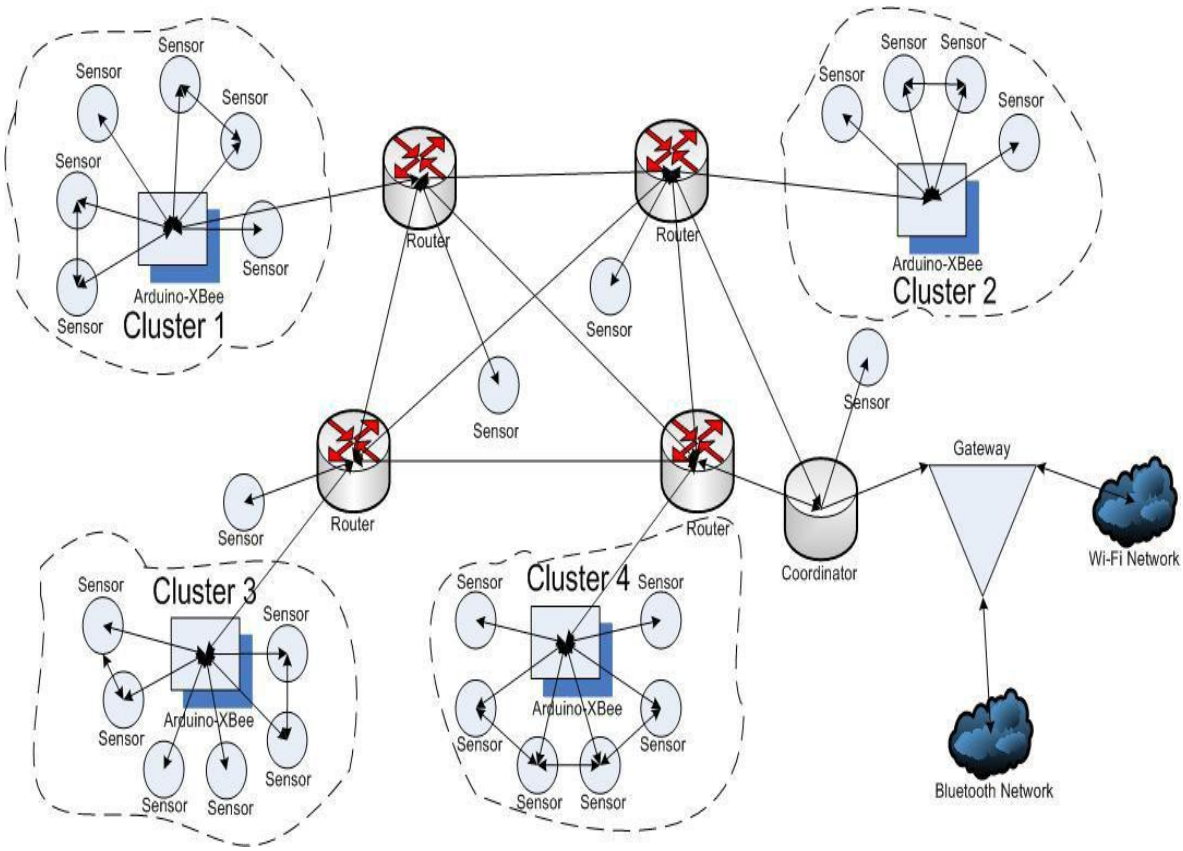


Рисунок 1.1 – Сенсорна мережа стандарту ZigBee на мікроконролерах Arduino

До мережі входять: координатор, що керує бездротовою мережею, маршрутизатори, які направляють потоки інформації між пристроями. Сенсори виконують прийом інформації за допомогою плати Arduino-XBee, яка складається з плати Arduino, плати розширення Arduino-XBee та радіомодуля XBee. Мікроконтролери обробку інформації, агрегування даних від вузлів мережі та керування вузлами мережі за допомогою API інтерфейсу. чим значно Координатор в цьому випадку виконує тільки моніторинг, конфігурацію, налаштування та адресацію мережі. Кластеризація полегшує керування та прийом інформації з кінцевих приладів, саме тому розподіляють мережу на кластери. Кластери сенсорної мережі об’єднують різні типи датчиків. Так, в кластері 1 можуть бути об’єднані датчики температури та спостереження,

датчики освітлення і вологості, в кластері 2 – датчики температури і вологості, в кластері 3 – датчики відкриття дверей і відеоспостереження, датчики освітлення, а в кластері 4 – датчики освітлення та температури і датчик відкриття дверей. Я правило, у мережі адресація виконується бітовим ідентифікатором мережі. Бездротова сенсорна мережа може бути сегментом корпоративної мережі, також охоплює бездротову мережу стандарту Wi-Fi і бездротову мережу стандарту Bluetooth.Стандарт IEEE 802.15.1 Bluetooth [6] надає бездротове з'єднання невеликої дії. Він добре розвинений і його застосовують для комунікації мобільних телефонів, планшетних ПК, периферійного обладнання. Проте він не розрахований на мережі з низьким енергоспоживанням, що істотно обмежує його поширення в сенсорних мережах. Технологія Bluetooth Low Energy (BLE) Bluetooth 4.0 [7] є технологією бездротового зв'язку для ближніх комунікацій, розробленою группою Bluetooth SpecialInterest Group. На відміну від стандарту Bluetooth 3.0, BLE орієнтовано на застосування в системах збирання даних, моніторингу з автономним живленням. На відміну від технологій сенсорних мереж, таких як, ZigBee, 6LoWPAN або Wave, орієнтованих на розподілені мережі з численими передачами даних між вузлами мережі, Bluetooth Low Energy орієнтовано на топології типу point-to-point і зірка. Основними сферами застосування BLE є облаштування забезпечення безпеки, керування електроприладами і відображення даних, датчиками з батарейним живленням, домашніх медичних приладів, спортивних тренажерів.Мережа стандарту Bluetooth, як і бездротова сенсорна мережа стандарту ZigBee, може бути реалізована на базі мікроконтролерів Arduino [8]. Згідно з BLE112 Datasheet [9], для взаємодії плати Arduino з мережею стандарту Bluetooth Low Energy.

На теперішній час область застосування БСМ постійно розширюється і можна прогнозувати, що в перспективі все фізичні об'єкти будуть забезпечені сенсорами, що мають IP-адреси з можливістю формування «Глобальної сенсорної мережі».

1.2 Вимоги до сенсорних мереж для екологічного моніторингу

Головна особливість екологічного моніторингу – це створення універсальної інтелектуальної системи для вироблення управлінських рішень на основі експрес-діагностики отриманих даних про стан навколишнього середовища. Збір первинних даних про стан оточуючого середовища в системі виконує БСМ. Система збору даних – це: мережа великої кількості сенсорів, які об'єднані між собою радіоканалом. Площа покриття подібної мережі може складати до декількох кілометрів за рахунок здатності ретранслювати дані від одного елемента до іншого. Основна перевага БСМ – це здатність контролювати в реальному часі параметри навколишнього середовища на великих територіях.

Типова сенсорна мережа має відповідати більшості вимог, які пред’являються екологічним моніторингом до БСМ. Ці вимоги враховують показники відмовостійкості, масштабування,, топологію сенсорної мережі, апаратні обмеження, модель передачі даних та споживану потужність. Деякі вузли можуть вийти з ладу із-за збоїв енергопостачання, фізичних пошкоджень або стороннього втручання. Відмова одного вузла мережі не повинна суттєво впливати на роботу усієї БСМ.

Відмовостійкість мережі можна забезпечити шляхом правильного застосування чи розробки відповідних протоколів передачі даних або алгоритмів функціонування. Оскільки створювана БСМ призначається для роботи в умовах можливого впливу кліматичних умов, вона повинна мати високу відмовостійкість. Масштабування розроблюваної сенсорної мережі обмежується кількістю вузлів від десятків до декількох тисяч вузлів. Вважається, що БСМ виправдовує вкладені в неї кошти, якщо її розгортання є дешевшим від системи збору і обробки даних на основі традиційних датчиків.
Не зважаючи на те, що велика кількість вузлів, а також неможливість автоматизації їх розгортання виключає розташування їх у відповідності з чітко

розробленим планом, схеми початкового розгортання мають відповідати таким вимогам:

- зменшувати витрати на монтаж;
- усувати необхідність будь-якої попередньої організації і планування;
- підвищувати гнучкість розташування;
- сприяти самоорганізації та відмовостійкості.

Вузли мережі можуть зменшувати вхідний сигнал із-за розряджання батареї або впливу фізичних факторів, тому в структурі БСМ можуть бути часті зміни топології після розгортання мережі. Інша топологія потребує зміну характеристик самих вузлів : положення, доступність (із-за завад, шумів, рухомих перешкод і т. д.), рівень заряду батареї, неполадки, зміна поставлених задач або ролі в мережі. Повинна бути передбачена можливість включення в БСМ резервних вузлів для заміни несправни х вузлів або у зв'язку з розширенням мережі та відповідних її функцій. Характеристики БСМ для конкретної задачі повинні враховувати такі чинники :

- кількість вузлів може бути вище, ніж у традиційній розподіленій мережі збору і обробки даних;
- вузли потрібно розташовувати якомога дуже щільно;
- можуть відбуватися збої у роботі вузлів під впливом факторів природного чи техногенного походження;
- топологія мережі може змінюватися випадковим чином;
- вузли обмежені в енергоспоживанні, обчислювальних можливостях, обсязі пам'яті;
- бажано, щоб вузли не мали глобальних ідентифікаційних номерів із-за значних додаткових витрат на енергоспоживання та порівняно великої кількості вузлів.

Розробку БСМ для прикладної задачі, а саме, для застосування в екологічному моніторингу, потрібно розпочинати з розробки окремого вузла мережі. За основу використовують типовий вузол системи, який складається з

кількох основних елементів (рисунок 1.2): блоку збору даних, блоку обробки даних, передавача і блоку живлення. Наявність додаткових модулів залежить від прикладної задачі БСМ. До додаткових модулів можна віднести систему визначення місцезнаходження, силовий генератор і мобілізатор. Модуль збору даних, як правило, складається з двох частин: сенсора і АЦП. Сигнал від сенсора після перетворення в АЦП передається в блок обробки. Передавач під'єднує вузол до мережі.

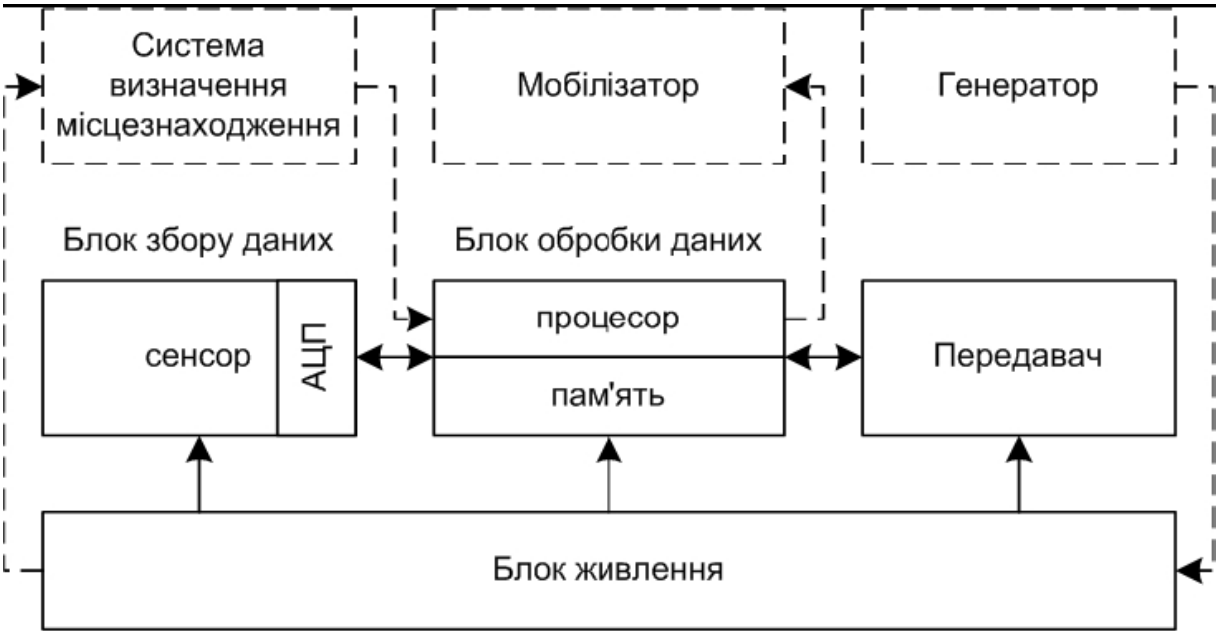


Рисунок 1.2 – Типовий вузол сенсорної мережі

1.3 Постановка завдань дослідження

Мета роботи*:* організувати сенсорну мережу з використанням стандартуIEEE802.15.4 ZigBee на основі мікроконтролерів Arduino для довгострокового моніторингу навколишнього середовища.

Об'єкт дослідження – бездротова сенсорна мережа для моніторингу

Предмет дослідження – вибір компонентів сенсорної мережі для існуючої приладової бази.

Для досягнення поставленої мети мають бути проведені наступні заходи:

- визначити сфери застосування бездротових мереж з низьким енергоспоживанням;
- розглянути прикладні аспекти практичної реалізації бездротових вузлів;
- виявити перспективні стандарти і протоколи бездротових сенсорних мереж;
- вивчити протоколи;
- розробити апаратну реалізацію координатора і вузлів.

2 СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПОБУДОВИ БЕЗДРОТОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ

2.1 Базовий стандарт для бездротових сенсорних мереж

Бездротові технології і створювані на їх основі телекомунікаційні мережі мають ряд загальновідомих переваг в числі яких гнучка архітектура і низькі витрати при монтажі. В даний час до числа масових і найбільш затребуваних на споживчому ринку систем бездротового зв'язку можна віднести системи стільниковог зв'язку, WiFi і Bluetooth. Кожна з них характеризується дальністю і швидкістю передачі, діапазоном робочих частот, функціональними можливостями і сферою застосування, а також іншими характеристиками, що визначають архітектуру і структурні особливості розгортається на їх основі телекомунікаційних мереж (рис. 2.1).

В архітектурному аспекті головною відмінністю БСМ від класичних телекомунікаційних радіомереж є використання в мережі великого числа надмініатюрних інтелектуальних датчиків для передачі невеликих обсягів телеметричної інформації на середні відстані (10-100 м.).

Рисунок 2.1 – Бездротові системи передачі інформації по радіоканалу

В експлуатаційному плані основними відмітними особливостями БСМ є вимоги стійкого функціонування в умовах динамічних змін в топології мережі через переміщення сенсорів, автономне електроживлення і суттєві обмеження в енергоспоживанні і обчислювальної продуктивності вбудованих в вузли мережі мікропроцесорів, пам'яті, трансиверів і інших мікроелектронних компонентів. При цьому в той же час умови функціонування БСМ передбачають передачі невеликих обсягів інформації з малою швидкістю. З огляду на запити ринку телекомунікацій в специфічній сфері моніторингу та управління об'єктами за допомогою бездротового зв'язку під егідою IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) в 2003 році була випущена офіційна специфікація IEEE 802.15.4, що отримала статус стандарту. За планами розробників, новий стандарт повинен був забезпечити дальність з'єднання, порівнянну з WiFi, але при цьому мати менше енергоспоживання за рахунок низької швидкості передачі даних. В ряду найважливіших завдань також забезпечення роботи в режимі реального часу з використанням тимчасових слотів, запобігання колізій доступу і комплексна підтримка захисту мереж. Сумісні зі стандартом 802.15.4 пристрої повинні мати можливість управління витратою електроенергії і контролю якості з'єднань. У документі 802.15.4 визначені два нижніх рівні семиуровневой мережевий моделі OSI: фізичний (PHY) і канальний (MAC). Фізичний рівень визначає спосіб передачі даних, інтерфейс організації зв'язку, апаратні особливості і параметри, необхідні для побудови мережі. На практиці фізичний рівень управляє роботою трансивера, виконує вибір каналів, сигналів управління і рівня потужності передачі.

В відповідність зі специфікацією стандарту 802.15.4 на фізичному рівні під обмін даними зарезервовані 27 каналів в трьох частотних діапазонах: 868 МГц, 910 МГц, 2.4 ГГц, що дозволяє використання стандарту в більшості країн світу частотних смугах (рис. 2.2).

