

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕХНОЛОГІЙ ТА  
ДИЗАЙНУ

Факультет мехатроніки та комп'ютерних технологій  
Кафедри інформаційних та комп'ютерних технологій

**ДИПЛОМНА БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА**

на тему

**СИСТЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО МОНІТОРИНГУ  
ВИРОБНИЦТВА ТА РОЗПОДІЛУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ  
СУБ'ЄКТАМИ АЛЬТЕРНАТИВНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ**

Виконав: студент групи БА-19  
спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-  
інтегровані технології  
освітня програма Автоматизація та  
комп'ютерно-інтегровані технології  
**Олександр КАБАЛДІН**

Науковий керівник к.т.н., доц. Валерія ДРОМЕНКО

Рецензент д.т.н., проф. Ірина ШВЕДЧИКОВА

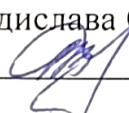
Київ 2023

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕХНОЛОГІЙ ТА  
ДИЗАЙНУ**

Факультет мехатроніки та комп'ютерних технологій  
Кафедра інформаційних та комп'ютерних технологій  
Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології  
Освітня програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри ІКТ**  
доц., к.т.н. Владислава СКІДАН

  
«13» червня 2023 р.

**ЗАВДАННЯ**

**НА ДИПЛОМНУ БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**








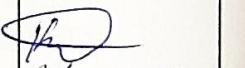

**КАБАЛДІНУ Олександрю Олександровичу**

1. Тема роботи: Система автоматизованого моніторингу виробництва та розподілу електроенергії суб'єктами альтернативної енергетики

Науковий керівник роботи Дроменко Валерія Борисівна, к.т.н., доц.  
затверджені наказом КНУТД від 08.11.2022 року №224-уч

2. Строк подання студентом дипломної роботи 08.06.2023
3. Вихідні дані до дипломної роботи: система має забезпечити автоматизований моніторинг виробництва та розподілу електроенергії суб'єктами альтернативної енергетики за допомогою бездротових технологій передачі інформації, високу енергоефективність та великий радіус дії.
4. Зміст дипломної роботи (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ. Розділ 1. Аналіз особливостей побудови і функціонування систем автоматизованого моніторингу виробництва та розподілу електроенергії суб'єктами альтернативної енергетики. Розділ 2. Технічна реалізація автоматизованої системи моніторингу виробництва та розподілу електроенергії суб'єктами альтернативної енергетики. Розділ 3. Рекомендаційні заходи покращення інформаційного обміну процесу автоматизованого моніторингу виробництва та розподілу електроенергії суб'єктами альтернативної енергетики. Загальні висновки. Список використаних джерел.
5. Дата видачі завдання 16.03.2023

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи (проекту)	Терміни виконання етапів	Примітка про виконання
1	Вступ	24.04.23	
2	Розділ 1. Аналіз особливостей побудови і функціонування систем автоматизованого моніторингу виробництва та розподілу електроенергії суб'єктами альтернативної енергетики	01.05.23	
3	Розділ 2. Технічна реалізація автоматизованої системи моніторингу виробництва та розподілу електроенергії суб'єктами альтернативної енергетики	10.05.23	
4	Розділ 3. Рекомендаційні заходи покращення інформаційного обміну процесу автоматизованого моніторингу виробництва та розподілу електроенергії суб'єктами альтернативної енергетики	14.05.23	
5	Висновки	25.05.23	
6	Оформлення дипломної роботи	31.05.23	
7	Здача дипломної роботи на кафедру для рецензування (за 14 днів до захисту)	8.06.23	
8	Перевірка дипломної роботи на наявність текстових співпадінь та помилок (за 10 днів до захисту)	12.06.23	
9	Подання дипломної роботи на затвердження завідувачу кафедри (за 7 днів до захисту)	15.06.23	

Студент



(підпис)

Олександр Кабалдін

(ініціали та прізвище)

Науковий керівник роботи

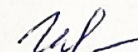


(підпис)

Валерія ДРОМЕНКО

(ініціали та прізвище)

Рецензент



(підпис)

Ірина ШВЕДЧИКОВА

(ініціали та прізвище)

## АНОТАЦІЯ

**Кабалдін О.О. Система автоматизованого моніторингу виробництва та розподілу електроенергії суб'єктами альтернативної енергетики. – Рукопис.**

Дипломна бакалаврська робота за спеціальністю 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології (Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології). – Київський національний університет технологій та дизайну, Київ, 2023 рік.

Дипломну бакалаврську роботу присвячено дослідженню технічних рішень для функціонування автоматизованої системи моніторингу виробництва та розподілу електроенергії, що базується на бездротовій сенсорній мережі LoRa, за допомогою якої здійснюється моніторинг та облік електроенергії. Запропоноване рішення стосується галузі автоматизації і керування.

Досліджувана автоматизована система моніторингу виробництва та розподілу електроенергії забезпечує можливість точного вимірювання та обліку виробленої та спожитої електроенергії, а також забезпечує цілодобовий моніторинг та контроль за роботою сонячних панелей та електрообладнання. Система здійснює збір та аналіз даних про вироблену та спожиту електроенергію, моніторинг ефективності роботи станції та виявлення несправностей та аварій в її роботі, автоматизацію процесу збору показів лічильників, а також забезпечує можливість віддаленого доступу до даних та формування деталізованих звітів про стан електромережі та роботу генеруючих приладів.

*Ключові слова: моніторинг виробництва та розподіл електроенергії, суб'єкти альтернативної енергетики, бездротова сенсорна мережа, автоматизація, шлюз, лічильник, датчик, сенсорний вузол, базова станція, мережева обробка даних.*

## ABSTRACT

**Kabaldin O.O. Automated monitoring system for production and distribution of electric power by alternative energy entities. - Manuscript.**

Bachelor's thesis in the specialty of 151 - Automation and Computer-Integrated Technologies. - Kyiv National University of Technologies and Design, Kyiv, 2023.

The bachelor's thesis is dedicated to researching technical solutions for the functioning of an automated system for monitoring the production and distribution of electric power based on the wireless sensor network LoRa, which enables the monitoring and accounting of electric power. The proposed solution relates to the field of automation and control.

The investigated automated system for monitoring the production and distribution of electric power provides the possibility of accurate measurement and accounting of generated and consumed electric power, as well as 24/7 monitoring and control of the operation of solar panels and electrical equipment. The system collects and analyzes data on generated and consumed electric power, monitors the station's performance and detects malfunctions and failures in its operation, automates the process of collecting meter readings, and also provides remote access to data and generates detailed reports on the state of the power grid and the operation of generating devices.

*Keywords: production and distribution monitoring of electric power, alternative energy entities, wireless sensor network, automation, gateway, meter, sensor, sensor node, base station, network data processing.*

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АЕС - атомна електростанція;

АСКОЕ - автоматизована система комерційного обліку електричної енергії;

АЦП - аналого-цифрових перетворювачів;

БЗПД - бездротових засобів передачі даних;

БС - базова станція;

БСМ - бездротова сенсорна мережа;

ВДЕ - відновлювана енергетика;

ВЕС - вітрова електростанція;

ГЕС - гідроелектростанція;

ОС - операційна система;

ПЗ - програмне забезпечення;

СЕС - сонячна електростанція;

ТЕС - теплова електростанція;

GPS - система глобального позиціонування (Global Positioning System);

LTE - довготривала еволюція (long-term evolution);

LoRaWAN - протокол глобальної мережі з низьким енергоспоживанням;

Nb-IoT - вузькосмуговий Інтернет речей (Narrow Band Internet of Things);

P2P - тимчасова або пірингова мережа (Peer-to-peer);

RFD - Пристрій зі зниженою функціональністю (Reduced Function Device);

CSD - дані з комутацією каналів (Circuit Switched Data);

FFD - повністю функціональний пристрій (Fully Function Device).

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПОБУДОВИ І ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗОВАНОГО МОНІТОРИНГУ ВИРОБНИЦТВА ТА РОЗПОДІЛУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ СУБ'ЄКТАМИ АЛЬТЕРНАТИВНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ .....	12
1.1. Загальний опис автоматизованої системи моніторингу виробництва та розподілу електроенергії суб'єктами альтернативної енергетики .....	13
1.1.1. Особливості організації й задачі автоматизованої системи моніторингу та виробництва електроенергії на об'єктах альтернативної енергетики .....	13
1.1.2. Компоненти автоматизованої системи моніторингу виробництва та розподілу електроенергії.....	15
1.1.3. Переваги використання системи моніторингу виробництва та розподілу електроенергії .....	16
1.2. Особливості будови та функціонування бездротових сенсорних мереж для системи автоматизованого моніторингу виробництва та розподілу електроенергії.....	17
1.2.1. Поняття бездротової сенсорної мережі для систем автоматизованого моніторингу .....	17
1.2.2. Класифікація бездротових сенсорних мереж у системі автоматизованого моніторингу виробництва та розподілу електроенергії.....	18
1.2.3. Структура сенсора та безпроводної сенсорної мережі у системі автоматизованого моніторингу .....	20
1.2.4. Загальні принципи функціонування систем автоматизованого моніторингу на основі бездротових сенсорних мереж .....	23
1.3. Бездротові сенсорні мережі автоматизованої системи моніторингу: різноманітні топології та їх структурні складові .....	25
1.3.1. Вузли в бездротових сенсорних мережах системи моніторингу .....	25
1.3.2. Різновиди топології бездротових сенсорних мереж.....	30
1.4. Технології передачі даних в бездротових сенсорних мережах.....	33
1.4.1. Технологія Circuit Switched Data (CSD) .....	33
1.4.2. Технологія LoRaWAN.....	35
1.4.3. Технологія Nb-IoT .....	36
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1 .....	38

РОЗДІЛ 2. ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ВИРОБНИЦТВА ТА РОЗПОДІЛУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ СУБ'ЄКТАМИ АЛЬТЕРНАТИВНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ .....	39
2.1. Загальні технічні вимоги, що пред'являються до автоматизованої системи моніторингу виробництва та розподілу електроенергії .....	39
2.2. Порівняльний аналіз технологій бездротового зв'язку для автоматизованих систем моніторингу .....	40
2.3. Розроблення структурної схеми автоматизованої системи моніторингу виробництва та розподілу електроенергії .....	45
2.4. Вибір елементної бази для автоматизованої системи моніторингу виробництва та розподілу електроенергії .....	47
2.4.1. Вибір шлюзу .....	47
2.4.2. Вибір антени .....	48
2.4.3. Вибір лічильника електроенергії .....	49
2.5. Розроблення алгоритму роботи автоматизованої системи моніторингу .....	50
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2 .....	53
РОЗДІЛ 3. РЕКОМЕНДАЦІЙНІ ЗАХОДИ ПОКРАЩЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОГО ОБМІНУ ПРОЦЕСУ АВТОМАТИЗОВАНОГО МОНІТОРИНГУ ВИРОБНИЦТВА ТА РОЗПОДІЛУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ СУБ'ЄКТАМИ АЛЬТЕРНАТИВНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ .....	54
3.1. Розрахунок часу передачі одного пакета через радіоінтерфейс LoRaWAN .....	55
3.2. Оцінювання пропускної здатності мережі LoRaWAN в контексті моніторингу вироблення електроенергії .....	58
3.3. Визначення швидкості передачі та чутливості приймача базової станції LoRa .....	60
3.4. Розрахунок ємності базової станції .....	62
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3 .....	66
ВИСНОВКИ .....	66
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	69
Додаток А .....	73



## ВСТУП

На сьогодні в якості системи моніторингу обсягів генерації та споживання електричної енергії використовується автоматизована система комерційного обліку електроенергії (АСКОЕ), проте вона використовує надзвичайно поширену, проте застарілу низькошвидкісну технологію (GSM CSD). В результаті цього інформаційний обмін відбувається з низькою періодичністю (іноді до 1 разу на добу), що не дає можливості здійснювати безперервний моніторинг збалансованості функціонування енергосистеми, а, відповідно, проєктувати та впроваджувати ефективні системи балансування.

**Актуальність теми дипломної роботи.** Таким чином, завдання розробки системи автоматизованого моніторингу виробництва, розподілу та споживання електроенергії або, принаймні, модернізації існуючої АСКОЕ, шляхом застосування новітніх технологій, що забезпечать суттєве покращення інформаційного обміну, зокрема для точного вимірювання та моніторингу обсягів генерації електричної енергії суб'єктами альтернативної енергетики була і залишається надзвичайно актуальною.

**Метою дослідження дипломної роботи** є застосування бездротових сенсорних мереж, які характеризуються низьким енергоспоживанням, широкою зоною покриття та значно вищою швидкістю інформаційного обміну для забезпечення якісного автоматизованого моніторингу виробництва та розподілу електроенергії суб'єктами альтернативної енергетики.

**Завдання дослідження,** які були поставлені у дипломній бакалаврській роботі:

- 1) провести аналіз існуючих методів, засобів та автоматизованих систем моніторингу виробництва та розподілу електроенергії на базі бездротових сенсорних мереж;
- 2) розробити структуру та алгоритм роботи автоматизованої системи моніторингу виробництва та розподілу електроенергії на базі бездротових сенсорних мереж;

- 3) здійснити вибір елементної бази розроблюваної автоматизованої системи моніторингу виробництва та розподілу електроенергії для суб'єктів альтернативної енергетики на базі бездротових сенсорних мереж;
- 4) розробити рекомендаційні заходи покращення інформаційного обміну процесу моніторингу виробництва та розподілу електроенергії суб'єктами альтернативної енергетики з використанням бездротової сенсорної мережі на базі обраної технології.

**Об'єктом дослідження** є процес моніторингу виробництва та розподілу електроенергії суб'єктами зеленої енергетики.

**Предмет дослідження** – покращення інформаційного обміну для автоматичного моніторингу обсягів виробництва та розподілу електричної енергії суб'єктами альтернативної енергетики.

У процесі роботи над роботою було використано такі **методи дослідження**:

- порівняння;
- аналіз;
- дедукція;
- синтез;
- моделювання.

**Інформаційна база дослідження:** при написанні дипломної бакалаврської роботи використані технічна література та наукові публікації з методів і засобів створення та реалізації систем автоматичного моніторингу виробництва та розподілу електричної енергії, а також документація офіційних виробників приладів з фондів бібліотеки Національної бібліотеки України імені В.І. Вернадського, КНУТД та глобальної мережі Інтернет.

**Практичне значення одержаних результатів:** запропонована модель автоматизованої системи моніторингу виробництва та розподілу електроенергії забезпечує суттєве покращення інформаційного обміну,

зокрема для точного обліку кількісних та якісних параметрів виробленої та спожитої електроенергії для забезпечення коректної фінансової звітності суб'єктів альтернативної енергетики та ефективного планування подальшої роботи станцій.

**Апробація результатів роботи:** результати доповідались та обговорювались на X Всеукраїнській науково-практичній конференції здобувачів вищої освіти та молодих вчених з автоматичного управління, 12 квітня 2023 року, м. Херсон-Хмельницький.

**Структура і обсяг роботи:** робота складається зі вступу, 3 розділів, висновків, списку використаних джерел (27 найменувань), 1 додаток. Загальний обсяг дипломної роботи 69 сторінок комп'ютерного тексту.

## **РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПОБУДОВИ І ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗОВАНОГО МОНІТОРИНГУ ВИРОБНИЦТВА ТА РОЗПОДІЛУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ СУБ'ЄКТАМИ АЛЬТЕРНАТИВНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ**

Основним пріоритетом подальшого розвитку об'єднаної енергетичної системи України та її європейської інтеграції є забезпечення додаткової стабільності, безпеки і надійності роботи [1, 2]. Саме надійність, стабільність та безпека є основними критеріями, що висувуються при проектуванні та побудові енергосистеми будь-якої країни.

Одним із ключових факторів, що забезпечує реалізацію цих вимог та, власне, забезпечує надійність та безпеку функціонування, є збалансованість роботи усіх ланок об'єднаної енергосистеми країни, включаючи генерацію, споживання та розподіл, а також можливість її швидкого збалансування у нештатних ситуаціях, пов'язаних із техногенними катастрофами, військовими діями та іншими непрогнозованими чинниками. В свою чергу для забезпечення швидкого збалансування енергосистеми, в першу чергу, необхідно організувати безперервний, або, принаймні, періодичний обмін інформацією щодо стану функціонування електричних мереж.

З іншого боку, навіть за умови штатного функціонування об'єднаної енергосистеми також є необхідність організації безперервного інформаційного обміну щодо збалансованості функціонування енергосистеми. Це пов'язано з тим, що поряд із генерацією гарантованої потужності (АЕС, ГЕС, ТЕС) в об'єднаній енергосистемі України швидкими темпами зростає частка електростанцій негарантованої потужності (сонячних електростанцій (СЕС), вітрових електростанцій (ВЕС) та інших відновлювальних джерел енергії (ВДЕ)), що використовують нестабільний природний енергоресурс, в результаті чого мають обмежену можливість або зовсім не мають можливості регулювати свою потужність у відповідності із заданим добовим графіком. Так, згідно із Кодексом системи передачі [3] при моделюванні розвитку

генеруючих потужностей та аналізі сценаріїв розвитку попиту та пропозиції потрібно враховувати «вплив складнопрогнозованих технологій виробництва електричної енергії (ВЕС та СЕС тощо)».

