

**Міністерство освіти і науки України  
Київський національний університет імені Тараса Шевченка**

---

---

**Факультет інформаційних технологій  
Кафедра мережевих та інтернет технологій**

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

завідувач кафедри

мережевих та інтернет технологій

\_\_\_\_\_ Ю.В. Кравченко

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 року

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА  
БАКАЛАВРА**

галузі знань 17 «Електроніка та телекомунікації»  
за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

на тему:

**ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ПОБУДОВИ  
СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ**

**Виконав: студент групи МІТ -41**

**Коропченко Олександр Сергійович**

(прізвище ім'я по-батькові)

(підпис)

**Керівник: професор кафедри мережевих та інтернет технологій**

**д.т.н., професор Кравченко Ю.В.**

(посада, прізвище ім'я по-батькові)

(підпис)

**Київ 2021**

**Міністерство освіти і науки України**  
**«Київський національний університет імені Тараса Шевченка»**

**Факультет інформаційних технологій**  
**Кафедра мережевих та інтернет технологій**

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

завідувач кафедри  
мережевих та інтернет технологій

\_\_\_\_\_ Ю.В. Кравченко

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 року

**ЗАВДАННЯ**  
**НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ**

Здобувачу вищої освіти \_\_\_\_\_ Коропченку Олександрю Сергійовичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи:

Інформаційна технологія побудови сенсорної мережі спеціального призначення  
 затверджена на засіданні кафедри МІТ «04» грудня 2020 р. протокол №8

2. Термін здачі закінченої роботи «30» травня 2021 р.

3. Вихідні дані до проекту  
 (роботи)

Мережеві пристрої

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, що їх потрібно розробити, обсяг – 35-40 стор.)

Вступ

1. Дослідження методів та алгоритмів побудови сенсорних мереж. Постановка задачі

1.1 Огляд і аналіз методів побудови сенсорних мереж

1.2 Постановка задачі

2. Розробка інформаційної технології побудови сенсорної мережі спеціального призначення

3. Рекомендації до побудови сенсорної мережі спеціального призначення

3.1. Модельний приклад

3.2. Рекомендації обрання пристроїв

3.3. Рекомендації до підвищення ефективності мережі

Висновки

5. Перелік графічного матеріалу 8-10 слайдів

Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

Керівник роботи \_\_\_\_\_

(підпис)

Ю.В Кравченко

(посада, прізвище, ім'я, по батькові)

Завдання прийняв до виконання \_\_\_\_\_

О.С. Коропченко

(підпис)

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Номер	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Підготовчий	20.12.2020	
2	Розділ 1	01.02.2021	
3	Розділ 2	25.02.2021	
4	Розділ 3	15.04.2021	
5	Доповідь та слайди	25.05.2021	
6	Пояснювальна записка	30.05.2021	

Здобувач вищої освіти \_\_\_\_\_ О.С. Коропченко  
(підпис)

Керівник \_\_\_\_\_ Ю.В. Кравченко  
(підпис)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 49с., 15 рис., 15 табл., 1 додаток, 23 джерела.

Об'єкт дослідження: процес функціонування бездротової сенсорної мережі спеціального призначення.

Предмет дослідження: процес проектування інформаційної технології та реалізації сенсорної мережі спеціального призначення.

Мета кваліфікаційної бакалаврської роботи (проекту): спроектувати інформаційну технологію сенсорної мережі спеціального призначення з наданням функціональної стійкості для збереження функціонування мережі під впливом зовнішніх та внутрішніх подразників.

Методи дослідження: системний підхід, методи порівняння, методи теорії інформації та методи системного аналізу.

В роботі проведено аналіз існуючих видів сенсорних мереж, їх способи живлення, канали передачі даних, радіус дії та ін.. Запропоновано математичну модель сенсорної мережі для вирішення поставленої задачі, забезпечивши для неї надмірність задля надання більшого значення функціональної стійкості.

Практичне значення полягає у розробці інформаційної системи сенсорної мережі спеціального призначення для моніторингу кордону, яка є функціонально стійкою під впливом подразників різного виду.

Галузь використання – військова діяльність, прикордонна сфера, системи моніторингу.

Напрямки подальшого розвитку кваліфікаційної роботи включають реалізацію інформаційної технології при розгортанні сенсорної мережі спеціального призначення, тестування її функціональної стійкості за рахунок видалення елементів надмірності для перевірки збереження нормального функціонування мережі під негативним впливом подразників.

Ключові слова: ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ, БЕЗДРОВОТА СЕНСОРНА МЕРЕЖА, ФУНКЦІОНАЛЬНА СТІЙКІСТЬ, САМООРГАНІЗАЦІЯ.

## ЗМІСТ

	Стор.
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ .....	6
ВСТУП.....	7
I. ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ТА АЛГОРИТМІВ ПОБУДОВИ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ .....	9
I.1. Огляд і аналіз методів побудови сенсорних мереж .....	9
I.2. Огляд існуючих топологій та елементів сенсорних мереж .....	12
I.3. Технології та стандарти сенсорних мереж .....	17
I.4. Властивості бездротових сенсорних мереж .....	21
Висновки до розділу I.....	25
II. РОЗРОБКА ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ПОБУДОВИ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ.....	27
II.1 Модель функціонування бездротової сенсорної мережі спеціального призначення .....	27
II.2 Розробка математичної моделі бездротової сенсорної мережі спеціального призначення.....	32
Висновки до розділу II .....	38
РОЗДІЛ III. РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ПОБУДОВИ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ.....	39
III.1 Модельний приклад.....	39
III.2 Рекомендації до підвищення ефективності мережі .....	46
Висновки до розділу III .....	52
ВИСНОВКИ .....	54
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	56
ДОДАТОК А.....	59

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ІС – інформаційна система;

БСМ – безпроводна сенсорна мережа;

КЗ – канал зв'язку;

КП – кінцевий пристрій;

СПД – система передачі даних;

ФС – функціональна стійкість.

## ВСТУП

У зв'язку зі збільшенням кількості галузей діяльності та стрімким розвитком суспільства мережеві технології повинні забезпечувати все більш надійне та тривале функціонування мереж передачі даних (МПД). Опираючись на це новітні МПД повинні не тільки забезпечувати попит на даний момент, а і розвивати нові технології та стандарти у сфері дротової та бездротової передачі даних.

Значна кількість мереж, основною задачею яких є спостереження та управління, ґрунтується на використанні бездротових ліній передачі даних. Дана інформаційна система має єдину назву – бездротова сенсорна мережа (БСМ). Основною задачею даного типу ІС є мінімізування обслуговування вузлів мережі протягом тривалого часу використання. Серед всіх компаній, які працюють у створенні нових технологій бездротової передачі даних, можна виділити наступні організації – IEEE, ZigBee Alliance, Wi-Fi Alliance.

Бездротова сенсорна мережа, як і будь яка інша мережа, це система з кінцевих пристроїв (КП) та маршрутизаторів. Однак є декілька головних особливостей даної ІС, серед них: використання автономного джерела живлення та бездротових каналів передачі даних. Також слід відмітити що відсутня жорстка прив'язка до відстані між пристроями, оскільки за допомогою ретрансляторів відстань може буди доволі значною. Заключною особливістю є два режими роботи КП. Активний стан – сенсор здійснює прийом, або виконує відправку інформації. Та пасивний стан – сенсор знаходиться у режимі очікування, причому у даному режимі роботи майже відсутнє споживання енергоресурсів.

Мета бакалаврської кваліфікаційної роботи є інформаційна технологія побудови сенсорної мережі спеціального призначення. Підвищення показника властивості функціональної стабільності сенсорної мережі. Інформаційна система повинна самоорганізуватись в процесі роботи у разі виникнення помилок, або втрати працездатності одного чи декількох датчиків (кінцевих пристроїв).

Актуальність даної бакалаврської кваліфікаційної роботи полягає у запропонуванні методики інформаційної технології побудування сенсорної мережі

спеціального призначення. Визначення загальної структурної моделі мережі, з поміж яких слід виділити кількість вузлів та лінії передачі інформації між різними типами пристроїв. Також слід відмітити самоорганізацію структури при масштабуванні мережі за допомогою впровадження нових вузлів, або ліній передачі даних. Покращення у математичній моделі показника функціональної стійкості сенсорної мережі з урахуванням технічних показників вузлів системи. Скорочення часових витрат при обчислюванні та переналаштуванні нових маршрутів зв'язку, у разі часткової або повної втрати одного чи декількох вузлів інформаційної системи.

# I. ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ТА АЛГОРИТМІВ ПОБУДОВИ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

## I.1. Огляд і аналіз методів побудови сенсорних мереж

Процес створення алгоритмів побудови сенсорних мереж починається з письмового опису структури предметної області та переходом до формального опису моделі, з урахуванням вузлів та каналів передачі даних. Першим етапом проектування є системний аналіз та письмовий опис існуючих сенсорних мереж.

З кожним днем бездротові сенсорні мережі (БСМ) здобувають все більший інтерес як з боку компаній, так і у побутовій сфері через використання у різноманітних областях діяльності, а розвиток та оптимізація програмного забезпечення якнайкраще зумовлює ріст популярності БСМ у порівнянні з дротовим способом передачі даних у мережах. Як це зазвичай трапляється перші бездротові мережі почали використовувати у військовій сфері у другій половині ХХ століття. Основоположником даної системи передачі даних прийнято вважати систему SOSUS – (SOund SUrveillance System). Данна мережа являє собою систему ідентифікації підводних човнів. Основними функціями даної мережі є:

- спостереження за певною областю водного простору;
- виявлення підводних човнів;
- ідентифікація підводних човнів;
- збирання даних (час перебування, рух і т.д.);
- передавання інформації для обробки.

З розвитком технологій у сфері мережевих технологій та мікроелектроніки БСМ почали використовуватись не тільки у військовій діяльності. Все більше речей побуту можна під'єднати до мережі інтернет, через це такі мережі виділили в окрему категорію під назвою: «Інтернет речі» (Internet of Things). Також слід виділити такі концепції як: бездротові персональні обчислювальні мережі (WPAN – Wireless Personal Network), системи радіочастотної ідентифікації (RFID – Radio Frequency IDentification), мікро електромеханічні системи (MEMS – Micro-Electro-Mechanical Systems).

Щодо промисловості на сьогоднішній день, слід відмітити одне з головних місць у стандартах БСМ, а саме першу версію стандарту IEEE 802.15.4, яка була опублікована у 2003 році. Даний стандарт описує фізичний шар і управління доступом до середовища для бездротових персональних мереж з низьким рівнем потужності сигналу і швидкостями до 480 Мбіт/с.

Сьогодні діапазон використання бездротових систем дещо більший ніж на кінці минулого століття і вже давно вийшов за рамки простого збирання та збереження інформації. Так у побуті часто використовують словосполучення «Інтернет речі». Даний термін часто використовується при створенні БСМ вдома. Також використовується більш вузька назва «розумний дім». Насамперед такі назви виникли через появу нових міжнародних стандартів для даної сфери діяльності. Провідними компаніями та організаціями, які сприяють розвиненню та появі нових промислових та побутових стандартів є: Міжнародний союз електрозв'язку (ITU), Міжнародна організація по стандартизації (ISO), Інженерна рада Інтернету (IETF), Інститут інженерів електротехніки та електроніки (IEEE) та інші.

Також слід зазначити що разом із значним розвитком у даній сфері з'явилися і певні вимоги та обмеження на структуру та функціонування вузлів. Так однією з основних вимог є габарити сенсорів (кінцевих пристроїв). Датчик повинен бути малих розмірів, для того щоб спростити його монтування на платі та заради зменшення ресурсів, які сенсор буде використовувати при експлуатації (підвищення автономної роботи). При тому сенсор має бути достатньо дешевим. Мала коштовність дає змогу швидко замінити датчик, який вийшов з ладу, або ж задля масштабованості у разі потреби. Проте створення БСМ зі значною кількістю кінцевих пристроїв – дуже важка задача, через це доцільно проводити певні розрахунки працездатності на її зменшеній моделі при різних режимах роботи та оцінювати основні параметри, серед яких:

- швидкодія БСМ;
- енергоспоживання ресурсів при різних навантаженнях;
- втрата пакетів даних при передачі;

- час самоорганізації та ін..

Однією з головних особливостей бездротової сенсорної мережі є здатність до ретрансляції даних. За допомогою цієї особливості БСМ має змогу передавати дані на значну відстань, при дещо малій потужності самих передавачів. Також слід відмітити адаптивність та самоорганізацію даної системи за складних умов експлуатації. Якщо взяти спеціалізовані бездротові сенсорні системи, то основним спектром їх застосування будуть:

- контроль за навколишнім середовищем;
- система оборони;
- моніторингові системи;
- охоронні системи;
- системи виявлення та сповіщення при пожежі;
- стеження за пересуванням техніки.

Завдяки бездротовим сенсорним мережам є можливість ефективного вирішення питань з контролю навколишнього середовища, спостереження за військовими об'єктами, надання оперативної інформації про нелегальний перетин кордону тощо. У промисловості та побуті їх можна застосовувати для моніторингу технологічних процесів і контролю функціонування систем для забезпечення поліпшення життєдіяльності людини. А значення сенсорів в медичних технологіях майбутнього майже позбавлене рамок використання. Насамперед вони можуть забезпечувати дистанційне спостереження за температурою тіла, диханням, кров'яним тиском та іншими фізіологічними характеристиками людини.

Існує декілька класифікацій БСМ, серед них:

- за типом живлення (стаціонарне, автономне, відновлювальне);
- за площею розгортання (10-100 м<sup>2</sup>, 100-1000 м<sup>2</sup>, >1000 м<sup>2</sup>);
- за застосуванням (моніторинг, збір даних, охоронна навколишнього середовища, тощо);
- за середовищем передачі (наземне, підземне, підводне);
- за технологією передачі (радіозв'язок, оптика, магнітна індукція);

- за організацією мережі (ієрархічна, децентралізована);
- за масштабом мережі (PAN, LAN, MAN);
- за типом вузлів (стаціонарні, мобільні).

При розробці безпроводної сенсорної мережі важливе значення приділяють функціонуванню структури [1]. Насамперед ключовими методами при побудови мережі є «single-hop» та «multi-hop», які в свою чергу поділяються на підметоди.

- метод з одним головним вузлом (single-hop). Використовується коли потужність передавача є достатньою для надсилання інформації до базової станції. Серед підметодів виділяють наступні топології: дерево, кільце, зірка, шина;
- метод з декількома головними вузлами (multi-hop). Використовується коли вузли не тільки займаються збиранням інформації, але й ретрансляванням повідомлень до інших вузлів.

## I.2. Огляд існуючих топологій та елементів сенсорних мереж

Слід зазначити що відстань між елементами мережі може різнитися через особливості навколишнього середовища, де розгортається мережа. Так відстань у приміщенні може становити від декількох десятків метрів, коли на відкритому просторі ця відстань може збільшуватись до кількох сотень метрів. При чому за рахунок ретрансляції повідомлень площа покриття може значно збільшитись: так в приміщенні відстань може доходити майже до кількох тисяч квадратних метрів. На відкритому просторі відстань від кількох сотень може збільшитись до декількох гектарів. Також однією з вимог БСМ є можливість масштабування мережі. Цього можливо домогтись декількома способами: або за рахунок додавання нових елементів до вже існуючої сенсорної мережі, або розбиття мережі на декілька кластерів (окремих зон) та подальшого масштабування окремих кластерів.

