

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВЕТЕРИНАРНОЇ
МЕДИЦИНИ ТА БІОТЕХНОЛОГІЙ ІМ. С.З. ГЖИЦЬКОГО
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

на тему:

**«РОЗРОБКА ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ГЕНЕРАЦІЇ
ТА ВИКОРИСТАННЯ ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ
ПРИВАТНИМИ ДОМОГОСПОДАРСТВАМИ»**

Виконав: здобувач групи ІТ-41
спеціальності 126 «Інформаційні системи та
технології»

Янкович Д. І.

(прізвище та ініціали)

Керівник: _____ **Пташник В. В.**

(прізвище та ініціали)

ДУБЛЯНИ-2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Перший (бакалаврський) рівень вищої освіти
Спеціальність 126 «Інформаційні системи та технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

(підпис)
д.т.н., професор, Тригуба А. М.
(вч. звання, прізвище, ініціали)
“ ” 202 року

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Янковичу Данилу Ігоровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Розробка інформаційної системи моніторингу генерації та використання відновлюваної електроенергії приватними домогосподарствами»

керівник роботи к. т. н., доцент, Пташник В. В.

(наук.ступінь, вч. звання, прізвище, ініціали)

затверджені наказом Львівського НУП від 25.02.2025 року № 123/к-с.

2. Строк подання студентом роботи 10 червня 2025 року

3. Вихідні дані до роботи: технічні характеристики систем генерації та обліку електроенергії з відновлюваних джерел, а також документація до сучасних бездротових рішень енергомоніторингу на базі LoRaWAN. Паспорти й специфікації апаратних компонентів, зокрема сенсорних вузлів і лічильників електроенергії типу SL7000. Науково-технічна література та нормативні вимоги до систем контролю споживання електроенергії у побутових мережах.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ

1. Аналіз систем моніторингу відновлюваної електроенергії та сенсорних технологій

2. Розробка інформаційної системи моніторингу генерації та використання відновлюваної енергії

3. Оптимізація інформаційного обміну в іот-системах енергетичного моніторингу

4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

Висновки

Список використаних джерел

5. Перелік графічного матеріалу

Графічний матеріал подається у вигляді презентації

6. Консультанти розділів

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата		Відмітка про виконання
		завдання видав	завдання прийняв	
1, 2, 3	Пташник В. В., к.т.н., доцент			
4	Городецький І. М., к.т.н., доцент			

7. Дата видачі завдання 28 листопада 2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Відмітка про виконання
1	Складання інженерної характеристики систем моніторингу відновлюваної електроенергії та сенсорних технологій	28.11.2024 – 31.12.2024	
2	Вибір принципів, методів та засобів розробки інформаційної системи моніторингу генерації та використання відновлюваної енергії	01.01.2025 – 28.02.2025	
3	Оптимізація інформаційного обміну в IoT-системах енергетичного моніторингу	01.03.2025 – 30.04.2025	
4	Розгляд питань з охорони праці та безпеки у надзвичайних ситуаціях	01.05.2025 – 14.05.2025	
5	Завершення оформлення розрахунково-пояснювальної записки та презентаційного матеріалу	15.05.2025 – 31.05.2025	
6	Завершення роботи в цілому. Підготовка до захисту кваліфікаційної роботи	01.06.2025 – 10.06.2025	

Здобувач

(підпис) Янкович Д.І.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис) Пташник В. В.
(прізвище та ініціали)

УДК 681.521 / 681.518

Розробка інформаційної системи моніторингу генерації та використання відновлюваної електроенергії приватними домогосподарствами. Янкович Д. І. Кафедра інформаційних технологій – Дубляни, Львівський НУВМБ ім. С.З. Гжицького, 2025.

Кваліфікаційна робота: 53 сторінки текстової частини, 15 рисунків, 5 таблиць, 18 джерел літератури.

Мета кваліфікаційної роботи полягає у створенні інформаційної системи для моніторингу генерації та використання електроенергії приватними домогосподарствами, з опорою на бездротові сенсорні мережі з низьким енергоспоживанням та широким покриттям.

Об'єктом дослідження є процеси моніторингу генерації, розподілу та споживання електроенергії у приватних домогосподарствах, що використовують відновлювані джерела енергії..

Предмет дослідження вивчає інформаційні технології та сенсорні мережі, що забезпечують автоматизований моніторинг і передачу даних у системах контролю генерації та використання електроенергії з ВДЕ.

У кваліфікаційній роботі розглянуто сучасні підходи до моніторингу електроенергетичних процесів на базі бездротових сенсорних мереж, проведено аналіз їх архітектури, топологій та каналів зв'язку. Запропоновано технічне рішення інформаційної системи моніторингу: визначено вимоги, вибрано бездротову технологію LoRaWAN, сформовано структурну та алгоритмічну моделі. Проведено математичне моделювання та розрахунки характеристик передачі даних, зокрема тривалості, пропускну здатності, чутливості приймача та навантаження на мережу. Оцінено ризики, пов'язані з експлуатацією IoT-систем у сфері ВДЕ, визначено заходи з охорони праці і безпеки в надзвичайних ситуаціях.