### **1.1. Загальний опис автоматизованої системи моніторингу виробництва та розподілу електроенергії суб'єктами альтернативної енергетики**

Головне завдання автоматизованої системи моніторингу виробництва та розподілу електроенергії для суб'єктів альтернативної енергетики полягає в точному вимірюванні та обліку виробленої та спожитої електроенергії, а також у забезпеченні цілодобового моніторингу та контролю за роботою сонячних панелей та електрообладнання.

Конкретні завдання автоматизованої системи моніторингу виробництва та розподілу електроенергії повинні включати в себе збір та аналіз даних про вироблену та спожиту електроенергію, моніторинг ефективності роботи станції та виявлення несправностей та аварій в її роботі, автоматизацію процесу збору показників лічильників, а також забезпечувати можливість віддаленого доступу до даних та формування деталізованих звітів про стан електромережі та роботу генеруючих приладів.

Основна мета системи полягає у забезпеченні надійного та точного обліку кількісних та якісних параметрів виробленої та спожитої електроенергії для забезпечення коректної фінансової звітності та ефективного планування подальшої роботи станцій.

#### **1.1.1. Особливості організації й задачі автоматизованої системи моніторингу та виробництва електроенергії на об'єктах альтернативної енергетики**

Виробництво електроенергії на сучасних об'єктах альтернативної енергетики (СЕС, ВЕС та ін.) здійснюється в автоматичному режимі, потребує мінімальної кількості штатного персоналу (здебільшого це технічний працівник, що контролює параметри функціонування електростанції, охорона, директор та бухгалтер). Потужні сонячні електростанції можуть

розташовуватись на значних територіально розподілених площах та містити велику кількість електрообладнання, що задіяне у виробництві. Вітрогенератори або дахові СЕС, як правило, змонтовані на значній висоті, що суттєво ускладнює періодичний доступ персоналу до енергогенеруючого обладнання з метою контролю за його роботою. Все це накладає жорсткі вимоги щодо необхідності здійснення технічним персоналом дистанційного цілодобового, постійного (бесперервного) контролю працездатності генеруючого обладнання з метою запобігання або ліквідації аварій чи інших нештатних ситуацій.

З іншого боку, на таких об'єктах, для організації ефективного управління, прогнозування та планування, окрім комерційного обліку спожитої та переданої в високовольтну (найчастіше 10 кВ або 35 кВ) об'єднану електромережу України, необхідно здійснювати технологічний облік в мережах постійного струму та в мережах 0,4 кВ, що вимагає використання великої кількості точок обліку. Крім цього регламентуючі та нормативні документи вимагають організацію цілодобового дистанційного збору кількісних і якісних показників технологічних і комерційних лічильників в мережах 0,4 кВ та 10 кВ або 35 кВ відповідно для операторів системи розподілу та контролюючих органів. Однак, на сьогодні, для функціонування автоматизованої система комерційного обліку електроенергії (АСКОЕ), яка використовує надзвичайно поширену, проте застарілу низькошвидкісну і нестабільну технологію GSM CSD, особливо в місцях з «неякісним покриттям». Це призводить до суттєвого погіршення періодичності інформаційного обміну (іноді до 1 разу на добу), що не дає можливості, навіть при встановленні дороговартісного додаткового комунікаційного обладнання з використанням цієї технології, забезпечити необхідний рівень технологічного та комерційного моніторингу.

Таким чином, є доцільним пошук та дослідження технічних рішень для забезпечення необхідного рівня моніторингу виробництва та розподілу

електроенергії, що базується на інших комунікаційних технологіях, а також побудови з їх використанням ефективної автоматизованої системи моніторингу. Сформулюємо основні вимоги до такої системи:

1. Моніторинг виробництва електроенергії: система повинна забезпечувати точний облік та параметри якості електроенергії, що виробляється суб'єктами альтернативної енергетики в мережі 0,4кВ.
2. Облік власного споживання електроенергії: система має фіксувати обсяг електроенергії, який споживається на станції в мережі 0,4кВ, а також реєструвати дані про передачу електроенергії до мережі 10кВ.
3. Моніторинг роботи обладнання: система має відслідковувати роботу всього обладнання на станції, від генеруючого обладнання до інверторів, оперативно інформувати про поточний стан системи, нештатну роботу, аварії обладнання, тощо, а також надавати можливість формувати деталізовані звіти.
4. Моніторинг мережі 10 кВ: система повинна відслідковувати стан мережі 10 кВ, яка забезпечує передачу електроенергії в об'єднану енергосистему України та власне споживання станції в період зупинки її генерації, а також миттєве відключення у випадку виникнення аварійної ситуації.

### **1.1.2. Компоненти автоматизованої системи моніторингу виробництва та розподілу електроенергії**

Автоматизована система моніторингу виробництва та розподілу електроенергії містить наступні компоненти:

- вимірювальне обладнання, таке як, лічильники електроенергії, трансформатори струму і напруги, обладнання для вимірювання параметрів якості та інше устаткування.
- комунікаційне обладнання, яке забезпечує передачу даних між різними компонентами системи, а також зв'язок з операторами мережі електропостачання та іншими стейкхолдерами.

- сервери АСКОЕ.

### **1.1.3. Переваги використання системи моніторингу виробництва та розподілу електроенергії**

Основні переваги використання автоматизованої системи моніторингу виробництва електроенергії для суб'єктів альтернативної енергетики включають:

- підвищення точності обліку: за допомогою автоматизованої системи можна точніше вимірювати та обліковувати кількість виробленої та спожитої електроенергії, контролювати її якісні параметри.
- оптимізація ресурсів: автоматизована система дозволяє планувати, контролювати і керувати генерацією, споживанням та розподілом електроенергії у найбільш ефективний спосіб, що дозволяє знизити її втрати, витрати на виробництво та споживання.
- зниження витрат на обслуговування: автоматизована система дозволяє автоматизувати багато процесів, що зменшує необхідність в людських ресурсах та знижує витрати на їх утримання.
- збільшення продуктивності: автоматизована система дозволяє швидко та ефективно обробляти велику кількість даних, що дозволяє операторам системи швидко приймати рішення та забезпечує більш ефективну роботу всієї системи.
- забезпечення безпеки: автоматизована система дозволяє відслідковувати стан електроенергетичної мережі та попереджати про можливі аварійні ситуації, що забезпечує безпеку виробництва та споживання електроенергії.



## 1.2. Особливості будови та функціонування бездротових сенсорних мереж для системи автоматизованого моніторингу виробництва та розподілу електроенергії

### 1.2.1. Поняття бездротової сенсорної мережі для систем автоматизованого моніторингу

Бездротова сенсорна мережа (БСМ) систем автоматизованого моніторингу - це територіально-розподілена система збору, обробки та передачі інформації, що складається з безлічі датчиків (сенсорів) та виконавчих пристроїв, об'єднаних між собою радіоканалом. Сенсори зазвичай складаються з автономних мікроконтролерів, приймачів та передавачів, що дає їм здатність до самоорганізації та дозволяє обмінюватися даними між собою за допомогою радіозв'язку. Бездротові сенсорні вузли є мініатюрними пристроями з обмеженими ресурсами, такими як заряд батареї, об'єм пам'яті, обчислювальні можливості і т.д. На рисунку 1.1 представлено типову безпроводну сенсорну мережу для моніторингу виробництва та розподілу електроенергії.

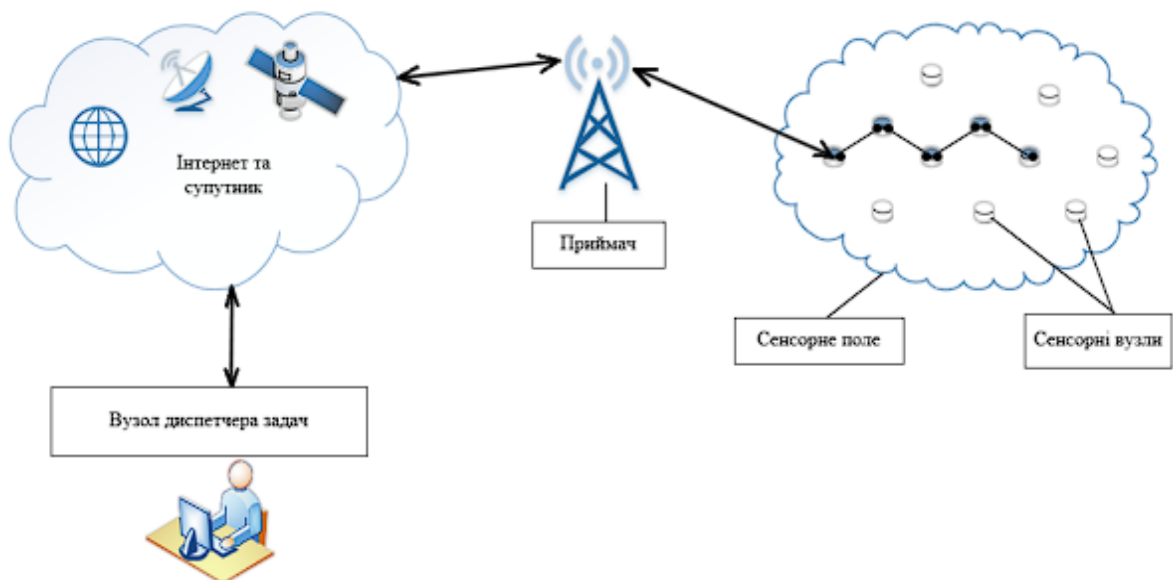


Рис. 1.1. Типова безпроводна сенсорна мережа для моніторингу виробництва та розподілу електроенергії

Простір, який покривається сенсорною мережею, називають сенсорним полем. Бездротові сенсорні вузли це мініатюрні пристрої з обмеженими ресурсами: зарядом батареї, об'ємом пам'яті, обчислювальними можливостями і т.п [4].

Бездротова сенсорна мережа має декілька переваг порівняно з традиційними провідними мережами:

1. Низька вартість: БСМ використовує бездротові технології, що знижує вартість організації мереж, включаючи вартість провідників, інших додаткових матеріалів та робіт з їх монтажу та прокладання.
2. Простота монтажу: бездротові сенсорні вузли можуть бути розташовані в будь-якому місці, без необхідності прокласти дроти, що значно спрощує процес монтажу.
3. Мобільність: БСМ може бути переміщена від одного місця до іншого без необхідності демонтажу провідників та інших додаткових матеріалів.
4. Енергоефективність: бездротові сенсорні вузли зазвичай мають невеликий розмір та обмежену потужність, що дозволяє їм працювати на батареї протягом тривалого часу.
5. Велика масштабованість: БСМ може бути розширена за допомогою додаткових бездротових вузлів, що дозволяє масштабувати мережу в залежності від потреб користувачів.
6. Гнучкість: бездротові сенсорні вузли можуть бути програмовані для виконання різних завдань збору та передачі даних, що забезпечує гнучкість та адаптивність мережі до змінних умов довкілля.

### **1.2.2. Класифікація бездротових сенсорних мереж у системі автоматизованого моніторингу виробництва та розподілу електроенергії**

1. Розмір мережі: БСМ можуть бути класифіковані за розміром мережі, наприклад, мікромережі, що включають в себе від декількох до десятків вузлів, або макромережі, що можуть містити сотні або тисячі вузлів.

2. Топологія: БСМ можуть мати різні типи топології, такі як зіркова (Star), деревовидна (Tree), мережа Меш (Mesh), кластерна (Cluster) та інші.
3. Застосування: БСМ можуть бути класифіковані за застосуванням, наприклад, моніторинг довкілля, моніторинг промислових процесів, медичні додатки, контроль транспорту та інші.
4. Комунікаційний протокол: БСМ можуть використовувати різні комунікаційні протоколи, такі як ZigBee, Bluetooth, Wi-Fi, LoRaWAN та інші.
5. Енергозбереження: БСМ можуть бути класифіковані за технологією енергозбереження, яка використовується в сенсорних вузлах, такі як режими сплячого режиму (Sleep mode), пониження напруги (Voltage scaling), оптимізація протоколу доступу до середовища (MAC), протоколи роутингу та інші.
6. Фізичні параметри: БСМ можуть бути класифіковані за фізичними параметрами, такими як діапазон частот, тип антени, потужність передачі сигналу та інші.

Бездротові сенсорні мережі використовуються поза межами міста суб'єктами альтернативної енергетики для збору і моніторингу даних про виробництво енергії, управління та підтримки енергетичної інфраструктури.

Один з прикладів використання БСМ у сфері альтернативної енергетики - це сонячні електростанції. Сенсори можуть бути встановлені для збору інформації про нахил та температуру сонячних панелей, кількісні та якісні параметри згенерованої електроенергії та інші показники. Ця інформація може бути використана для управління пристроями, які регулюють нахил панелей для оптимального збору сонячної енергії. Також їх можна використовувати для обміну даними на територіях погано «покритих» мобільним зв'язком. БСМ можуть також використовуватися для моніторингу енергетичних мереж та систем управління енергетикою, які використовують альтернативні джерела енергії, такі як вітроенергетика, сонячна енергія та гідроенергетика.

### **1.2.3. Структура сенсора та безпроводної сенсорної мережі у системі автоматизованого моніторингу**

Сенсор - це електронний пристрій, який може вимірювати зміну параметрів різних фізичних чинників, таких як тиск, температура, освітленість, тощо, перетворюючи їх в електричні сигнали. Сенсор складається з чотирьох основних компонентів: вимірювального блоку, блоку обробки, блоку приймача та блоку живлення. Крім того, він може мати додаткові компоненти, такі як система позиціонування, генератор енергії і мобілізатор.

Сенсори зазвичай складаються з двох субодиниць: сенсорів та аналого-цифрових перетворювачів (АЦП). Аналогові сигнали, що створюються сенсорами, перетворюються в цифрові сигнали за допомогою АЦП та подаються в блок обробки.

Блок обробки, який містить процесор та невеликий блок зберігання, може керувати процедурами, що змушують сенсор взаємодіяти з іншими сенсорами для виконання призначених завдань розпізнавання. Приймач з'єднує сенсор з мережею. Блок живлення є одним з найважливіших компонентів сенсора, що може живитись від альтернативного джерела енергії, наприклад, від сонячних елементів. На рис. 1.2 представлені компоненти сенсорної мережі автоматизованої системи.

Універсальний бездротовий сенсор може бути спроектований із використанням модульного підходу, що забезпечує гнучкість і універсальну платформу для вирішення широкого спектру задач. Функціональна блок-схема універсального бездротового сенсора представлена на рис. 1.3. Застосування різних сенсорів може бути досягнуте шляхом програмування або заміни блоків формування сигналу, що дозволяє використовувати широкий діапазон сенсорів з бездротовим сенсором. Крім того, радіолінію можна оперативно змінити в залежності від вимог до діапазону бездротових мереж автоматизованої системи і необхідності в двонапрявленому зв'язку. В цілому,

універсальні бездротові сенсори можуть бути дуже корисними для вирішення різноманітних завдань суб'єктів альтернативної енергетики [6].

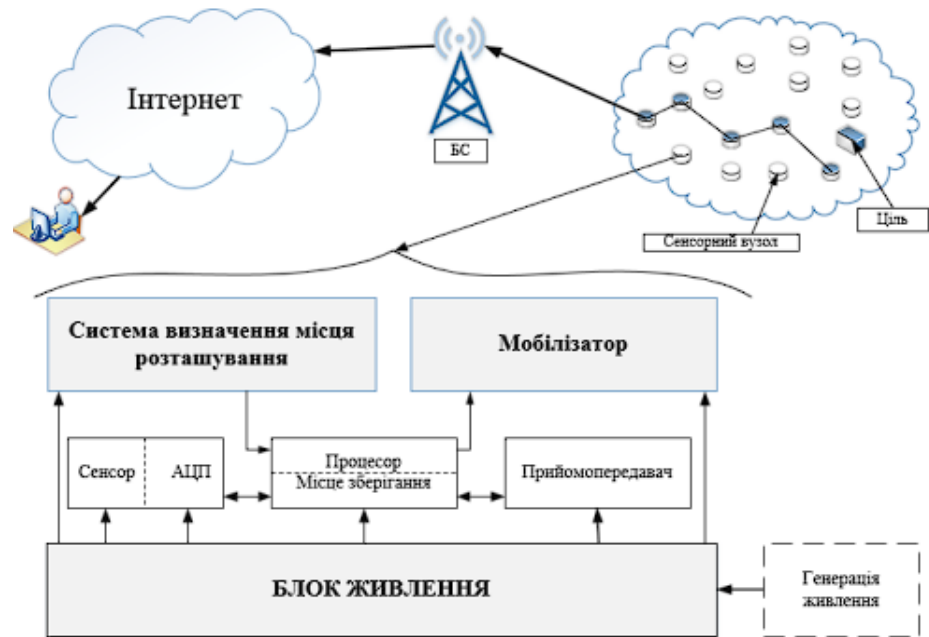


Рис. 1.2. Компоненти сенсорної мережі автоматизованої системи

Датчик (англ., Transducer) - пристрій, який використовується для перетворення одного виду енергії в інший. Отже, сенсор також є датчиком, який перетворює фізичну інформацію в електричну, яка може бути передана обчислювальній системі чи контролеру для обробки [6].