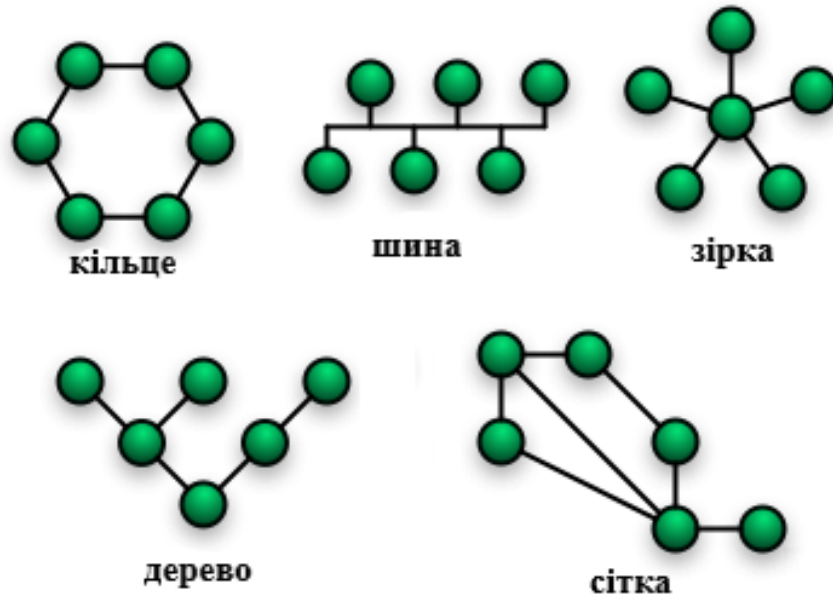


Рисунок 1.1 – найпоширеніші топології мереж

Топологія мережі прямим чином впливає на інформаційну відмовостійкість мережі та є одним із перших критеріїв при виборі найбільш відмовостійкої БСМ. Також топологія прямим чином впливає на працездатність та швидкодію при передачі даних [2].

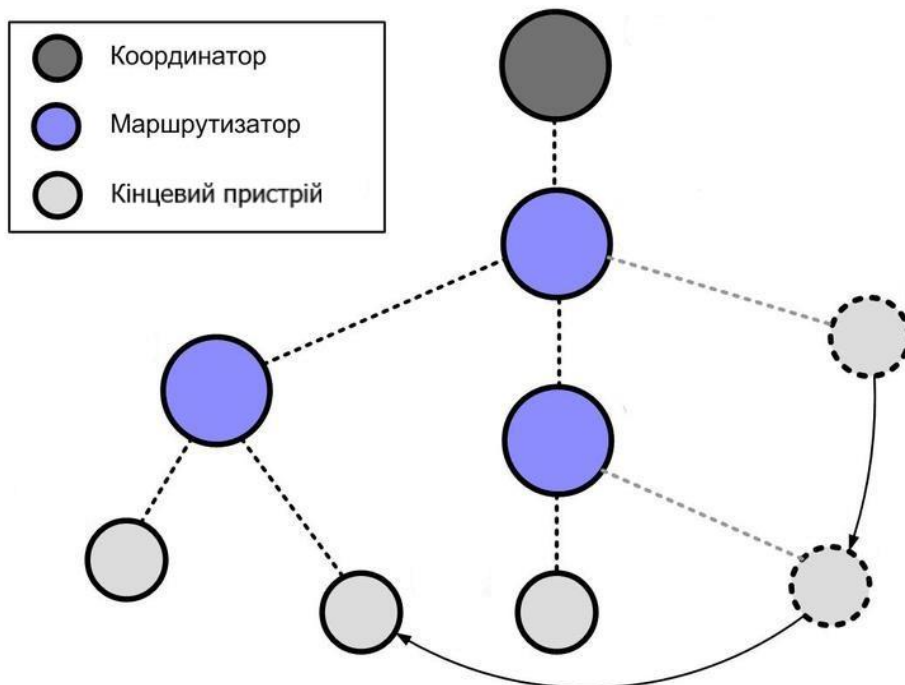


Рисунок 1.2 – типова топологія БСМ

На рисунку 1.2 показано типову топологію БСМ. Для подальшого проектування мережі слід розглянути окремо призначення кожного елемента в типовій топології. Отже, найчастіше бездротова сенсорна мережа складається з трьох основних компонентів, серед яких: координатор, маршрутизатор, кінцевий пристрій (сенсор). Якщо розглянути функціональні відмінності кожного з цих компонентів, то ми отримаємо:

- координатор – пристрій, який відповідає за організацію мережі у цілому. Виконує обов'язки довіреного центру та виконує певні обов'язки при маршрутизації. Проте, якщо даний вузол вийде з ладу то є велика вірогідність того, що мережа втратить свою працездатність. Через це слід пильно слідкувати за енергоресурсами, які споживає координатор. Слід замислитись не тільки над стаціонарним живленням для даного пристрою, але і за резервним у разі відмови першого;
- маршрутизатор – пристрій, основним завданням якого є маршрутизація мережевого трафіку. Насамперед це означає що маршрутизатор повинен мати доступ до інших елементів мережі, задля здійснення передачі даних між ними. Найчастіше має стаціонарне джерело живлення, а резервне джерело може мати за потреби;
- кінцевий пристрій (сенсор) – пристрій, який підключений до мережі і має завдання збору та відправки інформації. У маршрутизації участі не бере. Розрізняють два типи кінцевих пристроїв ZED та SED. Основна їх відмінність полягає в тому що ZED-пристрої завжди знаходиться в активному стані. У зв'язку з цим даний тип пристроїв більш вимогливий до джерела живлення. SED-пристрій має більше розповсюдження, може містити автономне або відновлюване джерело живлення. Основною відмінністю від ZED-пристроїв є те, що у разі, якщо даний тип кінцевого пристрою не передає дані на маршрутизатор, або не здійснює збір інформації, то він переходить у режим «сну».

Також координатор виступає Trust-центром. Основний обов'язок якого відповідальність за безпеку, а саме виконання автентифікації пристроїв та надання

ключів шифрування [3]. Якщо ж наша система має розподілений Trust-центр, то функції такого центру може виконувати який завгодно маршрутизатор типу FFD.

На початку єдиним пристроєм, який відповідає на запити та надає дозвіл на приєднання до мережі, є PAN координатор. Упродовж функціонування даної мережі є можливість делегування обов'язків на приєднані маршрутизатори.

На наступних рисунках (1.3 – 1.4) показано як передаються дані від кінцевого пристрою до координатора, за умови вже створеного з'єднання та без нього.

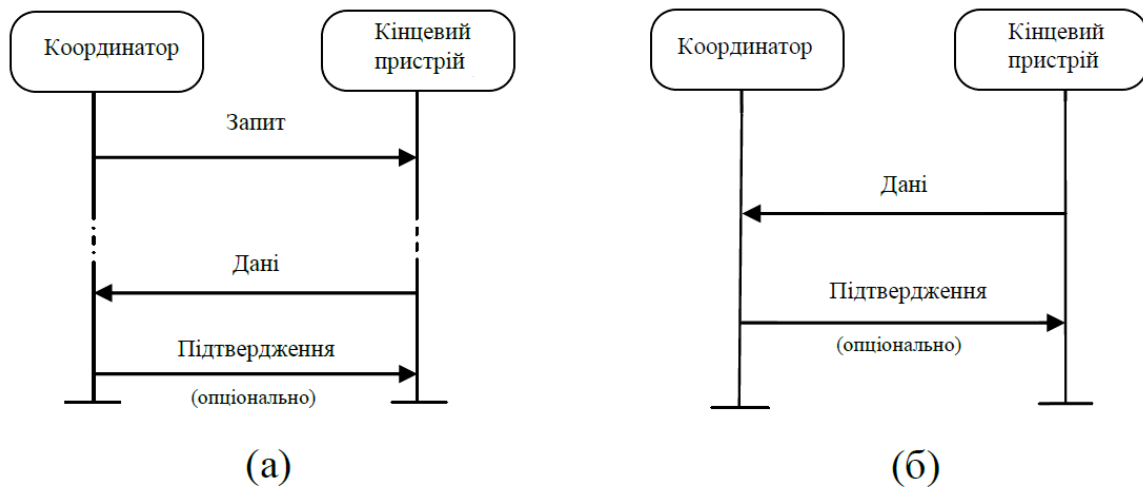


Рисунок 1.3 – (а) передача даних від кінцевого пристрою до координатора з використанням запиту; (б) передача даних від кінцевого пристрою до координатора без використання запиту (при використанні таймеру)

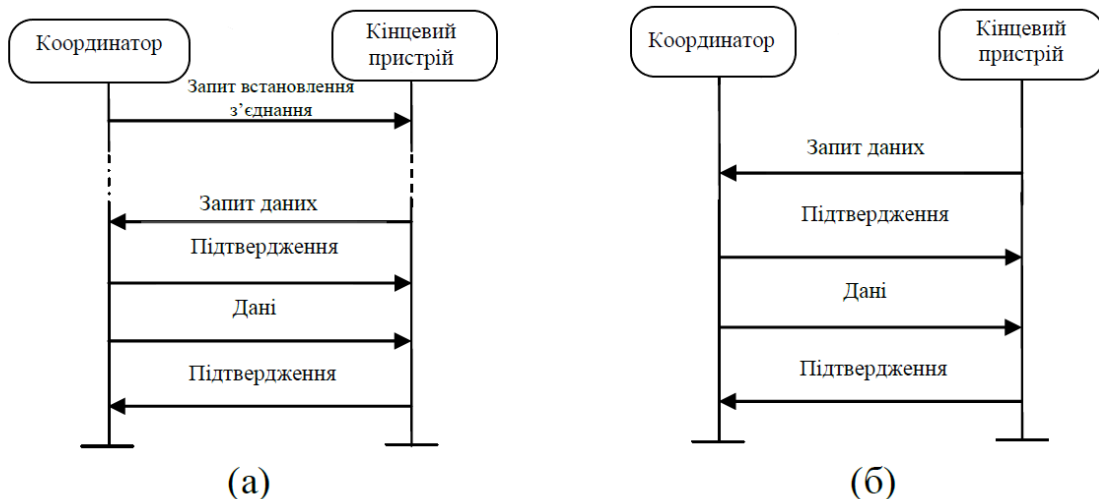


Рисунок 1.4 – (а) передача даних від кінцевого пристрою до координатора з встановленням з'єднання; (б) передача даних від кінцевого пристрою до координатора за запитом

Далі доцільно розглянути типову будову структури БСМ (рисунок 1.5)

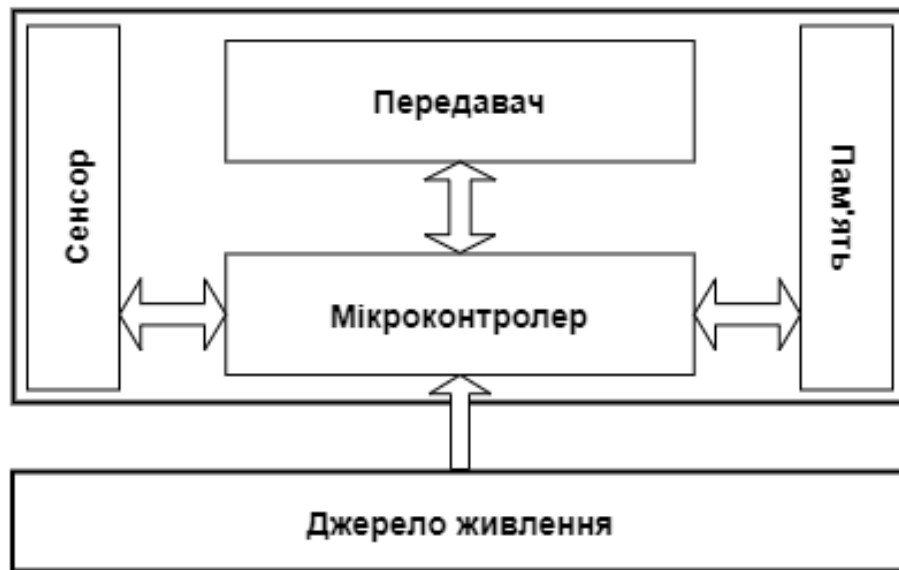


Рисунок 1.5 – типова структура будови бездротового сенсорного модулю

Ролей, які покладено на кінцеві пристрої, велика кількість. Залежно від роду діяльності та застосування сенсор в БСМ різняться. Так, для моніторингу температури буде використано датчик температури, для моніторингу вологості буде встановлено сенсор вологості і т.д..

Після отримання сигналу, у ході роботи сенсора, їх необхідно передати обробці, заради подальшої обробки та роботі з даними. Ця стадія слугує для здійснення ряду перетворень. Наразі може бути посилення сигналу, тобто збільшення амплітуди сигналу, або застосування фільтрів для усунення звад чи шумів [4].

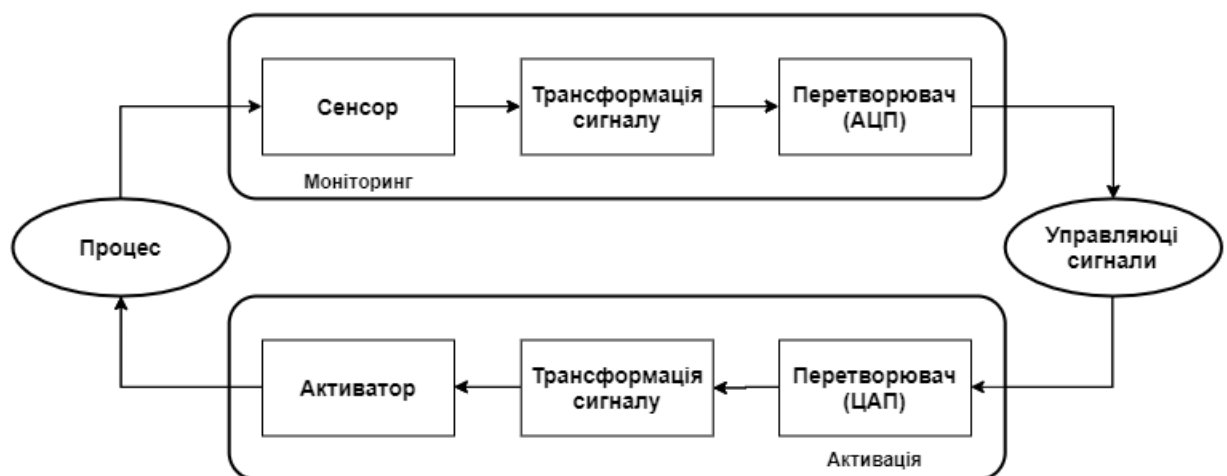


Рисунок 1.6 – процес збору даних та активація процесів у БСМ

На рисунку 1.6 розглянуто процес збору інформації, їх зчитування та перетворення для активації процесу в бездротових сенсорних мережах. На даному рисунку відбувається перетворення аналогового сигналу за допомогою аналого-цифрового перетворювача (АЦП) у цифровий для подальшого передавання по мережі чи обробки. Для активування процесу використовується зворотна функція (перетворення цифрового сигналу в аналоговий) за допомогою цифро-аналогового перетворювача.