Ключові слова: інформаційна система, сенсорна мережа, LoRaWAN, енергомоніторинг, відновлювана енергія.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ТА СЕНСОРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ	9
1.1 Сучасні підходи до автоматизованого моніторингу генерації та розподілу електроенергії.....	9
1.2 Архітектура та принципи функціонування бездротових сенсорних мереж	13
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ГЕНЕРАЦІЇ ТА ВИКОРИСТАННЯ ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГІЇ.....	23
2.1 Технічні вимоги до системи моніторингу в домогосподарствах з ВДЕ....	23
2.2 Аналіз і вибір технологій бездротового зв'язку для IoT-систем	24
2.3 Порівняння технологій LoRaWAN і NB-IoT для застосування в енергетиці .	26
2.4 Структурна схема системи моніторингу генерації та використання відновлюваної електроенергії.....	28
2.5 Обґрунтування вибору апаратних компонентів	29
2.6 Алгоритмічна модель функціонування IoT-системи моніторингу	32
РОЗДІЛ 3 ОПТИМІЗАЦІЯ ІНФОРМАЦІЙНОГО ОБМІНУ В IoT-СИСТЕМАХ ЕНЕРГЕТИЧНОГО МОНІТОРИНГУ	34
3.1 Розрахунок тривалості передачі даних у мережах LoRaWAN.....	34
3.2 Оцінка пропускної здатності мережі LoRaWAN у задачах енергомоніторингу	37
3.3 Розрахунок параметрів модуляції та чутливості приймача	39
3.4 Аналіз навантаження базової станції LoRaWAN	41
3.5 Шляхи покращення ефективності інформаційного обміну	43
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	44

4.1	Забезпечення охорони праці під час розробки та експлуатації інформаційної системи моніторингу.....	44
4.2.	Безпека в надзвичайних ситуаціях при використанні відновлюваних джерел енергії.....	45
4.3	Основні ризики, пов'язані з використанням ВДЕ в приватних домогосподарствах.....	46
ВИСНОВКИ		51
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ		52

ВСТУП

Сучасна енергетика переживає активний перехід до децентралізованих джерел електропостачання, серед яких особливу роль відіграють системи, що базуються на відновлюваних джерелах енергії – сонячних, вітрових, біоенергетичних установках тощо. В умовах зростаючого попиту на енергоефективність, екологічну безпеку та енергетичну автономію приватних домогосподарств, ключовим чинником стає впровадження цифрових рішень для контролю та управління процесами генерації та споживання електроенергії.

Застарілі автоматизовані системи обліку електроенергії, що й досі базуються на технології GSM CSD, вже не відповідають сучасним вимогам щодо швидкості, надійності та регулярності збору даних. Внаслідок цього виникає потреба у створенні більш гнучких, масштабованих та енергоефективних рішень, здатних забезпечити повноцінний моніторинг у реальному часі з використанням сучасних бездротових технологій зв'язку, таких як LoRaWAN або NB-IoT.

Особливої актуальності проблема набуває у сфері приватної енергетики, де відсутність централізованого обліку і контролю ускладнює інтеграцію малих електростанцій у загальну енергосистему, а також знижує ефективність енергоспоживання на рівні домогосподарств..

Мета дослідження – розробити інформаційну систему для автоматизованого моніторингу генерації та використання електроенергії приватними домогосподарствами, що використовують відновлювані джерела енергії, з опорою на бездротові сенсорні мережі з низьким енергоспоживанням та широким покриттям.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно:

- провести аналіз сучасних систем моніторингу у сфері альтернативної енергетики, зокрема на базі бездротових сенсорних мереж;

- дослідити архітектуру, топологію та принципи функціонування WSN у контексті енергетичних застосувань;
- обґрунтувати вибір технологій бездротового зв'язку, порівнявши LoRaWAN та NB-IoT за критеріями енергоефективності, дальності дії та пропускної здатності;
- розробити структурну та алгоритмічну моделі інформаційної системи моніторингу;
- виконати розрахунок характеристик мережі (швидкість передавання, затримка, навантаження) та запропонувати шляхи оптимізації інформаційного обміну;
- сформулювати вимоги до безпеки експлуатації IoT-систем у сфері альтернативної енергетики.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ТА СЕНСОРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

1.1 Сучасні підходи до автоматизованого моніторингу генерації та розподілу електроенергії

Забезпечення стабільності, безпеки та надійності функціонування енергосистеми є першочерговим завданням подальшого розвитку об'єднаної енергетичної системи України та її інтеграції до європейської енергосистеми [1, 2]. Надійність, стабільність і безпека є основними критеріями, які висуваються під час проектування та будівництва енергосистем будь-якої країни.

Одним із ключових чинників реалізації цих вимог – а також забезпечення надійності та безпеки роботи – є збалансована взаємодія всіх ланок об'єднаної енергосистеми країни, включно з генерацією, споживанням і розподілом електроенергії, а також здатність до швидкого балансування у надзвичайних ситуаціях, пов'язаних із техногенними катастрофами, військовими діями чи іншими непередбачуваними обставинами. Для забезпечення оперативного балансування енергосистеми має бути організований безперервний або щонайменше регулярний обмін інформацією про стан електромережі.