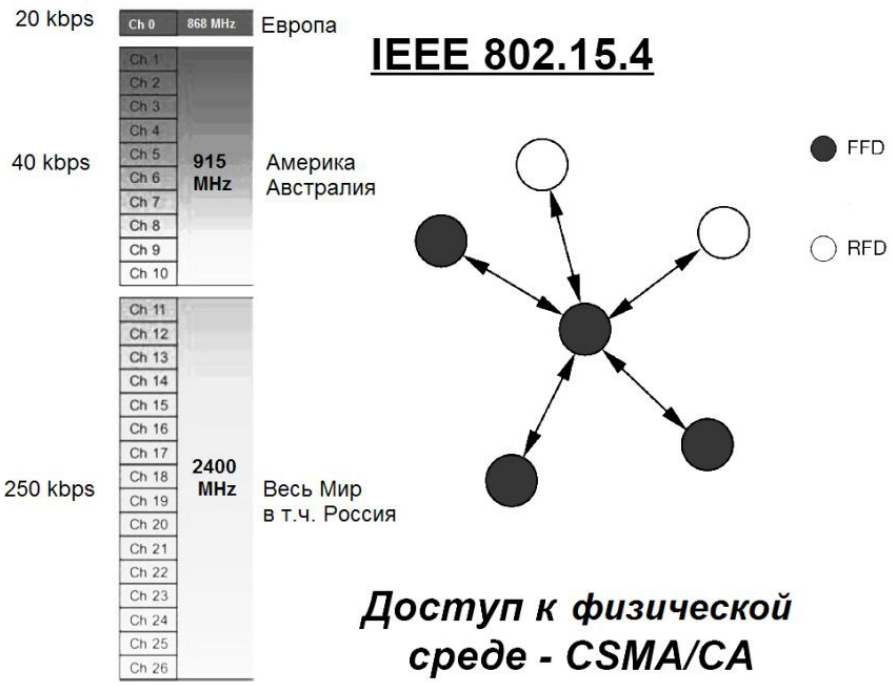


Рисунок 2.2 – Діапазон частот физичного рівня стандарту 802.15.4

Перша версія стандарту 802.15.4 визначала два фізичних рівня з широкосмугового модуляції з прямим розширенням спектра DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum): перший - в смузі 868/915 МГц зі швидкістю передачі відповідно 20 і 40 кбіт / с, а другий - в смузі 2450 МГц зі швидкістю 250 кбіт / с. У 2006 році допустимі швидкості передачі даних на частотах 868/915 МГц були збільшені до 100 і 250 кбіт / с. Крім того, були визначені чотири специфікації фізичного рівня в залежності від методу модуляції: при збереженні широкосмугового модуляції DSSS можливо використанні в діапазоні 868/915 МГц як двійковій, так і квадратурної фазової маніпуляції (QPSK - Quadrature Phase Shift Keying). З 2007 року в версію стандарту IEEE 802.15.4a число фізичних рівнів було збільшено до шести за рахунок включення рівня з надширокосмугових радіотехнології Ultra WideBand (UWB) для високошвидкісної передачі даних, а також специфікації рівня з радіотехнології Chirp Spread Spectrum (CSS), заснованої на розширенні частотного спектра методом лінійної частотної модуляції. Фізичний рівень UWB визначений

виділеними частотами в трьох діапазонах: нижче 1 ГГц, 3-5 ГГц і 6-10 ГГц, а для CSS виділений спектр в смузі 2450 МГц неліцензованому діапазону ISM. У 2009 році в версіях стандартів IEEE 802.15.4c і IEEE 802.15.4d були розширені доступні частотні діапазони. Дані специфікації визначає можливість використання на фізичному рівні приймально-передавальні пристрої з квадратурної фазової маніпуляцією (Quadrature phase-shift keying, QPSK) або з фазової маніпуляцією більш високих порядків (M-PSK) на частоті 780 МГц, а на частоті 950 МГц - гаусову частотну маніпуляцію (Gaussian frequency-shift keying, GFSK) або двійкову фазову маніпуляцію (Binary phase-shift keying, BPSK). Крім цього дослідницька група IEEE 802.15.4d в 2009 році включила в специфікації недавно відкриті діапазони 314-316 МГц, 430-434 МГц, і 779-787 МГц в Китаї, і визначила поправку до існуючого стандарту 802.15.4-2006 в частині підтримки діапазону 950-956 МГц в Японії.

На канальному рівні стандарт специфікація IEEE 802.15.4 визначає механізми взаємодії елементів мережі на фізичному рівні для забезпечення формування фрагментів даних (кадрів), перевірки та виправлення помилок, і відправки кадрів на мережевий рівень. При цьому підрівень MAC (media access control) канального рівня регулює множинний доступ до фізичного середовища з поділом за часом, управляє зв'язками трасіверов і забезпечує безпеку.

IEEE 802.15.4 забезпечує двосторонній напівдуплексний передачу даних, підтримуючи при цьому шифрування AES 128. Доступ до каналу заснований на принципі Carrier Sense Multiple Access With Collision Avoidance (CSMA / CA) - Багатостанційний доступ з контролем несучої і запобіганням конфліктів ". CSMA / CA - це мережевий протокол, в якому використовується принцип прослуховування несучої частоти. Пристрій, яке готове до передачі даних посилає jam signal (сигнал затору) і прослуховує ефір. Якщо буде виявлено "чужий" jam signal, то передавач "засинає" на випадковий проміжок часу, а потім знову пробує почати передачу кадру. Таким чином, передача може виходити тільки від одного пристрою, що підвищує продуктивність мережі.

При цьому дані ередаються відносно невеликими пакетами, що характерно для трафіку сигналів управління і моніторингу в БСС. Важливою особливістю стандарту є обов'язкове підтвердження доставки повідомлень.

Особливістю пристроїв, об'єднаних в мережу по стандарту IEEE 802.15.4, є низьке енергоспоживання за рахунок переходу трансивера в режим "засипання" при відсутності даних для пересилання і збереження підключення в цьому режимі. При розробці стандарту, основний акцент робився на швидкість процесів конфігурації і реконфигурирования. Зокрема, перехід приймача в активний стан триває близько 10-15 мс, а підключення до мережі нових пристроїв - від 30 мс. При цьому тривалість реконфігурації і підключення пристроїв залежить від сталості «прослуховування» маршрутизаторами мережі.

Стандарт визначає два типи вузлів мережі: повнофункціональний пристрій FFD (Fully Function Device), яке може реалізувати як функцію координації роботи і установки параметрів мережі, так і працювати в режимі типового вузла, пристрій з обмеженим набором функцій RFD (Reduced Function Device), що володіє тільки можливістю підтримки зв'язку з повнофункціональними пристроями. У будь-якій мережі повинен бути, принаймні, один FFD, який реалізує функцію координатора. Кожен пристрій має 64-бітний ідентифікатор, але в деяких випадках для обмеженої області може використовуватися короткий 16-бітний для з'єднань в персональної мережі PAN (personal area network).

Топології мережі. На канальному рівні стандарті IEEE 802.15.4 наведені загальні рекомендації до побудови топології мережі. Мережі можуть бути одноранговими P2P (peer-to-peer, point-to-point), або мати топологію «зірка». На основі структури P2P можуть формуватися довільні структури з'єднань, обмежені лише дальністю зв'язку між парами вузлів. З урахуванням цього можливі різні варіанти топологічної структури БСС, зокрема «дерево» кластерів - структура, в якій RFD, будучи «листям дерева», пов'язані тільки з одним FFD, а більшість вузлів в мережі є FFD. Можлива також Mesh-мережі

мережі, сформована на основі кластерних «дерев» з локальним координатором для кожного кластера і має глобальний мережевий координатор.

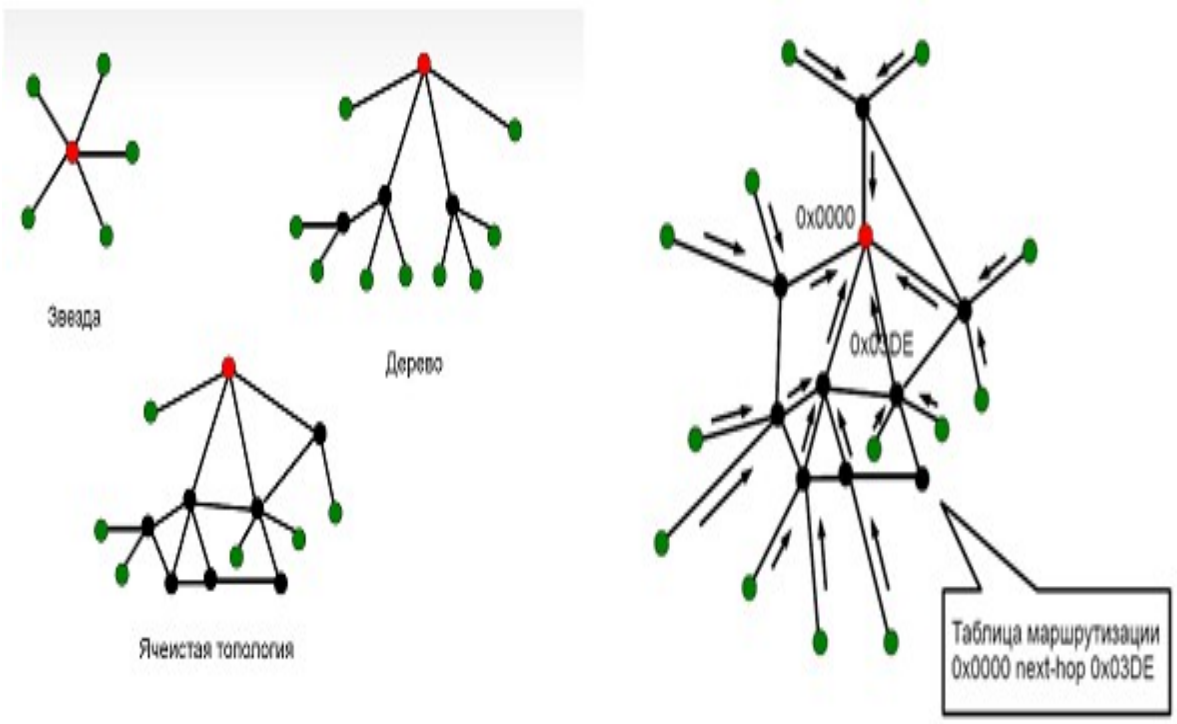


Рисунок 2.3 – Варіанти топології мереж стандарту IEEE 802.15.4

Крім стандартів 802.15.4./ZigBee для створення БСС можуть використовуватися специфікації інших стандартів бездротового зв'язку заснованих на IEEE 802.15.4 - 2005, зокрема WirelessHART і ISA100. Однак в даний час в області технологій бездротових сенсорних мереж ZigBee є стандартом, в найбільшою мірою підкріпленим представленими на ринку повністю сумісними апаратними та програмними засобами.

Крім того протоколи ZigBee дозволяють мережевим пристроям перебувати в сплячому режимі більшу частину часу, що істотно збільшує ресурс роботи вузлів при живленні від батарейних джерел. У БСМ на основі ZigBee підтримується режим "профілів пристроїв" або профілів для різних датчиків, які сумісні на рівні стека протоколу і можуть об'єднуватися в мережу, передавати, приймати і ретранслювати інформацію. У той же час "розуміти" цю інформацію буде тільки той пристрій, для якого вона призначена.

На теперішній час є досить велика кількість різних ZigBee-продуктів, починаючи від мікросхем приймачів стандарту IEEE 802.15.4 і закінчуючи готовими OEM-модулями з вбудованим програмним забезпеченням мережевого стека ZigBee.

Всі пристрої стандарту ZigBee в залежності від рівня складності поділяються на три класи, вищий з яких - координатор - управляє процесом формування мережі, зберігає дані про її топології та служить шлюзом для передачі даних, що збирають від усіх сенсорів БСС для їх подальшої обробки. У мережі, як правило, використовується тільки один PAN-координатор. Середнє за складністю пристрій - маршрутизатор - здатний ретранслювати повідомлення, підтримувати все топології мережі, а також виконувати функції координатора кластеру. І, нарешті, найпростіший пристрій - звичайний вузол - здатний лише передавати дані найближчому маршрутизатору.

Рисунок 2.4 – Типова топологія мережі ZigBee

Стандарт ZigBee підтримує мережу з кластерної архітектурою (рис.2.4), сформованої зі звичайних вузлів, об'єднаних в кластери за допомогою маршрутизаторів. Маршрутизатор кластерів запитують сенсорні дані від пристроїв і, ретранслюючи, їх один одному, передають координатору, який зазвичай має зв'язок з IP-мережею, куди і відправляє інформацію для накопичення і остаточної обробки.

Мережа ZigBee є самоорганізується, тобто все вузли здатні самостійно визначати і коригувати маршрути доставки даних. Дані передаються за допомогою радіопередавачів від одних вузлів до інших по ланцюжку, і в підсумку найближчі до шлюзу вузли скидають всю акумульовану інформацію на шлюз. Ця інформація включає дані, що зчитуються з сенсорних датчиків, а також дані про стан пристроїв і результати процесу передачі інформації. У разі виходу частини пристроїв з ладу, робота сенсорної мережі після реконфігурації повинна продовжитися. Бездротові вузли функціонують під управлінням спеціального додатку. Зазвичай всі вузли сенсорної мережі використовують одну і ту ж керуючу програму, що забезпечує їх функціональність і виконання мережевих протоколів. Стандарт ZigBee є практично єдиним стандартом в області технологій БСС найбільш повно описує набір з семи рівнів класичної схеми взаємодії відкритих систем (OSI) і одночасно - в найбільшою мірою підкріпленим наявністю виробництва повністю сумісних апаратних засобів і програмних продуктів .

Таким чином, стандарт ZigBee є практично єдиним стандартом в області технологій БСС найбільш повно описує набір з семи рівнів класичної схеми взаємодії відкритих систем (OSI) і одночасно - в найбільшою мірою підкріпленим наявністю виробництва повністю сумісних апаратних засобів і програмних продуктів (рис. 2.5).

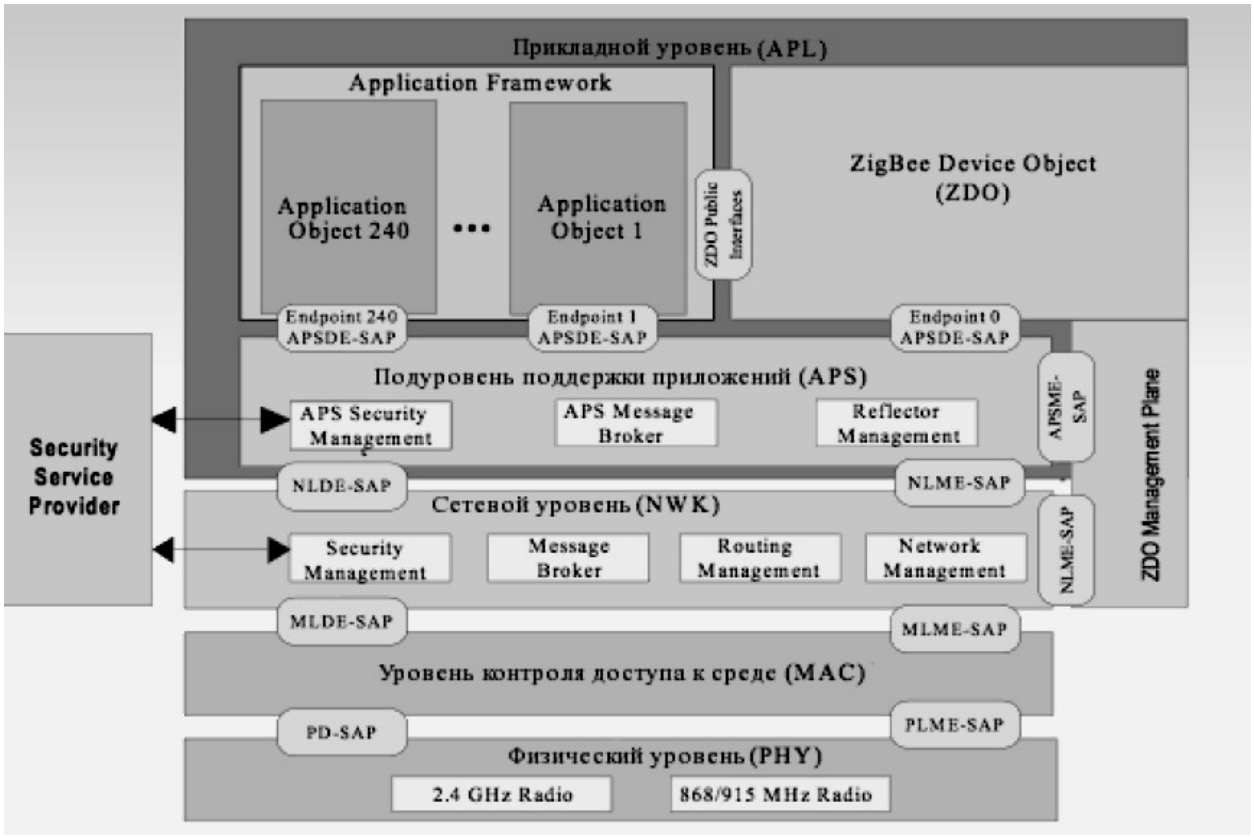


Рисунок 2.5 – Стек протоколів ZigBee

3 ПЕРСПЕКТИВНІ СТАНДАРТИ І ПРОТОКОЛИ БЕЗДРОТОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ

Бездротові мережі все частіше використовуються в різних сферах людської діяльності. Розглянемо основні типи бездротових мереж:

1.Wi-Fi (англ. Wireless Fidelity - «безпровідна точність») вікорістовується для створення стаціонарних комп'ютерних мереж високої пропускної здатності. Дозволяє створювати мережі в місцях, де не можна прокласти кабель. Працює на частоті 2.4 ГГц, на відстанях до 250 м.