### 1.3. Технології та стандарти сенсорних мереж

Щодо виробників програмного та апаратного забезпечення, які виробляють пристрої для сенсорних мереж, то їх апарати виконані за деякими стандартами та технологіями побудови БСМ. Так найбільш популярні вузли бездротової сенсорної мережі зазначено у таблиці 1.1, разом з їхніми основними характеристиками.

Таблиця 1.1 – основні параметри вузлів

Вузол мережі	Бездротовий стандарт	ОЗП	Центральний процесор управління
BTNode	Bluetooth (2,4 ГГц)	64 + 180 kB	Atmel Atmega 128 L
Mulle	Bluetooth (2,4 ГГц)	31 kB	Renesas MI6C/62P
SenseNode	IEEE 802.15.4 (2,4 ГГц)	10 kB	TI MSP430F1611
SunSPOT	IEEE 802.15.4 (2,4 ГГц)	1 kB	Atmel ARM920T
ZigBit ZDM	IEEE 802.15.4 /ZigBee (2,4 ГГц)	8 kB	Atmel ATmega1281V
Iris	IEEE 802.15.4 /ZigBee (2,4 ГГц)	8 kB	Atmel ATmega 1281

Як видно з таблиці вище основними бездротовими стандартами є: Bluetooth (під технічною назвою IEEE 802.15.1) та IEEE 802.15.4, які працюють на частоті 2,4

ГГц. Якщо розглядати модель OSI, то дані пристрої розташовані на фізичному та каналному рівнях (7 та 6 рівень відповідно).

Щодо основних способів використання бездротових сенсорних мереж, то вони різняться від однієї сфери діяльності до іншої, однак вирізняється єдина концепція сфери застосування – моніторинг. Насамперед БСМ доцільно використовувати для моніторингу промислових об'єктів чи навколишнього середовища, у сфері охоронних систем (медичного чи військового типу). Так БСМ спеціального призначення можна розташувати біля кордону задля швидкого ідентифікування його несанкціонованого перетину. Також перевагою даної мережі є те, що її можливо розвернути у важкодоступних місцях, місцях підвищеного ризику для життя людини (об'єкти підвищеної небезпеки, місцях переробки вогнебезпечних, хімічних чи інших речовин, тощо), місцях пониженої прохідності, тощо. У зв'язку з цим перед інженером, якому необхідно розгорнути сенсорну мережу, висувається ряд вимог та обмежень, щодо працездатності даної мережі та автономного функціонування [13, 14]. Серед таких умов є:

- низька вартість пристроїв;
- легка складність встановлення;
- порівняно великий термін експлуатації пристроїв та дешеве обслуговування;
- швидке розгортання;
- легка масштабованість;
- велика розмірність (за необхідності);
- велика швидкість передачі даних та пропускна здатність;
- малий час затримки (латентності). Даний показник впливає на швидкодію пристрою через малий час між виникненням події та отриманням даних;
- динамічна топологія (здатність до самоорганізації у разі несправності одного чи декількох вузлів);

- щільність вузлів (відстань між сусідніми пристроями БСМ та їх кількість);
- площа покриття (мінімальна кількість пристроїв, які необхідні для ретрансляції повідомлень).

На основі вимог, вказаних вище, розглянемо загальні стандарти та технології бездротової передачі, для цього розглянемо таблицю 1.2. На основі критеріїв цієї таблиці базується кінцевий вибір технології, на базі якої буде розгорнута БСМ для виконання тієї чи іншої поставленої задачі.

Таблиця 1.2 – характеристики параметрів бездротових стандартів передачі даних

Характеристики	Стандарти бездротової передачі			
	Thread (IEEE 802.15.4)	ZigBee (IEEE 802.15.4)	Bluetooth 4.x Bluetooth 5.0 (IEEE 802.15.1)	Wi-Fi (IEEE 802.11)
Дальність	Mesh	До 100 м	До 80 м	Від 100 м до 1 км
Енергоспоживання	До 20 dBm при передачі	До 25 dBm при передачі	До 10 dBm при передачі	10 mW – 1W
Частотний діапазон	2.4 ГГц	868/915 МГц 2.4 ГГц	2.4 ГГц	900 МГц / 2.4 ГГц / 5 ГГц
Пропускна здатність	250 кБ/с	250 кБ/с	До 2 Мб/с	50 кБ/с – 18 МБ/с; від 400 Мб/с до 6,5 Гб/с
Кількість елементів мережі	300	65000	7	250
Топологія	Mesh	Mesh	Star, Bus, P2P, Mesh	Star, Mesh
Розмір пакетів	63 байти	68 байт	8-47 байт	До 1500 байт

У таблиці 1.2 розглянуто технології бездротової передачі даних для стандартів з малим радіусом дії. До таких технологій ще відносять NFC та RFID. Перевагами цих стандартів є низьке енергоспоживання, проте в даній таблиці вони

не розглядаються через не відповідність вимогам до створення БСМ спеціального призначення, а саме:

- мала площа покриття;
- погана самоорганізація;
- слабка масштабованість.

З іншого боку технології NB-IoT, SigFox, LTE-M, LoRaWan занадто коштовні як при початковому встановленні, так і при обслуговуванні впродовж всього терміну експлуатації.

Розглянемо будову протоколів на фізичному та каналному рівнях для кожного з обраних бездротових стандартів у технологіях БСМ (таблиця 1.3).

Таблиця 1.3 – порівняльна характеристика будови протоколів каналного та фізичного рівнів для стандартів бездротової передачі даних малого радіусу дії

Назва рівня	Стандарти бездротової передачі			
Назва стандарту	Thread (IEEE 802.15.4)	ZigBee (IEEE 802.15.4)	Bluetooth 4.x Bluetooth 5.0 (IEEE 802.15.1)	Wi-Fi (IEEE 802.11)
Канальний	IEEE 802.15.4 MAC	IEEE 802.15.4 MAC	IEEE 802.15.1 MAC	IEEE 802.11 MAC+ IEEE 802.11s Mesh
Фізичний	IEEE 802.15.4 PHY	IEEE 802.15.4 PHY	IEEE 802.15.1 PHY	IEEE 802.11 PHY

З таблиці 1.3 видно стандарти Thread та ZigBee беруть за основу стандарти IEEE 802.15.4. Це дає змогу їх легкого впровадження та масштабування у бездротовій сенсорній мережі.

Підводячи підсумки з таблиць 1.1-3 можна прийти до наступного висновку. Технології та стандарти ZigBee та Thread більше за всіх підходять для створення БСМ, перш за все через значну енергоефективність та легку масштабованість.

Також слід наголосити що дані бездротові системи працюють на менших швидкостях. Насамперед технології ZigBee та Thread мають максимальну швидкість в 250 кБ/с, але швидкість передачі залежить від багатьох факторів:

наявності перешкод, відстані від вузла до вузла, тощо. Через це швидкість зменшується до 30 – 40 кбіт/с при передачі даних від одного вузла до іншого.

Використання стеку протоколів IP значно спрощує впровадження нових вузлів до вже існуючої мережі (легка масштабованість), та зменшує коштовність мережі в цілому, через відсутність проміжного обладнання.

Критерій самоорганізації, як і критерій надлишковості, також є важливою характеристикою при виборі технології. Так обидві ці технології мають достатню надлишковість зв'язків, що є основною вимогою для надання відмовостійкості БСМ. Самоорганізація забезпечує простоту розгортання сенсорної мережі в цілому. Надає змогу легкого масштабування та виконує швидко зміну зв'язків між координаторами та маршрутизаторами у разі несправності останніх.

При огляді стандартів IEEE 802.11, IEEE 802.15.1 та IEEE 802.15.4 можна виділити переваги і недоліки у кожній з них. Так у стандарті IEEE 802.11 великий розмір пакетів та швидкість їх передачі, проте високий рівень енергоспоживання (у порівнянні з розглянутими стандартами IEEE 802.15.x) майже повністю нівелює ці переваги. Розгортання БСМ лише на основі стандарту IEEE 802.11 є хибним. Даний стандарт доцільно використовувати для покращення показників швидкодії окремих вузлів бездротової системи. Стандарт IEEE 802.15.1 попри малий розмір пакетів та невелику площу покриття має велику пропускну (у порівнянні зі стандартом 802.15.4) спроможність, а використання додаткового обладнання (оскільки для впровадження пристроїв на основі цього стандарту в БСМ необхідний IP-шлюз) додає коштовності при розгортанні цих пристроїв. Стандарт IEEE 802.15.4 майже повна протилежність стандарту IEEE 802.15.1, оскільки дана технологія має більшу зону покриття (через значно більшу можливу кількість пристроїв у мережі). Проте дана перевага витікає у недолік, а саме меншу пропускну здатність такої мережі.

#### 1.4. Властивості бездротових сенсорних мереж

Основною вимогою для розгортання бездротової сенсорної мережі є здатність до самоорганізації та надання відмовостійкості даної мережі. Насамперед

це задається великою кількістю елементів у даній мережі, що в свою чергу зумовлює надмірну кількість зв'язків між елементами. Також невід'ємними складовими відмовостійкої мережі є наступні властивості:

- надмірність;
- живучість;
- відмовостійкість;
- стійкості функціонування;
- надійність.

Дані властивості доцільно розглядати при порівняно невеликих термінах експлуатації мережі, коли не береться до уваги вплив зовнішніх подразників. Якщо ж розглядати увесь життєвий цикл БСМ, то доречно додати ще одну властивість, яка характеризує саме здатність мережі протидіяти впливу цих факторів – функціональну стійкість.

**Надмірність.** Дана властивість описується здатністю мережі копіювати (дублювання) як функції, так і відокремлені елементи у системі, що передбачає її безвідмовне функціонування у разі дії факторів, що зумовили повний, або частковий вихід з ладу елементів мережі. Проте не всі елементи мережі БСМ слід дублювати. Це призведе до значного підвищення коштовності та збільшення енергоспоживання даної мережі. У зв'язку з цим дана властивість повинна застосовуватись вибірково до елементів БСМ, у першу чергу до тих елементів, які, у разі виходу з ладу, тягнуть за собою часткову або повну втрату функціоналу мережі.

**Живучість** системи. Під живучістю системи мають на увазі здатність надавати заздалегідь обраний коефіцієнт зв'язності між елементами сенсорної мережі. Якщо на БСМ діють зовнішні фактори, які зумовили вихід з ладу пристрою мережі, дана властивість виконує певні функції для відновлення зв'язності між пристроями [6].

Живучість прийнято розділяти на дві складові: структурну живучість та функціональну живучість. Для досліджень першої складової слід оцінювати живучість при деяких гіпотезах, що надає змогу звести дану задачу до задачі

аналізу зв'язаності графів, яка, в свою чергу, зводиться до оцінки ймовірності відновлення мережі при пошкоджуваних діях. Щодо функціональної живучості, слід використовувати моделі ймовірності, матричні та графові, для дослідження даної властивості. У деяких працях розрізняють іще одну складову – ієрархічну модель живучості [7]. Дана модель базується на аналізі підсистем нижнього рівня (термінали, шлюзи комунікації, апарати радіодоступу, тощо) та розглядає їх живучість на рівні композиції цих підсистем.

**Відмовостійкість.** Властивість, яка бере за мету продовжування функціонування, у разі утворення збоїв та порушень працездатності в деяких частинах мережі. У залежності від ступеню несправності падає і працездатність системи, яка може вкрай негативно вплинути на функціональність сервісів та служб [8]. На сьогодні розрізняють чотири типи систем за їх якісною характеристикою відмовостійкості, які пропорційно відображають максимальний час простою (непрацездатного стану) у годинах на рік. На таблиці 1.4 вказано дані типи систем.

Таблиця 1.4 – тип відмовостійких систем

Тип системи	Рівень відмовостійкості	Максимальний час простою за рік
Звичайна	99	3,5 доби
Високонадійна	99,9	8,5 годин
Відмовостійка	99,99	1 година
Безвідмовна	99,999	5 хвилин на рік

Також існує декілька вимог до бездротових сенсорних мереж на основі відмовостійкої властивості, серед них:

- вміння системи виявляти помилки;
- вміння системи локалізувати проблеми справності;
- обмеження поширення несправності на інші елементи мережі;
- резервування сервісів (вміння системи обирати принаймні дві точки відновлення);
- поновлення працездатності мережі, з подальшим відновлення працездатності сервісів.

**Стійкість функціонування.** Дана властивість опирається на взаємодію сенсорної системи з навколишнім середовищем, та виділяє здатність БСМ зберігати свою структуру та функціональність [9]. Також, за умов втручання до сенсорної мережі зовнішніх факторів, стійкість функціонування характеризується здатністю відтворюватись до свого працездатного стану.

**Надійність** системи. За стандартом ДСТУ 2860-94 надійність – це здатність елемента мережі зберігати у певний проміжок часу спроможність виконувати певний перелік функції, які визначені на основі системних параметрів. Вимоги до даної властивості є різні. Вони залежать від сфери діяльності, в якій буде використовуватись дана БСМ, функціонального призначення окремих елементів мережі та наявних умов використання [10].

Окремою властивістю можна виділити структурну надійність. Зазвичай дану властивість використовують у масштабних сенсорних мережах. Основною відмінністю структурної надійності від надійності є проектування системи, де за основу досліджуваного показника береться ймовірність безвідмовної роботи елемента мережі, що обчислюється на основі характеристик даного об'єкту. Дана властивість є найточнішим показником надійності.

**Функціональна стійкість.** Дана властивість, у порівнянні з попередніми, відносно нова. Функціональна стійкість базується на забезпеченні працездатності окремих складових, на базі перерозподілу існуючого резерву надмірності. Забезпечення даної властивості надається на основі аналізування системи механізмів, що складається з сукупності ресурсів. Виділяють декілька рівнів забезпечення функціональної стійкості, серед них:

- системно-функціональний рівень;
- концептуальний рівень;
- організаційно-технічний.

При виборі будь якого технології побудови БСМ та обраного стеку протоколів є змога виокремити абстрактні рівні функціонування сенсорної мережі:

- рівень контролю;
- рівень управління;

- рівень даних;
- рівень енергоспоживання.

У таблиці 1.5 представлено архітектуру рівнів функціонування на базі моделі OSI. Слід зазначити що надання функціональної стійкості на кожному рівні дає змогу забезпечити дану властивість для всієї системи.

Таблиця 1.5 – архітектура рівнів БСМ відносно моделі OSI

Прикладний рівень	Рівень контролю
Транспортний рівень	
Мережевий рівень	Рівень управління
Прикладний рівень	Рівень даних
Фізичний рівень	Рівень енергоспоживання

На рівні контролю гарантується можливість передачі пакетів. Насамперед – це зумовлюється функціонуванням таблиць маршрутизації та комутації. Рівень управління слугує для підтвердження працездатності мережі та передачі трафіку між мережевими пристроями, також на цьому рівні відбувається моніторинг за життєвим циклом окремого вузла мережі. Рівень даних відповідає за передачу трафіку між пристроями.