Актуатор (англ., Actuator) - виконавчий пристрій, що реагує на сигнал, який надійшов, для зміни стану керованого об'єкта. В актуаторі відбувається перетворення типів енергії, наприклад, електрична енергія, або енергія стисненого (розрідженого) повітря (рідини, твердого тіла) перетворюється в механічну [6].

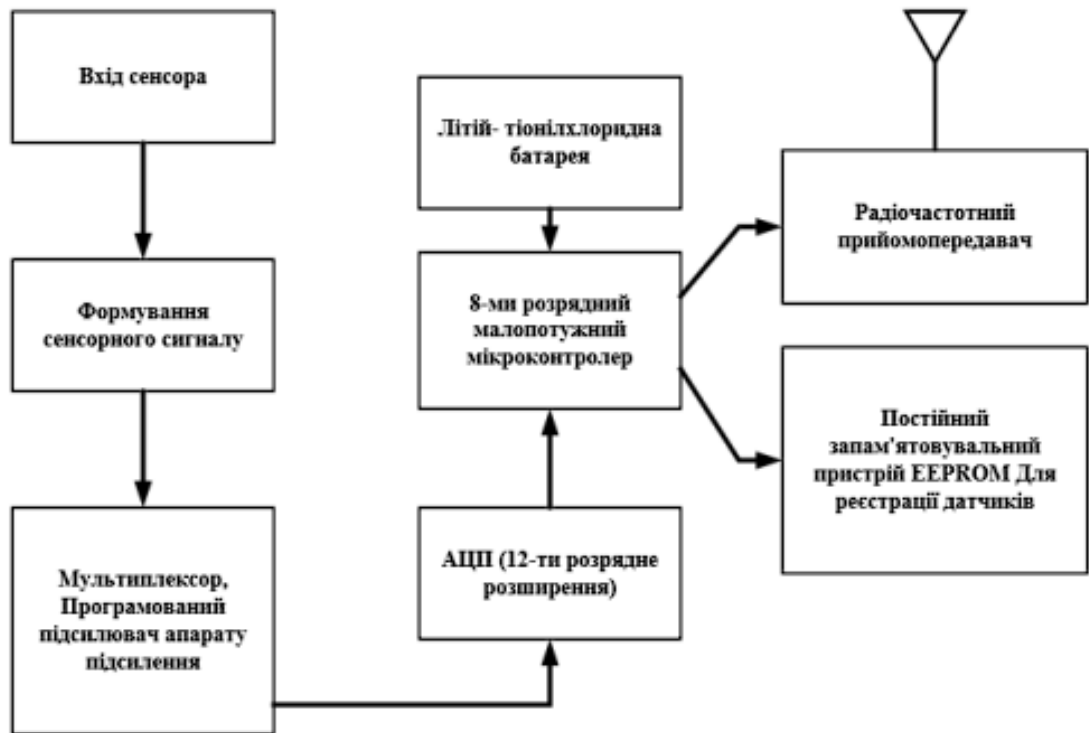


Рис. 1.3. Функціональна блок-схема сенсора в автоматизованій системі

Сенсорний вузол (англ., Sensor node) - це пристрій, який складається, принаймні, з одного сенсора (може також включати один або декількох актуаторів), і має обчислювальні та дротові або бездротові мережеві можливості [6].

Сенсорна мережа - система розподілених сенсорних вузлів, взаємодіючих між собою, а також з іншими мережами для запитів, обробки, передачі та надання інформації, отриманої від об'єктів реального фізичного світу з метою вироблення відповідної реакції на цю інформацію. Таким чином, сенсорна мережа включає в себе як мінімум сенсори, актуатори і комунікаційні вузли. Основною областю застосування сенсорної мережі є контроль і моніторинг реальних показників фізичних середовищ і об'єктів та в деяких випадках - управління цими об'єктами (активація в них певних процесів) [6].

Універсальний безпроводовий сенсор може бути використаний у самоорганізованій мережі зв'язку. Така мережа має випадкову кількість вузлів,

яка може змінюватися від 0 до максимального значення. Взаємозв'язки між вузлами у такій мережі випадкові і створюються для передачі інформації. Базова станція є компонентом мережі, який отримує дані від сенсорів і займається агрегуванням. Розташування базової станції впливає на параметри мережі, такі як витрата енергії, час життя мережі та кількість непрацездатних вузлів. Для передачі даних може бути задіяна різна кількість вузлів, і маршрут передачі даних визначається протоколом, на основі якого працює мережа.

#### **1.2.4. Загальні принципи функціонування систем автоматизованого моніторингу на основі бездротових сенсорних мереж**

Бездротові сенсорні мережі в системі автоматизованого моніторингу працюють за принципом локальних мереж, де сток або базова станція відправляє ширококомовний пакет у всю мережу. Кожен вузол додає адресу відправника до своєї таблиці маршрутизації та інші важливі параметри, такі як ID, рівень заряду батареї та кількість проміжних вузлів. Оскільки рівень заряду батареї є важливим параметром, що визначає енергетичний баланс мережі, кожен вузол передає дані про заряд батареї до сусідніх вузлів. Базова станція регулярно оновлює таблиці вузлів за допомогою повторної передачі інформації.

Сучасні бездротові сенсорні мережі використовуються головним чином для вимірювання параметрів навколишнього середовища та подальшої передачі цих даних до центрального обчислювального пристрою для обробки. Інтелектуальні системи на базі БСМ використовуються в різних сферах, таких як технологічний облік електроенергії, моніторинг виробництва та розподілу електроенергії.

Промислові бездротові сенсорні мережі створюються на основі вузлів передачі даних, які підключаються до сенсорів для вимірювання різноманітних параметрів. Вузли передачі даних виконують роль проміжної ланки між інформацією, що характеризує параметри навколишнього середовища, та центральною системою, яка має можливість регулювати цей

стан, наприклад, знизити температуру даного середовища. Іншими словами, бездротові сенсорні мережі дозволяють збирати, передавати та обробляти дані з різних точок, що є особливо корисним у випадку вимірювання параметрів, які важко або неможливо виміряти за допомогою традиційних методів. Це дозволяє ефективніше вести контроль за середовищем та приймати рішення на основі об'єктивних даних. У світі, де величезна кількість пристроїв є “розумними” та підключеними до мережі Інтернет, бездротові сенсорні мережі відіграють важливу роль у забезпеченні зв'язку та обробки даних між цими пристроями та зовнішнім світом.

На рис. 1.4 зображено схему збору інформації та управління систем автоматизованого моніторингу на базі БСМ.

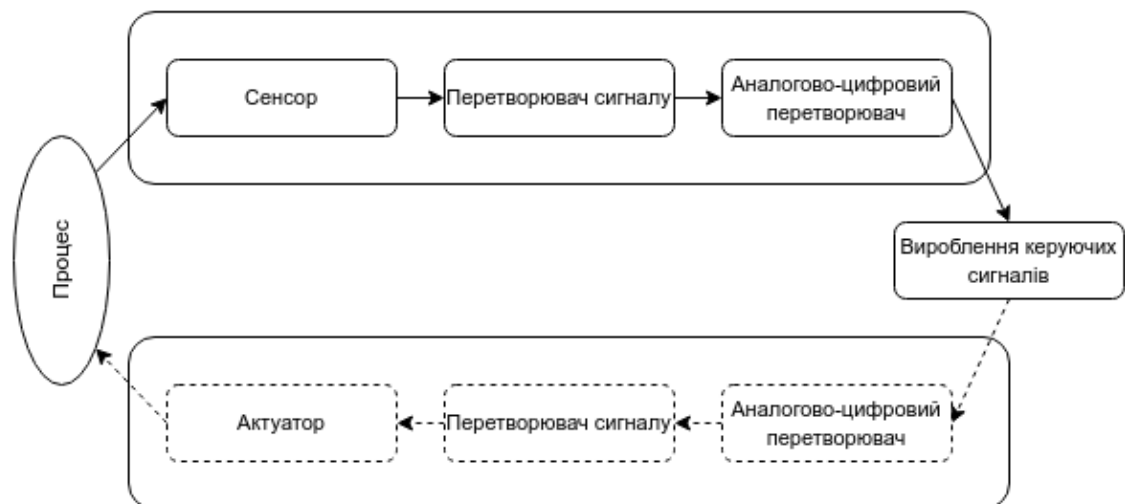


Рис. 1.4. Збір інформації та управління систем автоматизованого моніторингу на базі БСМ

До стандартного набору елементів мережі належать:

- координатор;
- сервер;
- вузол передачі даних.

Бездротові сенсорні мережі (БСМ) можуть функціонувати на відстані від декількох метрів до декількох кілометрів завдяки ретрансляції сигналу між сусідніми елементами мережі. Кожен вузол мережі може здійснювати ретрансляцію сигналу по черзі від одного вузла до іншого, що дає змогу



передавати дані через сусідні вузли у разі виходу з ладу одного з елементів мережі, не втрачаючи якості сигналу. Така велика дальність дії БСМ є можливою завдяки ретрансляції сигналу між сусідніми елементами мережі, що зображено на рис. 1.5 [5].

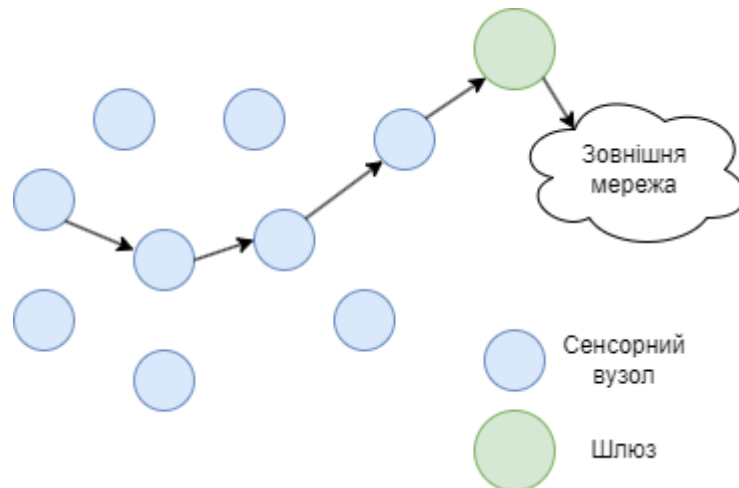


Рис. 1.5. – Маршрутизація даних в БСМ

### 1.3. Бездротові сенсорні мережі автоматизованої системи моніторингу: різноманітні топології та їх структурні складові

#### 1.3.1. Вузли в бездротових сенсорних мережах системи моніторингу

Сенсорні вузли або просто сенсори, що складають бездротові сенсорні мережі системи моніторингу виробництва, виготовляються у формі мініатюрних обчислювальних пристроїв. Вони оснащені датчиками, актуаторами та прийомопередавачами, які працюють у певному діапазоні радіочастот. Розміри сенсорного вузла зазвичай незначні і зазвичай не перевищують декілька кубічних сантиметрів. Апаратна частина вузла включає процесор, флеш-пам'ять та оперативну пам'ять, аналого-цифрові та цифро-аналогові перетворювачі, радіочастотний приймач, джерело живлення, різноманітні датчики та актуатори. Таким чином, апаратна частина вузла може бути поділена на чотири підсистеми:

1. комунікаційна підсистема - забезпечує безпроводне з'єднання з іншими вузлами в сенсорній мережі і містить радіо трансивер [7];

2. обчислювальна підсистема - забезпечує обробку даних і функціональність вузла і складається з мікроконтролера MCU, до складу якого входять процесор, оперативна SRAM, незалежна EEPROM і флешпам'ять, аналого-цифровий перетворювач ADC, таймер, порти введення/виведення [7];
3. сенсорна підсистема - забезпечує з'єднання сенсорного бездротового вузла із зовнішнім світом, до складу якої можуть входити аналогові і цифрові сенсори, актуатори [7];
4. підсистема електроживлення - забезпечує енергетичне постачання всіх елементів бездротового сенсорного вузла і включає пристрої генерації і акумулювання енергії, а також регулювання напруги [7].

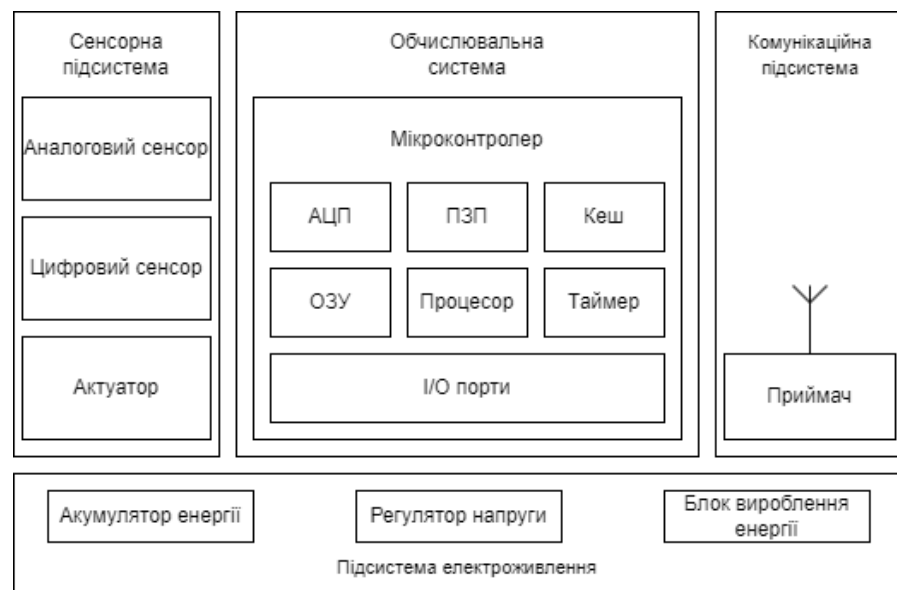


Рис. 1.6. Структура вузла БСМ

Бездротові сенсорні мережі включають в себе мініатюрні обчислювальні пристрої, що обладнані різними типами датчиків, актуаторів та трансиверів. Отримані від датчика сигнали часто потребують обробки, що включає посилення амплітуди, фільтрування шумів та аналого-цифрове перетворення. Після обробки, цифровий сигнал передається в процесор для подальшої обробки та зберігання в пам'яті мікроконтролера. Крім того, від сенсорних

вузлів можлива передача сигналів до зовнішнього середовища через актуатор. Для живлення сенсорних вузлів використовуються невеликі батареї.

Крім розміру, є й інші жорсткі обмеження для вузлів БСМ. Вони повинні:

- споживати дуже мало енергії;
- працювати з великою кількістю вузлів на малих відстанях;
- мати низьку вартість виробництва;
- бути автономними і працювати без обслуговування;
- адаптуватися до навколишнього середовища.

Для того, щоб сенсорні вузли могли виконувати свої функції, на кожен з них необхідно встановити спеціалізовану операційну систему (ОС). Один із прикладів такої операційної системи - TinyOS, яка розроблена в Університеті Берклі і має відкритий код. Ця система керує подіями в реальному часі і розрахована на роботу в умовах обмежених обчислювальних ресурсів. Завдяки TinyOS сенсорам можливо автоматично встановлювати зв'язки з сусідніми вузлами та формувати сенсорну мережу заданої топології.

Оскільки сенсори повинні автоматично вибирати схему організації мережі та маршрутизації даних, бездротові сенсорні мережі є самоналагоджувальними. Для цього сенсорні вузли повинні мати можливість самостійно визначати своє місце розташування відносно інших сенсорів, з якими вони передають дані. Спочатку відбувається ідентифікація всіх сенсорів, а потім вже формується схема маршрутизації.

Сенсорні вузли можуть бути закріплені стаціонарно, або мати відносну мобільність, тобто довільно переміщуватися в деякому просторі. В останньому випадку сенсорна мережа не має фіксованої постійної топології, а її структура динамічно змінюється з часом. Однак незалежно від розташування сенсорних вузлів, операційні системи, які використовуються в них, дозволяють їм працювати ефективно і забезпечувати високу якість передач даних в

бездротових сенсорних мережах досить складно через обмежені обчислювальні ресурси і обмежену пропускну здатність каналу зв'язку.

Загальна архітектура БСМ має наступні вузлів (див. рис. 1.7):

- координатор;
- маршрутизатор;
- кінцевий вузол.