2.WiMAX (англ. Worldwide Interoperability for Microwave Access) - стандарт безпровідного зв'язку, що забезпечує широкосмуговий зв'язок на значні відстані зі швидкістю, порівняною з кабельними з'єднаннями. Використовується для надання високошвидкісних сервісів передачі даних (до70Мб / с) і телекомунікаційних послуг, використовує високочастотний діапазону радіохвиль від 1,5 до 11 ГГц, максимальна відстань - 48 км.

3.ZigBee (назва походить від пористої структури, яка схожа на структуру сот бджіл) - назва набору протоколів, що застосовуються в пристроях, де потрібна велика час автономної роботи і велика захищеність при низьких швидкостях передачі даних. Працює на частотах 800, 900 МГц, 2.4 ГГц, відстань -до 1350 м.

4.Bluetooth (назва походить від прізвища середньовічного короля Данії Гаральда I Синезубого) - технологія для забезпечення щодо економного та дешевого радіозв'язку між різними типами електронних пристроїв, таких як мобільні телефони та аксесуари до них, портативні та настільні комп'ютери, принтери. Використовується частота 2,4 ГГц, відстань становить 100 м.

3.1 Особливості мережі ZigBee

Специфікація ZigBee розроблена на базі міжнародного стандарту IEEE 802.15.4 для створення недорогих бездротових мереж передачі невеликих обсягів даних з низьким енергоспоживанням.Сфери застосування таких мереж:

- автоматизація будівель, де технологія ZigBee використовується для зв'язку з датчиками температури, вологості, освітлення, вентиляції і т.д;
- діагностичне медичне обладнання;
- системи охоронної та пожежної безпеки;
- побутова електроніка і периферія персональних комп'ютерів.

Основна особливість технології ZigBee полягає в тому, що вона при відносно невисокому енергоспоживанні підтримує не тільки прості топології бездротового зв'язку, а й складні бездротові мережі з комірчастою топологією з ретрансляцією і маршрутизацією повідомлень ("mesh-мережі»).

При цьому ZigBee-мережі здатні до самонастраіванію при відключенні окремих вузлів (наприклад, якщо розрядився акумулятор). Стандарт IEEE 802.15.4 передбачає використання 16 каналів в діапазоні 2,4 ГГц, 10 каналів в діапазоні 915 МГц (для США) і одного каналу в смузі 868 MHz (для Європи) відповідно до неліцензійного частотних діапазонів, прийнятих в різних країнах. Швидкість передачі даних між пристроями залежить від числа зайнятих каналів і становить від 20 до 250 кбіт / с. Крім 16-бітової адресації, можливе розширення до 64-бітної, що дозволяє розміщувати в одній мережі до 65 тис. пристроїв.

Заявлена дальність зв'язку між двома пристроями - до 75 м, але, з огляду на, що дані в ZigBee-мережах можуть передаватися по ланцюжку при- нарядів, це не є перешкодою для розгортання мережі на великих площах. У мережі можуть працювати пристрої різного функціонального призначення.

Зокрема, координатор мережі здатний управляти роботою мереж різної топології, зберігати дані про їх структуру і в деяких випадках бути мостом до

мереж іншого роду. Ретранслятор мережі просто приймає і передає дані. Є також і приймачі, здатні спілкуватися тільки з координатором.

Всі бездротові стандарти останніх версій можуть автоматично вибирається ти несучу частоту в своєму робочому діапазоні, яка забезпечує найкраще функціонування. Для систем, що працюють в смузі 2,4 ГГц, це особливо важливо, оскільки вони повинні бути стійкі до перешкод, наприклад, від мікрохвильових печей, використовують таку саму частоту. Необхідна також коректна робота мереж IEEE 802.11 і Bluetooth. Крім ZigBee існують і інші типи мереж, засновані на стандарті IEEE 802.15.4. Наприклад, 6loWPAN або RF4CE. Стандарт 6loWPAN був розроблений для здійснення передачі даних по протоколу IPv6 в малопотужних бездротових персо-них мережах стандарту IEEE802.15.4. Основною метою розробки було забезпечення взаємодії бездротових персональних мереж IEEE 802.15.4 з широко поширеними мережами IP, в тому числі і для доступу в Інтернет.

Стандарт RF4CE - новий стандарт управління споживчою електронікою на базі бездротової технології, продукт консорціуму найбільших виробників побутової електроніки (Panasonic, Philips, Samsung, Sony). Він, як і ZigBee, є програмною надбудовою над стандартом 802.15.4. У порівнянні з традиційними інфрачервоними пультами нова технологія забезпечує безпосередньо ряд переваг, основні з яких - відсутність необхідності прямої видимості між пультом і приймачем

3.2 Протоколи обміну даними

Збір даних в одній сенсорній мережі з датчиками виробляється як за допомогою протоколів обмена данними: –I²C ;–USB 2.0 ; –1-провідний ; так і за допомогою аналогово-цифрового перетворювача (АЦП).

Шина I²C – послідовна шина даних для зв'язку інтегральних схем, зроблена фірмою Philips на початку 1980-х років як проста шина внутрішніх зв'язків для

створення керованих електроніків. Використовується для з'єднання низькокоростних периферійних компонентів з материнською платою, вбудованими системами та мобільними телефонами. Назва є абревіатуровим словом Inter-Integrated Circuit. 1 жовтня 2006 р.I²C використовує дві двонаправлені лінії, що підключаються до напруги живлення та управляються через відкритий колектор або відкритий сток - послідовну лінію даних (SDA, англ. Serial DAta) та послідовну тактику лінії (SCL, англ. Serial CLock). Стандартні напруги +5 В або +3,3 В, однак допускаються й інші. Класична адреса включає 7-бітний адресний простір з 16 зарезервірованими адресами. Це означає до 112 вільних адрес для підключення периферій на одній шині.

Основний режим роботи - 100 кбіт / с; 10 кбіт / с у режимі з пониженою швидкістю. Стандарт допускає тактирування для роботи з пристроями.

Після перегляду стандарту 1992 року можливе підключення ще більшої кількості пристроїв на одній шині (за рахунок 10-бітної адреси), а також більша швидкість до 400 кбіт / с. Відповідно, доступне кількість вільних узлів звороту до 1008.

Версія стандарту 2.0, випущена 1998 року, представила висикоскоростний режим роботи зі швидкістю до 3,4 Мбіт / с із зниженим енергопотребленням. Остання версія 2.1 2001 року включила лише незначні доробки.

Переваги шини I²C перед іншими такі:

- один мікроконтролер для управління набором пристроїв;
- лише дві лінії - лінія даних (SDA) та лінія синхронізації (SCL);
- кожен пристрій, підключений до шини, може бути програмно адресований за унікальним адресою. Для кожного моменту часу існує відношення ведучого / ведомого: ведучі можуть працювати, як ведучий-передатчик та ведучий-приймач;
- шина дозволяє мати кілька провідних, надаючи засоби для визначення колізій та арбітражів для запобігання пошкодження даних у ситуаціях, коли два або більше провідних одночасно починають передавати дані.У

стандартному режимі забезпечується передача послідовних 8-бітних даних із швидкістю до 100 кбіт / с та до 400 кбіт / с у режимі “швидко”;

- стандарт передбачає «гаряче» підключення та відключення пристроїв у процесах роботи систем.

Дві лінії, дані (SDA) та синхронізації (SCL) служать для переносу інформації. Каждое пристрій розпізнається за унікальним адресою та може працювати як передатчик або пристрій, залежно від призначення пристроїв. Крім того, пристрої можуть бути класифіковані як провідні та ведомі при передачі даних. Ведущий - це пристрій, який ініціює передачу даних і виражає сигнали синхронізації. При цьому любому адресному пристрої враховується ведомий за відношенням до ведучого.

Шина I²C допускає кілька провідних. Це означає, що більше чем одно пристрій, здатне керувати шиною, може бути підключене до неї. У якості провідних, як правило, виступають мікроконтролери, це означає, що більш ніж один провідний може спробувати почати пересилання в один і той же момент часу. Для усунення хаосу, який може призвести до цього, розроблена процедура арбітражу. Ця процедура заснована на тому, що I²C -пристрої підключаються до шини за правилом монтажного I.

Як SDA, так і SCL є двонаправленими лініями, об'єднаними до позитивному джерелу живлення через підтягуючий резистор (рис. 3.1). Коли шина вільна, обидві лінії знаходяться у високому положенні. Вихідні каскади пристроїв, підключених до шини, повинні мати відкритий стік або відкритий колектор для забезпечення функцій монтажного I.

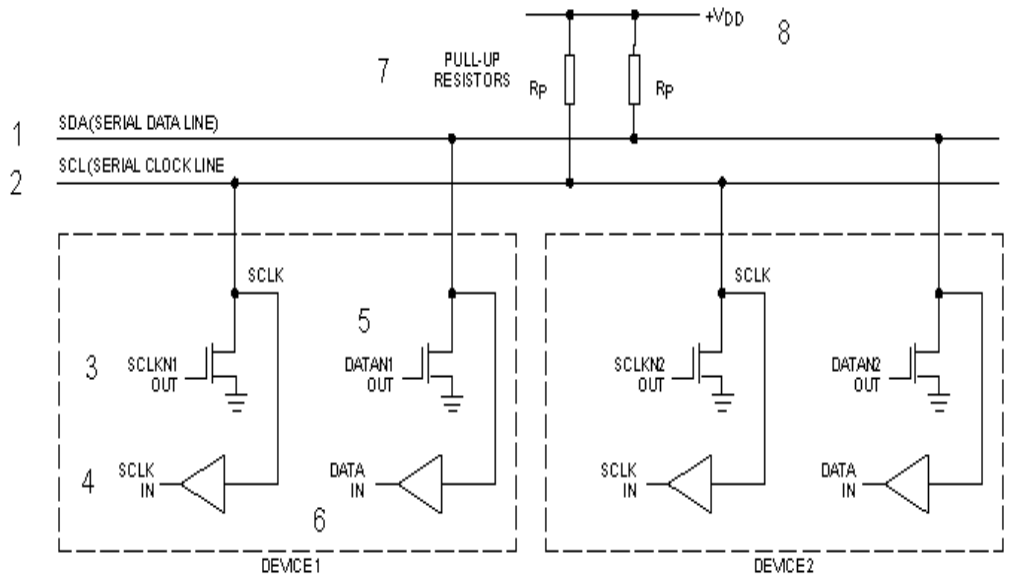


Рисунок 3.1 – Підключення I²C- приладів до шини

Збір даних в одній сенсорній мережі з датчиками виробляється як за допомогою протоколів обмена данними: – I²C ; – USB 2.0 ; –1-провідний ; так і за допомогою аналогово-цифрового перетворювача (АЦП).

Шина I²C – послідовна шина даних для зв'язку інтегральних схем, зроблена фірмою Philips на початку 1980-х років як проста шина внутрішніх зв'язків для створення керованих електроніків. Використовується для з'єднання низькокоростних периферійних компонентів з материнською платою, вбудованими системами та мобільними телефонами. Назва є абревіатуровим словом Inter-Integrated Circuit. 1 жовтня 2006 р.I²C використовує дві двонаправлені лінії, що підключаються до напруги живлення та управляються через відкритий колектор або відкритий сток - послідовну лінію даних (SDA, англ. Serial DAta) та послідовну тактику лінії (SCL, англ. Serial CLock). Стандартні напруги +5 В або +3,3 В, однак допускаються й інші. Класична адреса включає 7-бітний адресний простір з 16 зарезервірованими адресами. Це означає до 112 вільних адрес для підключення периферій на одній шині.

Основний режим роботи - 100 кбіт / с; 10 кбіт / с у режимі з пониженою швидкістю. Стандарт допускає тактирування для роботи з пристроями.

Після перегляду стандарту 1992 року можливе підключення ще більшої кількості пристроїв на одній шині (за рахунок 10-бітної адреси), а також більша швидкість до 400 кбіт / с. Відповідно, доступне кількість вільних узлів звороту до 1008.

Версія стандарту 2.0, випущена 1998 року, представила високоскоростний режим роботи зі швидкістю до 3,4 Мбіт / с із зниженим енергопотребленням. Остання версія 2.1 2001 року включила лише незначні доробки. Переваги шини I²C перед іншими такі:

- один мікроконтролер для управління набором пристроїв;
- лише дві лінії - лінія даних (SDA) та лінія синхронізації (SCL).
- кожен пристрій, підключений до шини, може бути програмно адресований за унікальним адресою. Для кожного моменту часу існує відношення ведучого / ведомого: ведучі можуть працювати, як ведучий-передатчик та ведучий-приймач;
- шина дозволяє мати кілька провідних, надаючи засоби для визначення колізій та арбітражів для запобігання пошкодження даних у ситуаціях, коли два або більше провідних одночасно починають передавати дані. У стандартному режимі забезпечується передача послідовних 8-бітних даних із швидкістю до 100 кбіт / с та до 400 кбіт / с у режимі “швидко”;
- стандарт передбачає «гаряче» підключення та відключення пристроїв у процесах роботи систем;

Дві лінії, дані (SDA) та синхронізації (SCL) служать для переносу інформації. Каждое пристрій розпізнається за унікальним адресою та може працювати як передатчик або пристрій, залежно від призначення пристроїв. Крім того, пристрої можуть бути класифіковані як провідні та ведомі при передачі даних. Ведущий - це пристрій, який ініціює передачу даних і виражає сигнали синхронізації. При цьому любому адресному пристрої враховується ведомий за відношенням до ведучого.

Шина I²C допускає кілька провідних. Це означає, що більше чем одно пристрій, здатне керувати шиною, може бути підключене до неї. У якості провідних, як правило, виступають мікроконтролери, це означає, що більш ніж один провідний може спробувати почати пересилання в один і той же момент часу. Для усунення хаосу, який може призвести до цього, розроблена процедура арбітражу. Ця процедура заснована на тому, що I²C - пристрої підключаються до шини за правилом монтажного І.

Як SDA, так і SCL є двонаправленими лініями, об'єднаними до позитивному джерелу живлення через підтягуючий резистор (рисунок. 3.2). Коли шина вільна, обидві лінії знаходяться у високому положенні. Вихідні каскади пристроїв, підключених до шини, повинні мати відкритий стік або відкритий колектор для забезпечення функцій монтажного І.

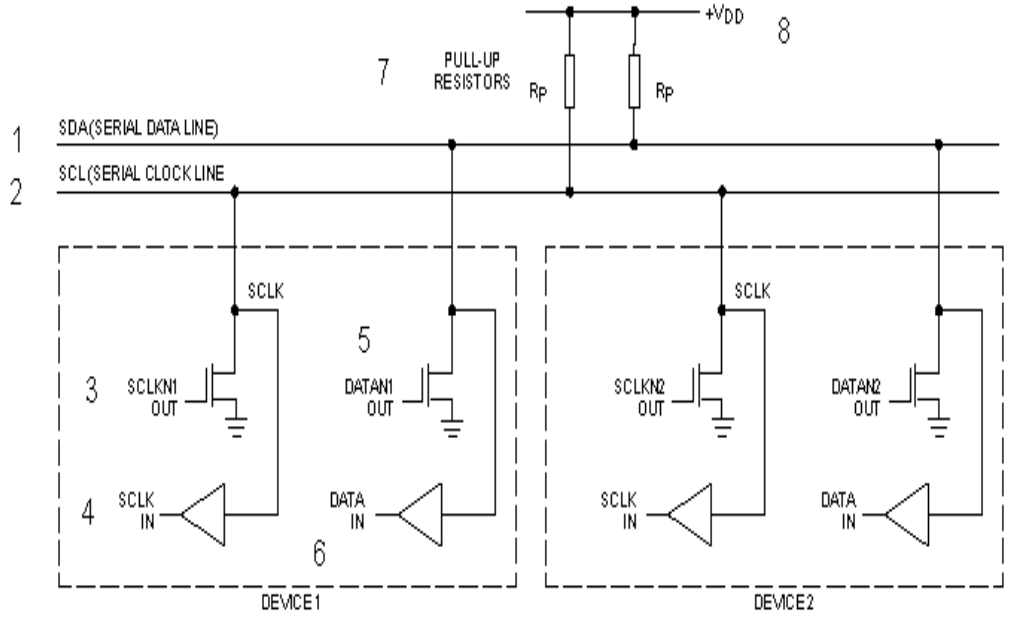


Рисунок 3.2. – Підключення I²C- приладів до шини

3.2.1 Шина 1-Wire для зв'язку з пристроями

1-Wire (один провідник) - зареєстрована торгова марка корпорацій Dallas Semiconductor для системотехніки шин пристроїв зв'язку Dallas Semiconductor. Унікальність мікросхеми Dallas з інтерфейсом 1-Wire передбачає використання для здійснення цифрових зв'язків однієї лінії даних (DATA) та однієї зворотної (або земної) проводки (RET) (рисунок.3.3). Живлення та зв'язок здійснюються через одне з'єднання.