З іншого боку, навіть за умови нормального функціонування об'єднаної енергосистеми необхідно забезпечити постійний інформаційний обмін для підтримання її збалансованої роботи.

Це обумовлено тим, що в енергосистемі України, окрім генерації гарантованої потужності (АЕС, ГЕС, ТЕЦ), стрімко зростає частка електростанцій негарантованої потужності, які використовують нестабільні природні джерела енергії – сонячні електростанції, вітрові електростанції та інші відновлювані джерела енергії. Такі електростанції мають обмежену або взагалі не мають

можливості коригувати свою потужність відповідно до встановлених добових графіків.

Основними завданнями автоматизованої системи моніторингу виробництва та розподілу електроенергії суб'єктів альтернативної енергетики є:

- точне вимірювання й облік обсягів виробленої та спожитої електроенергії;
- цілодобовий моніторинг і контроль роботи сонячних панелей та електрообладнання.

Специфічні завдання системи автоматизованого моніторингу повинні включати:

- збір та аналіз даних про виробництво й споживання електроенергії;
- моніторинг ефективності роботи електростанції;
- виявлення несправностей та аварій;
- автоматичне зчитування показань лічильників;
- забезпечення віддаленого доступу до даних;
- формування детальних звітів про стан електромережі та роботу генеруючого обладнання.

Головна мета системи – забезпечити достовірний і точний облік кількісних та якісних параметрів виробництва й споживання електроенергії з метою формування коректної фінансової звітності та ефективного планування подальшої експлуатації електростанції.

Виробництво електроенергії на сучасних об'єктах альтернативної енергетики (сонячні електростанції, вітрові електростанції тощо) здійснюється в автоматизованому режимі, що потребує мінімальної кількості штатного персоналу – переважно техніків, які контролюють параметри роботи електростанції, персоналу з охорони, диспетчерів та бухгалтерів.

Усе це висуває високі вимоги до технічного персоналу щодо організації віддаленого, цілодобового та безперервного моніторингу роботи обладнання для виробництва електроенергії з метою запобігання або оперативної ліквідації аварійних чи інших надзвичайних ситуацій.

З іншого боку, для ефективного управління, прогнозування та планування на таких об'єктах, окрім комерційного обліку спожитої та переданої до об'єднаної енергетичної мережі України електроенергії високої напруги (найчастіше 10 кВ або 35 кВ), необхідно забезпечити технічний облік у мережах постійного струму та низьковольтній мережі 0,4 кВ. Це вимагає використання великої кількості точок обліку.

Крім того, регуляторні та нормативні документи зобов'язують організації забезпечувати дистанційний збір кількісних та якісних показників з технічних і комерційних лічильників у мережах 0,4 кВ, 10 кВ або 35 кВ у режимі 24/7 для подальшого використання операторами систем розподілу та регуляторами.

Проте на сьогодні в автоматизованих системах комерційного обліку електроенергії (АСКОЕ) використовується надзвичайно поширена, але застаріла, повільна та нестабільна технологія GSM CSD, особливо в районах із поганим покриттям. Це призводить до суттєвого зниження частоти обміну інформацією (іноді – лише один раз на добу), а навіть використання дорогого додаткового комунікаційного обладнання на базі цієї технології не дозволяє досягти належного рівня технічного та комерційного моніторингу.

Тому заплановано дослідити технічні рішення, що забезпечують належний рівень моніторингу виробництва та розподілу електроенергії на основі сучасних комунікаційних технологій, і застосувати їх для створення ефективної автоматизованої системи моніторингу.

Сформульовані основні вимоги до такої системи:

- моніторинг виробництва електроенергії: система повинна забезпечувати точний облік та контроль параметрів якості електроенергії, виробленої суб'єктами альтернативної енергетики в мережі 0,4 кВ.
- розрахунок власного споживання електроенергії: система має фіксувати електроенергію, спожиту електростанцією в мережі 0,4 кВ, а також передавати дані про постачання електроенергії до мережі 10 кВ.
- контроль роботи обладнання: система повинна відстежувати роботу всіх компонентів електростанції – від обладнання генерації до інверторів, своєчасно

інформувати про поточний стан, збої та несправності, а також забезпечувати генерацію детальних звітів.

– моніторинг мережі 10 кВ: система має відстежувати стан мережі 10 кВ, контролювати подачу електроенергії до об'єднаної енергосистеми, фіксувати споживання в разі зупинки генерації та здійснювати аварійне вимкнення за потреби.

Система автоматизації моніторингу та управління виробництвом і розподілом електроенергії повинна включати вимірювальне обладнання (електролічильники, трансформатори струму та напруги, прилади контролю якості електроенергії), комунікаційне обладнання (засоби передачі даних між компонентами системи, а також засоби зв'язку з операторами мережі та іншими зацікавленими сторонами), сервер АСКОЕ.