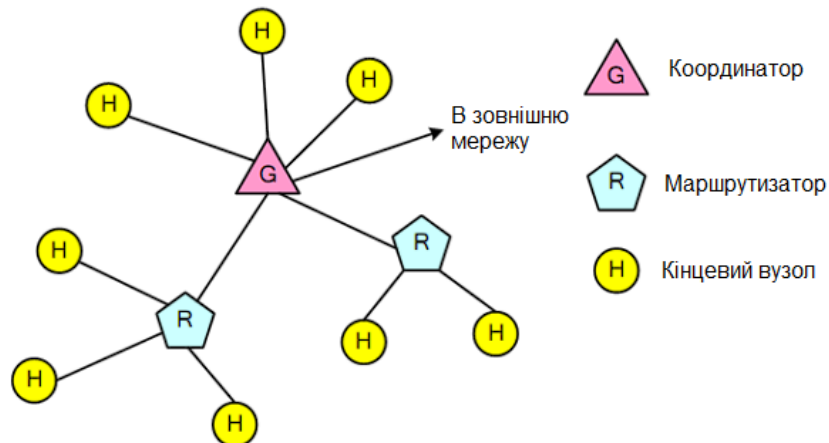


Рис. 1.7. Типи вузлів БСМ

Координатор є найбільш складним пристроєм бездротової сенсорної мережі (БСМ) і забезпечує глобальну координацію, організацію та установку параметрів мережі. Для ефективної роботи координатор потребує найбільший об'єм пам'яті і потужність джерела живлення. У мережі повинен бути тільки один координатор, який відповідає за вихід в зовнішню мережу та реалізує функцію шлюзу. Часто координатор також називають базовою станцією (БС).

Координатор реалізує наступні функції:

- визначає незадіяні канали з доступних для мережі та організовує мережу;
- передає мережеві сигнальні пакети, що містять інформацію про існуючу мережу;
- управляє мережевими підлеглими пристроями та встановлює параметри мережі, включаючи максимальну глибину вкладених підмереж, кількість мережеских маршрутизаторів і кількість підлеглих пристроїв;
- забезпечує маршрутизацію інформації між підлеглими пристроями;

- більшу частину часу перебуває в режимі прийому;
- забезпечує організацію таблиць маршрутизації;
- дозволяє маршрутизаторам та кінцевим пристроям приєднатися до мережі.

Маршрутизатор виконує ряд функцій, таких як прийом, буферизація та передача даних від інших вузлів БСМ, а також визначення напрямку передачі.

Крім того, він забезпечує наступні функції:

- визначає активні канали, підключається до мережі та дозволяє кінцевим пристроям входити до мережі, використовуючи додаткові списки активних каналів, визначені додатком;
- ретранслює сигнальні мережеві пакети з параметрами мережі від координатора;
- адмініструє мережеві адреси підключених до маршрутизатора підлеглих пристроїв;
- підтримує різні класи пристроїв маршрутизації, включаючи пристрій з таблицею маршрутизації та функцією деревовидної маршрутизації, пристрій тільки з функцією деревовидної маршрутизації та підтримку функції аварійної деревовидної маршрутизації;
- підтримує два режими роботи пристроїв: без переходу в "сплячий режим" та з переходом в "сплячий" режим в періоди, визначені координатором мережі та параметрами мережевої синхронізації.

Сенсорний вузол, який є кінцевим пристроєм, займається виконанням лише прикладних дій, таких як збір інформації та управління віддаленим об'єктом, і не здійснює ретрансляцію даних.

Сенсорний вузол має наступні особливості:

- 1) завжди шукає і намагається увійти в існуючу мережу, використовуючи додаткові списки активних каналів та сигнальні пакети синхронізації існуючої мережі для визначення параметрів мережі та маршрутизатора для входу в мережу;
- 2) живиться від автономного джерела живлення, такого, як батарея;

- 3) визначає наявність даних від координатора з пакетів синхронізації;
- 4) запрошує дані від координатора;
- 5) здатний знаходитися тривалий час у "сплячому" режимі (до 99,99% від всього часу роботи).

По виконуваних наборах функцій всі вузли БСМ можна віднести до двох видів:

- 1) пристрій з повним набором функцій FFD (Fully Function Device):
  - підтримка стандарту IEEE 802.15.4;
  - додаткова пам'ять і енергоспоживання дозволяють виконувати роль координатора мережі;
  - підтримка всіх типів топологій («точка-точка», «зірка», «дерево», «чарункова мережа»);
  - здатність виконувати роль координатора мережі;
  - здатність звертатися до інших пристроїв в мережі.
- 2) пристрій з обмеженим набором функцій RFD (Reduced Function Device):
  - підтримує обмежений набір функцій стандарту IEEE 802.15.4;
  - підтримка топології «точка-точка», «зірка»;
  - не виконує функції координатора; звертається до координатора мережі і маршрутизатора.

### **1.3.2. Різновиди топології бездротових сенсорних мереж**

Бездротові сенсорні мережі можна розділити на два типи архітектури: однорідні (однорангові) та ієрархічні (кластерні). Однорідна мережа передбачає, що всі вузли виконують однакові функції при зборі, обробці та передачі інформації. Цей підхід забезпечує оптимальну маршрутизацію даних, що передаються. Дані передаються по найефективнішим маршрутам за певними критеріями, такими як енергія (передача йде по маршруту з найвищим запасом енергії) та час (передача відбувається по найкоротшому

маршруту), що забезпечує економію цінних ресурсів. Для критично важливих даних може бути організована передача по найбільш надійному шляху.

Формується два типи мереж бездротових сенсорів: однорангові та ієрархічні. При одноранговому підході всі вузли виконують однакові функції, а маршрутизація даних відбувається по найефективнішим маршрутам, забезпечуючи економію часу та енергії. Агрегація даних відбувається по мірі їх проходження до координатора, але при такому підході можуть виникнути зіткнення пакетів та затримки. Іншим підходом є ієрархічна маршрутизація, яка базується на формуванні кластерів - областей мережі, де кожен кластер складається з маршрутизатора та кінцевих вузлів, які запитують сенсорні дані. На рис. 1.8 зображена така класична структура БСМ [8].

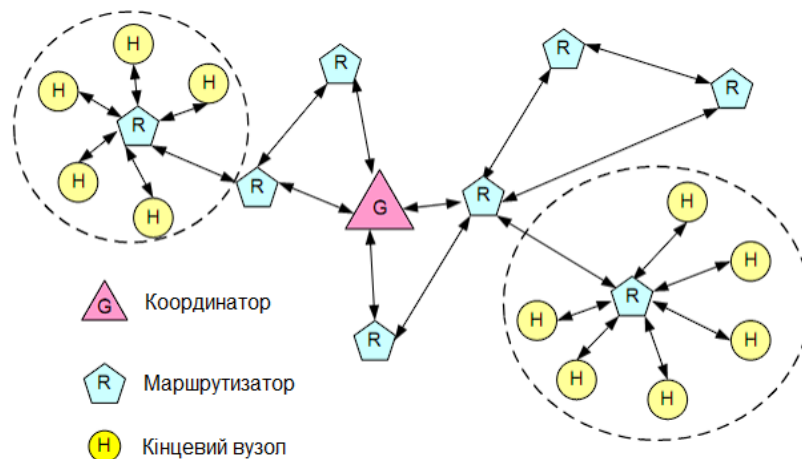


Рис. 1.8. Кластерна структура БСМ

У структурі ієрархічної мережі, маршрутизатор кожного кластера збирає дані з усіх вузлів кластера, обробляє їх і передає до інших маршрутизаторів в мережі. Інші вузли кластера здійснюють лише збір даних і передачу їх до маршрутизатора. Таким чином, вузли в мережі мають різні рівні повноважень. Цей підхід дозволяє мінімізувати затримки передачі даних, оскільки маршрутизатори завжди доступні, а зіткнення пакетів виключаються завдяки централізованому методу створення посилань. Однак, така маршрутизація не забезпечує функції маршрутизатора, витрачає більше енергії, що призводить до швидкого виснаження його батарей. Для енергоємних додатків можуть

застосовуватись фізично виділені сенсорні вузли з великим запасом енергії та обчислювальною потужністю. Маршрутизатори кластерів передають дані один одному і, в кінцевому рахунку, дані передаються до координатора, який зазвичай має зв'язок з IP-мережею, де відбувається остаточна обробка даних. У кожній мережі повинен бути принаймні один повнофункціональний пристрій, який виступає в ролі координатора.

Сенсорні мережі можуть мати різні топології, як показано на рис. 1.9. Однорангові мережі можуть бути організовані в будь-які топологічні структури, такі як точка-точка або зірка, залежно від дистанції між кожною парою вузлів. Mesh-мережі, що є базовою повнозв'язною топологією, забезпечують з'єднання кожного маршрутизатора мережі з декількома іншими маршрутизаторами цієї ж мережі. Хоча Mesh-мережі мають високу стійкість до відмов, вони потребують більш складної настройки порівняно з іншими топологіями [8].

Кластерне дерево є одним з прикладів тимчасової або пирингової мережі (Peer-to-peer, P2P), що означає рівень до рівня. У мережі типу кластерне дерево більшість пристроїв є FFD, а пристрої RFD підключаються до кластеру як кінцеві вузли. Щоб додати нові мережеві пристрої до віддаленого від координатора місця, можна використовувати вже підключені до мережі FFD, які працюють в режимі координатора. В цьому режимі вони можуть запрошувати нові мережеві пристрої в мережу за допомогою маяків. Таким чином формується кластер з мережевих пристроїв, які підслуховують свого координатора. Однак, вся інформація про кластер доступна тільки координатору PAN. Цей же метод можна використовувати для створення мультікластерів з мережевих пристроїв [8].



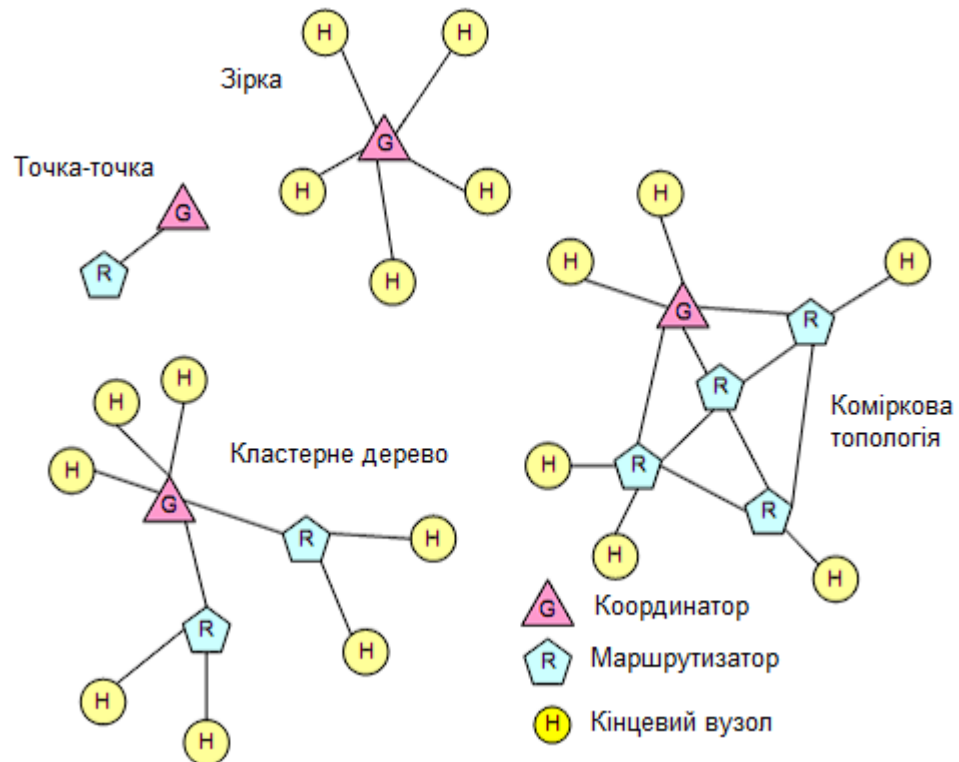


Рис. 1.9. Можливі топології сенсорної мережі

## 1.4. Технології передачі даних в бездротових сенсорних мережах

### 1.4.1. Технологія Circuit Switched Data (CSD)

Circuit Switched Data (тимчасової або пирингової мережі) - це технологія передачі даних через мобільну мережу, яка використовує ресурси мережі, які відведені для голосового зв'язку. При використанні CSD, передача даних відбувається за допомогою встановлення окремого каналу зв'язку між двома пристроями, який забезпечує стійкість передачі даних.

Міжнародний стандарт для мобільного цифрового стільникового зв'язку з розділенням каналу за принципом TDMA та високим рівнем безпеки за рахунок шифрування з відкритим ключем називається Глобальна система мобільного зв'язку (Global System for Mobile Communications, GSM). Стандарт був розроблений під патронатом Європейського інституту стандартизації електрозв'язку (ETSI) наприкінці 1980-х років. Більшість мереж GSM працюють у діапазоні 900 МГц або 1800 МГц, але в деяких країнах Америки

використовують діапазони 850 МГц та 1900 МГц, оскільки стандартні діапазони 900 та 1800 МГц зайняті іншими системами.

При роботі у стандартному діапазоні 900 МГц використовується діапазон 890–915 МГц для зв'язку від терміналу до базової станції, та 935–960 МГц для зв'язку від базової станції до терміналу. У деяких країнах діапазон частот GSM-900 був розширений до 880–915 МГц (MS → BTS) і 925–960 МГц (MS ← BTS), завдяки чому максимальна кількість каналів зв'язку збільшилася на 50. Така модифікація була названа E-GSM (extended GSM). Смуга у 25 МГц ділиться на 124 канали (несучі), кожен шириною у 200 кГц. Часове розділення каналів (TDMA) дозволяє у кожному каналі розміщувати вісім повношвидкісних (full-rate) чи шістнадцять напівшвидкісних (half-rate) голосових каналів. Стандарт GSM використовує декілька голосових кодеків, що дозволяють передавати голосовий канал шириною 3,1 кГц на швидкостях від 9,6 до 14 кбіт/с [9].

Крім того, стандарт GSM також підтримує передачу даних через мережу, включаючи послугу передавання даних Circuit Switched Data (CSD). CSD дозволяє передавати дані зі швидкістю 9,6 кбіт/с за допомогою використання каналу зв'язку між телефоном і мережею [9].

Основні переваги CSD:

- низька вартість і висока надійність в тих місцях, де немає доступу до іншого типу зв'язку;
- немає потреби у додаткових ресурсах мережі для передачі даних;
- простота в реалізації і зручність в використанні;

Основні недоліки CSD:

- низька швидкість передачі даних, яка зазвичай не перевищує 9,6 кбіт/с;
- відсутність можливості одночасної передачі даних та голосу;
- значний обсяг ресурсів мережі, що необхідні для передачі невеликої кількості даних;
- неможливість передавати дані в режимі реального часу.

### 1.4.2. Технологія LoRaWAN

LoRaWAN є мережевим протоколом, який використовує широкосмугову модуляцію LoRa на фізичному рівні та характеризується низьким енергоспоживанням. Цей протокол дозволяє передавати дані на великі відстані (до 10 км на відкритій місцевості, до 5 км у міській забудові) та забезпечує високу проникність сигналу в міській забудові, що дозволяє використовувати його в глибоких підвалах без додаткових витрат. Протокол LoRaWAN є програмним рівнем, що визначає процес використання обладнання LoRa при передачі та прийомі повідомлень. Він дозволяє малопотужним пристроям обмінюватись даними з додатками, які підключені до Інтернету бездротовою мережею на великій відстані [10].

LoRa класифікується на 3 класи пристроїв: А, В та С. Кожен з них має відмінні режими передачі даних та рівень енергоефективності.

Клас А є базовим та повинен бути підтриманий всіма пристроями. Ці пристрої входять до мережі за запланованим графіком та мають 2 додаткових вікна для прослуховування мережі, одразу після відправлення даних. Вони мають найтриваліший термін служби, але для передачі даних на пристрій потрібно дочекатись найближчого запланованого часу виходу в мережу [10].

Клас В, на відміну від класу А, має додаткові заплановані періоди прослуховування мережі, які відкриваються за розкладом. Ці пристрої синхронізуються з базовою станцією за допомогою спеціальних маяків, що дозволяє знати точний час виходу пристрою на зв'язок [10].

Клас С передає дані увесь час, крім періоду передачі даних. Ці пристрої застосовуються у випадках, коли не потрібно економити енергію, але потрібно опитувати пристрій у незапланований час [10].

Технологія LoRaWAN має свої переваги та недоліки. Серед переваг можна виділити високу дальність передачі даних, проникаючу здатність у міських умовах, швидкість та простоту розгортання мережі, тривалий строк служби батареї, простоту масштабування та невисоку вартість базових станцій

та кінцевих пристроїв. Серед недоліків можна виділити затримку передачі даних від кінцевих пристроїв до додатка та невисоку пропускопроміжну здатність мережі [10].

### **1.4.3. Технологія Nb-IoT**

Nb-IoT це специфікація стандарту стільникового зв'язку, призначена для забезпечення обслуговування пристроїв, які генерують невеликий обсяг даних [11].

Мережа Nb-IoT майже повністю успадкувала фізичну структуру та архітектуру від стандарту LTE, тому побудова інфраструктури для Інтернету речей не потребує нічого, крім оновлення програмного забезпечення на наявних базових станціях. Благодаря простоті системи оператори можуть надавати низькі тарифи для клієнтів Інтернету речей.