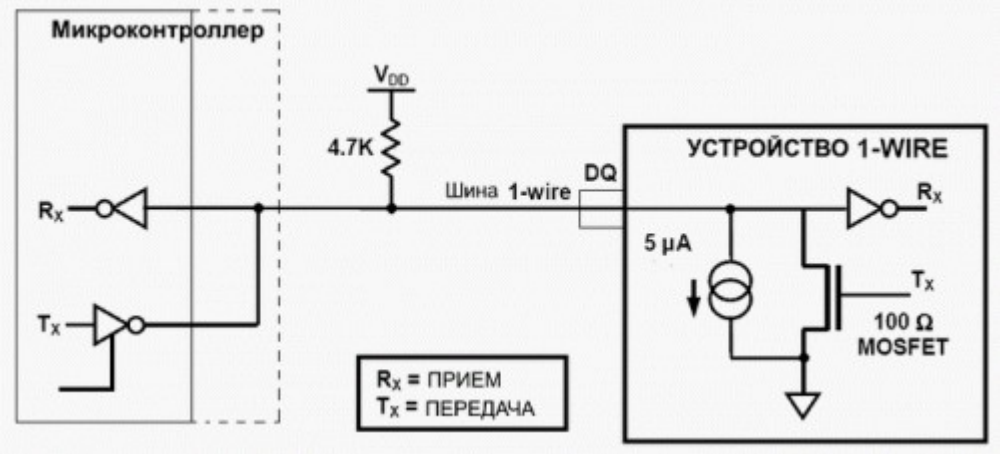


Рисунок 3.3 – Підключення пристроїв.

Режим зв'язку - асинхронний і напівдуплексний, який строго слідує схемам ведучий-підчинений. До однієї та тієї же шини може бути підключено одночасно або кілька підключених пристроїв, і лише один провідний пристрій. У якості провідної однопроцесної шини виступає не комп'ютер, а простіший універсальний мікроконтролер.

Обмін інформацією по 1-Wire відбувається наступним чином.

1. Передача інформації можлива лише видачею низького рівня в лінії, тобто замиканням її на загальний провід. У високому логічному рівні лінія вернеться сама, із-за наявності підтягуючого резистору (тепер понятно, що наявність зовнішнього підтягуючого резистору - обов'язкове умова роботи 1-Wire).

Шина 1-Wire може застосовуватися в різних галузях, наприклад, ідентифікація особистості. Замок і ключ, що використовують технологію 1-

Wire (iButton). Наявність в кожній мікросхемі 1-Wire унікального номера дозволяє використовувати пристрої iButton, наприклад, в системах контролю і управління доступом (СКУД) де вони успішно конкурують з безконтактними картками, що використовують технологію RFID.

Пристрої 1-Wire дуже зручні для вимірювань фізичних величин Не потрібно окремого живлення, можливо підключити по одному дроту цілу гірлянду різноманітних датчиків. Система таких датчиків легко контролюється на предмет аварій. Записи про калібрування можуть зберігатися прямо в датчиках.

3.2.2. Аналого-цифровий перетворювач

Мікроконтролер спілкується із зовнішнім світом за допомогою портів входу - виводу. У загальному випадку він може "сприймати" тільки цифрові сигнали - логічний нуль або логічну одиницю. Наприклад, для мікроконтролера ATmega8 при напрузі живлення 5 В логічний нуль - це напруга від 0 до 1,3 В, а логічна одиниця - від 1,8 до 5 В. Досить часто виникає потреба вимірювати напруги, які можуть приймати будь-яке значення в діапазоні від 0 до напруги живлення. Для цих цілей у складі мікроконтролерів AVR є аналого-цифровий перетворювач (АЦП).

На вхід АЦП подається безперервний аналоговий сигнал, а на виході виходить послідовність цифрових значень. АЦП має багато характеристик, але в якості основних можна назвати роздільну здатність, абсолютну точність, граничну частоту дискретизації і діапазон вхідних напруг.

Роздільна здатність (дозвіл) - це здатність АЦП розрізняти два значення вхідного сигналу. Визначається як величина зворотна максимальному числу кодових комбінацій на виході АЦП. У AVRa АЦП 10-ти розрядний. Максимальне число кодових комбінацій дорівнюватиме $2_{10} = 1024$.

Роздільна здатність дорівнює 1/1024 від усієї шкали допустимих вхідних напруг. Якщо напруга живлення 3.3 В, тоді 3.3 / 1024 = 0,0032 В, або приблизно

3 мВ. З таким кроком (це називається крок квантування) АЦП буде вимірюватися вхідна напруга.

Абсолютна точність - відхилення реального перетворення від ідеального. Виражається в кількості молодших значущих розрядів (LSB - least significant bit) АЦП. Для AVRa абсолютна похибка АЦП = ± 2LSB. Для нашого прикладуу абсолютна точність буде дорівнює 2 * 3 мВ = ± 6 мВ.

Гранична частота дискретизації визначає швидкодію АЦП і вимірюється в герцах або кількості вибірок в секунду (SPS - samples per second). Для мікроконтролерів AVR ця величина дорівнює 15 kSPS (Кілл семплів в секунду). Практично АЦП AVRa працює і швидше, але при цьому його точність погіршується.

Діапазон вхідних напруг - це мінімальне і максимальне значення напруги, яке можна подавати на вхід АЦП. Для мікроконтролера AVR він дорівнює 0 - Vcc (напруга живлення).

4.ПЛАНУВАННЯ УЗЛІВ У СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ: З ВИКОРИСТАННЯМ ДІАГРАМ ВОРОНОГО

4.1 Діаграми Вороного

Діаграма Вороного — це особливий вид розбиття метричного простору, що визначається відстанями до заданої дискретної множини ізольованих точок цього простору. Діаграма Вороного складається з так званих локусів - областей, в яких присутні всі точки, які знаходяться ближче до вибраної точки, ніж до всіх інших. У діаграмі Вороного локуси є опуклими многоугольнікамі. За визначенням локус будується таким чином.

Нехай маємо безліч з **n** точок, для якої ми будуємо діаграму. Візьмемо довільну точку **p**, для якої будуємо локус, і ще одну точку з данної безлічі - **q** (яка не дорівнює **p**). Проведемо відрізок, що з'єднує ці дві точки, і проведемо пряму, яка буде серединним перпендикуляром даного відрізка. Ця пряма ділить

площину на дві півплощини - в одній лежить точка **p**, в інший лежить точка **q**. В даному випадку локусами цих двох точок є отримані півплощині. Тобто для того, щоб побудувати локус точки **p**, потрібно отримати перетин всіх таких напівплощин (тобто на місці **q** побувають всі точки даної множини, крім **p**) (рис.4.1)

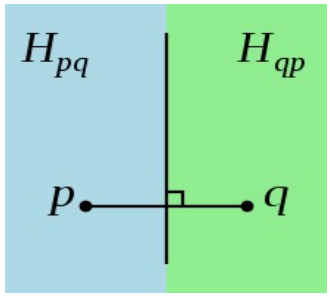


Рисунок 4.1 – Дві напівплощин для локусу точки **p**

Точку, для якої будується локус, називають сайтом (site). На рисунку 4.2 наведено приклад діаграми Вороного для декількох локусів, які позначені різними кольорами.

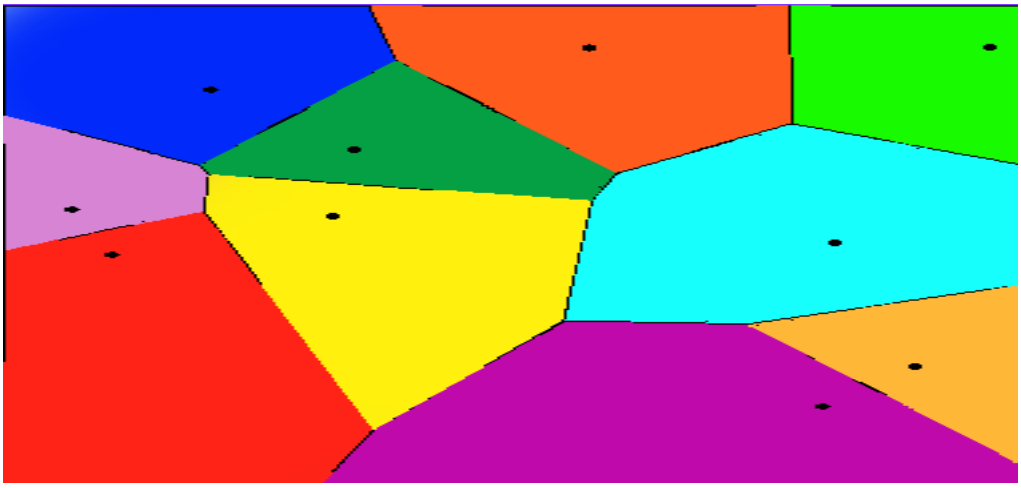


Рисунок 4.2 – Приклад діаграми Вороного

Алгоритми побудови діаграми якраз і є не що інше, як алгоритми побудови цих самих локусів для всіх точок з заданого набору. Локуси в даній задачі також називають багатокутниками Вороного або осередками Вороного.

Існує 4 основні алгоритму побудови діаграми Вороного:

1. Алгоритм побудови діаграми Вороного «в лоб». Складність: (n4);
2. Алгоритм побудови діаграми Вороного шляхом перетину напівплощин. Складність: (n2 * log (n));
3. Алгоритм Форчун побудови діаграми Вороного на площині. Складність: (n * log (n));
4. Рекурсивний алгоритм побудови діаграми Вороного. Складність: (n * log (n)). Для практичного користування в залежності від числа точок **n** вибирається необхідний алгоритм.

4.2. Використання діаграми Вороного для розташування вузлів

Бездротова сенсорна мережа - це особливий вид спеціальної мережі з розподіленими можливостями зондування та обробки, яка може бути використана в широкому діапазоні, таких як моніторинг навколишнього середовища, промислове застосування й т.д.

Незважаючи на свої потенційні можливості сенсорні мережі мають свої особливості, зв'язані з обмеженими ресурсами, такими як низька обчислювальна потужність, зменшена пропускна здатність та обмежене джерело живлення.

У випадку мережі з високою щільністю вузлів датчиків можуть виникнути такі проблеми, як перетин зони зондування, надлишкові дані, перешкоди зв'язку та втрата енергії. Для максимального використання мережевих ресурсів необхідна оптимізація розташування вузлів. З іншого боку, мережа високої щільності може запровадити механізм, що захищає від несправностей, підвищити точність і забезпечити дані з роздільною здатністю. Контроль щільності мережі залежить від управління проектуванням. У цій роботі ми пропонуємо метод управління, які вузли слід відключити чи підключити до мережі. Програма управління мережею може тимчасово вивести з експлуатації вузол датчика. У нашій розробці для такої програми

використана діаграма Вороного, яка розкладає простір на області навколо кожного вузла. Цю схему можна використовувати в багатьох прикладів управління бездротовою сенсорною мережею.

Велика кількість вузлів датчиків дозволяє проводити зондування в більшому географічному регіоні з більшою точністю, ніж раніше можливо. Цей тип мережі має потенціал для незліченних додатків, включаючи моніторинг погоди, безпеку та тактичний нагляд та моніторинг навколишнього середовища.Мережа бездротових сенсорів відрізняється від інших мереж, маючи деякі унікальні характеристики. Найважливішою особливістю є необхідність бути енергоефективною мережею. Вузол датчика має остаточний запас енергії, що подається від акумулятора. Зарядити акумулятор вузла часто неможливо. Таким чином, структура бездротової сенсорної мережі повинна бути максимально ефективною.

У випадку мережі з високою щільністю вузлів датчиків можуть виникнути такі проблеми, як перетин зони зондування, надлишкові дані, перешкоди зв'язку та втрата енергії. Для максимального використання мережевих ресурсів необхідна програма управління. З іншого боку, мережа високої щільності може запровадити відмовостійкий механізм, підвищити точність і надати дані з роздільною здатністю. Контроль щільності мережі залежить від проектування мережі.

У цій роботі ми пропонуємо механізм управління щільністю мережі на основі критерію, який визначає, які вузли слід виключити чи включити. Потім ми представляємо функцію управління для вирішення цієї проблеми, яка може тимчасово вивести з ладу вузол датчика. Наше рішення засноване на діаграмі Вороного, яка розкладає простір на області навколо кожного вузла, щоб визначити, який вузол датчика слід вимкнути чи ввімкнути. Щоб оцінити наш проект, ми проводимо порівняльне моделювання. Ми оцінюємо планування роботи вузлів, що змінюють щільність мережі.Ми показуємо, що наш підхід може заощадити енергію, не втрачаючи зони зондування.

Останнім часом спостерігається великий інтерес до енергоефективних бездротових сенсорних мереж. Більшість із них пов’язано з енергозберігаючими протоколами маршрутизації. В роботі [5] запропоновано LEACH як енергоефективний протокол зв'язку для бездротових сенсорних мереж. LEACH - це алгоритм маршрутизації на основі кластера, в якому голова кластера збирає дані з усіх вузлів датчиків у своєму кластері, компілює зібрані дані, виконуючи алгоритми синтезу даних, і передає дані безпосередньо на базову станцію. Голова кластеру продовжує залишатися керівником кластера протягом періоду, який називається раундом. На початку кожного раунду кожен вузол визначає, чи може це бути головою кластера під час поточного раунду. Якщо це так, вузол повідомляє про своє рішення сусідам.

Для отримання сукупної інформації є сканування залишкової енергії. Аналогічно карті погоди або радіолокаційним знімкам повітряного руху, сенсорна мережа сканує географічний розподіл ресурсів мережі або активність поля сенсора. Замість детальної інформації про залишкову енергію на окремих датчиках, сканування забезпечує абстрактний вигляд розподілу енергетичних ресурсів. Сенсорні сканування мережі можуть бути використані, щоб допомогти керувати поступовим розгортанням датчиків, але вони не мають точності для інформування найкращого місця для додавання вузла датчика в мережу, а також кількості нових вузлів, необхідних для покриття бажаної області моніторингу.

Схема планування вузлів по черзі економить енергію, не впливаючи на надану послугу. Схема планування вузлів включає або виключає деякі вузли, і певна надмірність все ще гарантована. Вузол вирішує його вимкнути, коли виявляється, що сусіди можуть допомогти йому контролювати всю його територію. Рішення не передбачає загального знання мережі та виконується локально на кожному вузлі. Таким чином, це не гарантує оптимального рішення. Запропонована схема збільшує вартість зв'язку, вимагає синхронізації та передбачає обчислення перетину геометричного подання. Вартість

розрахунку областей, визначених на площині **n** колами, є експоненціальною (при **n** колах таких областей може бути **2n**).

4.3 Системна модель для планування вузлів

У цьому розділі описана системна модель, визначено схему планування вузлів, пояснюється концепцію діаграми Вороного.. Деякі приклади проілюструють ідею нашої схеми та те, чому вузли планування важливі для бездротової сенсорної мережі

На рисунку 4.3 показана модель системи, яку ми використовуємо в цій роботі. У нас є бажана область (A), яку ми хочемо контролювати, і набір N бездротових датчиків, які разом визначають область моніторингу покриття. Ця область дає частку бажаної області, яка фактично контролюється. Ми визначимо це як метрику якості обслуговування (QoS) мережі. Дані з мережі надсилаються на базову станцію.