## Висновки до розділу I

Виконано аналіз існуючих типів та класифікацій бездротових сенсорних мереж. Розглянуто сфери застосування, існуючі технології передачі даних (у тому числі і бездротові), визначена майбутня можливість масштабування сенсорної мережі, розглянуто способи живлення та радіус покриття елементів мережі, існуючі типи вузлів та їх функції. Проведено оцінку особливостей функціонування БСМ, її способи побудови. Даний аналіз спрямований на визначення оптимальних методів для довгострокового функціонування сенсорної мережі спеціального

призначення за умов впливу зовнішніх та/або внутрішніх факторів, що породжують повну або часткову втрату працездатності елементів мережі.

Досліджено стандарти, що лежать в основі технологій бездротової передачі даних, які наразі використовуються у БСМ. Проведено їх детальний аналіз, та вплив обраних стандартів на кількісні та якісні характеристики функціонування мережі.

Розглянуто існуючі властивості сенсорних мереж з урахуванням нової властивості, а саме функціональної стійкості мережі. Забезпечення даної властивості дає змогу БСМ «відбивати» вплив зовнішніх та внутрішніх факторів, які негативно впливають на функціонуванні та працездатності мережі у цілому, шляхом надання надмірності для певних елементів або груп елементів мережі. Проаналізовано властивість самоорганізації, як бере за мету автоматизоване встановлення зв'язків між елементами мережі, що, в свою чергу, спрощує процес управління, у тому числі і видами надмірності. Для вдалого та кращого функціонування властивості функціональної стійкості необхідно впровадити її на кожному рівні архітектури БСМ.

## II. РОЗРОБКА ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ПОБУДОВИ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

### II.1 Модель функціонування бездротової сенсорної мережі спеціального призначення

Складні бездротові сенсорні мережі, до яких і належить сенсорної мережі спеціального призначення, можна представити рядом тих чи інших властивостей, які в свою чергу характеризуватимуть стан працездатності та функціонування в цілому. Надання БСМ можливості працездатного стану в умовах дії зовнішніх та/або внутрішніх факторів, які негативно впливають на працездатність мережі, є основним завданням на сьогоднішній день у даній сфері діяльності.

Основним завданням як сенсорної мережі спеціального призначення, так і БСМ у цілому є збір та обробка даних, які надаються мережі від кінцевих приладів (сенсорів) до центру обробки, або до серверів для їх подальшого зберігання.

Бездротові сенсорні мережі на даний момент реалізуються за допомогою багатьох стандартів та технологій, причому для різного виду діяльності мережі використовуються і різні види технологій, залежно від характеристик приладів, які використовують у тій чи іншій БСМ. Дані характеристики можуть відрізнятися за швидкістю передачі даних, рівнем використання енергоресурсів, дальністю передачі даних, об'ємом обчислювальних ресурсів, тощо.

Незалежно від вибору технологій, за допомогою яких буде спроектовано БСМ, надання функціональної стійкості є найважливішою властивістю сенсорної мережі, завдяки тому що дана властивість використовується на всіх рівнях «життєдіяльності» мережі. В першу чергу дана властивість впливає на кінцеву коштовність мережі та зменшення впливу людини при обслуговуванні пристроїв мережі упродовж всього терміну їх експлуатації [11]. Впровадження функціональної стійкості у сенсорні мережу відбувається при дотриманні наступних етапів:

- виявлення позаштатної ситуації;
- визначення позаштатної ситуації;

- відновлення працездатності системи.

Однак не завжди алгоритм дій вкладається в три етапи. Бувають випадки коли необхідні додаткові процедури та рішення, для того щоб відновити працездатність мережі. До таких «додаткових» етапів відносять:

- розпізнавання області надмірності;
- оцінка структурного стану БСМ;
- створення процедури (або використання існуючого) оптимального використання надмірності.

Виявлення позаштатної ситуації. На першому етапі функціональної стійкості відбувається порівняння поточних параметрів мережі та параметрів які визначаються заздалегідь.

Визначення позаштатної ситуації. На даному етапі обчислюється повна інформація про виявлену позаштатну ситуацію. Основне завдання даного етапу виявлення місця розташування пошкодженого елемента.

Етап відновлення працездатності системи слугує для усунення наслідків відмови працездатності пристрою та відновлення працездатності сенсорної мережі разом з усіма функціями даної мережі. Даний етап доцільно «розбити» на два другорядні етапи, які описані вище, а саме на:

- розпізнавання області надмірності (виявлення існуючої надмірності при нівелюванні наслідків, що виникли у разі виходу з ладу елемента мережі);
- створення процедури (оскільки надмірність є підсистемою БСМ, через те що вона використовує елементи які вже присутні в мережі, то даний етап слугує знаходженню раціонального використання даних елементів надмірності).

Заключним етапом функціональної стійкості є оцінка структурного стану БСМ. Через те що забезпечення функціональної стійкості виконується перед розгортанням сенсорної мережі, а саме на математичній моделі. На цьому етапі використовується метод, який покликаний оцінити точність методів, які були

використані на попередніх етапах, для подальшого впровадження у реальну сенсорну мережу [12].

У випадках, коли проходження по всіх вищеописаних етапах не є ефективними робиться висновок про повторне виконання даних етапів для більш вдалого забезпечення даної властивості.

На сьогоднішній день для аналізу стійкості використовують велику кількість методів аналізу. В свою чергу дані методи опираються на ознаки та критерії, які враховують особливості будь-якої бездротової мережі на основі класичної теорії стійкості. Дана теорія розділяється на дві складові, а саме поняття та визначення стійкості та методи визначення стійкості, які в свою чергу розділяються на певні критерії, які описані на рисунку 2.1.



Рисунок 2.1 – критерії класичної теорії стійкості

Виявлення пошкоджень під впливом внутрішніх чи зовнішніх факторів одна з першочергових задач для забезпечення функціональної стійкості. Визначення таких ситуацій проходить за деяким алгоритмом дій [15]:

- створення бази даних, де знаходяться параметри БСМ, за умови звичайного використання мережі;
- моніторинг параметрів мережі та своєчасне знаходження збоїв у них;
- знаходження методів та рекомендації задля усунення збоїв у мережі.

Наступна таблиця (таблиця 2.1) описує вплив властивостей на мережу, які так чи інакше впливають на функціонування безпроводної сенсорної мережі при її функціонуванні.

Таблиця 2.1 – вплив властивостей складних систем на мережу

Властивість	Суть властивості	Що є збудником	Забезпечення
Живучість	Протистояння зовнішнім факторам	Пошкодження при впливі навколишнього середовища	Захист внутрішніх комплектуючих від впливу зовнішніх факторів
Стійкість	Збереження координат елементів мережі	Спеціальні або випадкові зміни на вході системи	Способи управління по відхиленню
Відмовостійкість	Збереження працездатності при втраті певних елементів мережі	Внутрішні збої елементів мережі	Застосування резервних елементів мережі
Надійність	Збереження працездатності з плином часу	Внутрішні збої, які зумовлені загальним часом використання елементів мережі	Застосування перевірених елементів мережі та систем технічного обслуговування
Перешкодостійкість	Збереження інформації при її передачі	Вплив зовнішніх факторів та/або супротивника	Інформаційний захист каналів зв'язку
Функціональна стійкість	Збереження працездатності під дією зовнішніх та/або внутрішніх подразників	Внутрішні та/або зовнішні пошкодження пристрою, збої	Використання надлишковості

Далі доцільно буде розглянути основні види та фактори зовнішніх та внутрішніх подразників, які в той чи іншій мірі негативно впливають на коректне функціонування як окремих елементів мережі так і на БСМ у цілому. До таких факторів слід віднести:

- пошкодження (зумовлюється повним чи частковим пошкодженням елементів мережі під фізичним впливом природного чи штучного характеру. Даний вид впливу може призвести до повної втрати елемента мережі з подальшою повною чи частковою втратою функціоналу);
- збурення системи (процес, при якому з'єднання елементів мережі може частково або повністю зникнути. При помилках даного типу є можливість тимчасової втрати доступу до деяких сервісів та функцій мережі);
- відмови та збої (дані події можуть виникнути як під впливом зовнішніх факторів: некоректне встановлення чи налаштування елемента мережі; так і без впливу людини);
- інформаційний збурення (цілеспрямована атака супротивника з використанням шкідливого програмного забезпечення та/або спеціалізованого обладнання, яке направлене на внесення змін у первинні характеристики БСМ).

Виділяють декілька рівнів для забезпечення властивості функціональної стійкості у різних видах бездротових сенсорних мереж, у тому числі і для бездротових сенсорних мереж спеціального призначення, серед таких рівнів [16]:

- **Концептуальний** (на даному рівні обговорюються та визнаються завдання, які безпосередньо пов'язані з розробкою БСМ. На концептуальному рівні визначають: властивості які впливають на стійкість сенсорної мережі; показники функціональної стійкості; майбутні загрози які можуть виникнути у термін експлуатації даної мережі; методи за допомогою яких відбуватиметься відновлення мережі до працездатного стану);

- **Системно-функціональний** (основною задачею даного рівня є розробка методів за допомогою яких буде відбуватись коректна дія принципів функціональної стійкості);
- **Організаційно-технічний** (мета даного рівня врахувати особливості мережі та середовища, де дана мережа буде розгортатись; визначення дестабілізуючих чи негативних впливів, які можуть виникнути при установці чи у період експлуатації; розробка моделі безпроводної сенсорної мережі).

## II.2 Розробка математичної моделі бездротової сенсорної мережі спеціального призначення

Математична модель бездротової сенсорної мережі спеціального призначення повинна описувати структуру мережі, основні властивості ліній передачі даних між кінцевими пристроями та проміжними пристроями мережі. Також математична модель БСМ повинна забезпечувати управління надмірністю задля вдалого впровадження даної властивості при розгортанні мережі у реальному житті.

Припустимо що  $S$  – це стан нашої системи. Він характеризується множиною ознак за допомогою яких можливо встановити чи мережа знаходиться в працездатному стані або ж в стані несправності. Дана множина описується як

$$S = \{S_i^{(1)}, S_i^{(2)}, \dots, S_i^{(N)}\}.$$

Де  $S_i$  – це довільний стан, який визначається множиною станів з яких він складається.  $N$  в свою чергу це кількість складових даної системи. Слід зазначити що складові можуть виконувати як одну функцію, так і мати більш ширший функціонал (дві функції та більше) які зазначені заздалегідь.

Якість роботи бездротових сенсорних мереж спеціального призначення може різнитись, залежно від середовища де знаходиться мережа, або при інших

факторах. Через це функціонування БСМ може варіюватися в певних межах. Дані межі залежать від максимальних (або критичних) показників, які змінюються залежно від впливу зовнішніх та внутрішніх факторів, які діють на мережу. Виходячи з цього можливо зробити висновок що властивість функціональної стійкості залежить від деяких факторів, серед яких є:

- параметри середовища (кліматичні умови);
- параметри пристроїв (енергоємність приладів живлення, радіус дії пристроїв, швидкість та частота передачі даних тощо).

Для кращого аналізу фактору «параметри пристроїв», задля підвищення властивості функціональної стійкості БСМ, доцільно вирізнити три основні функції пристроїв з яких складається мережа:

- функція сенсора (в переважній більшості дану функцію забезпечують кінцеві пристрої. Дана функція забезпечує вимірювання параметрів середовища у якому перебуває даний пристрій);
- функція передатчика (дана функція забезпечуються на всіх пристроях мережі. Надає змогу передавати інформацію по каналам передачі даних);
- функція маршрутизатора (дана функція, у більшості своїй, присутня у проміжних пристроях мережі. Ця функція відповідає за прийом даних від сенсорів та подальше просування цих даних по каналам зв'язку до центру обробки інформації чи виділеного серверу).

Значною перевагою бездротового способу передачі даних над дротовим є те, що при бездротовій передачі елементи мережі (як кінцеві так і проміжні) мають властивість самоорганізації, тобто відбувається знаходження нового маршруту при зникненні попереднього, у разі виходу з ладу маршрутизатору при пошкодженні. Задля виконання умов для надання властивості функціональної стійкості для мереж спеціального призначення необхідно:

- забезпечити працездатність для всіх кінцевих елементів у період всього часу експлуатації мережі;

- гарантувати процес передачі між пристроями мережі по основних або ж резервних (у разі виходу з ладу перших) каналах передачі даних.

Характеристика БСМ описується наступним набором параметрів: швидкістю передачі даних між елементами мережі по каналах зв'язку; кількістю пристроїв у мережі; щільністю розміщення елементів мережі; прогнозованим часом роботи пристроїв; радіусом покриття пристроями мережі; пропускнуою здатністю елементів. Проте від кінцевих вимог та завдань, які були покладені на мережу, буде варіюватись і кінцева топологія даної сенсорної мережі.

Для кращого розуміння представимо топологію сенсорної мережі спеціального призначення як граф. При дослідженні моделі графа топології будемо застосовувати наступні параметри:

- потужність ребер;
- потужність вершин;
- валентність;
- матриці суміжності;
- коефіцієнт реберної зв'язності;
- коефіцієнт вузлової зв'язності.

Як правило у топології мережі прийнято вибирати один або декілька вузлів, які будуть виконувати роль керуючих. Основною задачею даних вузлів є збір даних, а деколи й управління іншими пристроями у мережі. Структура даного графу характеризується зв'язком елементу із сусідніми з ним елементами мережі.

Характеристика зв'язаності визначається двома факторами:

- характеристикою зв'язаності;
- існуючими показниками стійкості.

Задля дослідження математичної моделі будемо використовувати теорію функціональної стійкості. Дана теорію базується на таких показниках, як:

- реберна зав'язність – показник, що вказує на мінімальне число ребер. Причому збільшення даного показника приводить до незв'язного графу;

- вузлова (вершинна) зв'язність – показник, що вказує на мінімальне число вузлів. Причому збільшення відстані між елементами призводить до одновершинного графу;
- імовірність зв'язності – даний показник вказує на імовірність передачі інформації за час, який не перевищує вказаний заздалегідь.

При аналізі вищеписаних показників є можливість виявити наступні особливості:

- показники зв'язності здатні охарактеризувати структуру графа на поточний момент часу. Причому надійність даних вузлів та їх ліній зв'язку до уваги не береться;
- при підрахунках імовірності зв'язності є можливість використання параметрів: надійності пристрою, виду фізичного каналу, загальна зв'язність графу та наявність резервних ребер (каналів);
- імовірність вираховується лише по відношенню до пари вершин.

У матриці ймовірностей зв'язності вказуються усі пари вершин.

$$P = \|P_{ij}\|, \quad i, j = 1, 2, \dots, n.$$

Сумарний показник ймовірності зв'язності між елементами можна уявити у вигляді матриці.