Основні характеристики Nb-IoT включають:

- достатню пропускну здатність для більшості IoT-пристроїв;
- можливість обмінюватися об'єктами, які рознесені в часі;
- здатність працювати на більш віддаленій території, ніж 4G на тій же частоті;
- високу стійкість до шумів;
- надзвичайно низьке енергоспоживання (датчики можуть працювати від однієї батареї протягом близько 10 років);
- знижені вимоги до процесора.

Nb-IoT - це стандарт стільникового зв'язку, який базується на технології LTE. Простими словами, смуга 4G LTE складається з каналів, що розділяються на піднесення з шириною 15 кГц. Кожна несуча в LTE розбивається на ресурсні блоки (РБ), що містять 12 піднесень по 15 кГц. Загалом, один РБ займає 180 кГц та містить 84 ресурсних елементів у сітці 12 на 7. Смуга 5 МГц включає в себе 25 РБ, які можуть використовуватись для передачі даних за стандартом LTE [11].

У мережі Nb-IoT швидкість передачі даних може досягати 58,8 Кбіт/с, але з використанням деяких рішень можна збільшити її до 100 Кбіт/с. Передача даних на піднесені 15 кГц забезпечує збільшення спектральної щільності сигналу та зменшення відношення сигнал/шум. Це особливо важливо для IoT-пристроїв зі слабкими передавачами.

Низький рівень споживання енергії досягається не лише завдяки низьким швидкостям передачі даних, але й завдяки зниженню кількості енерговитратних процедур реєстрації в мережі. Підключений пристрій з'єднується з базовою станцією, "домовляється" щодо параметрів роботи та переходить у сплячий режим, після чого може бути швидко розбуджений для передачі даних. У сплячому режимі базова станція накопичує інформацію для кінцевого пристрою, зменшуючи час в радіофері. Однак варто пам'ятати, що для такої роботи устаткування має знаходитися в одній точці, і переміщення пристрою може потребувати повторного "обговорення" параметрів з базовою станцією [11].

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

1. Проаналізовано задачі автоматизованої системи моніторингу та виробництва електроенергії, її компоненти та переваги використання. Показано, що конкретними завданнями автоматизованої системи моніторингу виробництва та розподілу електроенергії є збір та аналіз даних про вироблену та спожиту електроенергію, моніторинг ефективності роботи станції та виявлення проблем в її роботі, автоматизація процесу збору показників лічильників, а також забезпечення віддаленого доступу до даних та звітів про стан електромережі та роботу генеруючих приладів.
2. Охарактеризовані особливості будови та функціонування бездротових сенсорних мереж для систем автоматизованого моніторингу виробництва та розподілу електроенергії. Визначені переваги, класифікація бездротових сенсорних мереж, їх типи та особливості топології.
3. Показано, що сучасні системи моніторингу виробництва та розподілу електроенергії, як правило, складаються зі складного поєднання технічних пристроїв та програмного забезпечення. Вони включають сенсорні вузли (такі як лічильники), обладнані вбудованими пристроями для збору даних та бездротової передачі інформації за допомогою технологій, таких як GSM, LoRa, NB-IoT та інші. Ці пристрої передають інформацію до блоків керування та передачі даних (таких як шлюзи або базові станції), які зчитують, обробляють та передають результати вимірювань на сервер мережі. Після цього дані надсилаються до зовнішніх програмних додатків, включаючи автоматизовані робочі місця диспетчерського керування.

## **РОЗДІЛ 2. ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ВИРОБНИЦТВА ТА РОЗПОДІЛУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ СУБ'ЄКТАМИ АЛЬТЕРНАТИВНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ**

Метою даного розділу є розроблення структурної схеми та алгоритму роботи автоматизованої системи моніторингу виробництва та розподілу електроенергії, що враховуватиме особливості функціонування суб'єктів альтернативної енергетики. Для досягнення цієї мети необхідно провести дослідження сучасних технологій та методів моніторингу та управління електроенергією, а також вивчити специфіку суб'єктів альтернативної енергетики та їх вимоги до системи.

Крім того, оберемо елементну базу розроблюваної системи моніторингу, оскільки основним завданням є створення ефективною та надійною системи, яка забезпечуватиме точне вимірювання, контроль та аналіз параметрів електроенергетичної системи.

### **2.1. Загальні технічні вимоги, що пред'являються до автоматизованої системи моніторингу виробництва та розподілу електроенергії**

Загальні технічні вимоги до автоматизованої системи моніторингу виробництва та розподілу електроенергії суб'єктами альтернативної енергетики, включають наступне:

- двонаправленість передачі сигналів. Система повинна забезпечувати можливість двонаправленої передачі сигналів між засобами обліку, радіомодемами, концентраторами та сервером. Це дозволить збирати дані з приладів обліку та передавати їх на сервер для подальшого аналізу та моніторингу;
- автоматична передача даних. Система повинна мати можливість автоматично передавати збережені покази з приладів обліку на сервер з заданою періодичністю або за запитом від сервера. Це забезпечить актуальність та надійність даних у системі моніторингу;

- адаптивність програмного забезпечення. ПЗ сервера, концентраторів та радіомодемів повинне бути адаптивним для реалізації функціонування з різними приладами обліку через цифровий інтерфейс. Це дозволить інтегрувати різні типи приладів обліку в систему моніторингу без значних змін у програмному забезпеченні;
- інформаційний захист. Система повинна забезпечувати захист передачі інформації шляхом шифрування каналів передачі даних на ділянках радіомодем - концентратор - сервер. Також слід застосовувати завадостійке кодування при передачі цих даних. Це забезпечить конфіденційність та цілісність даних, що передаються у системі;
- бездротовий зв'язок. Радіомодеми і концентратор повинні мати універсальний блок управління і бездротового зв'язку для бездротової передачі даних. Це дозволить ефективно та надійно передавати дані з приладів обліку до сервера без необхідності провідного з'єднання.

Ці загальні технічні вимоги формують основу для розробки автоматизованої системи моніторингу виробництва та розподілу електроенергії, забезпечуючи надійну і безперебійну передачу даних з приладів обліку на сервер для подальшого аналізу та контролю електроенергетичної системи.

## **2.2. Порівняльний аналіз технологій бездротового зв'язку для автоматизованих систем моніторингу**

Забезпечення ефективної комунікації є ключовим фактором для успішного розподілу електроенергії, зокрема в сфері альтернативної енергетики, де бездротова передача даних є необхідною. Часто станції виробництва «зеленої» енергії розташовані віддалено від населених пунктів, де можуть виникнути проблеми з мережевим зв'язком. У таких випадках, встановлення бездротових засобів передачі даних (БЗПД) є доречним.

Вибір оптимального бездротового стандарту для забезпечення ефективної комунікації в автоматизованій системі моніторингу є важливим



завданням, оскільки потрібно враховувати такі параметри, як енергоспоживання, радіус покриття та пропускна здатність. Важливо, щоб БСМ був енергоефективним, забезпечував достатній радіус покриття і мав достатню пропускну здатність для передачі важливих даних.

На рис. 2.1 представлено порівняння технологій за дальністю дії. Як видно з рис. 2.1, що більшість технологій не відповідає потребам суб'єктів альтернативної енергетики через їх обмежену дальність передачі даних. Тому слід розглянути можливість застосування технології бездротової широкомасштабної мережі Wireless Wide Area Network.

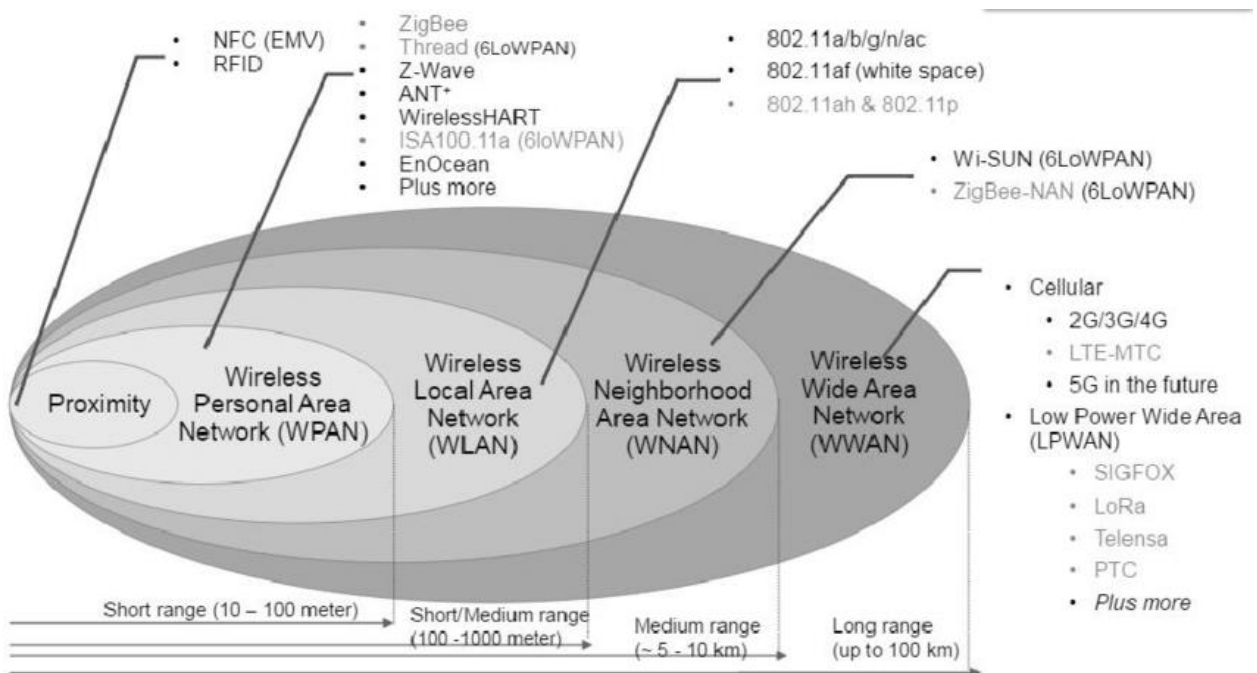


Рис. 2.1 Технології бездротового зв'язку за радіусом дії [16]

У табл. 2.1 наведений порівняльний аналіз параметрів технологій БСМ.

Оскільки різні бездротові стандарти мають свої переваги та обмеження, важливо вибрати той, який найкраще підходить для конкретних умов та потреб суб'єктів альтернативної енергетики.

Для забезпечення ефективної комунікації в автоматизованій системі моніторингу найкращим варіантом може бути застосування технології

LoRaWAN, яка забезпечує надійний та енергоефективний зв'язок на великій відстані. Також, технологія NB-IoT може бути використана для забезпечення ефективного зв'язку в приміщеннях та підземних спорудах.

Таблиця 2.1

### Порівняльний аналіз параметрів технологій БСМ

Параметр	технології БСМ			
	LTE-M	LoRaWan	NB-IoT	Sigfox
Стандарт зв'язку	3GPP	Власний	3GPP	Власний
Частота	від 700 МГц до 2,2 ГГц. від 452,5 МГц до 467,5 МГц	433 МГц, 868 МГц, 915 МГц	від 700 МГц до 2,2 ГГц, від 452,5 МГц до 467,5 МГц	868 МГц, 915 МГц, 921 МГц
Швидкість передачі	1 Мбіт/с	RX 290 біт/с TX 50 Кбіт/с	~200 Кбіт/с	0,1 Кбіт/с
Топологія	Зірка	Зірка	Зірка	Зірка
Кількість пристроїв	Дуже велика	Дуже велика	Дуже велика	Дуже велика
Радіус дії	5 км	від 5 км до 15 км	5 км	від 10 км до 50 км
Потужність	висока	середня	висока	середня
Спосіб застосування	Мобільний/ Локальний	Мобільний/ Локальний	Мобільний/ Локальний	Мобільний/ Локальний

### 2.3. Порівняння технологій LoRaWAN та NB-IoT

Продемонструємо порівняльний аналіз технічних характеристик технологій LoRaWAN та NB-IoT табл. 2.2.

NB-IoT та LoRaWAN - два різних стандарти для забезпечення зв'язку. Одна з найбільш відчутних відмінностей між ними - це простота розгортання.

Для того, щоб розпочати роботу з мережею NB-IoT, потрібно спочатку отримати ліцензію на використання частот. NB-IoT мережа працює в

ліцензованій частині спектра, що може знаходитися в діапазоні 1800 МГц або нижче. Також, для розгортання мережі NB-IoT можна використовувати інфраструктуру мереж 4G.

Таблиця 2.2

**Порівняльний аналіз технічних характеристик технологій  
LoRaWAN та NB-IoT**

Технічні характеристики	LoRaWAN	NB-IoT
Метод модуляції	CSS	OFDMA/DSSS
Діапазон	ISM	ліцензований
Швидкість	від 0,3 кбіт/с до 50 кбіт/с	UL: від 1 кбіт/с до 144 кбіт/с DL: від 1 кбіт/с до 200 кбіт/с
Автономність	більше 10 років	до 10 років
Радіус дії, км	5 (міський), 20 (сільський)	1 (міський), 10 (сільський)
Частотна смуга, кГц	125	164
MCL, дБ	165	164
Піковий струм, мА	32	120
Струм в сплячому режимі, мкА	1	5
Безпека	AES 128 біт	3GPP від 128 біт до 256 біт
Дозвіл на приватну мережу	Так	Ні

З іншого боку, LoRaWAN не вимагає ліцензування для використання частот. Це означає, що пристрої можуть бути легко і швидко розгорнуті в будь-якому місці, де це необхідно.

Ще однією важливою відмінністю є синхронізація. Мережа NB-IoT належить до стільникового зв'язку, тому пристрої, які підключені до цієї

мережі, повинні "прокидатися" та синхронізуватися з мережею, щоб отримати або надіслати повідомлення. Це може призвести до витрати енергії пристроєм та скорочення часу автономної роботи.

У свою чергу, LoRaWAN працює зовсім інакше. Пристрої можуть надсилати дані тільки тоді, коли є що надсилати, що дозволяє їм економити енергію та зберігати заряд акумулятора.

Надійність та швидкість передавання даних - один з ключових аспектів для ефективного використання пристроїв IoT. В цьому контексті NB-IoT стоїть на високому рівні, забезпечуючи середню швидкість передачі даних 200 Кбіт/с, проти 50 Кбіт/с від LoRaWAN. Це робить його ефективним для більш швидких додатків [12].

Пропускна здатність - ще один важливий аспект, який слід враховувати при порівнянні мереж NB-IoT та LoRaWAN. Зазвичай, NB-IoT працює на вищій пропускній здатності, ніж LoRaWAN, зі значенням 180 кГц порівняно з 125 кГц для LoRaWAN.

Покриття мереж - інший важливий фактор, який слід враховувати. NB-IoT найкраще працює у складних міських районах, де його продуктивність буде надлишковою. Однак, в приміських або сільських районах, його продуктивність може бути нижчою. На відміну від цього, LoRaWAN не залежить від мобільних даних і має стійке покриття, незалежно від умов місцевості. Тому, для IoT-пристроїв у віддалених місцях, LoRaWAN може бути більш оптимальним варіантом.

Управління SIM-картами є важливим аспектом роботи в мережі NB-IoT. Для підключення до цієї мережі можна використовувати різні формати SIM-карт, зокрема звичайні, термо-SIM карти для роботи в екстремальних кліматичних умовах і SIM-чіпи для невеликих пристроїв.

Однак впровадження технології LoRa створило конкуренцію на ринку бездротових технологій IoT для стільникових технологій, оскільки вона

працює без SIM-карт, а кінцевий вузол може підключатись до мережі безкоштовно [12].

Зараз для використання 2G і 3G обладнання необхідно купувати SIM-карти. Однак для стільникових LPWAN-мереж, які основані на 4G, розробляють модулі з вбудованими програмованими SIM-чипами, що зробить взаємодію з оператором зв'язку дешевшою та простішою.

Щодо розгортання мережі LPWAN в Україні, оператор стільникового зв'язку lifecell планує використовувати технологію LoRaWAN та частоту 868 МГц. Ця технологія дозволить підтримувати зв'язок між пристроями на відстані до 15 км з мінімальним споживанням енергії [12].

### **2.3. Розроблення структурної схеми автоматизованої системи моніторингу виробництва та розподілу електроенергії**

Наступним етапом буде розробка структурної схеми автоматизованої системи моніторингу виробництва та розподілу електроенергії.

На рис. 2.2 зображено структурну схему автоматизованої системи моніторингу виробництва та розподілу електроенергії (на базі бездротової сенсорної мережі LoRaWan).

Кінцеві IoT пристрої (лічильники) підключені до шлюзу LoRaWAN за допомогою топології «зірка», а передача сигналів між ними здійснюється за допомогою модуляції LoRa. При цьому передача даних йде одразу на всі доступні в локації базові станції, а не на одну. Відсутність прив'язки до конкретного шлюзу дозволяє гарантувати передачу інформації та, при необхідності, контролювати датчик, який знаходиться у русі. Уся інформація, яка передається з кінцевого IoT-пристрою, захищена наскрізним шифруванням за допомогою 2 рівнів криптографічного захисту: 128-бітного мережевого ключа та 128-бітного ключа сесії додатку [12]. Технологія LoRaWAN дозволяє легко підключати нові сенсорні вузли, а їх кількість не обмежується рівнем енергоспоживання.