Для суб'єктів альтернативної енергетики використання автоматизованої системи моніторингу виробництва електроенергії має низку суттєвих переваг. Насамперед, такі системи забезпечують більш точний облік, дозволяючи точно вимірювати обсяги виробленої та спожитої електроенергії, а також контролювати її якість. Водночас вони сприяють оптимізації ресурсів, що полягає в ефективному плануванні, контролі та управлінні процесами виробництва, споживання і розподілу енергії, що зменшує її втрати та витрати.

Крім того, автоматизовані системи знижують витрати на обслуговування, оскільки дозволяють автоматизувати значну частину операцій, зменшуючи потребу в персоналі та скорочуючи витрати на технічну підтримку. Завдяки здатності обробляти великі обсяги даних у режимі реального часу, такі рішення підвищують продуктивність і забезпечують можливість оперативного ухвалення рішень. Нарешті, ці системи підвищують безпеку, постійно контролюючи стан електромережі та своєчасно сповіщаючи про потенційні загрози чи надзвичайні ситуації.

1.2 Архітектура та принципи функціонування бездротових сенсорних мереж

Бездротова сенсорна мережа (WSN) для автоматизованих систем моніторингу – це географічно розподілена система збору, обробки та передачі інформації, яка складається з великої кількості датчиків і виконавчих механізмів, з'єднаних між собою через радіоканали.

Датчики зазвичай складаються з автономного мікроконтролера, приймача та передавача, що забезпечує можливість самоорганізації та дозволяє їм обмінюватися даними між собою за допомогою радіозв'язку.

Бездротові сенсорні вузли – це малі пристрої з обмеженими ресурсами, зокрема зарядом акумулятора, обсягом пам'яті, обчислювальними можливостями тощо.

На рисунку 1.1 представлено типову бездротову сенсорну мережу, яка використовується для моніторингу процесів виробництва та розподілу електроенергії.

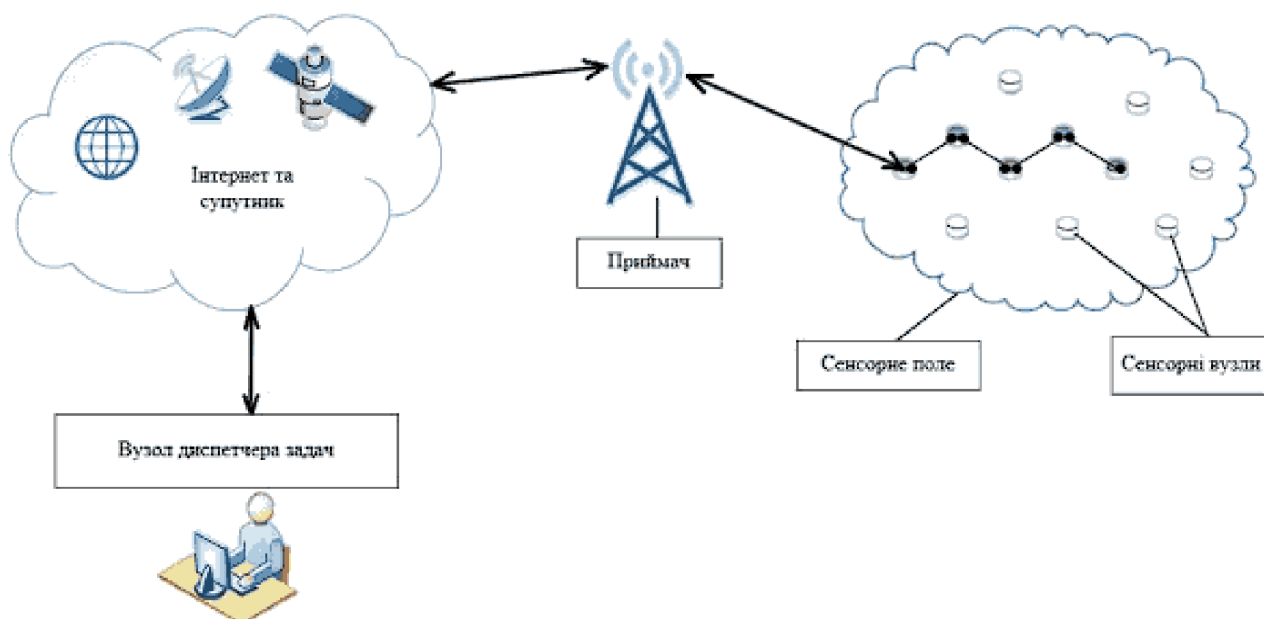


Рисунок 1.1 – Архітектура бездротової сенсорної мережі для контролю процесів виробництва та розподілу електроенергії

Простір, охоплений сенсорною мережею, називається сенсорним полем. А бездротові сенсорні вузли – це крихітні пристрої з обмеженими ресурсами, такими як заряд акумулятора, обсяг пам'яті, обчислювальна потужність тощо [4].