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & P_{12} & \dots & P_{1n} \\ P_{21} & 0 & \dots & P_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{n1} & P_{n2} & \dots & 0 \end{bmatrix}.$$

Щодо критеріїв, за якими визначається рівень функціональної стійкості, то можна виділити наступні два критерії:

- **структурний критерій.** Мережа називається функціонально стійкою, якщо значення реберної та вершинної зв'язності більше та/або дорівнює двом, тобто

$$\chi(G) \geq 2 \cup \lambda(G) \geq 2.$$

- **Ймовірнісний критерій.** Мережа називається функціонально стійкою, якщо значення ймовірності зв'язності, між відповідними елементами мережі, не менше заданої

$$P_{ij}(t) \geq P_{ij}^3, i \neq j, i, j = 1, 2, \dots, n.$$

Стосовно властивості функціональної стійкості, то на основі вищеописаних показників та факторів можливо зробити наступний висновок, щодо задоволення показників властивості:

- коефіцієнт вузлової зв'язності  $\chi(G)$  показує максимальне число збоїв  $R_{\text{мод}}$  пристроїв, яке може бути присутнє у бездротовій сенсорній мережі спеціального призначення;

$$R_{\text{мод}} = \chi(G) - 1.$$

- коефіцієнт реберної зв'язності  $\lambda(G)$ , в свою чергу, показує на максимально допустиме число збоїв ліній передачі даних, яке може бути присутнє у БСМ, за умови що зберігається зв'язність між елементами мережі;

$$\lambda(G) = \min |S_j, j = 1, 2, \dots, m_s|.$$

тут  $S_j$  це  $j$ -та множина ребер, яка полягає у перерахуванні потужностей  $m_s$  графа;

- ймовірність зв'язності показує ймовірність передачі інформації від вузла  $i$  до вузла  $j$  за час, який не перевищує заданий. Даний показник

має свої переваги, оскільки даний показник покладається на: надійність мережевих пристроїв, наявність надмірності у мережі, зв'язність між елементами та технологію передачі даних між елементами мережі.

На основі даних критеріїв та за допомогою розрахунків можна визначити чи є мережа функціонально стійкою. Проте, під час розрахунків може виявитись що мережу не можна віднести як до функціонально стійкої, так і до функціонально нестійкої. Зумовлено це тим, що у такому випадку мережа знаходиться на межі функціональної стійкості. Аналіз таких структур вказує на те що мережі, які знаходяться на межі функціональної стійкості виконують увесь перелік завдань, що покладені на дану сенсорну мережу, проте вихід з ладу принаймні одного вузла з'єднання чи моста тягне за собою вихід з ладу мережі та/або втрату певного функціоналу.

Щоб надати мережі функціональної стійкості, слід визначити яка кількість мостів та вузлів з'єднання має дана топологія. Мостом називають ребро графа, яке поєднує два підграфи та якщо його зруйнувати утвориться двокомпонентний граф. Вузлом з'єднання називається елемент мережі, який поєднує два підграфи та при видаленні якого досліджуваний граф розіб'ється на двокомпонентний граф.

Вказана характеристика вказує на замалий рівень функціональної стійкості, через це необхідно впровадити до даної структури додаткові лінії передачі даних, задля використання їх у якості резервних та надані надмірності.

Визначити реберний чи вузловий запас можна за допомогою поняття зв'язності структури. Характеризується це кількістю відмов, які узмозі спричинити нестійкий стан сенсорної мережі.

Вузловий (вершинний) запас – число, яке показує відстань від обраного елемента з координатами  $(\lambda(G), \chi(G))$  до прямої  $\chi(G) = 1$ .

$$Z_v = \chi(G) - 1.$$

Реберний запас – число, яке показує відстань від обраного елемента з координатами  $(\lambda(G), \chi(G))$  до прямої  $\lambda(G) = 1$ .

$$Z_t = \lambda(G) - 1.$$

Рівень функціональної стійкості може визначатись аналітично чи графічно у вигляді коефіцієнту резерву функціональної стійкості.

## Висновки до розділу II

Визначено математичну модель сенсорної мережі спеціального призначення за умови її функціональної стійкості. Дана модель використовує у собі модель самоорганізації, оскільки переважно всі лінії зв'язку між елементами використовують бездротові канали передачі даних. Також за рахунок використання даного способу передачі даних можливе врахування особливостей мережі, що значно зменшує витрати на розгортанні мережі або ж впровадженні нових елементів (масштабуванні) у вже створену БСМ. Описана модель враховує більшість показників, які характерні для даного виду сенсорних мереж.

Визначено загальну модель функціонування бездротової сенсорної мережі спеціального призначення з детальним описом етапів впровадження властивості функціональної стійкості у бездротові сенсорні мережі з урахуванням додаткових етапів, таких як:

- розпізнавання області надмірності;
- оцінка структурного стану БСМ;
- створення процедури (або використання існуючого) оптимального використання надмірності.

Досліджено можливий вплив на БСМ спеціального призначення внутрішніх чи зовнішніх подразників з детальним описом подій, що зумовили збій у пристроях сенсорної мережі та можливими наслідками, які можуть трапитись у разі втрати кінцевого чи проміжного пристрою мережі, під дією вищеописаних впливів. Визначено перелік пошкоджень під впливом внутрішніх чи зовнішніх факторів та запропоновано дії для виявлення та уникання непередбачуваних ситуацій.

## РОЗДІЛ III. РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ПОБУДОВИ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

### III.1 Модельний приклад

Управління елементами мережі та каналами зв'язку а також моніторингу станів об'єктів – це перелік основних завдань, які будуть покладені при проектуванні та побудові бездротових сенсорних мереж спеціального призначення. Слідкування за показниками функціонування мережі дає змогу маніпулювати розподілом зв'язків між елементами мережі задля зменшення витрат ресурсів системи, водночас з використанням надмірності в плані використання додаткових вузлів мережі та додатковими каналами передачі даних між ними, для надання можливості нормального функціонування БСМ під негативним впливом внутрішніх ті/або зовнішніх факторів.

До таких негативних впливів на мережу при функціонуванні БСМ спеціального призначення можна віднести:

- значні витрати електроенергії коли пристрій виконує функцію приймача;
- часові витрати, у випадках коли відстань між пристроями мережі занадто велика;
- зашумленість каналу при передачі даних;
- наявність перешкод між елементами;
- несправність елементів мережі.

Для прикладу буде аналізовано сенсорну мережу, яка може використовуватись для автоматизації певних функцій прикордонних служб. Головною метою даної мережі є моніторинг та контроль за кордоном держави. БСМ базується на пристроях від компанії Advantech Corporation, серією ADAM шостої ревізії та програмним забезпеченням WebAccess 8.0 HMI/SCADA. При використанні вищевказаних пристроїв та ПЗ користувачі мають змогу власноруч налаштувати пристрої залежно від потреб та функцій які вони делегуватимуть на мережу. У випадку з мережами спеціального призначення це може бути контроль

за навколишнім середовищем (температура, вологість), IP-камери , тощо. Притому управління за всіма процесами можна виконувати дистанційно, за допомогою віртуальної панелі на персональному комп'ютері чи смартфоні.

Дана бездротова сенсорна мережа спеціального призначення здатна забезпечити:

- велику різноманітність бібліотеки редактора ПЗ, для налаштування сторінки виводу інформації, на якій може буде динамічно відображена інформація щодо функціонування як окремих елементів мережі, так сенсорної мережі у цілому; даних про несанкціонований перетин кордону, тощо;
- контроль за температурними показниками комплектуючих (процесора, вентилятора та інші) задля моніторингу справності пристрою;
- ведення архіву вимірювань.

Основними особливостями використання даної БСМ спеціального призначення є:

- великий термін експлуатації мережі за рахунок використання енергоефективних кінцевих приладів із змінним типом роботи (робочий режим / режим сну);
- надання автономного функціонування та самоорганізації сенсорної мережі у випадках коли вийшли з ладу окремі елементи мережі;
- використання надмірності не тільки для кінцевих та проміжних пристроїв, а і для виділених серверів, що надає змогу зберігати та обробляти інформацію над спостережуваними об'єктами;
- наявність у пристроях мережі вбудованої системи самодіагностики;
- можливість використовувати дротові канали передачі даних (у разі, якщо необхідна більша швидкість чи пропускна спроможність при передачі між вузлами мережі).

Складові елементи сенсорної мережі спеціального призначення:

- кінцеві вузли (сенсори), маршрутизатори, координатори;

- сервери збору інформації;
- ПЗ для аналізу та управління БСМ.

Проте при масштабуванні даної бездротової сенсорної мережі за технологіями ZigBee чи Threath можливі негативні впливи, коли у разі тих чи інших причин з ладу вийдуть елементи мережі, оскільки для даних технологій характерна топологія дерева, а з минулих розділів можна визначити що дана топологія мережі має низький рівень функціональної стійкості [21]. Це зумовлено тим що:

- топологія дерево має малу кількість альтернативних маршрутів;
- низький рівень вузлової та реберної зв'язності;
- низький рівень ймовірності зв'язності між елементами структури.

У зв'язку з цим слід дотримуватись інформаційної технології, розробленої у попередньому розділі, задля надання властивості функціональної стійкості БСМ спеціального призначення на етапі проектування сенсорної мережі. Через це слід обрати топологію, яка має дещо кращу функціональну стійкість. Насамперед до таких схем мереж належать трикутна, квадратна, шестикутна та кругова топологія. У таблиці 3.1 вказано формули для розрахунку кількості елементів мережі.

Таблиця 3.1 – таблиця розрахунків необхідних елементів мережі

Топологія	Кількість елементів
Трикутна	$N = 1.15 * A_t / a_s^2$
Квадратна	$N = A_t / a_s^2$
Шестикутна	$N = 0.77 * A_t / a_s^2$
Кругова	$N = (B / 2a_s) * (C / a_s + 1) + (B / 2a_s + 1) * (C / a_s)$

Дані формули дають змогу вказувати загальну кількість вузлів системи, де:

- $N$  – кількість елементів;
- $A_t$  – площа покриття;
- $a_s$  – відстань між елементами мережі;

За технологією ZigBee (IEEE 802.15.4) пристрої мають різний радіус дії, який залежить як від обраного мережевого обладнання так і від наявності перешкод між елементами. Зазначено що елементи з технологією IEEE 802.15.4 мають радіус дії

від 10 м до 100 м. У випадку якщо нам необхідно покрити площу розміром 1 га, то за даними формулами отримаємо кількість елементів мережі для кожної з топологій. Результати розрахунків вказані у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – результати розрахунків кількості елементів для різних топологій

Топологія	Кількість елементів		
	$r = 10\text{м}$	$r = 30\text{м}$	$r = 50\text{м}$
Трикутна	115	29	5
Квадратна	100	25	4
Шестикутна	77	20	3
Кругова	75	17	3

При аналізі таблиці вище видно що при будь-якій відстані між елементами найменш кількісною є кругова топологія, тому дана структура мережі є найбільш бажаною за умови великої площі покриття [22]. Через це топологія моделі матиме вигляд, як показано на рисунку 3.1.

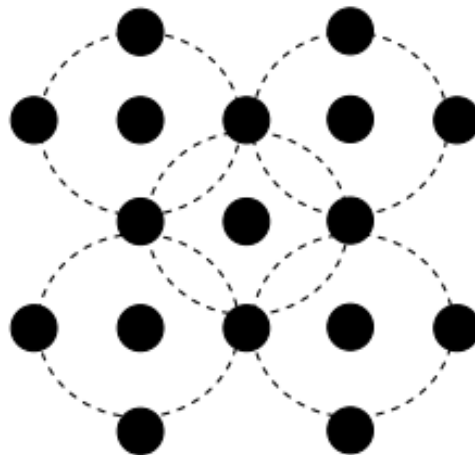


Рисунок 3.1 – топологія сенсорної мережі

Проте мало обрати лише топологію. Важливу роль відіграє і розміщення каналів зв'язку між елементами мережі, обрання вузла для сервера та координатора. Розглянемо дві топології мереж (рисунок 3.2), де у якості координатора буде взято 2 та 9 елемент (рахунок починається з верхнього лівого вузла та просувається з ліва на право і зверху вниз). Зеленим кольором показано вузол, який відповідає за функції координатора. У разі якщо координатор вийде з

ладу дану функцію може взяти на себе інший проміжний елемент за рахунок самоорганізації мережі [23].

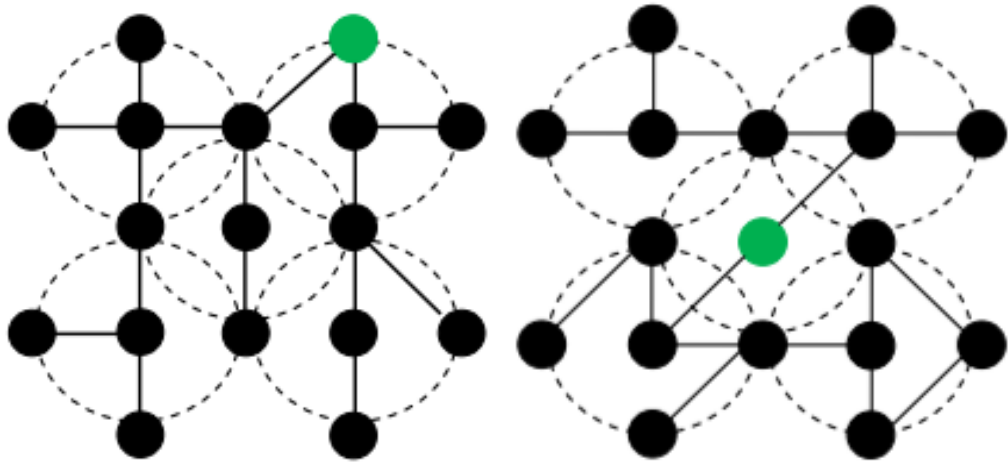


Рисунок 3.2 – схема з'єднання елементів мережі та обрання координатору

Для спрощення розуміння та більшої наглядності зобразимо дану топологію у вигляді ієрархічної топології (топологія дерево), з уже виявленими лініями зв'язку. Дані топології вказані на рисунку 3.3 (а, б).