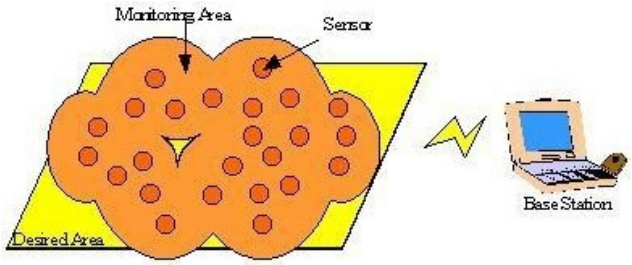


Рис 4.3 Системна модель.

Щільність вузлів датчиків у мережі (ρ) є функцією кількості датчиків (N) у бажаній області (A), як показано у рівнянні 1.

(1)

Мережа бездротових сенсорів може мати від сотні до тисяч вузлів датчиків. Однак ця інформація є неповною, якщо незрозуміла щільність вузлів датчиків у мережі, тобто розподіл вузлів у середовищі моніторингу.

Ми працюємо з плоскою і однорідною бездротовою мережею, розподіленою в 2-D площині поля, але ми могли б легко поширитися на **n** розміри. Кожен вузол нерухомий, хоча топологія мережі може бути динамічною, оскільки вузли можуть стати недоступними постійно або тимчасово.

Кожен вузол знає своє місце розташування на площині. Положення не повинно бути глобальним, воно може бути відносно базової станції або відомої точки. отримання надійного розташування вузла вивчалося в різних контекстах. Використовуючи систему глобального позиціонування (GPS), ми можемо визначити географічне розташування вузла з великою точністю. Іншим рішенням є наявність загальних вузлів, які обчислюють їх відстань до маяків та оцінюють їх розташування. Маяки - це спеціальні вузли, які заздалегідь знають свої координати і можуть періодично передавати сигнал, який підлягає обробці загальними вузлами.

Наш проект використовує як датчик дальності, так і радіодіапазон. Існує три можливості, як показано на рис.4.4, при розгляді діапазону датчика та радіуса дії: діапазон датчика більше, менше або дорівнює радіусу дії.

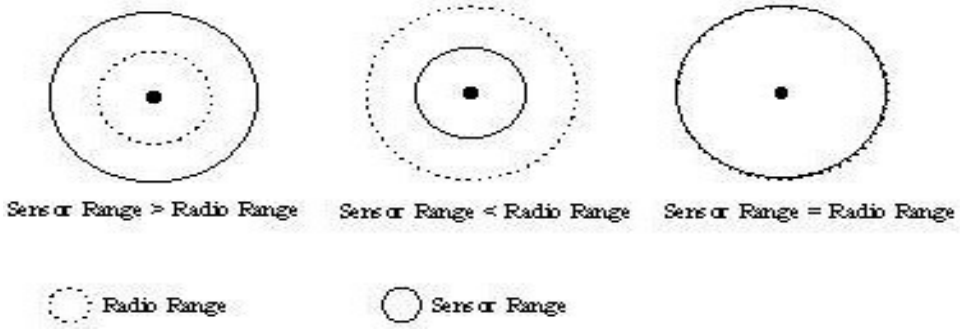


Рис 4.4 Діапазони датчика та радіусу дії.

4.4 Планування розміщення вузлів.

Як зазначалося раніше, деякі проблеми можуть виникнути, якщо мережа має високу щільність вузлів датчиків. Далі ми представляємо схему управління

для вирішення цієї проблеми. Програма планування може тимчасово вивести з експлуатації вузол датчика, запланувавши вмикання та вимикання вузлів.

Припустимо, у нас є мережа з топологією, як показано на рис. 4.5 і всі вузли передають з однаковою частотою. Вузол 1 хоче передати інформацію у вузол 5 та / або вузол 2 хоче передати у вузол 3. Але якщо вузол 4 передає щось іншому вузлу, це призведе до перешкод при обох передачах, як показано на рисунку 4.5. Рішення для управління може тимчасово вимкнути вузол 4 у випадку, якщо програма моніторингу не потребує іншого вузла в тій зоні зондування, яка вже охоплена іншими вузлами.

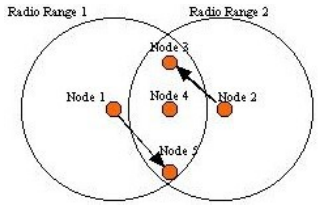


Рисунок 4.5 – Приклад топології мереж.

Рис.4.5 ілюструє приклад топології мережі. Плоска бездротова мережа сенсорів використовує мультистрибковий алгоритм для економії енергії та збільшення діапазону зв'язку вузла. Припустимо, вузол 1 хоче обмінюватися даними з вузлом 3. Якщо інформація повинна проходити через вузол 2, це витратить енергію та пропускну здатність та збільшить затримку. Вузол 1 може передавати безпосередньо на вузол 3. Рішення для управління може тимчасово вимкнути вузол 2. Все одно буде потрібно використовувати мультистрибковий зв’язок, якщо вузол 1 хоче зв’язатися з вузлом 4. Важливим моментом є те, що збільшення кількості стрибків не є необхідним для економії енергії. Враховуючи топологію мережі та відстань D від вузла 1 до вузла 4, оптимальною кількістю стрибків для економії енергії є D (dchar), де відстань dchar називається характерною відстанню і не залежить від D, а залежить від обладнання трансивера. Якщо використовується інше значення, це призводить до енергетичної неефективності.

Ті самі приклади, що демонстрували радіоперешкоди, можуть бути використані для ілюстрації сенсорних перешкод. Велика кількість сенсорних вузлів у сенсорному полі робить неможливим збір надлишкової детальної інформації про стан з кожного окремого вузла датчика, враховуючи енергетичні та комунікаційні обмеження. Обрізання надмірної інформації про зондування є важливим завданням у бездротовій сенсорній мережі, яка економить енергію.

Схема планування вузлів може використовуватися для різних цілей. Тут ми представляємо дві ідеї. Коли активний вузол залишає мережу, через проблеми за енергією, наприклад, управління може активувати деякі вузли, які вимкнені. Енергія економиться, і покриття зони моніторингу не впливає на роботу. Друга мета - з причини безпеки. Вузли, які не зондують, можуть залишатися в режимі прослуховування мережі, перевіряючи, чи передають вузли те, що вони отримали, підвищуючи безпеку мережі. За необхідності вимкнений вузол стане активним вузлом. Щоб визначити, чи буде вузол вимкнено, ми будемо використовувати діаграму Вороного, яка пояснюється далі.

4.5 Діаграма Вороного для розміщення вузлів

Нехай S = {p1, p2,. . . , pi,. . . , pn} - множина точок у двовимірній евклідовій площині. Ці точки називаються сайтами. Діаграма Вороного розкладає простір на області навколо кожної ділянки, так що всі точки в області навколо pi ближче до pi, ніж будь-яка інша точка S.

V (pi) складається з усіх точок, які ближче до pi, ніж будь-який інший сайт. Сукупність усіх сайтів утворює діаграму Вороного V (S). Наступний приклад ілюструє діаграму Вороного. На рисунку 4.6 показана множина вхідних вузлів, для яких будується діаграма Вороного (рисунок 4.7)

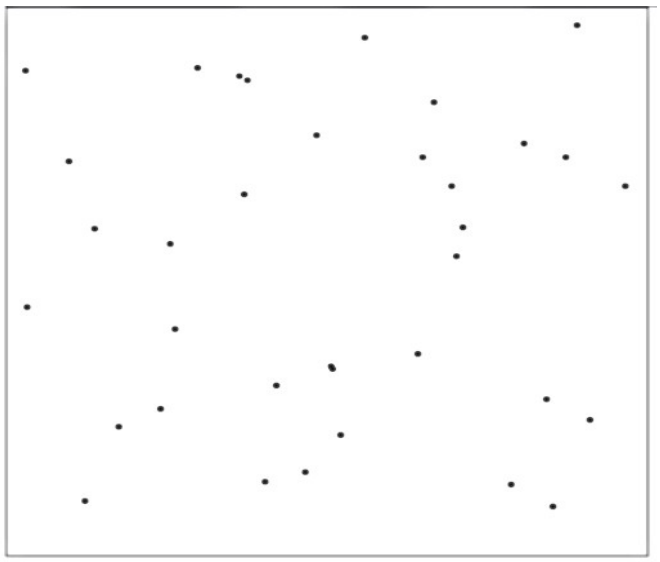


Рисунок 4.6 – Точки входу

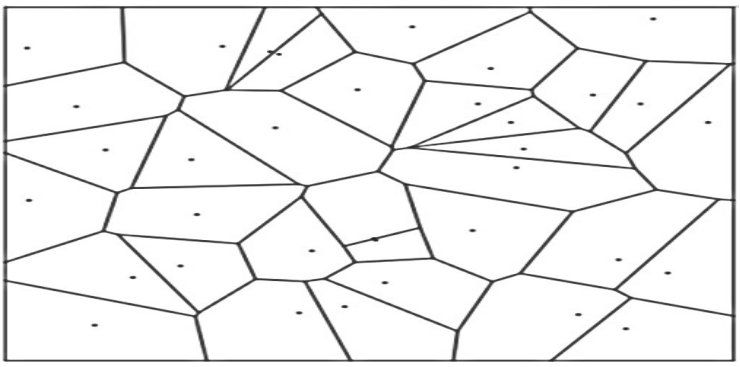


Рисунок 4.7 – Діаграма Вороного

4.5.1 Алгоритм .побудови діаграми Вороного

У цьому розділі проведено алгоритм, який використовується для підрахунку, які вузли ввімкнені чи вимкнені. Враховуючи місцезнаходження з вузлів і області, що підлягає моніторингу, кожен вузол повторно представляє точку, а бажаною областю для моніторингу є полігон, який визначається діаграмою Вороного. Мета полягає у визначенні площі, за яку відповідає кожен вузол. Потім ми підбираємо вузол з найменшою площею, і якщо він занадто малий, вузол слід вимкнути. Сусіди цього вузла стають відповідальними за цю область, оновлюючи діаграму Вороного. Цей процес триває доти, доки не буде відповідати вузол для площі, меншої за заданий поріг. На рисунку 8 показано псевдокод алгоритму.

Алгоритм проілюстровано з використанням топології мережі на рисунку 4.8. Оскільки вузол 4 відповідає за невелику площу (меншу, ніж попередня), алгоритм вирішує, що вузол 4 слід вимкнути. Рисунок 4.9 ілюструє нову топологію діаграми Вороного. На цьому кроці немає вузла, відповідального за меншу площу, ніж молодший, і алгоритм закінчується.

```
Input: set of points.

Output: nodes that should be turned off.

Calculate Voronoi();

do begin

for every node begin

calculate Vonoroi Area();

end

get SmallestArea();

if (smallest area < threshold) then

begin

node responsible ← turn off;

update Voronoi();

keep searching ← true;

end

else keep searching ← false;

end

while (keep searching)
```

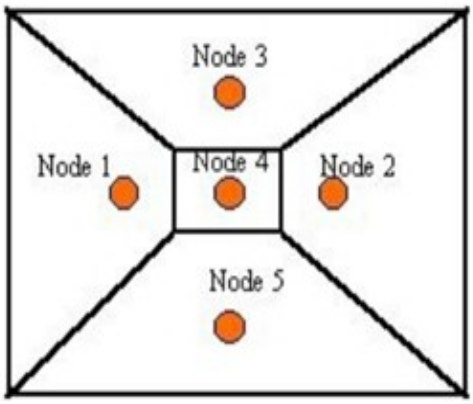


Рисунок. 4.8. – Початкова діаграма Вороного

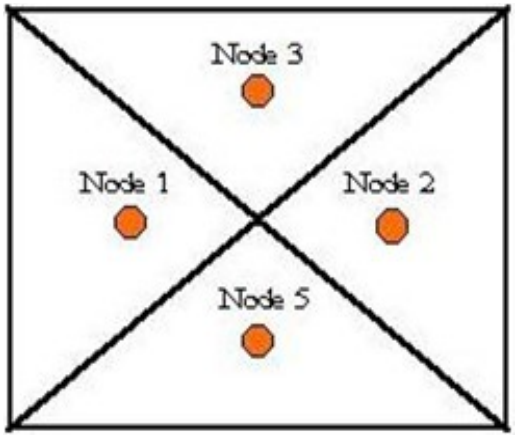


Рисунок. 4.9 – Нова діаграма Вороного

Найбільша складність для обчислення діаграми Вороного - (n log n). Таким чином, алгоритм представляється можливим для виконання на базовій станції. Простий підхід, щоб оновити діаграму Вороного, полягає у її відбудові з найгіршою складністю (n2 log n). Однак може бути використаний додатковий підхід для оновлення діаграми Вороного.

Локальний алгоритм вирішення планування вузлів може використовувати таку ідею, Самовибраний керівник кластера збирає позицію даних з усіх вузлів датчиків у своєму кластері, обчислює діаграму Вороного та розподіленим чином передає своє рішення назад до вузлів. Однак є деякі недоліки: він витрачає енергію на вибір голови кластера та передачу інформації кожному вузлу; рішення, чи слід увімкнути чи вимкнути вузол є дуже важливим і повинно прийматися на рівні управління, оскільки це може вплинути на всю мережу; і це не вирішує проблему в околицях кожної голови кластера.

Якщо мережа є ієрархічною, ми можемо розробити три варіанти. Якщо голова кластера не відповідає, це може бути осторонь алгоритму діаграми Вороного. Другий варіант - розглядати голову кластера як загальний вузол, використовуючи попередню конструкцію. Третій варіант - призначити вагу кожному вузлу. Деякі варіанти - це мультипликативно зважена діаграма Вороного та додатково зважена діаграма Вороного. Нехай dis позначає евклідову відстань, а wi - вага кожної точки pi. Мультипликативно зважена діаграма Вороного формується за допомогою функції відстані в рівнянні 2.

Ребро, як правило, є круговою дугою. Додатково зважена діаграма Вороного формується за допомогою функції відстані у рівнянні 3. Ребро, як правило, є гіперболічною дугою.

(2)

(3)

Якщо сенсорна мережа має мобільні вузли, можна застосувати діаграму Вороного рухомих точок.

Ключовим критерієм продуктивності в більшості бездротових сенсорних мереж є енергія. Енергозбереження ми розглядаємо як кількість позавузлів, які дає наша конструкція. Оскільки існує багато типів вузлів з різними типами енергетичного рівня, наша метрика енергозбереження - це кількість невузлів, яка не залежить від типів вузлів датчиків. Інший використаний показник - це відсоток бажаної зони зондування, яка не покрита мережею. Ідея полягає в тому, щоб перевірити, чи не втрачається зона зондування при вимкненні вузла.

Вимкнений вузол також можна описати як резервний вузол. Він включається, коли робочий вузол не працює належним чином, наприклад, коли йому недостатньо енергії або він більше не реагує.

Наші експерименти проводились на квадратній зоні зондування. Для всіх експериментів розмір мережі становить 100 вузлів. Щоб змінювати щільність, ми міняємо площу. Положення кожного вузла генерується випадковим чином. Ми встановили порогову площу як відсоток від зони зондування кожного сенсора:

Кількість вузлів резервного копіювання при зміні щільності для різних порогових областей. Як і слід було очікувати, коли щільність зростає, кількість резервних вузлів також збільшується. Це також трапляється, коли ми порівнюємо поріг зони Вороного та кількість резервних вузлів. ілюструється

У таблиці 1 наведено область, що не охоплюється збільшенням кількості резервних вузлів. Оскільки поріг був низьким, в експериментах не було втрачено зони зондування.

Таблиця 1. – Площа, не охоплена датчиками × відсоток резервних вузлів у мережі, для різних значень порогової площі

Коефіцієнт = 0.0025		**Коефіцієнт = 0.05**		**Коефіцієнт = 0.01**		**Коефіцієнт = 0.02**	
Вузли резервного копіювання %	**Не покрита площа %**	**Вузли резервного копіювання %**	**Не покрита площа %**	**Вузли резервного копіювання %**	**Не покрита площа %**	**Вузли резервного копіювання %**	**Не покрита площа %**
0	0	1	0	0	0	8	0
0	0	0	0	6	0	24	0
0	0	8	0	25	0	55	0
4	0	20	0	52	0	74	0
26	0	47	0	74	0	98	0

Перевірка того, чи фактично вузли датчиків здійснюють моніторинг забороненої зони, є важливою для БСМ показником якості обслуговування.

5 АППАРАТНО–ПРОГРАМНА РЕАЛИЗАЦІЯ КОМПОНЕНТІВ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ

Найбільш важливими елементами у сенсорній мережі є ті, які збирають дані за допомогою різних датчиків та передають їх на комп'ютер. Але не менш важливу роль має координатор – він керує робочою мережею, зберігає дані про її топологію та служить шлюзом для передачі даних й подальшої обробки комп'ютером.