Бездротові сенсорні мережі (БСМ) мають численні переваги порівняно з традиційними дротовими системами. Завдяки використанню радіотехнологій, створення таких мереж обходиться дешевше, адже не потребує витрат на кабелі, супутні матеріали та роботи з прокладання проводки. Встановлення мережі також спрощується: сенсорні вузли можна розміщувати практично в будь-якому місці без необхідності фізичного з'єднання дротами. Така особливість забезпечує високу мобільність — вузли легко переміщуються без демонтажу конструкції.

Ще однією перевагою є енергоефективність: компактні сенсорні вузли споживають мало енергії, що дозволяє їм тривалий час працювати від автономного джерела живлення. БСМ характеризуються високою масштабованістю, адже їх можна без проблем розширювати за рахунок додавання нових вузлів, що важливо при зміні вимог до мережі. До того ж, ці вузли піддаються перепрограмуванню, що забезпечує гнучкість функціонування та адаптацію до змін середовища.

Мережі можна класифікувати за розміром: від мікромереж із кількома вузлами до макромереж із сотнями або тисячами елементів. За типом побудови БСМ можуть мати різні топології, такі як «зірка», «дерево», «сітка», кластерна тощо. Їхнє застосування охоплює різні сфери: від екологічного моніторингу й промислового контролю до медицини та систем транспортного управління.

Також варіюються й протоколи зв'язку, які використовуються в БСМ — зокрема, ZigBee, Bluetooth, Wi-Fi, LoRaWAN та інші. Залежно від особливостей енергоспоживання сенсорних вузлів, мережі поділяють за методами енергозбереження: це можуть бути режими сну, оптимізація рівня напруги, вдосконалення MAC-протоколів або використання енергоефективних маршрутів. Окрім цього, класифікація може базуватися на фізичних характеристиках, як-от частотний діапазон, тип антени або потужність сигналу.

Суб'єкти альтернативної енергетики використовують БСМ за межами міст для збору та моніторингу даних про виробництво енергії, управління та обслуговування енергетичної інфраструктури.

Сонячні електростанції є прикладом застосування БСМ в альтернативній енергетиці. На таких станціях можуть бути встановлені датчики для збору інформації про нахил і температуру сонячних панелей, кількісні та якісні параметри виробленої електроенергії, а також інші показники. Ці дані використовуються для керування обладнанням, що регулює кут нахилу панелей з метою оптимального збору сонячної енергії.

Крім того, БСМ ефективні для передачі інформації в регіонах зі слабким мобільним покриттям. Їх також застосовують для моніторингу енергетичних мереж і систем керування енергією, що використовують відновлювані джерела – вітер, сонце та воду.

На апаратному рівні основою БСМ є датчик – електронний пристрій, здатний вимірювати зміни фізичних параметрів (наприклад, тиску, температури, освітленості тощо) і перетворювати їх на електричні сигнали.

Основними складовими датчика є: вимірювальний блок, блок обробки, блок прийому та блок живлення. Окрім цього, пристрій може містити додаткові компоненти, зокрема системи позиціонування, джерела енергії або приводи (мобілізатори).

Зазвичай датчики складаються з двох основних підсистем: власне сенсора та аналогово-цифрового перетворювача (АЦП). Аналоговий сигнал, створений сенсором, перетворюється АЦП у цифровий і передається до блоку обробки. Блок обробки містить процесор і невеликий обсяг пам'яті, який виконує програми, що забезпечують взаємодію з іншими датчиками для реалізації певних функцій (наприклад, виявлення подій чи розпізнавання станів). Блок прийому забезпечує підключення датчика до мережі. Джерело живлення – одна з ключових складових датчика, яке може працювати від альтернативних джерел енергії, зокрема сонячних батарей.

На рисунку 1.2 зображено компоненти сенсорної мережі для системи автоматизації.

Універсальні бездротові датчики можуть проєктуватися з використанням модульного підходу, що забезпечує гнучкість та універсальність платформи для виконання широкого спектра завдань. Функціональну блок-схему типового бездротового датчика наведено на рисунку 1.3.

Використання різних типів сенсорів можна реалізувати шляхом перепрограмування або заміни модуля формування сигналу, що дозволяє підключати до системи різні датчики. Також конфігурацію радіозв'язку можна змінювати залежно від вимог до діапазону мережі та потреби у двосторонній передачі даних.

Загалом універсальні бездротові датчики є ефективними засобами для розв'язання широкого кола завдань на підприємствах альтернативної енергетики [6].