Рис. 2.2. Структурна схема автоматизованої системи моніторингу виробництва та розподілу електроенергії (на базі бездротової сенсорної мережі LoRaWAN)

Кожен шлюз (базова станція) зареєстрований у мережі LoRaWAN і напямую пересилає отримані пакети даних на мережевий сервер (Network Server), використовуючи найбільш відповідний варіант підключення до мережі (3G, 4G, Wi-Fi, Ethernet, по оптоволокну або радіолінійному зв'язку) [12].

Мережевий сервер (Network Server) керує всією мережею. Він отримує дані від шлюзів, видаляє дублікати повідомлень, пересилає отримані дані на відповідний сервер додатків (Application server), контролює швидкість передачі даних [12].

Сервер додатків (Application server) обробляє отримані дані і спрямовує їх на підключені кінцеві пристрої. Отримані дані можна інтерпретувати та використовувати для вирішення бізнес-завдань [12].

## 2.4. Вибір елементної бази для автоматизованої системи моніторингу виробництва та розподілу електроенергії

### 2.4.1. Вибір шлюзу

В якості базової станції візьмемо KONA Macro, яка характеризується низькими витратами на зберігання мережі та покращеною зоною покриття і ємністю. Ці станції мають компактний корпус, що дозволяє легко їх

монтажувати. Вона має вбудований 3G/LTE модем і модуль GPS, що зменшує необхідність додаткових покупок. Базові станції KONA Macro дуже міцні і можуть працювати в будь-яких погодних умовах [13]. Базова станція KONA Macro зображена на рис. 2.3.



Рис. 2.3 Базова станція KONA Macro

Даний пристрій має наступні технічні характеристики:

- Напрацювання на відмову (MTBF) - 850,000 годин
- Енергоспоживання - < 12 Вт
- Робочий діапазон температур - -40°C to +60°C
- Робочий діапазон вологості - 10-100% без конденсації
- Ступінь захисту - IP67
- Габарити - 144 x 282 x 92 mm
- Маса - 2,6 кг
- ISM Bands - EU868, AU915, AS923, JP920, CH779, NA902-928, CN470-510
- Потужність передавача - 14 дБм до 27 дБм
- Ethernet підключення - RJ-45

- GPS - вбудована антена
- Канал 3G/4G - вбудована антена
- Wi-Fi - немає
- Тип LoRa антени - N-Type
- Тип живлення - 48VDC або PoE (802.3af)

#### 2.4.2. Вибір антени

Антенa ТЕКТЕЛІС LoRaWAN® Antenna 2.5/3 dBi - це напрямлена антена для використання в мережах LoRaWAN®. Вона має коефіцієнт підсилення в діапазоні від 2,5 до 3 дБі та працює в діапазоні частот від 824 до 960 МГц [14]. Антенa ТЕКТЕЛІС зображена на рис. 2.4.



Рис. 2.4 Антенa ТЕКТЕЛІС

Основні характеристики:

- Діапазон частот 860-870 МГц
- Ширина смуги 10 МГц
- Поляризація вертикальна
- Кількість каналів 1
- Коефіцієнт підсилення 2,5 дБі



- Ширина діаграми променевого пучка 3 дБ - азимутальна (горизонтальна) 360°
- Номінальна імпеданс 50 Ом
- Обробка вхідної потужності РЧ 20 Вт
- Розмір 25 мм x 470 мм
- Вага менше 0,25 кг
- RF роз'єм N-J
- Робоча температура -40°C до +70°C

### **2.4.3. Вибір лічильника електроенергії**

Лічильники електричної енергії нового покоління серії SL7000 (ACE7000) є багатофункціональними трифазними електронними приладами, що мають програмовані можливості. Окрім вимірювання параметрів споживання енергії, вони також здатні проводити додаткові вимірювання якості електричної енергії. Лічильники можуть бути прямого або трансформаторного типу і мають розширені функціональні можливості, такі як багатотарифний облік електроенергії на підприємствах енергетики і промисловості, автоматичне зчитування та архівація розрахункових параметрів [15].

Ці лічильники використовують універсальне джерело живлення і мають широкий діапазон вимірювань, що охоплює всі можливі застосування. Це дозволяє використовувати лічильники одного типу на всій території, що обслуговується енергетичною компанією.

Лічильники серії SL7000 виробляються з точністю класу 0.2, 0.5 або 1.0. Вони оснащені сучасними комунікаційними інтерфейсами, протоколами передачі даних і мовою DLMS-COSEM, що відповідають новому міжнародному стандарту. Це забезпечує легку інтеграцію лічильників в автоматизовані системи комерційного обліку та інші системи технологічного контролю [15]. Лічильники електричної енергії SL7000 зображений на рис. 2.5.



Рис. 2.5 Лічильники електричної енергії SL7000

## **2.5. Розроблення алгоритму роботи автоматизованої системи моніторингу**

Згідно поставленого завдання дослідження розроблено алгоритм роботи автоматизованої системи моніторингу виробництва та розподілу електроенергії, який наведено на рис. 2.6.

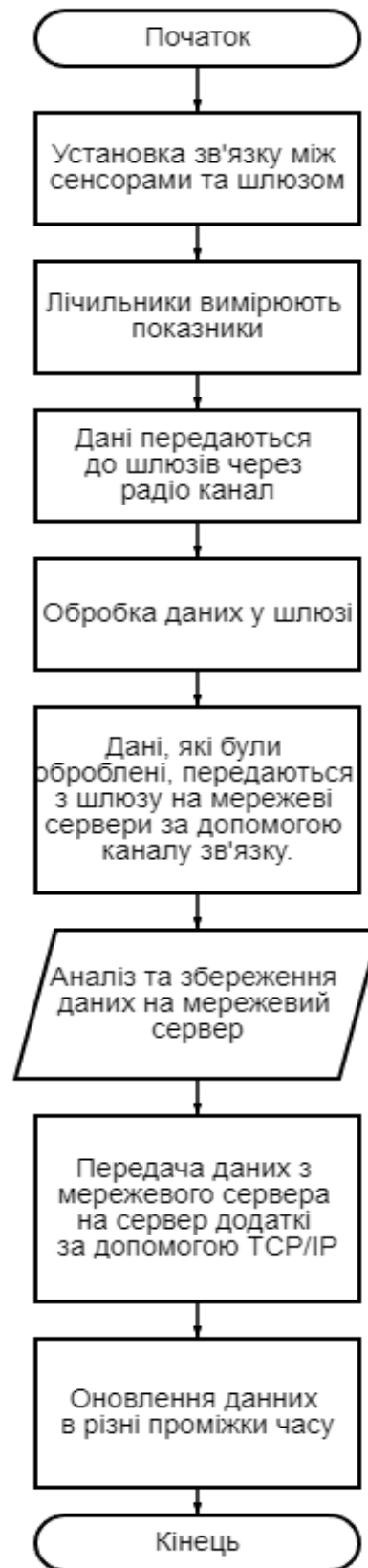


Рис. 2.6. Блок-схема алгоритму роботи автоматизованої системи моніторингу виробництва та розподілу електроенергії

Алгоритм реалізується виконанням наступних послідовних кроків:

- 1) вимірювання енерговитрат кінцевими пристроями;
- 2) передача даних до шлюзу за допомогою радіоканала;
- 3) обробка даних шлюзом;
- 4) передача даних зі шлюзу на мережевий сервер;
- 5) обробка інформації сервером;
- 6) подальша передача на сервери додатків.

Після завершення цих етапів дані оновлюються згідно з встановленим інтервалом часу.

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

1. Наведено загальний опис розробленої автоматизованої системи моніторингу виробництва та розподілу електроенергії, включаючи її структуру, основні завдання та технічні вимоги. Впровадження такої системи дозволить ефективно контролювати та оптимізувати виробництво та розподіл електроенергії, забезпечуючи надійність, ефективність та безпеку у цих процесах.
2. Проведено порівняльний аналіз двох високоефективних бездротових технологій передачі даних в бездротових сенсорних мережах - LoRaWAN та NB-IoT. Показана перспективність застосування в системах моніторингу виробництва та розподілу електроенергії суб'єктами альтернативної енергетики технології LoRaWAN, що базується на методі модуляції LoRa в бездротових мережах LPWAN та використовує відкритий протокол LoRaWAN для взаємодії між LPWAN-шлюзами та кінцевими пристроями та яка найкраще відповідає більшості технічних вимог, зокрема стосовно енергоефективності, покриття, надійності та простоти розгортання.
3. Розроблено структурну схему системи моніторингу виробництва та розподілу електроенергії суб'єктами альтернативної енергетики, в якій кожен компонент має свою функціональну роль та взаємозв'язок з іншими елементами системи.
4. На основі технічних вимог до системи моніторингу виробництва та розподілу електроенергії суб'єктами альтернативної енергетики, а також з урахуванням обраної технології бездротового з'єднання LoRaWAN, здійснено вибір її елементної бази.
5. Розроблено алгоритм роботи запропонованої системи моніторингу та наведено опис послідовності етапів та процесів, що відбуваються на кожному кроці його реалізації.

### **РОЗДІЛ 3. РЕКОМЕНДАЦІЙНІ ЗАХОДИ ПОКРАЩЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОГО ОБМІНУ ПРОЦЕСУ АВТОМАТИЗОВАНОГО МОНІТОРИНГУ ВИРОБНИЦТВА ТА РОЗПОДІЛУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ СУБ'ЄКТАМИ АЛЬТЕРНАТИВНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ**

В даному розділі наведені рекомендаційні заходи покращення інформаційного обміну процесу автоматизованого моніторингу виробництва та розподілу електроенергії суб'єктами альтернативної енергетики з використанням бездротової сенсорної мережі LoRa. Зокрема, розглянуті такі аспекти, як розрахунок часу передачі пакетів, оцінка пропускної здатності мережі, визначення швидкості передачі та чутливості приймача та розрахунок ємності базової станції. Ці ключові аспекти є важливими для розробки ефективної та надійної системи моніторингу, що базується на бездротовій сенсорній мережі LoRa.

Розрахунок часу передачі пакетів є одним з важливих етапів при проектуванні мережі LoRa, оскільки він визначає швидкість та ефективність передачі даних. Оцінка пропускної здатності мережі дозволяє визначити, який об'єм даних може бути передано протягом певного проміжку часу і як це впливає на продуктивність системи моніторингу. Визначення швидкості передачі та чутливості приймача базової станції є важливим аспектом, оскільки вони визначають максимальну відстань, на якій можуть бути розташовані вузли мережі, щоб забезпечувати надійну передачу даних. Розрахунок ємності базової станції визначає, скільки вузлів може бути підключено до базової станції без втрати продуктивності мережі.

В даному розділі представлені математичний опис розрахунку часу передачі пакетів, оцінки пропускної здатності мережі, визначення швидкості передачі та чутливості приймача базової станції та розрахунку ємності базової станції в системі автоматизованого моніторингу альтернативної енергетики з використанням бездротової сенсорної мережі LoRa. Ці моделі та методи дозволять ефективно проектувати та налаштовувати мережу, забезпечуючи

оптимальну передачу даних та максимальну продуктивність системи моніторингу в секторі альтернативної енергетики.

### 3.1. Розрахунок часу передачі одного пакета через радіоінтерфейс LoRaWAN

Кожен пакет, який передається через мережу LoRaWAN, складається з фізичного рівня блоку даних і преамбули. Преамбула полягає в однобайтовій послідовності 10101011, яка вказує на початок пакета, а також в семи байтах, що чергуються 1 і 0 (кожен байт - послідовність 101010). Ці значення служать для синхронізації приймального терміналу. Кількість символів у преамбулі, позначена як  $n_{preamble}$ , може бути налаштована в діапазоні від 6 до 65535.

Швидкість передачі даних у мережі LoRaWAN визначається комбінацією рівнів модуляції та коефіцієнтів розширення (Spreading Factors) разом з шириною смуги каналу. Ці параметри впливають на фізичну бітову швидкість та час передачі в ефірі. Рівень розширення (SF) - це ціле число, яке може бути встановлене в діапазоні від 7 до 12. Чим вище значення SF, тим більше спотворення можливе в лінії зв'язку.

Кількість символів у блоці даних фізичного рівня визначається за формулою (3.1)

$$payloadSymbNb = 8 + \text{ceil} \left( \frac{8PL - 4SF + 28 + 16CRC - 20H}{4(SF - 2ADR)} \right) (CR + 4), \quad (3.1)$$

де

- $PL = 12 + FRM$  – кількість байт корисних даних у блоці фізичного рівня ( $PHPPayload$ );
- $SF$  – коефіцієнт розширення спектра;
- $CRC$  – перевірка надлишковості циклічної суми ( $CRC = 1$ , коли передача поля  $CRC$  блоку корисного навантаження включена, і  $CRC = 0$  – коли вимкнена);

- $H$  – параметр, що відображає наявність заголовка в радіопакеті ( $H = 0$ , коли передача заголовка ( $PHDE + PHDE\_CRC$ ) включена, і  $H = 1$  – коли передача заголовка відсутня);
- $ADR$  – оптимізація швидкості передачі даних ( $ADR = 1$ , коли оптимізація для низьких швидкостей передачі включена, та  $ADR = 0$  – коли вимкнена);
- $CR$  = від 1 до 4 – швидкість коду;
- $ceil$  – операція округлення до найближчого цілого числа.

Тривалість передачі преамбули розраховується за формулою (3.2)

$$T_{preamble} = (n_{preamble} + 4,25) \cdot T_{sym}, \quad (3.2)$$

де  $T_{sym}$  – тривалість передачі одного символу, що розраховується за формулою (3.3)

$$T_{sym} = \frac{2^{SF}}{BW}, \quad (3.3)$$

де  $BW$  – полоса одного радіоканала.

Тривалість передачі блоку даних фізичного рівня розраховується за формулою (3.4)

$$T_{payload} = payloadSymb \cdot T_{sym}. \quad (3.4)$$

Тривалість передачі всього пакета мережі LoRaWAN розраховується за формулою (3.5)

$$T_{packet} = T_{preamble} + T_{payload}. \quad (3.5)$$

Розрахунок будемо проводити для передачі одного UL-пакета (з корисним навантаженням 10 байт) між кінцевим пристроєм (End Node) і сервером додатків (Application Server). Вихідні значення:

- смуга радіоканалу  $BW = 125$  кГц (для SF7 – SF12);
- кількість символів у преамбулі  $n_{preamble} = 6$  (для SF7 – SF12);
- корисні дані ( $FRMPayload$ )  $FRM = 10$  байт (для SF7 – SF12);
- фізичний блок даних ( $PHYPayload$ )  $PL = 23$  (для SF7 – SF12);
- прапор включення заголовка в пакет  $H = 0$  (для SF7 – SF12);



- прапор включення CRC у пакет,  $CRC = 1$  (для SF7 – SF12);
- прапор включення оптимізації швидкостей  $ADR = 0$  (для SF7 – SF12);
- швидкість кодування  $CR = 1$  (для SF7 – SF12).

Таблиця 3.1

## Результати обчислень для передачі одного UL-пакету

Коефіцієнт розширення спектра	$SF$	7	8	9	10	11	12
Тривалість передачі 1-го символу, мс	$T_{sym}$	1,02	2,04	4,09	8,19	16,38	32,76
Прапор включення оптимізації швидкостей	$ADR$	0	0	0	0	1	1
Кількість символів в блоці даних	$payloadSymNb$	28	23	23	18	23	18
Тривалість передачі преамбули, мс	$T_{preamble}$	10,50	20,99	41,98	83,968	167,94	335,87
Тривалість передачі блока даних	$T_{payload}$	49,15	88,06	155,65	270,336	540,67	917,50
Тривалість передачі усього пакета	$T_{packet}$	59,65	109,06	197,63	354,30	708,61	1253,38

На практиці, основним значенням для розширення спектра (Spreading Factor) є  $SF = 12$ , оскільки воно забезпечує найкращу захищеність від завад. З табл. 3.1 видно, що для цього розширення спектра тривалість передачі пакета найбільша і складає 1253,38 мс.

### 3.2. Оцінювання пропускної здатності мережі LoRaWAN в контексті моніторингу вироблення електроенергії

Усі пристрої мережі LoRaWAN, включаючи кінцеві пристрої та базові станції (БС), використовують несинхронізований доступ до спільного середовища передачі даних. Кожен пристрій, розраховуючи на свої потреби, планує випуск пакетів у випадкові моменти в рамках цього механізму доступу. Цей механізм, що базується на протоколі "pure ALOHA", забезпечує гнучкість і ефективність передачі даних у мережі LoRaWAN.