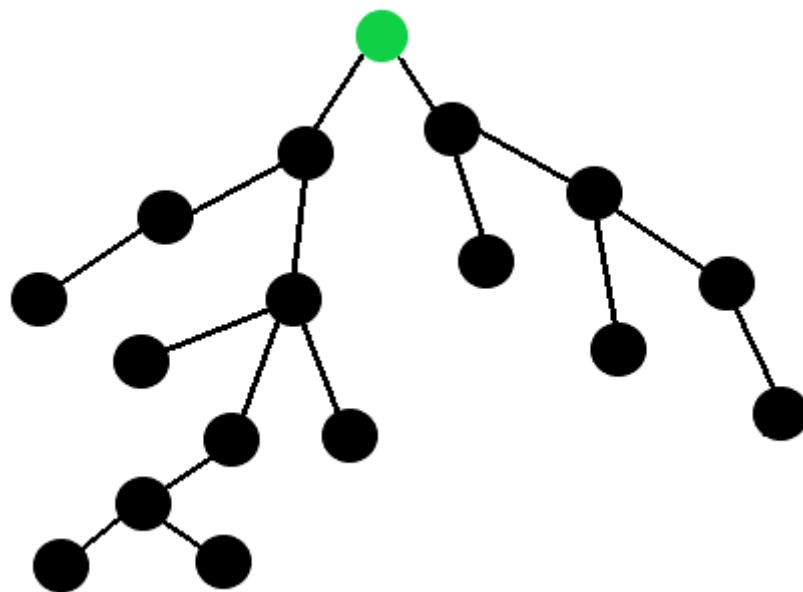


Рисунок 3.3 (а) – видозмінена топологія з 2-м елементом визначеним як координатор

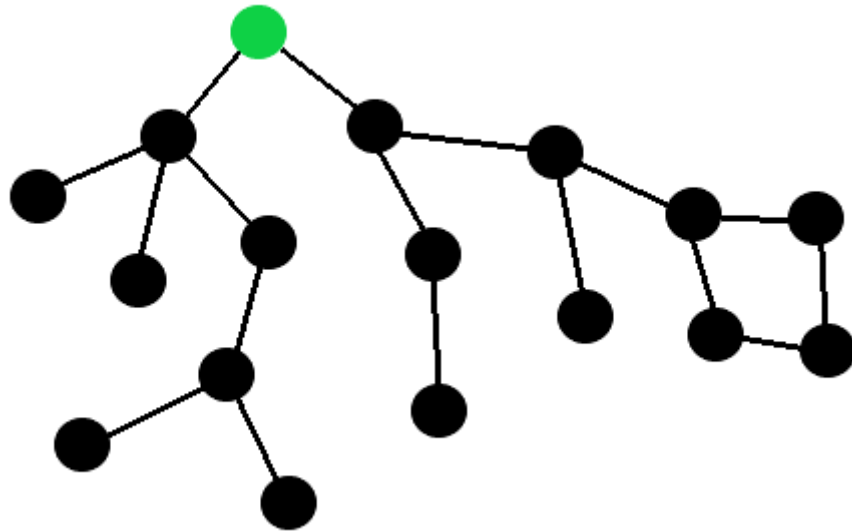


Рисунок 3.3 (б) – видозмінена топологія з 9-м елементом визначеним як координатор

Обравши випадок б) видозміненої топології сенсорної мережі отримаємо таблицю структури суміжності, яку зазначено у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – розташування елементів мережі та зв'язки між ними

Номер вузла	Локальна міра (кількість зв'язків)	Суміжність (з яким елементом є зв'язок)
1	1	4
2	1	6
3	1	4
4	3	1, 3, 5
5	2	4, 6
6	4	2, 5, 7, 9
7	1	6
8	2	11, 12
9	2	6, 12
10	2	14, 15
11	1	8
12	3	8, 9, 13
13	3	12, 14, 16
14	3	10, 13, 17
15	2	10, 17
16	1	13
17	2	14, 15

На основі вищевказаної таблиці виконаємо аналіз БСМ задля більш точної оцінки властивості функціональної стійкості [17].

1. Структура даної топології являє собою дерево з наперед визначеними каналами зв'язку. Отриманий граф являється зв'язним та однокомпонентним.
2. Структура мережі налічує 17 елементів мережі, враховуючи кінцеві пристрої та координатор.
3. Структура налічує 17 каналів зв'язку. У таблиці 3.3 зазначено який елемент мережі з яким елементом має канал зв'язку.
4. Міра вершинної зв'язності та міра реберної зв'язності дорівнює 1.
5. Вершинний та ребровий резерв функціональної стійкості дорівнює 0.
6. Ймовірність зв'язності має змінну величину і варіюється у межах від 0,5 до 0,95. У зв'язку з цим буде аналізовано декілька коефіцієнтів зв'язності. Так ми маємо три коефіцієнти зв'язності, а саме: 0,5; 0,7; 0,95. Розрахунки, які пов'язані з підрахунком ймовірності зв'язності буде розглянуто далі у відповідних таблицях.

При проектуванні сенсорної мережі необхідно наперед оцінити приблизний час роботи елементів БСМ, задля розуміння коли знадобиться замінити акумулятори. Щодо витрачання енергоресурсів пристроями, то ця величина є змінною, оскільки більшість приладів мають змінний режим роботи [18]. На рисунку 3.4 вказано режим роботи датчиків мережі.

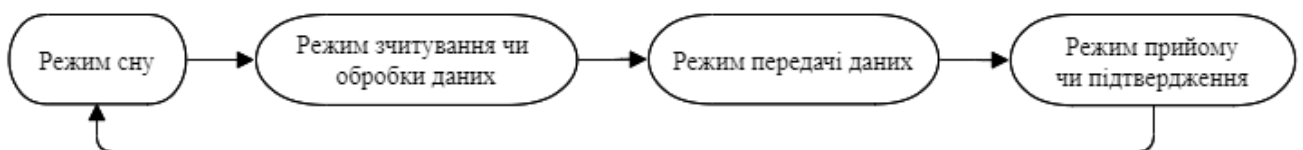


Рисунок 3.4 – режим роботи кінцевих елементів сенсорної мережі

Детальніше про режими роботи та споживання електроенергії при даних режим показано у таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – режими роботи елементів мережі та їхні затрати енергоресурсів

Режим роботи	Затрати енергоресурсів, мВт
Прийом	50
Передача	43
Обробка	18
Режим сну	0,04

Використовуючи дані з таблиці вище та маючи характеристику ємності акумулятора, взятої з переліку характеристик пристрою, можна оцінити приблизний час роботи ( $t$ ) елемента БСМ за формулою

$$t = E / P$$

де  $E$  – початкова енергоємність акумулятора чи батареї,  $P$  – витрачання енергоресурсів при експлуатації пристрою.

### III.2 Рекомендації до підвищення ефективності мережі

Задля підвищення критерію функціональної стійкості для БСМ спеціального призначення збільшимо кількість ліній зв'язку, тим самим підвищимо значення надмірності для початкового графу (рисунк 3.3 б) та визначмо ймовірність зв'язності між елементами мережі [19, 20].

При аналізі критеріїв сенсорної мережі спеціального призначення на основі властивості функціональної стійкості отримаємо:

1. Оскільки вершинний та ребровий запас = 0, то і запас функціональної стійкості теж = 0. Це означає що у разі виходу з ладу координатора топологія розділиться на дві складові частини, що веде до погіршення функціонування сенсорної мережі у цілому.

2. Дана структура знаходиться на межі функціональної стійкості. Заданого рівня надмірності не вистачає для забезпечення функціональної стійкості та функціонування мережі у цілому при дії негативних факторів, які можуть спричинити вихід з працездатного стану елементів мережі. Для забезпечення функціональної стійкості для БСМ спеціального призначення виникає необхідність у оптимізації та наданні більшого коефіцієнту надмірності.

Для кращої наглядності зробимо матрицю суміжності у вигляді таблиці 3.5, за умови що ймовірність передачі даних по каналам зв'язку залишиться незмінною і дорівнюватиме 0,9.

Таблиця 3.5 – матриця суміжності для початкового графу

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0

Для підвищення показника функціональної стійкості необхідно надати надмірності до початкової топології сенсорної мережі спеціального призначення шляхом впровадження додаткових ліній зв'язку. На рисунках 3.5-7 вказано топології, у яких між певними елементами мережі додано нові канали зв'язку 6, 14 та 32 канали відповідно. У таблиці 3.6-8 вказано матриці суміжності для новостворених топологій.

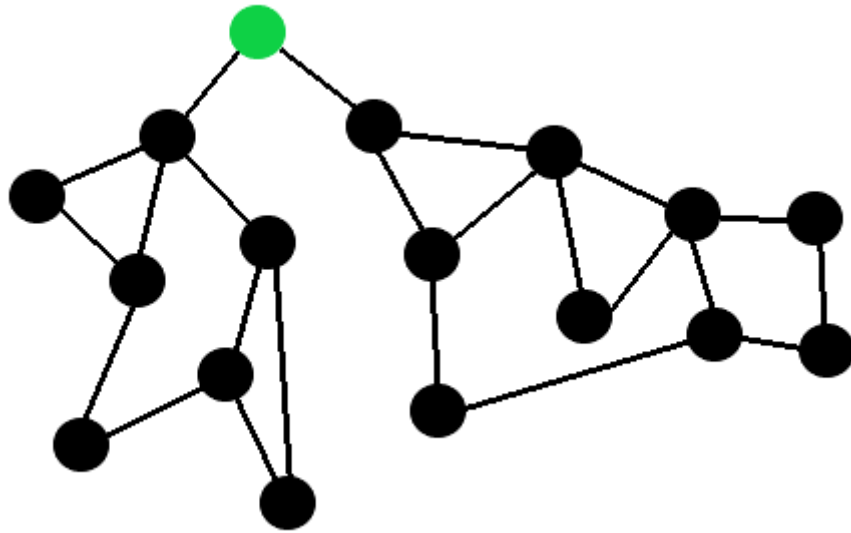


Рисунок 3.5 – початковий граф з додатковими 6-ма каналами зв'язку між елементами мережі

Таблиця 3.6 – матриця суміжності для початкового графу з додатковими 6-ма каналами зв'язку між елементами мережі

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
7	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	0
11	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0

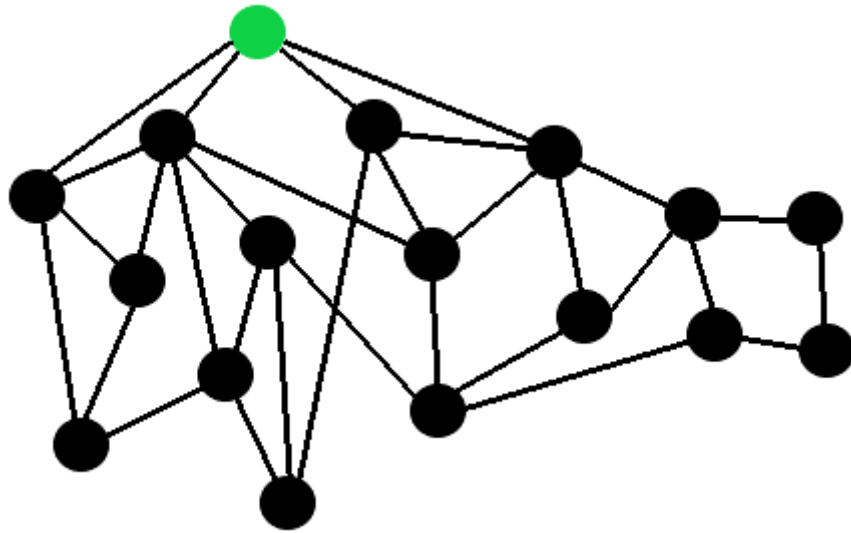


Рисунок 3.6 – початковий граф з додатковими 14-ма каналами зв'язку між елементами мережі

Таблиця 3.7 – матриця суміжності для початкового графу з додатковими 14-ма каналами зв'язку між елементами мережі

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
4	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
6	0	1	0	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
7	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0
9	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0
11	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0
12	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	1	0	1	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0

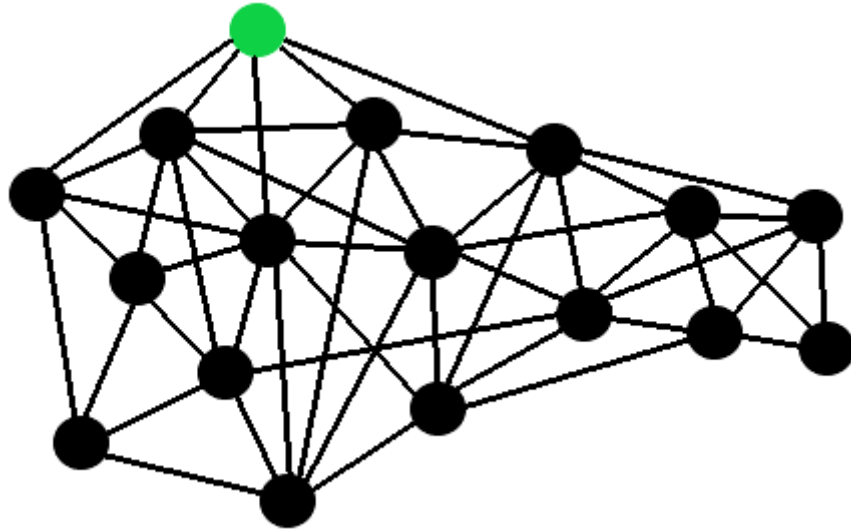


Рисунок 3.7 – початковий граф з додатковими 32-ма каналами зв'язку між елементами мережі

Таблиця 3.8 – матриця суміжності для початкового графу з додатковими 32-ма каналами зв'язку між елементами мережі

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0
4	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
5	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0
6	0	1	0	1	1	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0
7	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	0
9	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1
11	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0
12	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1
14	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1
16	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	1
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	0

Для знаходження ймовірності зв'язності між двома вершинами ( $P_{3\beta}$ ) скористаємось формулою

$$P_{зв} = \sum_{i=1}^k P(B_i)$$

Де  $B_i$  – ймовірність події, яка полягає в тому, що принаймні існує один шлях між двома вершинами графу,  $P(B_i)$  – ймовірність такої події, а  $k$  – кількість сприятливих випадків. Скориставшись даною формулою зобразимо таблиці зв'язності елементів мережі при коефіцієнтах зв'язності 0,5; 0,7 та 0,95. Результати демонструють, що при збільшенні каналів зв'язку ймовірність зв'язності між елементами теж збільшується, проте при коефіцієнті зв'язності 0,95 впровадження нових КЗ не призведе до покращення функціональної стійкості, оскільки подальше збільшення зв'язків являється коштовним та не є рентабельним. Детальніше з таблицею зв'язності можна ознайомитись у «Додатку А».

Проаналізувавши дані таблиці можна зробити наступний висновок, що при збільшенні каналів зв'язку між елементами зростає ймовірність зв'язності. За результатами моделювання можна визначити значення функціональної стійкості. У таблиці 3.9 вказано топологічні значення функціональної стійкості отриманих бездротових сенсорних мереж.

Таблиця 3.9 – значення функціональної стійкості отриманих мереж

Топологія	Вершинна зв'язність	Реберна зв'язність	Резерв вершинної зв'язності	Резерв реберної зв'язності	Рівень функціональної стійкості (ФС)
Початкова	1	1	0	0	Межа ФС
З 6-ма додатковими лініями	1	1	0	0	Межа ФС
З 14-ма додатковими лініями	4	4	3	3	ФС
З 32-ма додатковими лініями	5	5	4	4	ФС

У даному випадку початкова мережа та мережа з 6-ма додатковими каналами зв'язку знаходиться на межі властивості функціональної стійкості. Це означає, що

при впливі зовнішніх та/або внутрішніх факторів, які негативно впливатимуть на функціонування БСМ, велика ймовірність втрати певної функціональності мережі. Удосконалені мережі з 14-ма та 32-ма додатковими каналами передачі даних напроти знаходяться на рівні функціональної стійкості. Показники резервної реберної та вершинної зв'язності, в свою чергу, вказують на максимально можливу кількість втрачених зв'язків між елементами мережі без втрати функціоналу, або дана втрата не є критичною для коректного функціонування мережі.

### Висновки до розділу III

Обрано оптимальну структуру мережі шляхом визначення мінімальної кількості елементів для покриття певної ділянки. Обрано мережеві пристрої, які можуть бути використані у побудові бездротової сенсорної мережі спеціального призначення. Визначено можливий негативний вплив зовнішніх та внутрішніх факторів на мережу та особливості використання даної мережі спеціального призначення.

Приведено модельний приклад бездротової сенсорної мережі спеціального призначення, яка використовується для моніторингу за навколишнім середовищем та контролем за кордоном. При аналізі даного модельного прикладу було виявлено що коефіцієнт функціональної стійкості не є достатнім. Це тягне за собою негативні наслідки, оскільки негативний вплив зовнішніх або внутрішніх подразників можуть негативно вплинути на загальну працездатність сенсорної мережі та втрати певного функціоналу при виході з ладу одного або декількох елементів БСМ.