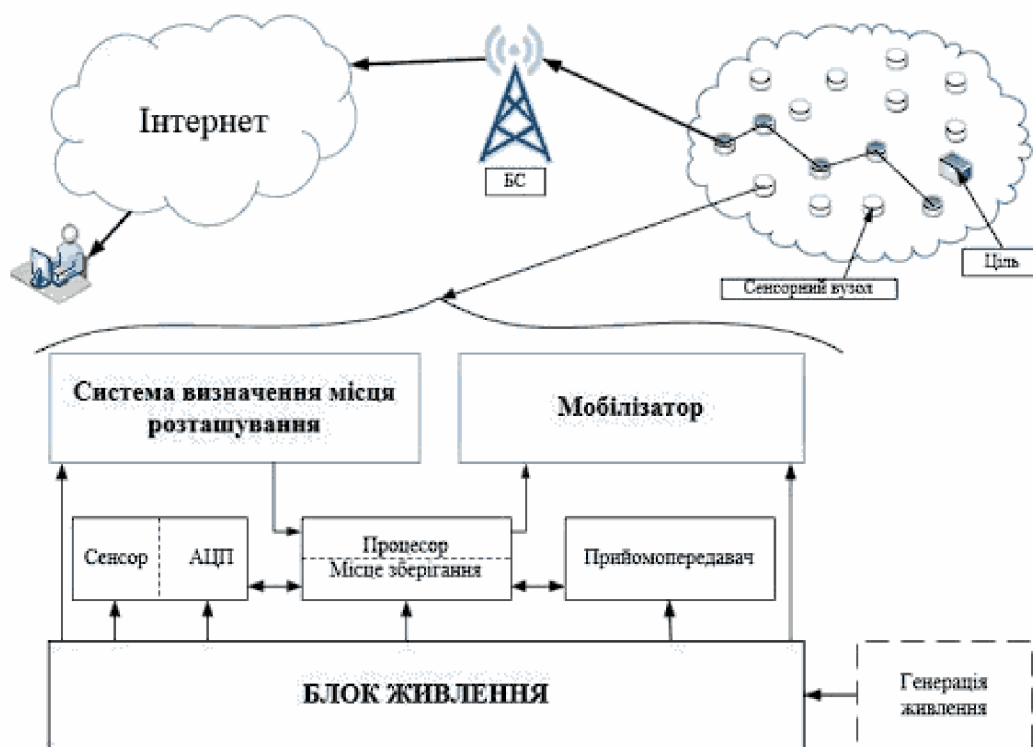


Рисунок 1.2 – Основні складові сенсорної мережі в автоматизованій системі моніторингу

Перетворювач – це пристрій, який використовується для перетворення одного виду енергії в інший. Відтак, датчик також є перетворювачем, що перетворює фізичну інформацію в електричний сигнал, який може бути переданий до обчислювальної системи або контролера для подальшої обробки [6].

Актuator – це пристрій, який реагує на вхідний сигнал і змінює стан керованого об'єкта. В актуаторі також відбувається перетворення одного виду енергії на інший, наприклад, електричної енергії або енергії стисненого (чи розрідженого) повітря, рідини або твердих речовин – у механічну енергію. [6]

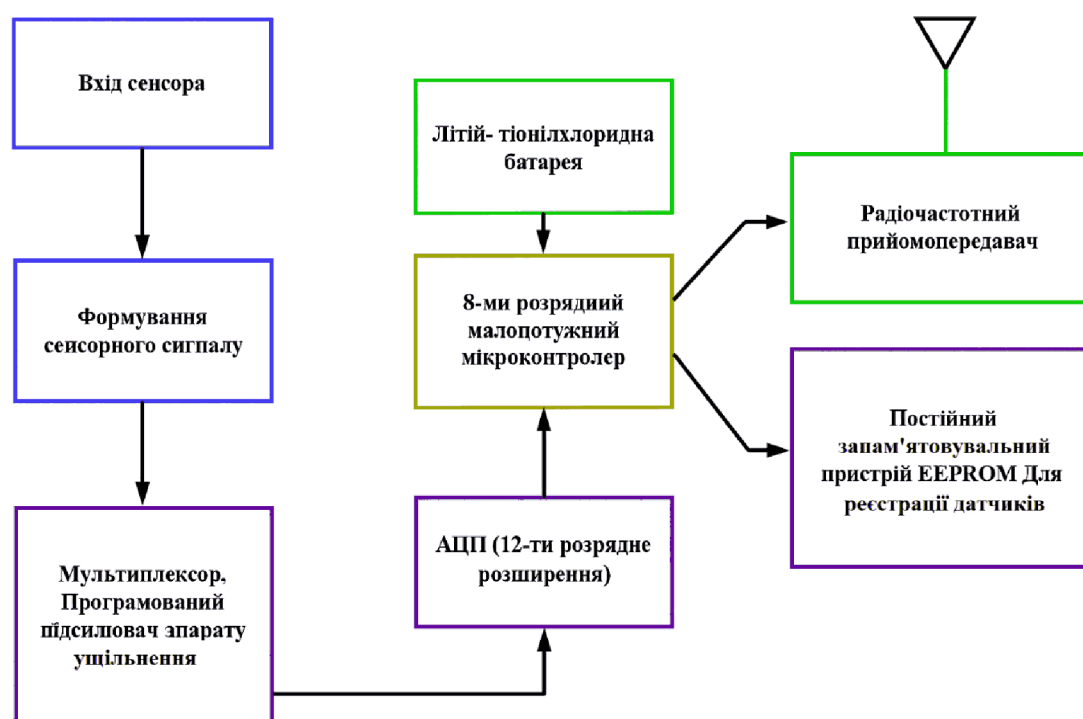


Рисунок 1.3 – Функціональна схема сенсорного модуля в системі автоматизованого контролю

Сенсорний вузол – це пристрій, що складається щонайменше з одного датчика (а також, можливо, одного або кількох приводів) з вбудованими обчислювальними можливостями та підтримкою дротового або бездротового зв'язку [6].