Основні припущення, за яких здійснюється оцінювання пропускної спроможності, включають:

- 1) випадковий доступ. Припускається, що користувачі в системі "pure ALOHA" мають випадковий доступ до передачі даних. Це означає, що вони не синхронізовані і не координують свої передачі;
- 2) пуассонівський потік. Припускається, що інтенсивність появи пакетів даних в системі відповідає пуассонівському потоку. Це означає, що час між появою пакетів є випадковою величиною з експоненційним розподілом;
- 3) незалежність передач. Припускається, що передача пакетів даних в системі "pure ALOHA" відбувається незалежно одна від одної. Колізії виникають тільки при одночасній передачі двох або більше пакетів даних;
- 4) повторні спроби передачі. Припускається, що після колізії користувачі, що брали участь у колізії, чекають випадковий час перед повторною спробою передачі. Цей випадковий час визначається пропускною спроможністю системи;
- 5) ідеальна детекція колізій. Припускається, що система має ідеальну здатність виявляти колізії. Це означає, що коли два або більше пакетів даних намагаються передати одночасно, система відразу розпізнає колізію.

У цьому випадку ймовірність того, що за час передачі одного пакета  $T$  надійде ще  $k$  пакетів від усіх терміналів мережі, визначається формулою Пуассона (3.6)

$$Pr(k) = \frac{G^k \cdot e^{-G}}{k!}, \quad (3.6)$$

де  $G$  – середня кількість повідомлень передачі, що з'явилося на всіх терміналах мережі за час  $T$ .

Ймовірність успішної передачі становить нуль у випадку, якщо на інтервалі передачі повідомлення та на одному попередньому інтервалі не з'являються пакети для передачі від інших кінцевих пристроїв мережі ( $k = 0$ ) (3.7).

$$P = e^{-2G} \quad (3.7)$$

Середня кількість успішно переданих за час  $T$  пакетів, тобто пропускна спроможність мережі, становить (3.8)

$$S = G \cdot P, \quad (3.8)$$

Обчислимо пропускну здатність для розроблюваної системи, використовуючи формули (3.7) та (3.8) для значень  $G$  від 0 до 1,5 з кроком 0,1, та представимо результати розрахунку графічно на рис. 3.1.

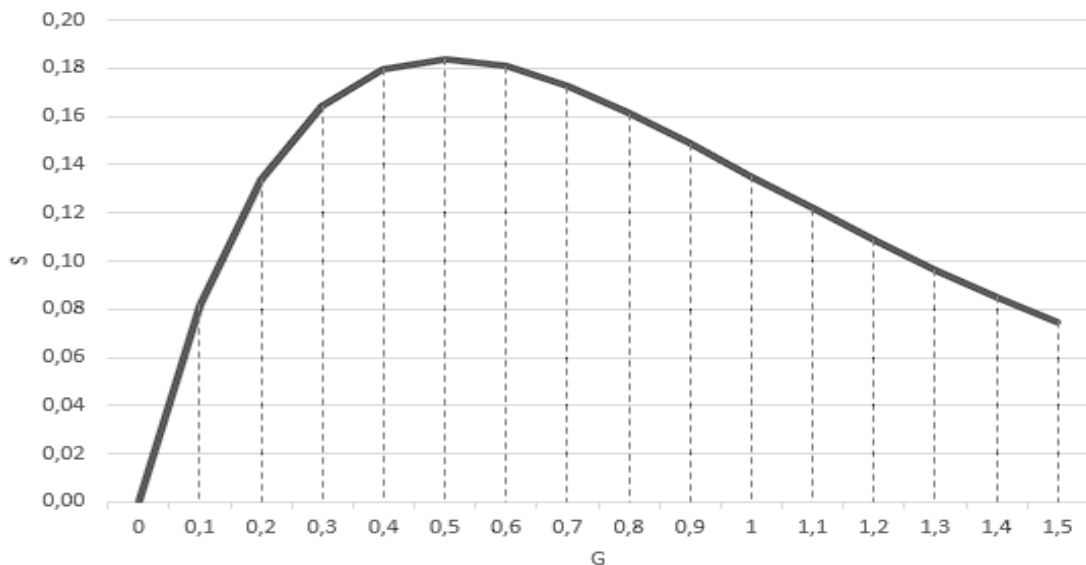


Рис. 3.1. Пропускна здатність для мережі LoRaWAN

З рис. 3.1 видно, що найбільше значення пропускної здатності досягається при інтенсивності надходження пакетів ( $G$ ) рівній 0,5 і має значення 0,184.

За допомогою формули (3.7) проведемо обчислення ймовірності успішної передачі пакетів та представимо результати розрахунку графічно на рис. 3.2.

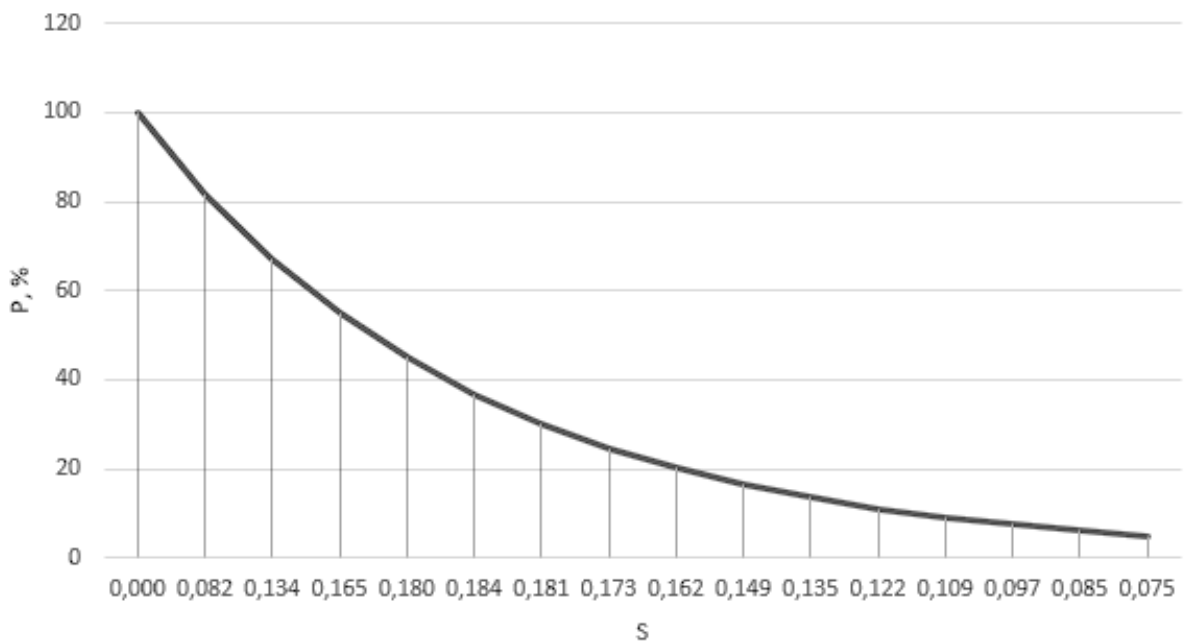


Рис. 3.2. Залежність успішної передачі пакетів даних від пропускної здатності

З рис. 3.2 видно, що при максимальному значенні пропускної здатності мережі ймовірність успішної передачі пакетів через колізію складатиме 37%.

### 3.3. Визначення швидкості передачі та чутливості приймача базової станції LoRa

Широкопasmугова модуляція LoRa використовує метод лінійної частотної модуляції (ЛЧМ), що дозволяє розширити спектр сигналу шляхом неперервної зміни його частоти. Однією з головних переваг такого підходу є еквівалентність між синхронізацією та зрушенням частоти між передавачем та приймачем, що спрощує конструкцію приймальної сторони. Ширина смуги частоти ЛЧМ відповідає спектральній ширині сигналу.

Розрахунок бітової швидкості модуляції LoRa ( $R_b$ ) можна виконати за допомогою формули (3.9).

$$R_b = SF \frac{1}{2^{SF/BW}}, \quad (3.9)$$

де

- $SF$  - коефіцієнт розширення спектра (7 - 12);
- $BW$  - ширина смуги каналу (може бути 125 kHz, 250 kHz або 500 kHz.).

Швидкість передачі символів  $R_s$  розраховується за формулою (3.10)

$$R_s = \frac{1}{T_{sym}} = \frac{BW}{2^{SF}}. \quad (3.10)$$

А швидкість передачі чіпа  $R_c$  може бути визначена за допомогою формули (3.11)

$$R_c = R_s \cdot 2^{SF}. \quad (3.11)$$

LoRa модуляція також включає змінну схему корекції помилок, що підвищує надійність передачі сигналу за рахунок його надмірності. Таким чином, мінімальна швидкість передачі даних сигналу  $R_b$  може бути визначена за формулою (3.12)

$$R_b = SF \frac{4/(4+CR)}{2^{SF/BW}}, \quad (3.12)$$

де  $CR$  – кодова швидкість, яка може бути встановлена на 4/5, 4/6, 4/7 чи 4/8.

Крім того, існує ще один суттєвий фактор, яким є чутливість приймача. Цей показник визначає найменшу потужність сигналу LoRa, яку приймач може впізнати та демодулювати. На основі керівництва дизайнера LoRaSemTech чутливість приймача LoRaWAN можна розрахувати за формулою (3.13)

$$S = -174 + 10 \log BW + NF + SNR, \quad (3.13)$$

де

- $S$  – чутливість приймача;
- $NF$  – коефіцієнт шуму приймача;
- $SNR$  – відношення сигнал/шум для сигналу.

У табл. 3.2 представлені значення номінальної швидкості передачі та чутливості приймача для смуги пропускання 125 кГц. Відповідні значення  $R_b$  (бітової швидкості модуляції) та  $SF$  (рівні розширення спектра) обчислені з використанням наведених рівнянь.

Таблиця 3.2

**Результати розрахунків номінальної швидкості передачі та чутливості приймача**

Смуга пропускання, кГц	Коефіцієнт розширення спектра $SF$	Швидкість передачі $R_b$ , біт/с	Чутливість приймача, дБм
125	7	5697	-122
125	8	3255	-125
125	9	1831	-128
125	10	1071	-133
125	11	559	-135
125	12	305	-137

Для наведених значень у табл. 3.2, максимальна відстань зв'язку в мережі LoRaWAN становить близько 10 км. Проте, при цьому не враховуються вплив радіоперешкод та перешкод, які можуть зустрічатися на шляху поширення сигналу [18].

### 3.4. Розрахунок ємності базової станції

Проаналізуємо мережу LoRa, яка використовує частоту 868 МГц і смугу пропускання 125 кГц при  $N_f = 8$  радіочастотних каналах. Передбачається, що вузли передають пакети з корисним навантаженням 10 байт і преамбулою 6 символів з інтенсивністю передачі 1 пакет на годину. Допускається ймовірність втрат через колізії  $P_{втр} = 5\%$ . Колізія виникає, якщо два або більше вузлів одночасно передають свої пакети з однаковим коефіцієнтом розширення спектра  $SF$ .

Час передачі одного пакета розраховується за формулою (3.14)

$$T_{SF} = T_{SF ULpack} + T_{SF DLpack}, \quad (3.14)$$

де

- $T_{SF ULpack}$  – сумарний час передачі пакета від вузла до БС;
- $T_{SF DLpack}$  – час передачі пакету з підтвердженням від БС до вузла.

Коефіцієнт розширення спектра визначається з допомогою формули (3.14) при використанні даних з табл. 3.1.

Продуктивність БС LoRa, тобто кількість пакетів, які обслуговує шлюз на добу, визначається виразом (3.15)

$$\text{Пропускна здатність} = N_f \sum_{SF} P_{SF} \frac{N_{EN\text{пак}} \cdot 3600 G_{2\%}}{T_{SF}}, \quad (3.15)$$

де

- $N_{en\text{пак}}$  – кількість пакетів, що передаються одним кінцевим вузлом на добу;
- $G = 0,0256$  – інтенсивність надходження пакетів при  $P_{втр} = 5\%$ ;
- $P_{SF}$  – можливість використання відповідного  $SF$ ;
- $N_f$  – загальна кількість радіоканалів, розгорнутих мережею LoRaWAN.

Проведемо обчислення ємності базової станції LoRa, де вузли розподілені по різним площам зон радіопокриття.

На рисунку 3.3 відображено імовірність використання вузлів у різних зонах  $SF$ , де  $P_{SF} = (4,8\%; 3,9\%; 11,8\%; 16,7\%; 25,6\%; 37,2\%)$  [17].

За допомогою формули (3.15) та даних з табл. 3.1, можна визначити ємність базової станції LoRa, а також відповідну кількість кінцевих вузлів на одну базову станцію. Результати розрахунку ємності базової станції LoRa представлені у табл. 3.3 [17].

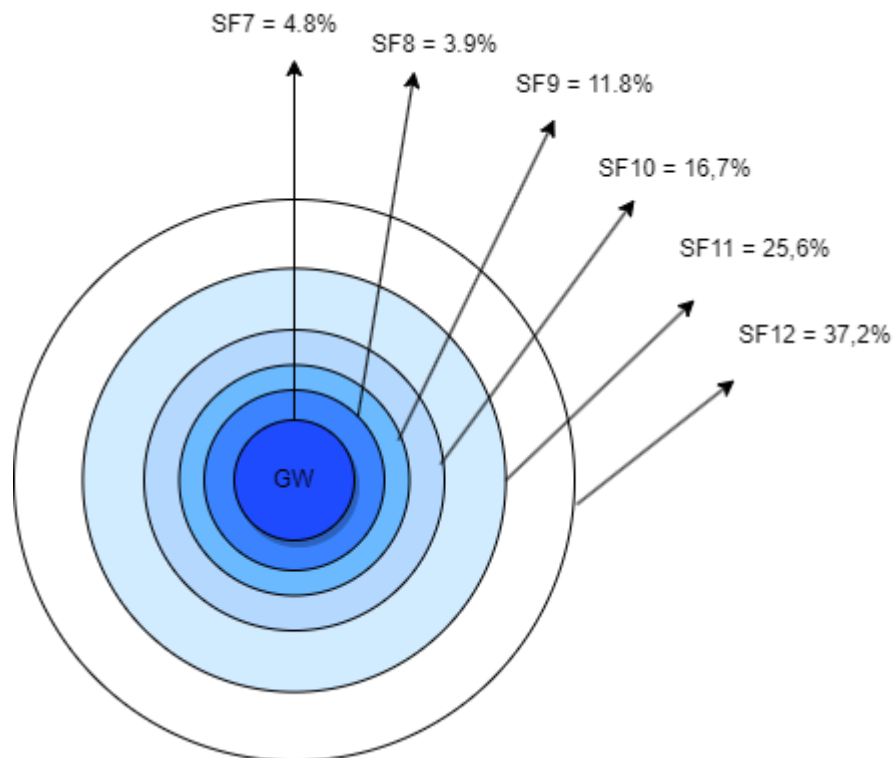


Рис. 3.3. Ймовірність використання вузлів у різних зонах SF

Таблиця 3.3

### Результати розрахунку ємності БС

$N_{\text{епак}}$ на добу	Інтенсивність потоку $G$ при $P_{\text{втр}} = 5\%$	Кількість пакетів на добу	Кількість пристроїв на одну БС
24	0,0256	64 349	2 681

### 3.5. Рекомендаційні заходи покращення інформаційного обміну

При плануванні розгортання системи автоматизованого моніторингу необхідно враховувати рельєф місцевості, оскільки базові станції мають бути розміщені на висотних позиціях, які переважають у даній місцевості та перевищують рівень розташування сенсорних вузлів. Крім того, бажано, щоб кожен вузол знаходився в радіусі дії двох базових станцій.

Також, розташування GSM-900 антен поряд з пристроями LoRaWAN може стати додатковим фактором спричинення перешкод в бездротовому зв'язку мережі. Ця проблема може бути вирішена шляхом розташування



базових станцій та сенсорних вузлів мережі LoRaWAN на відстані 100 метрів від антен GSM-900.

У подальшому, можлива модернізація автоматизованої системи моніторингу виробництва та розподілу електроенергії шляхом розширення її функціональності, що підвищить її загальну ефективність. Для досягнення цього можливе розширення та оптимізація програмного забезпечення, додавання додаткових резервних джерел живлення та заміна штатних антен на більш потужні.

### ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

1. Розроблені рекомендаційні заходи покращення інформаційного обміну процесу автоматизованого моніторингу виробництва та розподілу електричної енергії в секторі альтернативної енергетики з використанням бездротової сенсорної мережі LoRa. Зокрема, розраховано час передачі пакетів, оцінка пропускної здатності мережі, визначено швидкості передачі та чутливості приймача базової станції та розраховано ємність базової станції. Ці параметри є важливими для розробки ефективної та надійної системи моніторингу, що базується на бездротовій сенсорній мережі LoRa.
2. Встановлено, що при використанні розширення спектра  $SF = 12$ , який має найкращу заводо захищеність тривалість передачі пакетів найбільша і становить 1253,38 мс.
3. Оцінювання пропускної здатності мережі показало, що при максимальному значенні пропускної здатності ймовірність успішної передачі пакетів через колізію складатиме 37%.
4. Визначення швидкості передачі та чутливості приймача базової станції при відстані зв'язку в мережі LoRaWAN 10 км підтвердило, що при збільшенні коефіцієнта розширення спектра  $SF$ , швидкість передачі падає, а чутливість приймача зростає. Так при  $SF = 7$   $Rb = 5697$  біт/с, а чутливість -122 дБм, а при  $SF = 12$ , відповідно 305 біт/с та -137 дБм.
5. Розрахунки показали, що до базової станції може бути підключено до 2 681 вузлів без втрати продуктивності мережі, і при цьому передати 64 349 пакетів даних.