В роботі основні модулі побудовані на основі безпровідного прийомо-передавача XB24-ACI-001 (рис.5.1). Це малогабаритний модуль стандарту ZigBee IEEE 802.15.4, призначений для побудови промислових систем передачі даних. Управління модулем здійснюється через інтерфейс UART за допомогою AT-команди. У таблиці 5.1 представлені основні характеристики даного модуля.

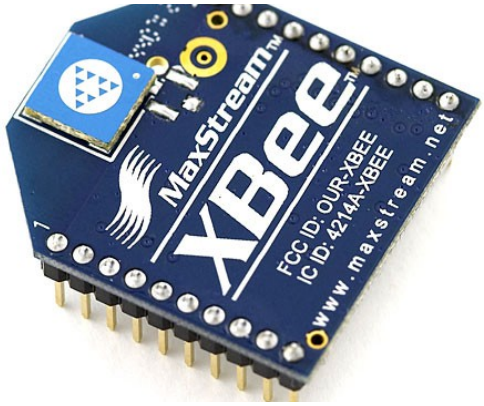


Рисунок 5.1 − ZigBee модуль XB24-ACI-001

Таблиця 5.1 − Основні характеристики XB24-ACI-001

Параметри	XBee
Радіус дії в приміщенні, м	30
Радіус дії у вільному просторі, м	100
Максимальна вихідна потужність, мВт	1
Швидкість перелачі даних по радіоканалу, біт/с	250000
Швидкість передачі даних за інтерфейсом, біт/с	1200...115200
Чутливість, дБм	-92
Напруга живлення, В	2,8...3,4
Ток споживання в режимі передачі, мА	45
Ток споживання в режимі прийому, мА	50
Ток споживання в режимі енергозбережения, мкА	10
Робоча частота, ГГц	2,4
Число каналів	16
Число адресів в мережі	65000
Розміри, мм	24,4x27,6
Робочий діапазон температур, °С	-40...85

Даний модуль підтримує 3 топології мережі: Point-to-Point, Point-to-Multipoint, Peer-to-Peer. Це дозволяє реалізувати практично будь-яку складність мережі. Додатково модуль має:

- 6 10-бітних АЦП;
- 8 цифрових каналів вводу / виводу;
- Інтерфейс UART;
- API функції для програмування;
- 3 індикатора стану.

Існує також модуль XBee-PRO, який відрізняється від XBee підвищеною потужністю виходу і, відповідно, збільшеним радіусом дії. Модулі випускаються в трьох варіантах - з провідною антенною, з вбудованою чіп-антенною і з роз'ємом для підключення зовнішньої антени.

5.1 Координатор

Координатор для ZigBee прийому-передавача XB24-ACI-001 має 3 світлодіода, що відображають його стан.

1. Потужність - світлодіод, який показує, підключений модуль або ні;

2. Партнер - показує встановлений зв'язок пристрою з координатором;

3. RSSI - відображає потужність прийнятого сигналу, використовуючи ШИМ.

XB24 з'єднується через інтерфейс UART з двонаправленим перетвореним інтерфейсом FT232, що дає можливість підключити модуль ZigBee за допомогою інтерфейсу USB 2.0 для персонального комп'ютера для обміну данними. FT232 у своїй черзі також має два світлодіодні індикатори:

- RxLed - індикація прийнятих даних;
- TxLed - індикація передаваних даних.

Перетворювач інтерфейсів FT232 пов'язаний з енергонезалежною пам'яттю EEPROM, яка використовується для зберігання інформації про вузол й він називається «Координатор ZigBee». Цей вузол не виконує жодних функцій при обробці даних, тому в ньому відсутні будь-які мікропроцесорні пристрої, введені ними не належні. Схема електричної принципової координатора зображена на рисунке 5.2. Живлення координатора виконується лише від порта USB, так як координатор має потребу в току порядку десятки міліампер і не передбачає дані про напругу живлення більше 5 В.

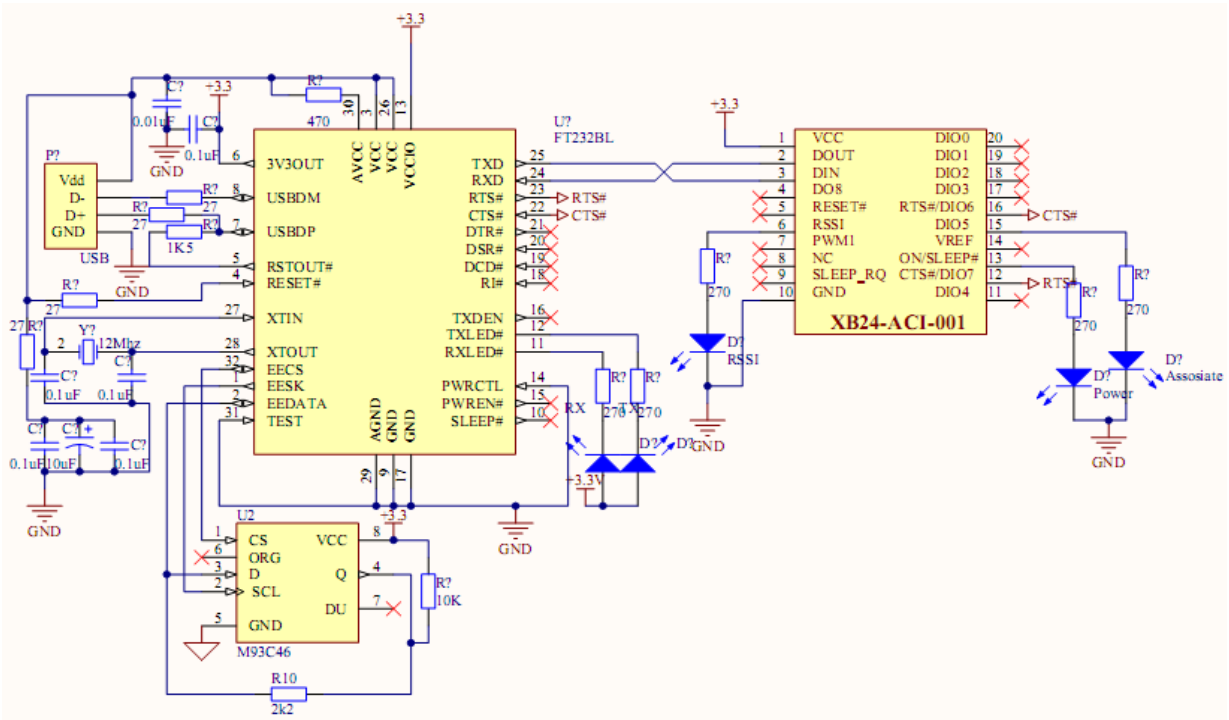


Рисунок 5.2 – Схема координатора електрична принципова

5.2 Вузол сенсорної мережі

Основним завданням вузла (рис. 5.3) є збір даних від різноманітних датчиків, тому він, на відміну від координатора, виконаний на мікроконтролері сімейства AVR Atmega8, на який покладено функції збору, обробки, прийому і пересилання даних. Був обраний саме МК Atmega8 в силу його малої вартості, простоти і достатньою конфігурації для реалізації всіх функцій вузла. Структурна схема вузла зображено на рисунку 5.4. Для збору радіаційно-екологічних параметрів навколишнього середовища були обрано такі:

- температура (ДТ);
- тиск (ДД);
- відносна вологість повітря (ДВ);
- освітленість (ДО);
- напрям і сила вітру (ДНСВ);
- радіаційний фон (ДРФ).

У вузлі також є ZigBee приймально-передавач XB24-ACI-001, з 3 індикаторами (Associate, RSSI, Power). Мікроконтролер Atmega8 з'єднаний через інтерфейс UART з XB24, за допомогою якого і здійснюється обмін інформацією. Живлення модуля проводиться від батарейки «Крона» з напругою 9 В або 12 В. Не дивлячись на те, що живлення елементів вузла проводиться напругою 3.3В, така висока напруга на вході потрібна для датчика радіаційного фону СБМ-20.

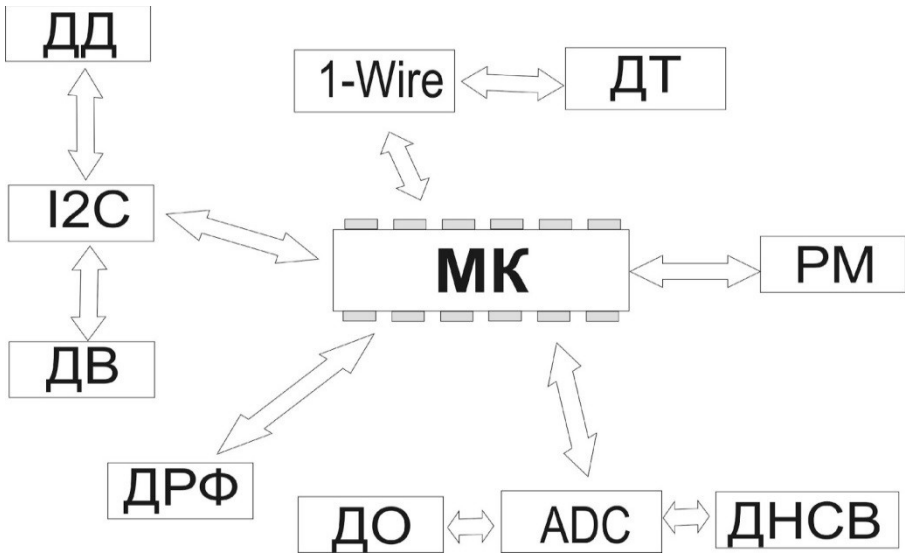


Рисунок 5.3 – Структурна схема вузла мережі

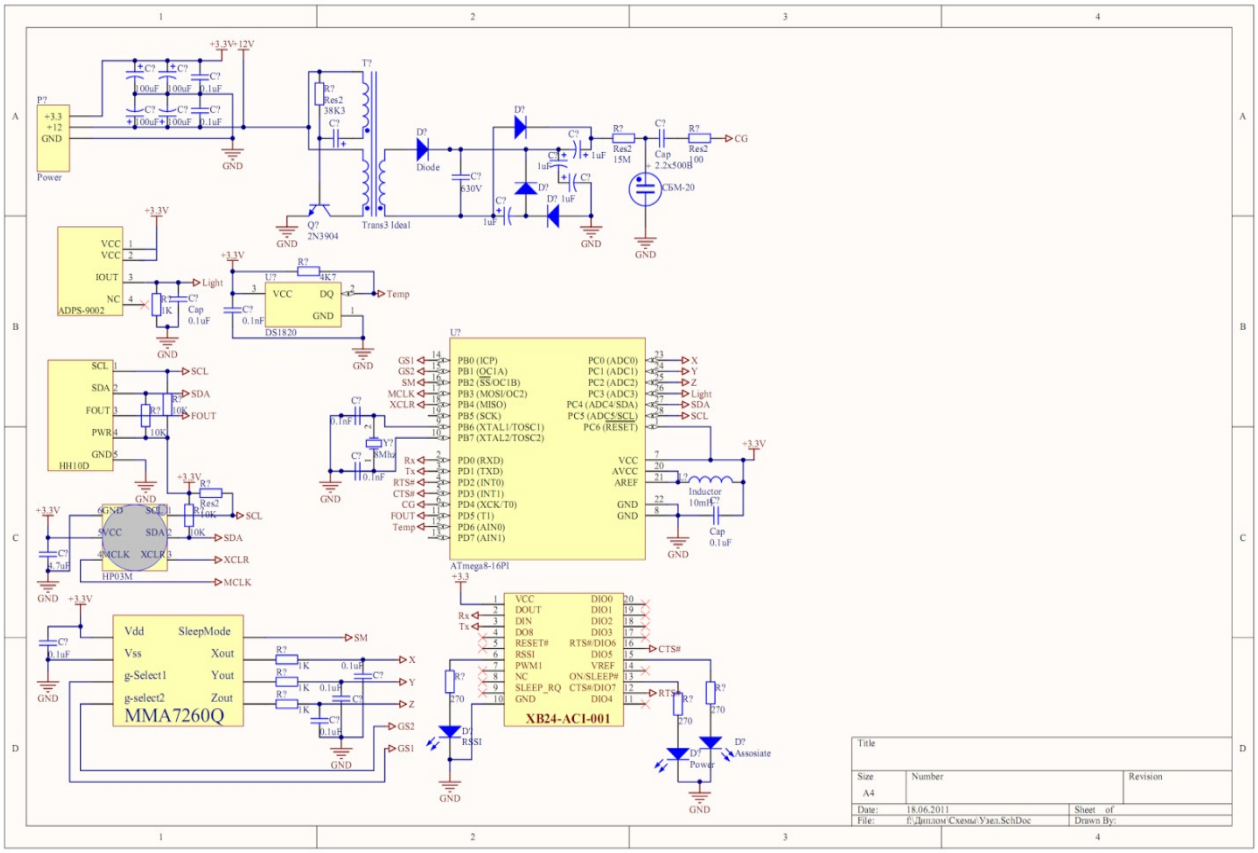


Рисунок 5.4 – Схема вузла електрична принципова

5.2.1 Вимірювання температури навколишнього середовища

В якості датчика температури був обраний датчик фірми Dallas Semiconductors DS18B20. DS18B20 цифровий термометр з програмованим упрпавлінням, від 9 до 12-bit, яке може зберігатися в EEPROM пам'яті приладу. DS18B20 обмінюється даними по 1-Wire шині і при цьому може бути як єдиним пристроєм на лінії так і працювати в групі. Діапазон вимірювань від -55 ° C до + 125 ° C і точністю 0.5 ° C в діапазоні від -10 ° C до + 85 ° C. На додаток, DS18B20 може харчуватися напругою лінії даних ("parasite power"), при відсутності зовнішнього джерела напруги.

Кожен DS18B20 має унікальний 64-бітний послідовний код, який дозволяє, спілкуватися з безліччю датчиків DS18B20 встановлених на одній шині. Такий принцип дозволяє використовувати один мікропроцесор, щоб контролювати безліч датчиків DS18B20, розподілених за великим ділянці.

Переваги датчика:

- вимагає всього однієї лінії для обміну даними;
- не вимагає зовнішніх компонентів;
- перетворює значення температури в 12-ти бітний цифровий вигляд за 750 мс (максимум);
- може працювати як термостат.
- Підключення датчика до шини може бути виконано двома способами (рис.5.5): –з використанням 3 провідників;
- з використанням 2 провідників (так зване «паразитне харчування»).

Лінія даних повинна бути обов'язково підтягнута резистором 4.7k до лінії живлення.

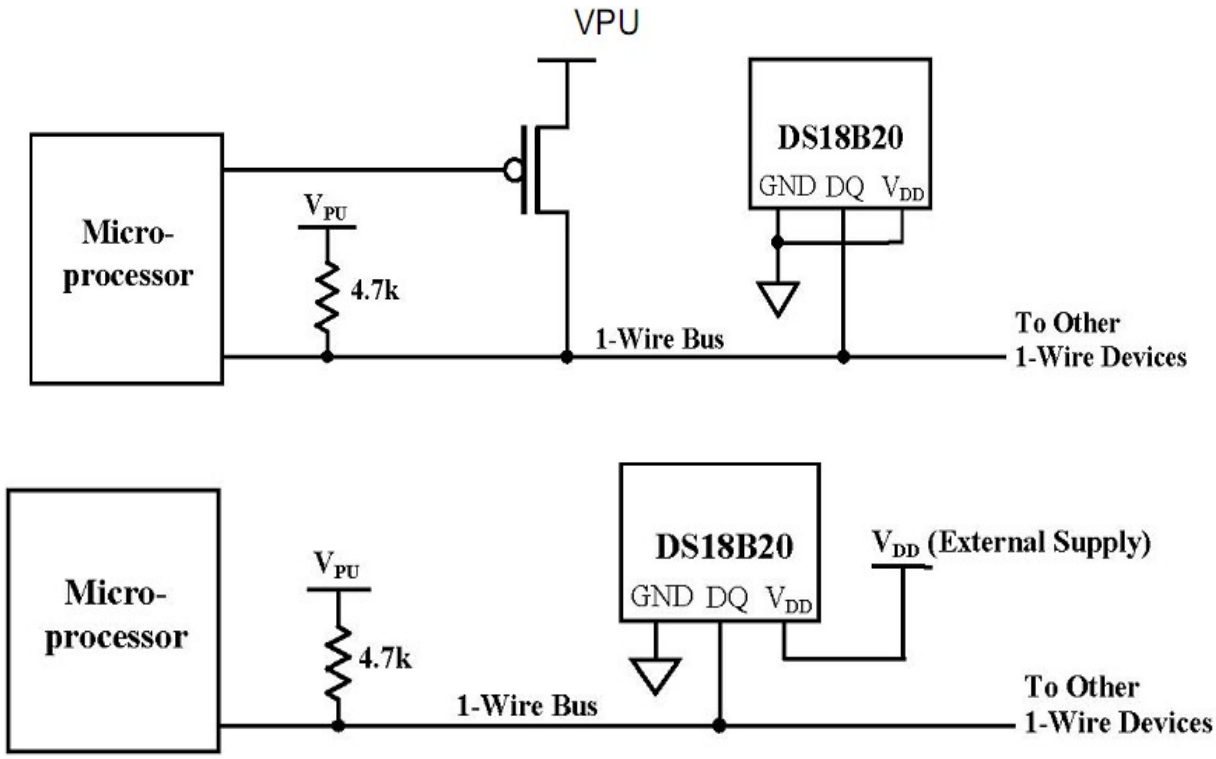


Рисунок 5.5 − Підключення датчика до шини.