Сенсорна мережа – це система розподілених сенсорних вузлів, які взаємодіють між собою та з іншими мережами з метою збору, обробки, передачі

та надання інформації, отриманої від об'єктів реального фізичного світу. Це дозволяє системі адекватно реагувати на отримані дані. Таким чином, сенсорна мережа включає принаймні датчики, виконавчі механізми та вузли зв'язку.

Основними сферами застосування сенсорних мереж є контроль і моніторинг фізичного середовища та характеристик об'єктів реального світу, а в деяких випадках – і управління цими об'єктами (зокрема, активація певних процесів) [6].

Універсальний бездротовий датчик може функціонувати в самоорганізованій мережі зв'язку. Така мережа може містити випадкову кількість вузлів – від нуля до певного максимального значення. З'єднання між вузлами встановлюються динамічно з метою передачі інформації.

Базова станція – це компонент мережі, що приймає дані від сенсорів і виконує їх агрегацію. Її розташування впливає на такі параметри мережі, як енергоспоживання, тривалість життя мережі та кількість вийшлих з ладу вузлів. Передача даних може здійснюватися через різну кількість проміжних вузлів, а маршрут визначається протоколом, що використовується в мережі.

Бездротові сенсорні мережі в автоматизованих системах моніторингу функціонують за принципом локальних мереж, у яких приймачі або базові станції розсилають широкомовні пакети по всій мережі. Кожен вузол додає до таблиці маршрутизації інформацію про відправника, а також інші важливі параметри – ідентифікатор, рівень заряду акумулятора та кількість проміжних вузлів.

Оскільки рівень заряду є критично важливим параметром, що впливає на енергетичний баланс мережі, кожен вузол надсилає інформацію про стан акумулятора своїм сусідам. Базова станція періодично оновлює таблицю вузлів шляхом повторної передачі зібраної інформації. Сучасні бездротові сенсорні мережі в основному використовуються для вимірювання параметрів навколишнього середовища, а потім передають ці дані на центральний обчислювальний пристрій для обробки. Інтелектуальні системи на основі BSM використовуються в різних сферах, таких як технічний вимір електроенергії, виробництво електроенергії та моніторинг розподілу.

Промислові бездротові сенсорні мережі побудовані на основі вузлів передачі даних, підключених до датчиків, що вимірюють різні параметри. Вузли передачі даних виступають посередниками між інформацією, яка характеризує умови навколишнього середовища, та центральною системою, здатною регулювати ці умови, наприклад, шляхом зниження температури в певній зоні.

Іншими словами, бездротові сенсорні мережі дозволяють збирати, передавати та обробляти дані з різних точок, що є особливо корисним при вимірюванні параметрів, які складно або неможливо зафіксувати традиційними методами. Це дає змогу ефективніше контролювати середовище та приймати обґрунтовані рішення на основі об'єктивних даних.

У сучасному світі, де велика кількість пристроїв є «розумними» та підключеними до Інтернету, бездротові сенсорні мережі відіграють ключову роль у забезпеченні зв'язку та обробці даних між цими пристроями та зовнішнім середовищем.

На рисунку 1.4 представлено принципову схему збору інформації та керування автоматизованою системою моніторингу на базі БСМ..

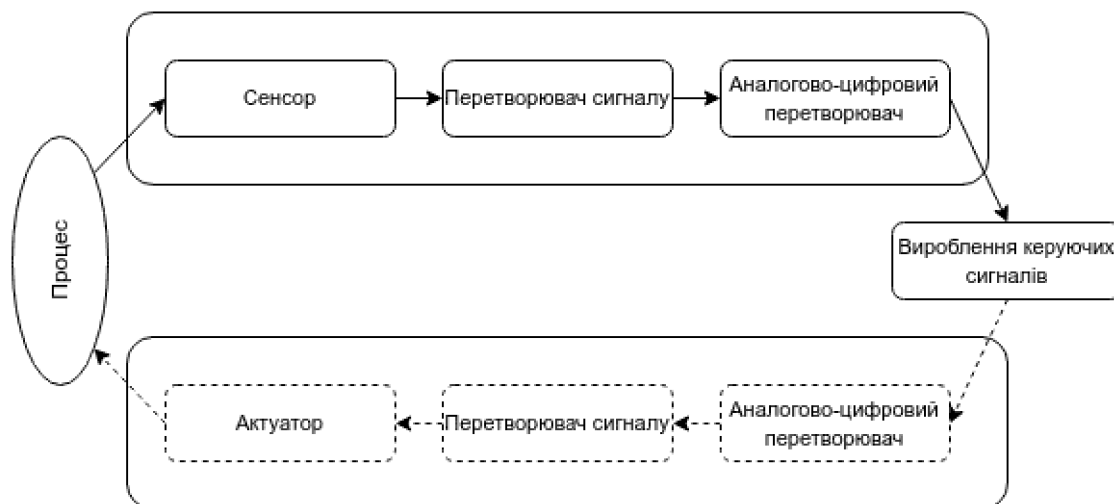


Рисунок 1.4 – Організація збору даних і керування в системі моніторингу на основі БСМ

Стандартний набір елементів мережі включає: координатор, сервер та вузли передачі даних.