## ВИСНОВКИ

1. В результаті аналізу задач автоматизованої системи моніторингу та виробництва електроенергії, її компонентів та переваг використання, показано, що конкретними завданнями автоматизованої системи моніторингу виробництва та розподілу електроенергії є збір та аналіз даних про вироблену та спожиту електроенергію, моніторинг ефективності роботи станції та виявлення проблем в її роботі, автоматизація процесу збору показників лічильників у віддаленому доступі.
2. На основі особливостей будови та функціонування бездротових сенсорних мереж (за допомогою технологій, таких як GSM, LoRa, NB-IoT та інші) для систем автоматизованого моніторингу виробництва та розподілу електроенергії визначені переваги, класифікація бездротових сенсорних мереж, їх типи та особливості топології.
3. Розроблені структура, основні завдання та технічні вимоги автоматизованої системи моніторингу виробництва та розподілу електроенергії. Впровадження такої системи дозволить ефективно контролювати та оптимізувати виробництво та розподіл електроенергії суб'єктами альтернативної енергетики, забезпечуючи надійність, ефективність та безпеку у цих процесах.
4. Порівняльний аналіз двох вискоефективних бездротових технологій передачі даних в бездротових сенсорних мережах - LoRaWAN та NB-IoT - показав перспективність застосування в системах моніторингу виробництва та розподілу електроенергії суб'єктами альтернативної енергетики технології LoRaWAN, що базується на методі модуляції LoRa в бездротових мережах LPWAN та використовує відкритий протокол LoRaWAN для взаємодії між LPWAN-шлюзами та кінцевими пристроями та яка найкраще відповідає більшості технічних вимог, зокрема стосовно енергоефективності, покриття та надійності.
5. На основі технічних вимог до системи моніторингу виробництва та розподілу електроенергії суб'єктами альтернативної енергетики, а також з урахуванням

обраної технології бездротового з'єднання LoRaWAN, здійснено вибір її елементної бази та розроблено алгоритм роботи розроблюваної системи моніторингу.

6. Розроблені рекомендаційні заходи покращення інформаційного обміну процесу автоматизованого моніторингу виробництва та розподілу електричної енергії в секторі альтернативної енергетики з використанням бездротової сенсорної мережі LoRa. Встановлено, що:

- при використанні розширення спектра  $SF = 12$  тривалість передачі пакетів найбільша і становить 1253,38 мс;
- при максимальному значенні пропускної здатності ймовірність успішної передачі пакетів через колізію складатиме 37%;
- при збільшенні коефіцієнта розширення спектра  $SF$ , швидкість передачі падає, а чутливість приймача зростає. Так при  $SF = 7$   $Rb = 5697$  біт/с, а чутливість -122 дБм, а при  $SF = 12$ , відповідно 305 біт/с та -137дБм;
- базова станція може підключити до себе до 2 681 вузла без втрати продуктивності мережі, і при цьому передати 64 349 пакетів даних.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Про ринок електричної енергії | від 13.04.2017 № 2019-VIII [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/2019-19#Text>
2. Президент підписав Закон про гарантії для встановлення гібридних систем з виробництва електроенергії в Укргідроенерго [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://uhe.gov.ua/ukrhydroenergo-news-09062022>
3. Про затвердження Кодексу системи | від 14.03.2018 № 309 [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0309874-18#Text>
4. Recommendation Y.2060. Overview of Internet of Things. ITU-T, Geneva. – February 2018
5. I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci. A survey on sensor networks. IEEE Communications Magazine. 40 (8) (2020) 102–114.
6. R. M. Alguliev, T. Kh. Fataliev, B. S. Agaev, and T. S. Aliev. Sensor Networks: the state, Decisions and prospects. 1317 - 1327
7. S. V. Chavan, B. P. Ladgaonkar and S. K. Tilekar. AN OVERVIEW OF SENSOR NODES FOR WIRELESS SENSOR NETWORK APPLICATIONS: A REVIEW 175-180
8. Divya Sharma, Sandeep Verma, Kanika Sharma. Network Topologies in Wireless Sensor Networks: A Review, April - June 2013, 93-97
9. eTutorials.org [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://etutorials.org/Mobile+devices/mobile+vpn/Part+II+MVPN+and+Advanced+Wireless+Data+Services/Chapter+6+GSM+GPRS+and+UMTS+VPN+Solutions/GSM+and+UMTS+Circuit-Switched+Data+Solutions/>
10. Atiko [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.atiko.com.ua/articles-ua/obzor-tekhnologii-lorawan-ua/>

11. NB-IoT [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://shop-gsm.ua/blog/chto-takoe-set-nb-iot-i-kakovy-ee-osobennosti/>
12. Влах-Вигриновська Г. І., Вигриновський М. А., Іванюк О. О. // ОГЛЯД І ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ LPWAN ДЛЯ РОЗГОРТАННЯ МЕРЕЖ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ // Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра комп’ютеризованих систем автоматики, 2018. - с. 67-73.
13. KONA Macro [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://tektelic.com/products/gateways/kona-macro-iot-gateway/>
14. TEKTELIC LoRaWAN® Antenna [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.mz-connect.com/shop/en/lorawan-antenna-for-tektelic-kona-macro-gateway-p-169986>
15. ACE SL7000 [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.itron.com/na/solutions/product-catalog/ace-sl7000>
16. A Study of Efficient Power Consumption Wireless Communication Techniques / Modules for Internet of Things (IoT) Applications [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.scirp.org/journal/paperinformation.aspx?paperid=65802>
17. Konstantin Mikhaylov, Juha Petäjärvi, Tuomo Hänninen Centre for Wireless Communications/ Analysis of the Capacity and Scalability of the LoRa Wide Area Network Technology // Faculty of Information Technology and Electrical Engineering, University of Oulu, Finland.
18. ITU-R P.1238-5 Recommendations. Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radio communication systems and radio local area networks in the frequency range 900MHz to 100GHz. [Електронний ресурс] – Режим 99 доступу до ресурсу: [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1238-7-201202-S!!PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1238-7-201202-S!!PDF-E.pdf)
19. Дроменко В.Б. Сучасні технології побудови безпроводних систем моніторингу виробництва електроенергії суб'єктами альтернативної

- енергетики / В.Б. Дроменко, О.О. Кабалдін // Матеріали Х Всеукраїнської науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти та молодих вчених з автоматичного управління присвяченої Дню ракетно-космічної галузі України : Збірник наукових праць / Під редакцією Г.В. Рудакової та ін. – Херсон–Хмельницький: Видавництво ФОП Вишемирський В.С., 2023. – С. 115-116.
20. Дроменко В. Б. Сучасні підходи оцінки якості характеристик складних електричних кіл / В. Б. Дроменко, В. С. Тарас. // Технології та дизайн. - 2021. - № 1. - Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/td\\_2021\\_1\\_10](http://nbuv.gov.ua/UJRN/td_2021_1_10)
21. Дроменко В. Б. Аналіз підходів до вимірювання характеристик складних електричних кіл / В. Б. Дроменко // Мехатронні системи: інновації та інжиніринг : тези доповідей III-ої Міжнар. наук.-практ. конф. (10 жовтня 2019 р., м. Київ) / відп. за вип. М. А. Зенкін. - Київ : КНУТД, 2019. - С. 110-111.
22. Панченко Є. А. Дослідження комп'ютеризованої системи обліку електроенергії / Є. А. Панченко ; наук. кер. В. Б. Дроменко // Наукові розробки молоді на сучасному етапі : тези доповідей XVI Всеукраїнської наукової конференції молодих вчених та студентів (27-28 квітня 2017 р., Київ). - К. : КНУТД, 2017. - Т. 2 : Мехатронні системи і комп'ютерні технології. Ресурсозбереження та охорона навколишнього середовища. - С. 215-216.
23. Ковальчук О. А. Система управління сонячними панелями [Електронний ресурс] / О. А. Ковальчук, Ю. М. Пилипенко // Технології та дизайн. - 2020. - № 1 (34). - Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/td\\_2020\\_1\\_12](http://nbuv.gov.ua/UJRN/td_2020_1_12).
24. ДСТУ 5003.1 Автоматизовані системи обліку електричної енергії. Загальні положення. – Введ. 2008-05-21. - К. Держстандарт України - Режим доступу: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id\\_doc=55920](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=55920)

- 25.ДСТУ 5003.2 Автоматизовані системи обліку електричної енергії. Терміни та визначення понять. – Введ. 2008-05-21. - К. Держстандарт України - Режим доступу: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=55923](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=55923)
- 26.ДСТУ 5003.3-1 Автоматизовані системи обліку електричної енергії. Структура, функції та види забезпечення. – Введ. 2008-05-21. - К. Держстандарт України - Режим доступу: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=55924](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=55924)
- 27.ДСТУ 5003.4-1 Автоматизовані системи обліку електричної енергії. Забезпечення сумісності. Основні положення. – Введ. 2008-05-21. - К. Держстандарт України - Режим доступу: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=55925](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=55925)



---

Міністерство освіти і науки України  
Херсонський національний технічний університет  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
Вінницький національний медичний університет  
ім. М. І. Пирогова  
Луцький національний технічний університет  
Вінницький національний технічний університет  
Кременчуцький національний технічний університет  
ім. Михайла Остроградського  
Сумський державний університет  
Херсонський державний аграрно-економічний університет  
Херсонська державна морська академія  
Київський національний університет технологій і дизайну

**Матеріали  
X Всеукраїнської  
науково-практичної конференції  
здобувачів вищої освіти  
та молодих вчених  
з автоматичного управління**

*присвячена Дню ракетно-космічної галузі України*



12 квітня 2023р.  
Херсон- Хмельницький

УДК 004.77:621.3

**В.Б. Дроменко, О.О. Кабалдін**Київський національний університет технологій та дизайну  
dromenko.vb@knuatd.edu.ua**СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПОБУДОВИ БЕЗПРОВІДНИХ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ  
ВИРОБНИЦТВА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ СУБ'ЄКТАМИ АЛЬТЕРНАТИВНОЇ  
ЕНЕРГЕТИКИ**

Задача точного вимірювання і своєчасного моніторингу обсягів споживання електричної енергії та її генерації виробниками існувала завжди. Однак з моменту приєднання до енергосистеми України різноманітних суб'єктів альтернативної енергетики – ця задача надзвичайно ускладнилась.

Наразі в Україні існує нагальна проблема з балансуванням енергосистеми, яка інтенсивно зростає за рахунок спорудження нових джерел альтернативної енергетики з нестабільними та слабо прогнозованими обсягами виробітку. Балансування енергосистеми неможливе без масового залучення засобів балансування енергосистеми, що включають системи зберігання енергії, генерацію з високою маневреністю, міжнародні системи передачі енергії та регулювання попиту та споживання. Однак, міжнародні системи передачі енергії мають свої фізичні, договірні та ринкові обмеження. Управління попитом та споживанням наразі масово не використовуються навіть у найбільш розвинених країнах, а для використання об'єктів генерації з високою маневреністю слід збільшити їх кількість, посилити маневреність та надзвичайно важливо налагодити моніторинг стану енергосистеми в режимі реального часу. У зв'язку з нагальністю проблеми, доступні на сьогоднішній день технології мають невідкладно з'явитися в енергосистемі [1].

Як зазначено вище, саме моніторинг стану енергосистеми в режимі реального часу є необхідною умовою для ефективного балансування та регулювання виробництва та споживання електроенергії в Україні. Однією із найважливіших складових моніторингу є швидкість обміну параметрами стану ділянок енергосистеми, яка, в свою чергу, суттєво залежить від комунікаційної інфраструктури, що використовується для передачі даних, в тому числі в автоматизованій системі комерційного обліку електроенергії (АСКОЕ). Згідно концепції проектування автоматизованих систем обліку електроенергії в умовах енергоринку АСКОЕ повинна містити сукупність цифрових вимірювальних каналів обліку (ЦВКО) і до складу якої входять лічильник (ЛЧ), пристрій з електронними платіжними засобами (ППЗ), канал передачі даних (КПД) та устаткування збору і обробки даних (УЗД) [2].

Традиційно в Україні при проектуванні та, відповідно, побудові АСКОЕ, в якості комутованих каналів зв'язку, що обслуговуються GSM/GPRS модемами, частіше за все використовуються застарілі технології передачі даних CSD та GPRS [3]. CSD (Circuit Switched Data) передає дані зі швидкістю лише 9,6 Кбіт/с за один часовий інтервал в підсистемі мережі та комутації (Network and Switching Subsystem NSS). Це призводить до необхідності виділення двох або більше часових інтервалів для CSD-викликів. А стандартна технологія GPRS (General Packet Radio Service), яка використовує не зайняту голосовим зв'язком смугу частот для передачі інформації – зі швидкістю передачі даних в межах 20-40 Кбіт/сек. Це зумовлено тим, що не всюди в Україні є якісний мобільний інтернет, що, в свою чергу, значно ускладнює можливість побудови системи моніторингу у реальному часі.

Для вирішення зазначеної проблеми пропонується застосувати технологію LoRaWAN, що базується на методі модуляції LoRa в бездротових мережах LPWAN та використовує відкритий протокол LoRaWAN для взаємодії між LPWAN-шлюзами та кінцевими пристроями. Цей мережевий протокол відзначається низьким рівнем енергоспоживання, що забезпечує дальність передачі даних до 15 км на відкритій місцевості або до 5 км у міських умовах, з високою проникністю через стіни та перешкоди, що дозволяє використовувати його у підвальних приміщеннях. Застосування технології LoRa також забезпечує захист сигналу від перешкод, а швидкість передачі даних через бездротовий канал досягає 50 Кбіт/с [4, 5].

Система моніторингу виробництва електроенергії суб'єктами альтернативної енергетики може бути реалізована за архітектурою мережі LoRaWAN, як показано на рисунку. Основними ключовими компонентами такої архітектури є:

- 1) кінцевий пристрій (наприклад лічильник) – призначений для здійснення функцій вимірювання виробленої електроенергії та містить набір необхідних датчиків та елементів керування [5];



Рисунок 1 – Застосування архітектури мережі LoRaWAN для моніторингу виробництва електроенергії суб'єктами альтернативної енергетики

- 2) шлюз – пристрій, що приймає дані від кінцевих пристроїв за допомогою радіоканалу та передає їх у транзитну мережу. В якості такої мережі можуть виступати Ethernet, Wi-Fi, стільникові мережі та будь-які інші телекомунікаційні канали. Шлюз і кінцеві пристрої утворюють мережеву топологію типу «зірка». Зазвичай, шлюз містить багатоканальний приймач для обробки сигналів у декількох каналах одночасно або навіть декількох сигналів в одному каналі [5]. Відповідно, декілька таких пристроїв забезпечують зону покриття мережі та прозору двосторонню передачу даних між кінцевими вузлами суб'єктів альтернативної енергетики та сервером;
- 3) мережевий сервер – призначений для виконання функцій керування мережею таких, як завдання розкладу, адаптація швидкості, зберігання і обробка отриманих даних;
- 4) сервер додатків, який віддалено контролює роботу кінцевих вузлів суб'єктів альтернативної енергетики і збирає з них необхідні дані.

Як правило, в мережах LoRa власником шлюзів і центрального сервера є оператор мережі [2], а кінцевих пристроїв – суб'єкти альтернативної енергетики, передаючи дані двонаправлено і забезпечуючи належний захист.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. UA Українська енергетика. URL: <https://ua-energy.org/uk/posts/balansuvannia-enerhosystemy-v-poshukakh-optymalnykh-rishen>
2. Про затвердження Концепції побудови автоматизованих систем обліку електроенергії в умовах енергоринок. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0032558-00#Text>
3. Технічні рекомендації на проектування та впровадження локального устаткування збору і обробки даних (ЛУЗОД) та автоматизованої системи комерційного обліку електроенергії (АСКОЕ). URL: <https://hoe.com.ua/page/tehnichni-rekomendatsiji-do-luzod-askoe>
4. Atiko. URL: <https://www.atiko.com.ua/articles-ua/obzor-tehnologii-lorawan-ua/>
5. Romsat. URL: <https://romsat.ua/news/company/lorawan-technology/#>
6. Панченко Є. А., Дроменко В. Б. Дослідження комп'ютеризованої системи обліку електроенергії. *Наукові розробки молоді на сучасному етапі : тези доповідей XVII Всеукраїнської наукової конференції молодих вчених та студентів (27-28 квітня 2017 р., Київ). Мехатронічні системи і комп'ютерні технології. Ресурсозбереження та охорона навколишнього середовища*. К.: КНУТД, 2017. Т. 2. С. 215-216. <https://er.knutd.edu.ua/handle/123456789/8343>