5.2.2 Вимірювання тиску навколишнього середовища

Для вимірювання тиску використано датчик виробника HOPE MICROELECTRONICS HP03M. Даний датчик складається з двох модулів: модуля вимірювання температури і тиску. Модуль тиску датчика HP03M складається з пьезо-резистивного сенсора тиску та інтерфейсу ADC. ADC дає можливість отримувати тиск і температуру з 12 бітної точністю. За допомогою високоточної калібрування, в пам'яті чіпа зберігаються 11 калібрувальних коефіцієнтів, тим самим дозволяючи читати точніші значення тиску і температури. Даний датчик взаємодіє з МК Atmega8 по шині I2C.

Переваги датчика:

- перетворювач 16 біт;
- напруга живлення 2.2-3.6 В;
- 2 провідника - харчування (VCC, GND);

- 2 провідника - шина I2C (SDA - повинен бути обов'язково підтягнутий резистором 4.7k до лінії живлення, SCL);
- 1 провідник - синхронизирующий сигнал 32.768 kHz з МК (MCLK);
- 1 провідник - скидання АЦП (XCLR) енергоспоживання;
- діапазон робочих температур -40 − + 85ºС;
- не вимагає зовнішніх компонентів.
- при підключенні датчика (рисунок 5.6) використовується 6 провідників:

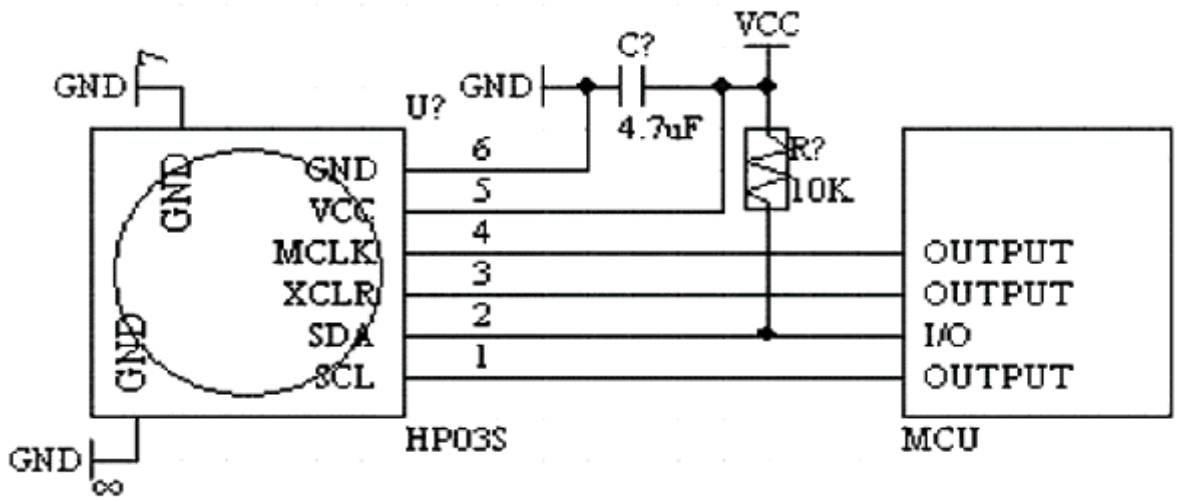


Рисунок 5.6 − Підключеннння барометра

5.2.3 Вимірювання відносної вологості повітря навколишнього середовища

Використано датчик вологості HH10D фірми Hope RF, який складається з ємнісного сенсора вологості, CMOS перетворювача частоти і пам'яті EEPROM для зберігання калібрувальних коефіцієнтів, які використовуються для розрахунку вологості. Завдяки датчику вологості ємнісного типу, система може дуже швидко реагувати на зміну вологості.

Переваги датчика:

- дві точки для калібрування датчика;
- частотний вихід датчика легко інтегрується в призначене для користувача пристрій;

- дуже низьке енергоспоживання;
- не вимагає зовнішніх компонентів.
- датчик взаємодіє з МК по шині I2C (рис.5.7) використовує для підключення 5 провідників:
- SDA, SLC - шина I2C (SDA - повинен бути обов'язково підтягнутий резистором 4.7k до лінії живлення);
- VSS, VDD - лінії живлення;
- FOUT - задає частота, по якій вважаю вологість.

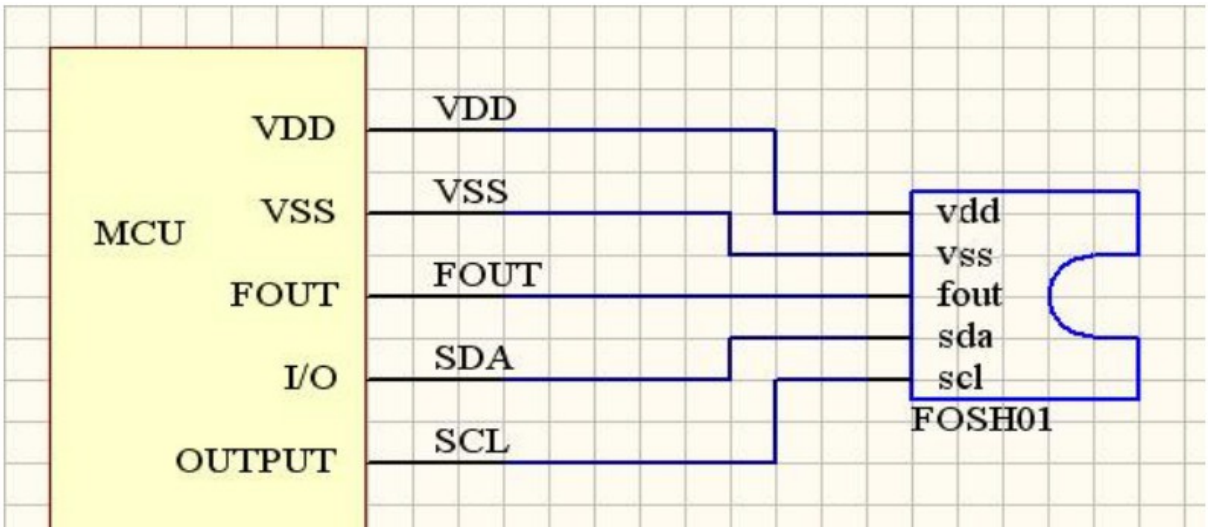


Рисунок 5.7 − Схема піключения датчика відносної вологості

5.2.4 Вимірювання освітленості

Для вимірювання освітленості використаний датчик APDS-9002 фірми Agilen Technologies, який складається з спектрального фототранзистор, тим самим забезпечуючи відмінну чутливість, близьку до реакції людського ока.

Переваги датчика:

- Висока чутливість;
- Мініатюрний корпус;
- Аналоговий вихід;
- Стабільна робота від -40 до + 85ºС;

- Напруга живлення від 2.5-5.5 В.
- Датчик використовує для підключення (рiс.5.8) всього 2 лінії:
- Аналоговий вихід.

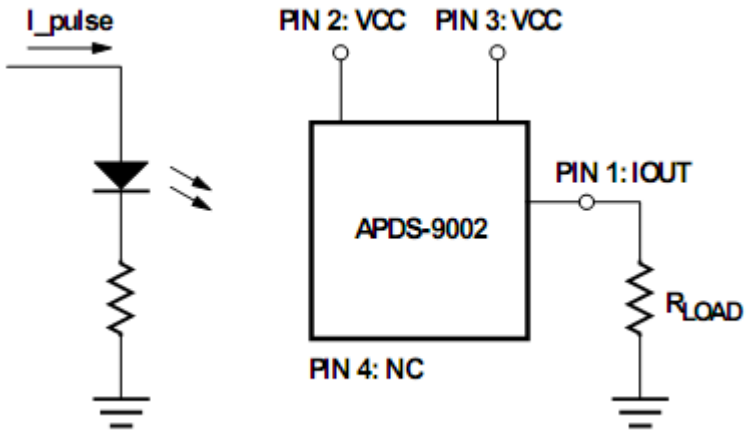


Рисунок 5.8 – Схема підключення датчика освітленості.

5.2.5 Вимірювання радіаційного фону навколишнього середовища

Лічильник Мюллера-Гейгера - газорозрядний прилад для виявлення і дослідження різного роду радіоактивних і іонізуючих випромінювань: α- і β-частинок, γ-квантів, світлових і рентгенівських квантів, часток високої енергії в космічних променях і на прискорювачах. Гамма-кванти реєструються лічильником Гейгера – Мюллера таким чином: вторинним іонізуючим частіцам- фотоелектронна, комптонівським електронам, електрон-позитрон парам; нейтрони реєструються по ядрах віддачі і продуктам ядерних реакцій, що виникають в газі лічильника. Працює лічильник при напружених, відповідних самостійного коронного розряду (ділянка V, рис.5.9).

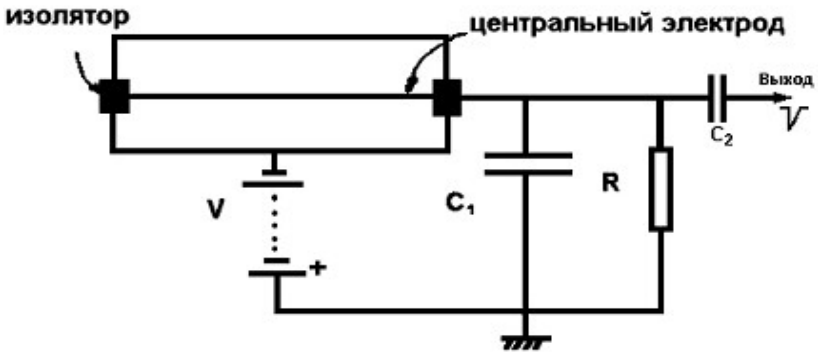


Рисунок 5.9 – Схема підключення лічильника Гейгера

Цей лічильник має практично стовідсотковою ймовірністю реєстрації зарядженої частинки, так як для виникнення розряду досить однієї електрон-іонної пари. Основними характеристиками лічильника є: рахункова характеристика - залежність швидкості рахунку від величини робочої напруги; ефективність лічильника - виражене у відсотках відношення числа рахованих частинок до числа всіх частинок, що потрапляють в робочий об'єм лічильника; дозволяє час - мінімальний інтервал часу між імпульсами, при якому вони реєструються окремо і термін служби лічильників.

Лічильники Гейгера-Мюллера застосовуються для реєстрації всіх видів випромінювання. Вони можуть бути використані як для абсолютних, так і для відносних вимірювань радіоактивних випромінювань.

У роботі використовувався датчик Мюллера-Гейгера СБМ-20, який має характеристики, які відображені в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 − Характеристики СБМ-20

Робоча напруга, В	400
Плато - область малої залежності швидкості рахунку від напруги живлення, В	100
Власний фон лічильника, імп / с, не більше	1
Радіаційна чутливість лічильника, імп / мкР (* - по кобальту-60)	78
Амплітуда вихідного імпульсу, В, не менше	50
Габарити, мм - діаметр х довжина	11х10

5.2.6 Напрямок та швидкість вітру

В роботі був розроблений датчик напрямку і швидкості вітру на основі 3-х осьового акселерометра MMA7260. Дані з акселерометра надходять в МК (рис.5.10), вони обробляються і вираховуються такі параметри вітру, як напрям і швидкість.Додаткові лінії даних дають можливість вибрати потрібну чутливість датчика.

Переваги акселерометра:

- змінна чутливість (1.5g, 2g, 4g, 6g);
- маленький струм (500uA);
- струм споживання в сплячому режимі 3uA;
- напруга живлення 2.2-3.6;
- швидкий запуск;
- низька вартість.

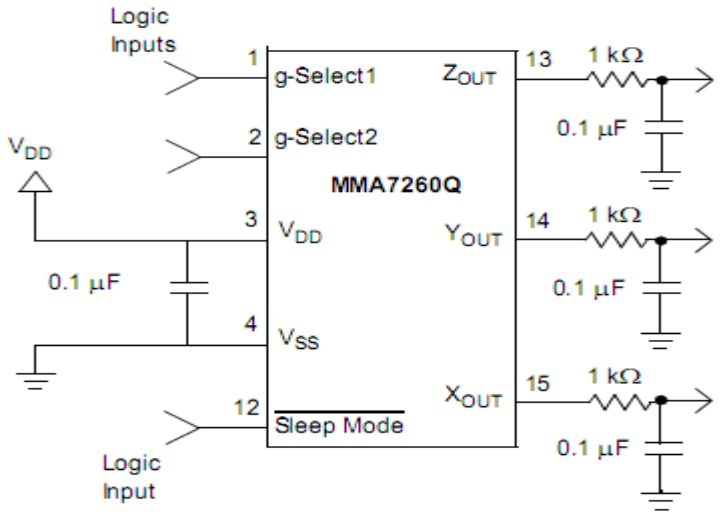


Рисунок 5.10 – Підключення акселерометра

5.3 Програмне забезпечення для візуалізації даних в сенсорній мережі

Для візуалізації даних, зібраних в сенсорній мережі була розроблена програма візуалізації SVMD ZigBee 2.0 в C ++ Builder 6, інтерфейс якої представлений на рисунку 5.11