Запропоновано методи підвищення ефективності мережі, а саме при збільшенні надмірності, шляхом надавання додаткових ліній передачі даних, значення функціональної стійкості також збільшується завдяки зростанню ймовірності зв'язності між елементами сенсорної мережі. Слід зазначити, що даний спосіб не є стовідсотково дійсним для всіх випадків, оскільки при замалому збільшенні зв'язків між елементами мережа знаходилась на межі функціональної

стійкості. Проте подальше вкладення коштів, для надання надмірності мережі, забезпечить БСМ функціональною стійкістю.

За отриманими даними визначено на якому рівні функціональної стійкості знаходяться початкова та видозмінені топології сенсорної мережі та знайдено математичну модель (таблиця 3.9), яка задовольняє значення властивості функціональної стійкості. Такі сенсорні мережі зберігають свою працездатність під негативним впливом зовнішніх та внутрішніх факторів та навіть при виходу з ладу одного чи декількох елементів зберігають свою функціональність відносно початкового переліку функцій, яких надає мережа при нормальному функціонуванні.

## ВИСНОВКИ

У результаті кваліфікаційної бакалаврської роботи обґрунтовано інформаційну технологію побудови сенсорної мережі спеціального призначення, яка при наданні надмірності та забезпечені функціональної стійкості мережі дозволяє зберігати функції БСМ під впливом факторів, які можуть негативно вплинути на працездатність мережі. У ході виконання основні результати роботи полягають у наступному:

1. Проаналізовано існуючі типи та класифікації бездротових сенсорних мереж. Розглянуто сфери застосування сенсорних мереж, існуючі технології передачі даних, визначено можливість масштабування сенсорної мережі, розглянуто способи живлення та радіус покриття елементів мережі, існуючі типи пристроїв БСМ та їх функції. Проведено оцінку особливостей функціонування сенсорних мереж спеціального призначення та їх способи побудови. Даний аналіз спрямований на знаходження оптимальних методів для довгострокового функціонування сенсорної мережі під впливом умов зовнішнього та/або внутрішнього характеру, що можуть спричинити повну або часткову втрату працездатності елементів мережі.

2. Досліджено стандарти, які наразі використовуються при побудові сенсорних мереж, що лежать в основі технологій бездротової передачі даних. Проведено їх детальний аналіз, та вплив обраних стандартів на кількісні та якісні характеристики функціонування мережі.

3. Розглянуто властивість функціональної стійкості мережі. Насамперед, забезпечення цієї властивості надає змогу сенсорній мережі парировати вплив зовнішніх та внутрішніх факторів, які можуть негативно відобразитись на функціонуванні мережі. Завдяки наданню надмірності для певних елементів або сукупності елементів мережі можливо домогтися кращих показників функціональної стійкості для БСМ спеціального призначення. Проаналізовано властивість самоорганізації. Дана властивість покликана автоматизувати

встановлення зв'язків між елементами мережі, задля спрощення процесу управління.

4. Визначено математичну модель сенсорної мережі спеціального призначення за умови надання їй функціональної стійкості. Описана модель враховує більшість показників, які характерні для даного виду сенсорних мереж. Визначено загальну модель функціонування сенсорної мережі з детальним описом етапів впровадження властивості функціональної стійкості.

5. Досліджено можливий негативний вплив на сенсорну мережу спеціального призначення з боку внутрішніх чи зовнішніх подразників та детально описано події, що зумовили цей збій або вихід з ладу пристроїв сенсорної мережі і можливими наслідками, які можуть виникнути у разі втрати кінцевого чи проміжного пристрою;

6. Приведено модельний приклад бездротової сенсорної мережі спеціального призначення, яка використовується для моніторингу за навколишнім середовищем та контролем за кордоном. При аналізі даного модельного прикладу було виявлено що коефіцієнт функціональної стійкості не є достатнім. Це тягне за собою негативні наслідки, оскільки негативний вплив зовнішніх або внутрішніх подразників можуть негативно вплинути на загальну працездатність сенсорної мережі та втрати певного функціоналу при виході з ладу одного або декількох елементів БСМ.

7. Запропоновано методи підвищення ефективності мережі за рахунок збільшення надмірності. Визначено що при надаванні додаткових ліній передачі даних значення функціональної стійкості збільшується завдяки зростанню ймовірності зв'язності між елементами сенсорної мережі.

8. Дані результати можуть бути використані при розробці бездротових сенсорних мереж спеціального призначення для удосконалення функціональності даних мереж за рахунок надання функціональної стійкості її елементам. Подальший напрямок досліджень, в даній галузі, сприятиме більш вдалому впровадженні властивості завдяки впровадженню функціональної стійкості на всіх рівнях функціонування бездротових сенсорних мереж.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Барабаш О. В. Аналіз побудови мережі відеоконтролю пунктів митного спостереження на основі функціонально стійкої системи / О. В. Барабаш, С. В. Бодров, А. П. Мусієнко // Зв'язок. – 2014. – № 2. – С. 8 – 11.
2. Барабаш О.В. Вибір показників та критеріїв при оцінюванні функціональної стійкості системи розвідки повітряного противника та оповіщення на етапі її побудови / О.В. Барабаш, В.В. Кіреєнко // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. – 2013. – №3. – С. 5 – 7.
3. Барабаш О. В. Математична модель забезпечення функціональної стійкості мобільних систем / О. В. Барабаш, Н. М. Берназ // Системи обробки інформації. – 2015. – Вип. 12. – С. 97 – 100.
4. Барабаш О. В. Методика аналізу структурної функціональної стійкості розгалуженої інформаційної мережі / О. В. Барабаш, А. Ф. Конограй, І. П. Саланда // Телекомунікаційні та інформаційні технології. – 2017. – № 3. – С. 27–35.
5. Барабаш О. В. Поняття та визначення властивості функціональної стійкості системи розвідки повітряного противника та оповіщення / О. В. Барабаш, В. В. Кіреєнко // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – 2013. – Вип. 44. – С. 12 – 17.
6. Воротніков В. В. Методика підвищення живучості інформаційно-комунікаційної мережі / В. В. Воротніков, О. С. Бойченко, Є. О. Гриневич. // Системи обробки інформації. – 2017. – №5. – С. 69–75.
7. Галелюка І. Б. Моделювання бездротових сенсорних мереж / І. Б. Галелюка // Комп'ютерні засоби, мережі та системи. – 2015. – № 14. – С. 141–150.
8. Говорущенко Т. О. Особливості відмовостійких комп'ютерних систем з програмованою логікою як об'єктів діагностування / Т. О. Говорущенко, Є. Г. Гнатчук. // Вісник Хмельницького національного університету. – 2010. – №5. – С. 222–226.
9. Додонов А.Г. Живучесть информационных систем / А.Г. Додонов, Д.В. Ландэ. – К.: Наук. думка, 2011. – 256 с.
10. Кафідова О. В. Спосіб підвищення ефективності безпроводних сенсорних мереж / О. В. Кафідова, О. Г. Гуйда. // Вісник АМУ серія «Техніка». – 2014. – №1. – С. 66–76.
11. Кушнерова Н. І. Формалізована постановка синтезу оптимально розподіленої структури системи прогнозування нештатних ситуацій /

- Н. І. Кушнерова. // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2014. – №4. – С. 93–97.
12. Кравченко Ю. В. Визначення проблематики теорії функціональної стійкості щодо застосування в комп'ютерних системах / Ю. В. Кравченко, Ю. Нікіфоров. // Телекомунікаційні та інформаційні технології. – 2014. – №1. – С. 12–18.
13. Макаренко А. Ю. Бездротові технології передачі даних Wi-Fi, Bluetooth та ZigBee / А. Ю. Макаренко, А. О. Парфенова, С. Б. Могильний. // Вісник Національного технічного університету України "КПІ" Серія – Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2010. – №41. – С. 171–181.
14. Краснобаев В. А. Анализ энергоэффективности беспроводной сенсорной сети / В. А. Краснобаев, Р. А. Горбенко. // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – 2014. – №4. – С. 20–23.
15. Машков О. В. Методи побудови функціонально стійких складних динамічних систем / О. В. Машков, О. А. Кононов, Д. В. Пекарев. // ВІСНИК ЖДТУ. – 2006. – С. 93 – 103.
16. Машков О. Математичні моделі і методи забезпечення функціональної стійкості ієрархічних організаційних систем управління / О. Машков, В. Косенко. // X Міжнародна науково-практична конференція авіаційна та експериментальна психологія у контексті технологічних досягнень. – 2017. – № 10.
17. Нечепуренко М.И. Алгоритмы и программы решения задач на графах и сетях/ М.И. Нечепуренко, В.К. Попков, С.М. Майнагашев и др. – Новосибирск: Наука. Сиб. Отд-ние, 1990. – 515 с.
18. Саланда І.П. Методи пошуку оптимальних маршрутів графа структури розгалуженої інформаційної мережі за заданим критерієм оптимальності при різних обмеженнях / І.П. Саланда, О.В. Барабаш, А.П. Мусієнко // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – 2016. – №2(42). – С. 99–106.
19. Собчук А. В. Математична модель функціонально стійкої безпроводної сенсорної мережі / А. В. Собчук, М. О. Коваль, Ю. В. Кравченко, О. В. Барабаш // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2017. – Вип. 6. – С.122–126.
20. Собчук А. В. Методи оцінки функціонально стійкої безпроводної сенсорної мережі / А. В. Собчук, О. В. Барабаш, А. П. Мусієнко. // Телекомунікаційні та інформаційні технології. – 2019. – №3. – С. 46–54.
21. Собчук А. В. Характеристика функціонально стійких сенсорних мереж / А. В. Собчук, О. В. Барабаш, Ю. В. Кравченко. // VI Міжнародна

науково-практична конференція «Математика. Інформаційні технології. Освіта». – 2017.

22. Собчук А. В. Основні характеристики функціонально стійких сенсорних систем / А. В. Собчук, Ю. В. Кравченко, О. В. Барабаш. // Науковотехнічна конференція молодих вчених "Актуальні проблеми інформаційних технологій" (АРІТ-2018). – 2018. – С. 10–11.
23. Щипанський П. В. Забезпечення властивості функціональної стійкості системи контролю повітряного простору / П. В. Щипанський, О. В. Барабаш, В. В. Кіреєнко // Системи озброєння і військова техніка. – 2014. – № 1. – С. 248–251.

## ДОДАТОК А

Матриця ймовірності початкового графу з додатковими б-ма каналами зв'язку,  
при значенні зв'язності  $p = 0,5$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	0	0,25	0,25	0,5	0,25	0,25	0,5	0,031	0,125	0,008	0,016	0,063	0,031	0,016	0,004	0,016	0,008
2	0,25	0	0,125	0,125	0,25	0,5	0,5	0,063	0,25	0,016	0,031	0,125	0,063	0,031	0,008	0,031	0,016
3	0,25	0,125	0	0,5	0,5	0,25	0,125	0,031	0,125	0,008	0,016	0,063	0,031	0,016	0,004	0,016	0,008
4	0,5	0,125	0,5	0	0,5	0,25	0,25	0,031	0,125	0,008	0,016	0,063	0,031	0,016	0,004	0,016	0,008
5	0,25	0,25	0,5	0,5	0	0,5	0,25	0,063	0,25	0,016	0,031	0,125	0,063	0,031	0,008	0,031	0,016
6	0,25	0,5	0,25	0,25	0,5	0	0,5	0,125	0,5	0,031	0,063	0,25	0,125	0,063	0,016	0,063	0,031
7	0,5	0,5	0,125	0,25	0,25	0,5	0	0,063	0,25	0,016	0,031	0,125	0,063	0,031	0,008	0,031	0,016
8	0,031	0,063	0,031	0,031	0,063	0,125	0,063	0	0,25	0,25	0,5	0,5	0,5	0,25	0,125	0,25	0,125
9	0,125	0,25	0,008	0,125	0,25	0,5	0,25	0,25	0	0,063	0,125	0,5	0,25	0,125	0,031	0,125	0,063
10	0,008	0,031	0,016	0,008	0,016	0,031	0,016	0,25	0,063	0	0,5	0,125	0,25	0,5	0,5	0,25	0,25
11	0,016	0,031	0,016	0,016	0,031	0,063	0,031	0,5	0,125	0,5	0	0,25	0,25	0,25	0,25	0,125	0,125
12	0,063	0,125	0,063	0,063	0,125	0,25	0,125	0,5	0,5	0,125	0,25	0	0,5	0,25	0,063	0,25	0,125
13	0,031	0,063	0,031	0,031	0,063	0,125	0,063	0,5	0,25	0,25	0,25	0,5	0	0,5	0,125	0,5	0,25
14	0,016	0,031	0,016	0,016	0,031	0,063	0,031	0,25	0,125	0,5	0,25	0,25	0,5	0	0,25	0,5	0,5
15	0,004	0,008	0,004	0,004	0,008	0,016	0,008	0,125	0,031	0,5	0,25	0,063	0,125	0,25	0	0,125	0,5
16	0,016	0,031	0,016	0,016	0,031	0,063	0,031	0,25	0,125	0,25	0,125	0,25	0,5	0,5	0,125	0	0,25
17	0,008	0,016	0,008	0,008	0,016	0,031	0,016	0,125	0,063	0,25	0,125	0,125	0,25	0,5	0,5	0,25	0

Матриця ймовірності початкового графу з додатковими б-ма каналами зв'язку,  
при значенні зв'язності  $p = 0,7$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	0	0,49	0,49	0,7	0,49	0,49	0,7	0,168	0,343	0,082	0,118	0,24	0,168	0,118	0,058	0,118	0,082
2	0,49	0	0,343	0,343	0,49	0,7	0,7	0,24	0,49	0,168	0,168	0,343	0,24	0,168	0,082	0,168	0,118
3	0,49	0,343	0	0,7	0,7	0,49	0,343	0,168	0,082	0,118	0,118	0,24	0,168	0,118	0,058	0,118	0,082
4	0,7	0,343	0,7	0	0,7	0,49	0,49	0,168	0,343	0,082	0,118	0,24	0,168	0,118	0,058	0,118	0,082
5	0,49	0,49	0,7	0,7	0	0,7	0,49	0,24	0,49	0,118	0,168	0,343	0,24	0,168	0,082	0,168	0,118
6	0,49	0,7	0,49	0,49	0,7	0	0,7	0,343	0,7	0,168	0,24	0,49	0,343	0,24	0,118	0,24	0,168
7	0,7	0,7	0,343	0,49	0,49	0,7	0	0,24	0,49	0,118	0,168	0,343	0,24	0,168	0,082	0,168	0,118
8	0,168	0,24	0,168	0,168	0,24	0,343	0,24	0	0,49	0,49	0,7	0,7	0,7	0,49	0,343	0,49	0,343
9	0,343	0,49	0,343	0,343	0,49	0,7	0,49	0,49	0	0,24	0,343	0,7	0,49	0,343	0,168	0,343	0,24
10	0,082	0,118	0,082	0,082	0,118	0,168	0,118	0,49	0,24	0	0,7	0,343	0,49	0,7	0,7	0,49	0,49
11	0,118	0,168	0,118	0,118	0,168	0,24	0,168	0,7	0,343	0,7	0	0,49	0,49	0,49	0,49	0,343	0,343
12	0,24	0,343	0,24	0,24	0,343	0,49	0,343	0,7	0,7	0,343	0,49	0	0,7	0,49	0,24	0,49	0,343
13	0,168	0,24	0,168	0,168	0,24	0,343	0,24	0,7	0,49	0,49	0,49	0,7	0	0,7	0,343	0,7	0,49
14	0,118	0,168	0,118	0,118	0,168	0,24	0,168	0,49	0,343	0,7	0,49	0,49	0,7	0	0,49	0,7	0,7
15	0,058	0,082	0,058	0,058	0,082	0,118	0,082	0,343	0,168	0,7	0,49	0,24	0,343	0,49	0	0,343	0,7
16	0,118	0,168	0,118	0,118	0,168	0,24	0,168	0,49	0,343	0,49	0,343	0,49	0,7	0,7	0,343	0	0,49
17	0,082	0,118	0,082	0,082	0,118	0,168	0,118	0,343	0,24	0,49	0,343	0,343	0,49	0,7	0,7	0,49	0

Матриця ймовірності початкового графу з додатковими б-ма каналами зв'язку,  
при значенні зв'язності  $\rho = 0,95$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	0	0,903	0,903	0,95	0,903	0,903	0,95	0,774	0,857	0,698	0,735	0,815	0,774	0,735	0,663	0,735	0,698
2	0,903	0	0,857	0,857	0,903	0,95	0,95	0,815	0,903	0,774	0,774	0,857	0,815	0,774	0,698	0,774	0,735
3	0,903	0,857	0	0,95	0,95	0,903	0,857	0,774	0,698	0,735	0,735	0,815	0,774	0,735	0,663	0,735	0,698
4	0,95	0,857	0,95	0	0,95	0,903	0,903	0,774	0,857	0,698	0,735	0,815	0,774	0,735	0,663	0,735	0,698
5	0,903	0,903	0,95	0,95	0	0,95	0,903	0,815	0,903	0,735	0,774	0,857	0,815	0,774	0,698	0,774	0,735
6	0,903	0,95	0,903	0,903	0,95	0	0,95	0,857	0,95	0,774	0,815	0,903	0,857	0,815	0,735	0,815	0,774
7	0,95	0,95	0,857	0,903	0,903	0,95	0	0,815	0,903	0,735	0,774	0,857	0,815	0,774	0,698	0,774	0,735
8	0,774	0,815	0,774	0,774	0,815	0,857	0,815	0	0,903	0,903	0,95	0,95	0,95	0,903	0,857	0,903	0,857
9	0,857	0,903	0,857	0,857	0,903	0,95	0,903	0,903	0	0,815	0,857	0,95	0,903	0,857	0,774	0,857	0,815
10	0,698	0,735	0,698	0,698	0,735	0,774	0,735	0,903	0,815	0	0,95	0,857	0,903	0,95	0,95	0,903	0,903
11	0,735	0,774	0,735	0,735	0,774	0,815	0,774	0,95	0,857	0,95	0	0,903	0,903	0,903	0,903	0,857	0,857
12	0,815	0,857	0,815	0,815	0,857	0,903	0,857	0,95	0,95	0,857	0,903	0	0,95	0,903	0,815	0,903	0,857
13	0,774	0,815	0,774	0,774	0,815	0,857	0,815	0,95	0,903	0,903	0,903	0,95	0	0,95	0,857	0,95	0,903
14	0,735	0,774	0,735	0,735	0,774	0,815	0,774	0,903	0,857	0,95	0,903	0,903	0,95	0	0,903	0,95	0,95
15	0,663	0,698	0,663	0,663	0,698	0,735	0,698	0,857	0,774	0,95	0,903	0,815	0,857	0,903	0	0,857	0,95
16	0,735	0,774	0,735	0,735	0,774	0,815	0,774	0,903	0,857	0,903	0,857	0,903	0,95	0,95	0,857	0	0,903
17	0,698	0,735	0,698	0,698	0,735	0,774	0,735	0,857	0,815	0,903	0,857	0,857	0,903	0,95	0,95	0,903	0

Матриця ймовірності початкового графу з додатковими 14-ма каналами зв'язку,  
при значенні зв'язності  $p = 0,5$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	0	0,935	0,467	0,935	0,467	0,467	0,935	0,233	0,467	0,117	0,233	0,117	0,117	0,06	0,06	0,117	0,06
2	0,935	0	0,233	0,467	0,467	0,935	0,935	0,467	0,935	0,117	0,233	0,467	0,467	0,233	0,117	0,233	0,117
3	0,467	0,233	0	0,935	0,935	0,467	0,233	0,467	0,467	0,233	0,467	0,935	0,467	0,233	0,117	0,233	0,117
4	0,935	0,467	0,935	0	0,935	0,935	0,467	0,467	0,467	0,233	0,467	0,233	0,233	0,117	0,117	0,233	0,06
5	0,467	0,467	0,935	0,935	0	0,935	0,467	0,467	0,467	0,467	0,935	0,467	0,233	0,233	0,233	0,467	0,117
6	0,467	0,935	0,467	0,935	0,935	0	0,935	0,935	0,935	0,467	0,467	0,935	0,467	0,233	0,06	0,467	0,117
7	0,935	0,935	0,233	0,467	0,467	0,935	0	0,467	0,467	0,117	0,233	0,233	0,233	0,117	0,06	0,117	0,06
8	0,233	0,467	0,467	0,467	0,467	0,935	0,467	0	0,467	0,467	0,935	0,935	0,935	0,467	0,117	0,467	0,233
9	0,467	0,935	0,467	0,467	0,467	0,935	0,467	0,467	0	0,233	0,233	0,935	0,935	0,467	0,117	0,467	0,233
10	0,117	0,117	0,233	0,233	0,467	0,467	0,117	0,467	0,233	0	0,935	0,233	0,467	0,935	0,935	0,467	0,467
11	0,233	0,233	0,467	0,467	0,935	0,467	0,233	0,935	0,233	0,935	0	0,467	0,467	0,467	0,467	0,935	0,233
12	0,117	0,467	0,935	0,233	0,467	0,935	0,233	0,935	0,935	0,233	0,467	0	0,935	0,467	0,117	0,467	0,233
13	0,117	0,467	0,467	0,233	0,233	0,467	0,233	0,935	0,935	0,467	0,467	0,935	0	0,935	0,233	0,935	0,467
14	0,06	0,233	0,233	0,117	0,233	0,233	0,117	0,467	0,467	0,935	0,467	0,467	0,935	0	0,467	0,935	0,935
15	0,06	0,117	0,117	0,117	0,233	0,06	0,06	0,117	0,117	0,935	0,467	0,117	0,233	0,467	0	0,233	0,935
16	0,117	0,233	0,233	0,233	0,467	0,467	0,117	0,467	0,467	0,167	0,935	0,467	0,935	0,935	0,233	0	0,467
17	0,06	0,117	0,117	0,06	0,117	0,117	0,06	0,233	0,233	0,467	0,233	0,233	0,467	0,935	0,935	0,467	0

Матриця ймовірності початкового графу з додатковими 14-ма каналами зв'язку,  
при значенні зв'язності  $p = 0,7$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	0	1	0,916	1	0,916	0,916	1	0,641	0,916	0,449	0,641	0,449	0,449	0,354	0,354	0,449	0,354
2	1	0	0,641	0,916	0,916	1	1	0,916	1	0,449	0,641	0,916	0,916	0,641	0,449	0,641	0,449
3	0,916	0,641	0	1	1	0,916	0,641	0,916	0,916	0,641	0,916	1	0,916	0,641	0,449	0,641	0,449
4	1	0,916	1	0	1	1	0,916	0,916	0,916	0,641	0,916	0,641	0,641	0,449	0,449	0,641	0,354
5	0,916	0,916	1	1	0	1	0,916	0,916	0,916	0,916	1	0,916	0,641	0,641	0,641	0,916	0,449
6	0,916	1	0,916	1	1	0	1	1	1	0,916	0,916	1	0,916	0,641	0,354	0,916	0,449
7	1	1	0,641	0,916	0,916	1	0	0,916	0,916	0,449	0,641	0,641	0,641	0,449	0,354	0,449	0,354
8	0,641	0,916	0,916	0,916	0,916	1	0,916	0	0,916	0,916	1	1	1	0,916	0,449	0,916	0,641
9	0,916	1	0,916	0,916	0,916	1	0,916	0,916	0	0,641	0,641	1	1	0,916	0,449	0,916	0,641
10	0,449	0,449	0,641	0,641	0,916	0,916	0,449	0,916	0,641	0	1	0,641	0,916	1	1	0,916	0,916
11	0,641	0,641	0,916	0,916	1	0,916	0,641	1	0,641	1	0	0,916	0,916	0,916	0,916	1	0,641
12	0,449	0,916	1	0,641	0,916	1	0,641	1	1	0,641	0,916	0	1	0,916	0,449	0,916	0,641
13	0,449	0,916	0,916	0,641	0,641	0,916	0,641	1	1	0,916	0,916	1	0	1	0,641	1	0,916
14	0,354	0,641	0,641	0,449	0,641	0,641	0,449	0,916	0,916	1	0,916	0,916	1	0	0,916	1	1
15	0,354	0,449	0,449	0,449	0,641	0,354	0,354	0,449	0,449	1	0,916	0,449	0,641	0,916	0	0,641	1
16	0,449	0,641	0,641	0,641	0,916	0,916	0,449	0,916	0,916	0,167	1	0,916	1	1	0,641	0	0,916
17	0,354	0,449	0,449	0,354	0,449	0,449	0,354	0,641	0,641	0,916	0,641	0,641	0,916	1	1	0,916	0



Матриця ймовірності початкового графу з додатковими 32-ма каналами зв'язку,  
при значенні зв'язності  $p = 0,5$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	0	0,935	0,935	0,935	0,467	0,467	0,935	0,467	0,467	0,233	0,467	0,467	0,233	0,233	0,117	0,467	0,233
2	0,935	0	0,467	0,467	0,935	0,935	0,935	0,467	0,935	0,117	0,467	0,467	0,467	0,117	0,117	0,233	0,233
3	0,935	0,467	0	0,935	0,935	0,467	0,467	0,935	0,467	0,935	0,935	0,935	0,467	0,467	0,233	0,467	0,233
4	0,935	0,467	0,935	0	0,935	0,935	0,935	0,467	0,467	0,935	0,467	0,467	0,467	0,467	0,233	0,935	0,467
5	0,467	0,935	0,935	0,935	0	0,935	0,935	0,935	0,935	0,467	0,935	0,935	0,467	0,467	0,233	0,467	0,233
6	0,467	0,935	0,467	0,935	0,935	0	0,935	0,935	0,935	0,233	0,467	0,935	0,467	0,467	0,117	0,467	0,233
7	0,935	0,935	0,467	0,935	0,935	0,935	0	0,167	0,467	0,233	0,467	0,467	0,233	0,233	0,117	0,467	0,117
8	0,467	0,467	0,935	0,467	0,935	0,935	0,467	0	0,467	0,467	0,935	0,935	0,935	0,935	0,467	0,935	0,467
9	0,467	0,935	0,467	0,467	0,935	0,935	0,167	0,467	0	0,233	0,467	0,935	0,935	0,467	0,233	0,467	0,467
10	0,233	0,117	0,467	0,467	0,467	0,233	0,233	0,467	0,233	0	0,935	0,233	0,467	0,935	0,935	0,935	0,935
11	0,467	0,467	0,935	0,467	0,935	0,467	0,467	0,935	0,467	0,935	0	0,467	0,935	0,467	0,467	0,935	0,467
12	0,467	0,467	0,935	0,467	0,935	0,935	0,467	0,935	0,935	0,233	0,467	0	0,935	0,467	0,233	0,467	0,467
13	0,233	0,467	0,467	0,467	0,467	0,467	0,233	0,935	0,935	0,467	0,935	0,935	0	0,935	0,467	0,935	0,935
14	0,233	0,117	0,467	0,467	0,467	0,467	0,233	0,935	0,467	0,935	0,467	0,467	0,935	0	0,935	0,935	0,935
15	0,117	0,117	0,233	0,233	0,233	0,117	0,117	0,467	0,233	0,935	0,467	0,233	0,467	0,935	0	0,467	0,935
16	0,467	0,233	0,467	0,935	0,467	0,467	0,467	0,935	0,467	0,935	0,935	0,467	0,935	0,935	0,467	0	0,935
17	0,233	0,233	0,233	0,467	0,233	0,233	0,117	0,467	0,467	0,935	0,467	0,467	0,935	0,935	0,935	0,935	0

Матриця ймовірності початкового графу з додатковими 32-ма каналами зв'язку,  
при значенні зв'язності  $p = 0,7$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	0	1	1	1	0,916	0,916	1	0,916	0,916	0,641	0,916	0,916	0,641	0,641	0,449	0,916	0,641
2	1	0	0,916	0,916	1	1	1	0,916	1	0,449	0,916	0,916	0,916	0,449	0,449	0,641	0,641
3	1	0,916	0	1	1	0,916	0,916	1	0,916	0,916	1	1	0,916	0,916	0,641	0,916	0,641
4	1	0,916	1	0	1	1	1	0,916	0,916	0,916	0,916	0,916	0,916	0,916	0,641	1	0,916
5	0,916	1	1	1	0	1	1	1	1	0,916	1	1	0,916	0,916	0,641	0,916	0,641
6	0,916	1	0,916	1	1	0	1	1	1	0,641	0,916	1	0,916	0,916	0,449	0,916	0,641
7	1	1	0,916	1	1	1	0	0,167	0,916	0,641	0,916	0,916	0,641	0,641	0,449	0,916	0,449
8	0,916	0,916	1	0,916	1	1	0,916	0	0,916	0,916	1	1	1	1	0,916	1	0,916
9	0,916	1	0,916	0,916	1	1	0,167	0,916	0	0,641	0,916	1	1	0,916	0,641	0,916	0,916
10	0,641	0,449	0,916	0,916	0,916	0,641	0,641	0,916	0,641	0	1	0,641	0,916	1	1	1	1
11	0,916	0,916	1	0,916	1	0,916	0,916	1	0,916	1	0	0,916	1	0,916	0,916	1	0,916
12	0,916	0,916	1	0,916	1	1	0,916	1	1	0,641	0,916	0	1	0,916	0,641	0,916	0,916
13	0,641	0,916	0,916	0,916	0,916	0,916	0,641	1	1	0,916	1	1	0	1	0,916	1	1
14	0,641	0,449	0,916	0,916	0,916	0,916	0,641	1	0,916	1	0,916	0,916	1	0	1	1	1
15	0,449	0,449	0,641	0,641	0,641	0,449	0,449	0,916	0,641	1	0,916	0,641	0,916	1	0	0,916	1
16	0,916	0,641	0,916	1	0,916	0,916	0,916	1	0,916	1	1	0,916	1	1	0,916	0	1
17	0,641	0,641	0,641	0,916	0,641	0,641	0,449	0,916	0,916	1	0,916	0,916	1	1	1	1	0