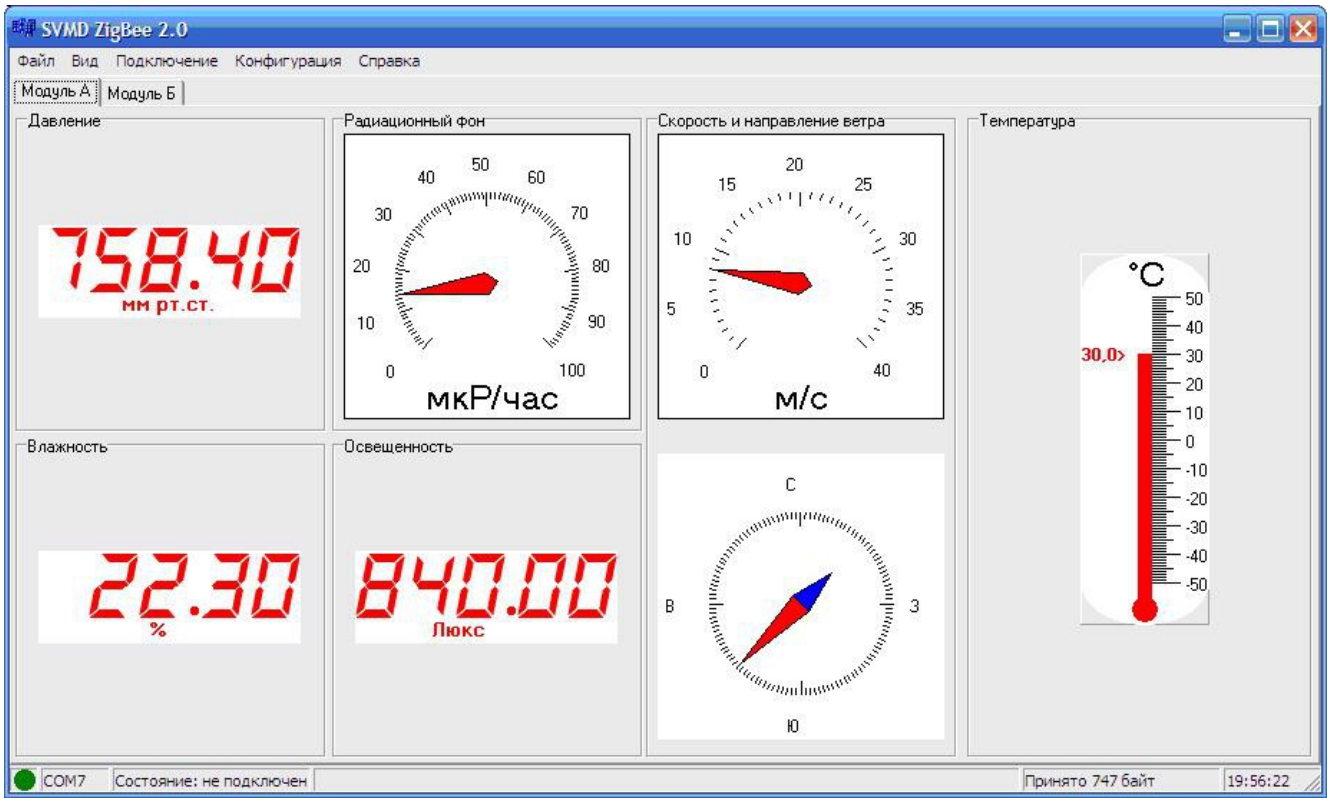


Рисунок 5.11 – Інтерфейс користувача для візуалізації даних

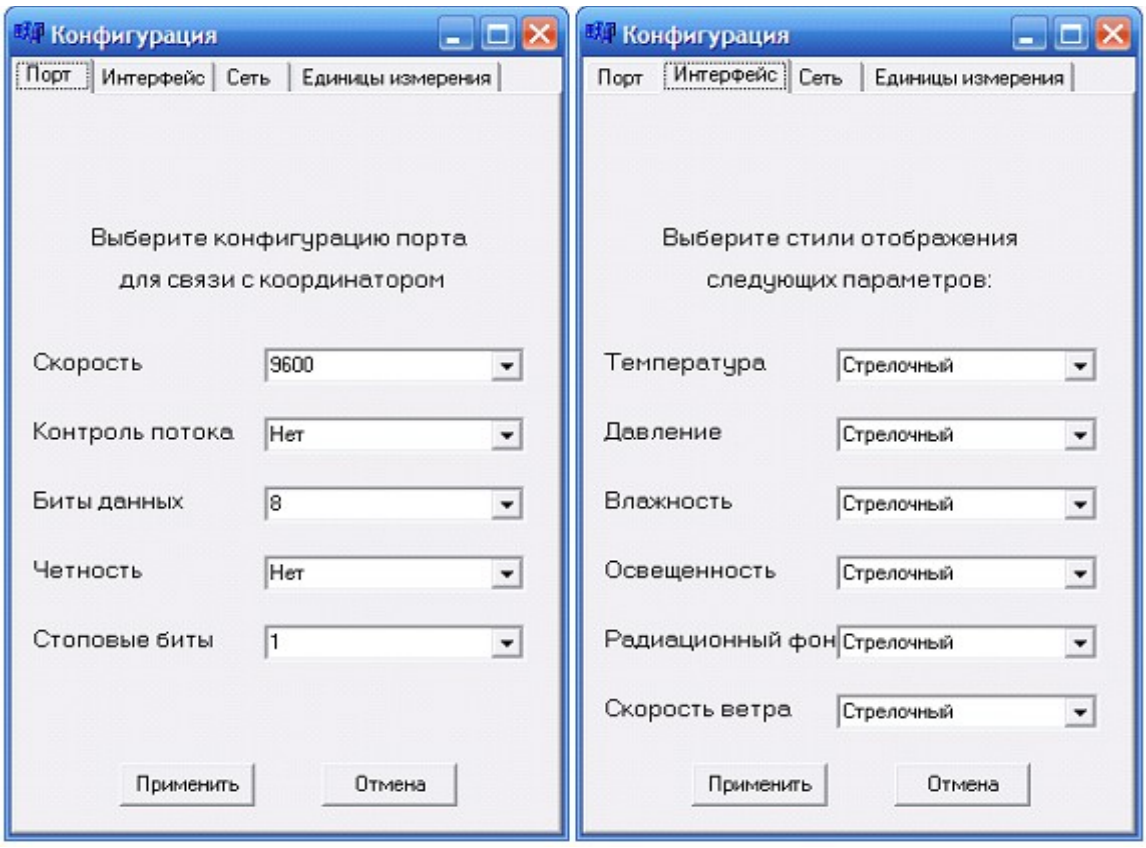
Для створення програми розроблено ряд програмних компонентів, таких як:

- датчик тиску (відображає дані в одних із зазначених одиниць виміру: Па, Бар, Атм, технічна Атм, мм рт.ст., м вод.ст.);
- датчик радіаційного фону (виконується автоматичне перемикання між: мР / год, мкР / год);
- датчик вологості відображає відносну вологість в%;
- датчик освітленості відображає освітленість в одиницях виміру Люкс;

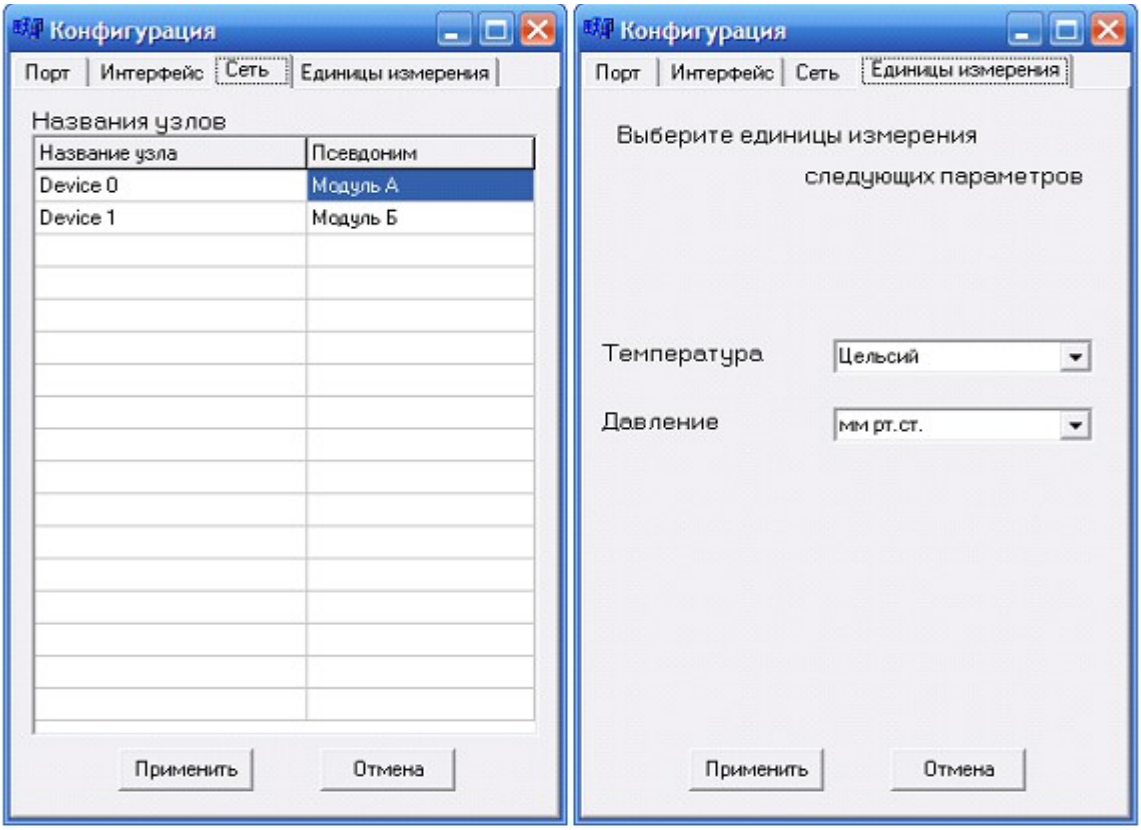
- датчик параметрів вітру візуалізує швидкість вітру в м / с, а напряму вітру червоним кінцем вказує в сторону, куди дме вітер;
- датчик температури (відображає дані в одних із зазначених одиниць виміру: K, ºF, ºC);
- всі з розроблених датчиків здатні візуалізувати дані в двох режимах: цифровий і стрілочний, що ми бачимо на рисунку 5.11.

Програма автоматично визначає порт до якого підключений координатор мережі. Для цього необхідно клікнути «Пошук пристроїв» в меню «Підключення». Якщо координатор був знайдений червоний індикатор підключення координатора в нижньому лівому кутку вікна загориться зеленим, і поруч буде відображений порт, на якому він був знайдений. Програма також сама виявляє втрату зв'язку з координатором, після чого індикатор підключення знову стане червоним. Програма автоматично виявляє кількість вузлів, які пересилають дані координатору і динамічно додає вкладки в головному вікні програми з назвою модуля.

У меню «Налаштування» присутні 4 вкладки (рис.5.12): на першій можна вибрати настройки порту, на другий можна вибрати режим відображення інформації (стрілочний, цифровий), на третьому - псевдоніми для вузлів, які будуть відображатися у всій програмі замість імен вузлів, на четвертої - вибрати одиниці виміру для температури та тиску.


Конфигурация
Порт
Интерфейс
Сеть
Единицы измерения
Выберите конфигурацию порта
для связи с координатором
Скорость
9600
Контроль потока
Нет
Биты данных
8
Четность
Нет
Стоповые биты
1
Применить
Отмена
Конфигурация
Порт
Интерфейс
Сеть
Единицы измерения
Выберите стили отображения
следующих параметров:
Температура
Стрелочный
Давление
Стрелочный
Влажность
Стрелочный
Освещенность
Стрелочный
Радиационный фон
Стрелочный
Скорость ветра
Стрелочный
Применить
Отмена

(а)


Конфигурация
Порт
Интерфейс
Сеть
Единицы измерения
Названия узлов
Название узла
Псевдоним
Device 0
Модуль А
Device 1
Модуль Б
Применить
Отмена
Конфигурация
Порт
Интерфейс
Сеть
Единицы измерения
Выберите единицы измерения
следующих параметров
Температура
Цельсий
Давление
мм рт.ст.
Применить
Отмена

(б)

Рисунок 5.12

Пункти меню Налаштування: (а) - настройки порту і інтерфейсу; (б) - настройки мережі та одиниць вимірювання

Пункт графіки залежностей (рис.5.13) з меню дає можливість порівняно оцінити показання з різних вузлів, які відображаються на графіку.

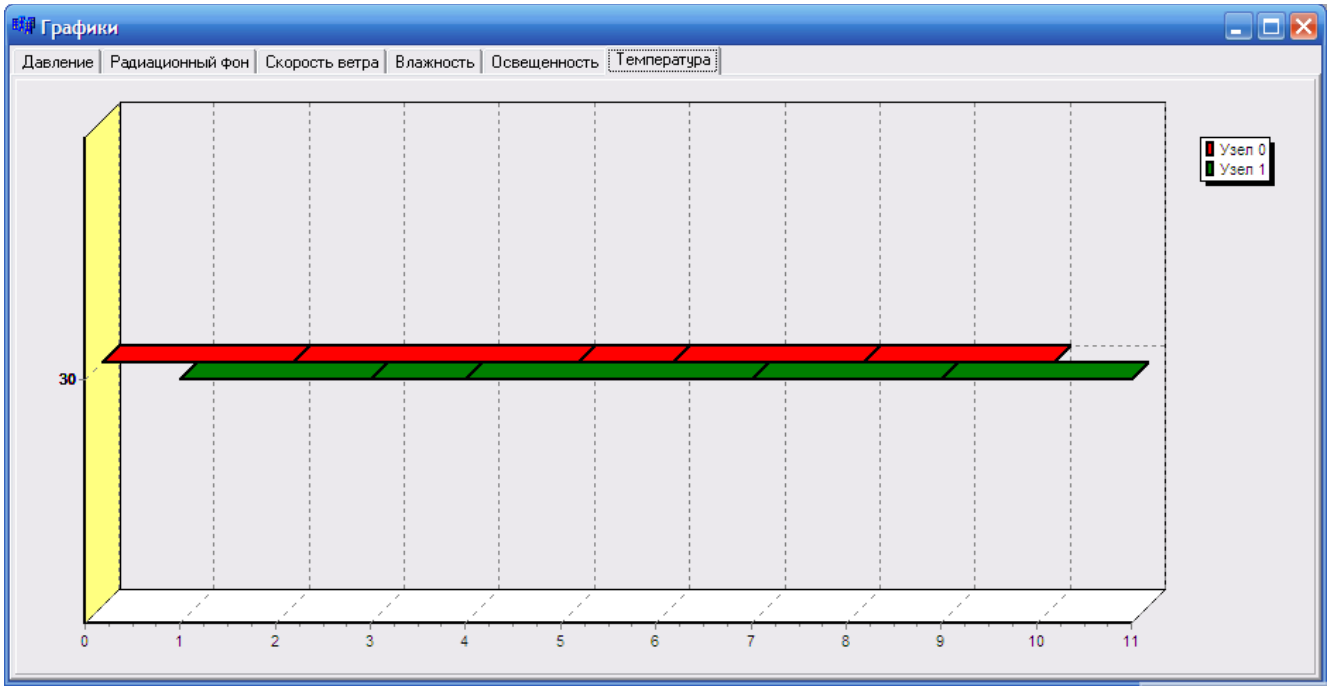


Рисунок 5.13 – Графіки залежностей

Пункт Відкрити з меню Файл дозволяє в той час, поки не ведеться прийом даних від датчиків відкрити вже збережені дані, які відобразяться у вікні Графіки.

Пункт Зберегти з меню Файл дозволяє зберегти всі отримані дані за поточний сеанс.

Для початку роботи з програмою потрібно виконати наступні кроки:

1. підключити координатор;
2. виконати Пошук пристроїв в меню Підключення;
3. після того, як координатор буде знайдений Підключитися до нього з меню Підключення.

Після цього почнеться прийом і візуалізація даних від підключених вузлів.

ВИСНОВКИ

Пропована автономна система моніторингу і контролю складних технічних об'єктів з використанням сенсорної мережі може бути використана в багатьох прикладних областях з різними функціональними можливостями:

- безперервний і періодичний моніторинг технічного стану об'єктів контролю на основі показань бездротових сенсорів;
- оперативний аналіз даних і прогноз зміни значень вимірюваних параметрів для виявлення небезпечних тенденцій і аварійних ситуацій;
- відображення контрольованих об'єктів на мнемосхемі об'єкта з аналізом загального стану об'єкта і кожного сенсора;
- оперативне інформування користувачів про виникнення нештатних ситуацій на об'єктах;
- прогнозування технічного стану об'єкта і залишкового ресурсу на заданий період часу.
- інформування про виявлені відхилення в технічному стані об'єктів з формуванням і видачею рекомендацій для прийняття рішень

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1.Кривуля Г.Ф., Власов В.А. Автономна система моніторингу та контролю технічних об'єктів з використанням безпровідних сенсорних мереж. Вісник Нац. технічного університету сільського господарства ім.Петра Василенка. Випуск 187 "Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України".2017 р. Харків. 64-67с. ..

2. ZigBee Alliance [Электронный ресурс].– Режим доступа: http://www.zigbee.org/.– 20.06.2016.

3. Побудова сенсорної мережі аеропорту та її інтеграція з бездротовою мережею аеропорту стандарту 802.11 [Текст] / О. П. Ткаліч, Р. С. Одарченко, О. Ю. Устинов, Д. О. Колодинський // Современный научный вестник. – 2013. – Т. 2, № 1. – С. 139–143.

4.Блум, Д. Изучаем Arduino: инструменты и методы технического волшебства [Текст] / Д. Блум. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2015. – 336 с.

5. XBee Datasheet [Электронный ресурс].– Режим доступа: /www.digi.com/lp/xbee,https://www.sparkfun.com/datasheets/Wireless/Zigbee/XBee-Datasheet.pdf. 20..06.2016.

5. 802.15.1-2005 - IEEE Standard for Information technology-- Local and metropolitan area networks--Specific requirements-- Part 15.1a: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications for Wireless
6. Personal Area Networks (WPAN) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=1490827&filter=AND%28p_Publication_Number:9980%29. – 20.06.2106.

7.Bluetooth Low Energy Alliance [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.bluetooth.com/ what-is-bluetooth-technology/bluetooth-technologybasics/ low-energy.20.06.2016.

8. Петин, В. Проекты с использованием контроллера Arduino [Текст] / В..Петин. - Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2014. – 400 с.

9. BLE112 Datasheet [Электронный ресурс]. –Режим доступа: https://www.bluegiga.com/enUS/products/ble112-bluetooth-smart-module/, https://www.bluetooth.org/tpg/RefNotes/BLE112_Datasheet1.pdf. – 20.06.2016.

10. IEEE 802.11TM WIRELESS LOCAL AREA NETWORKS. The Working Group for WLAN Standards[Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.ieee802.org/11/. – 20.06.2016.

11.Krivoulya, G.F., Yayra Maud, Bogomazov Є. Localization of nodes largescale wireless sensor networks. ТЕЗИ ДВАДЦЯТОЇ МІЖНАРОДНОЇ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ «ПРОБЛЕМИ ІНФОРМАТИКИ ТАМОДЕЛЮВАННЯ» (ПІМ-2020) *16 – 20 вересня 2020 р.* Харків – Одеса. С.15.