Бездротові сенсорні мережі (WSN) можуть працювати на відстані від кількох метрів до кількох кілометрів завдяки ретрансляції сигналу між сусідніми елементами мережі.

Кожен мережевий вузол може по черзі передавати сигнали від одного вузла до іншого, тому навіть у разі виходу з ладу окремого елемента передача даних відбувається через сусідні вузли без втрати якості сигналу.

Таке широкомасштабне покриття БСМ забезпечується завдяки ретрансляції сигналу між сусідніми елементами мережі, як показано на рисунку 1.5 [5].

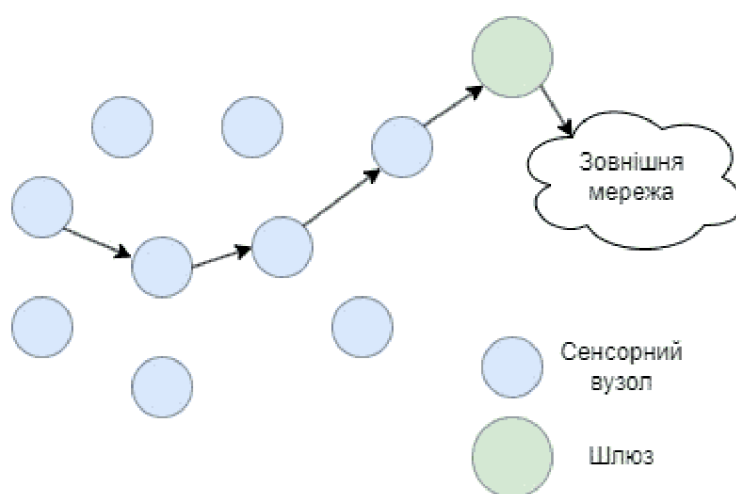


Рисунок 1.5 – Схема маршрутизації інформації в бездротовій сенсорній мережі

Сенсорні вузли (або просто датчики), які складають бездротову сенсорну мережу системи моніторингу виробництва, виготовляються у вигляді мікрообчислювальних пристроїв. Вони оснащені датчиками, приводами та трансиверами, що працюють у певному діапазоні радіочастот. Розмір сенсорного вузла зазвичай невеликий – не більше кількох кубічних сантиметрів. Апаратна частина вузла включає процесор, флеш-пам'ять та оперативну пам'ять, аналого-цифровий і цифро-аналоговий перетворювачі, радіочастотний приймач, блок живлення, а також різні датчики і виконавчі механізми (рис. 1.6).

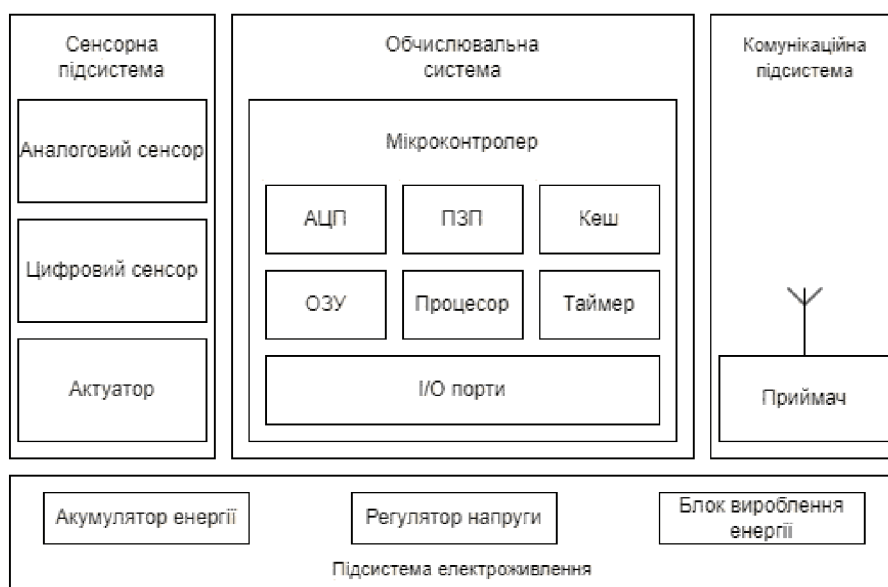


Рисунок 1.6 – Структурна модель вузла бездротової сенсорної мережі

Щоб сенсорні вузли могли виконувати свої функції, на кожному з них має бути встановлена спеціалізована операційна система. Прикладом такої операційної системи є TinyOS, яка була розроблена в Університеті Берклі та має відкритий вихідний код. Система керує подіями в режимі реального часу й призначена для роботи в умовах обмежених обчислювальних ресурсів.

Загальна архітектура БСМ включає такі типи вузлів (рис. 1.7): координатор, маршрутизатори, кінцеві вузли.

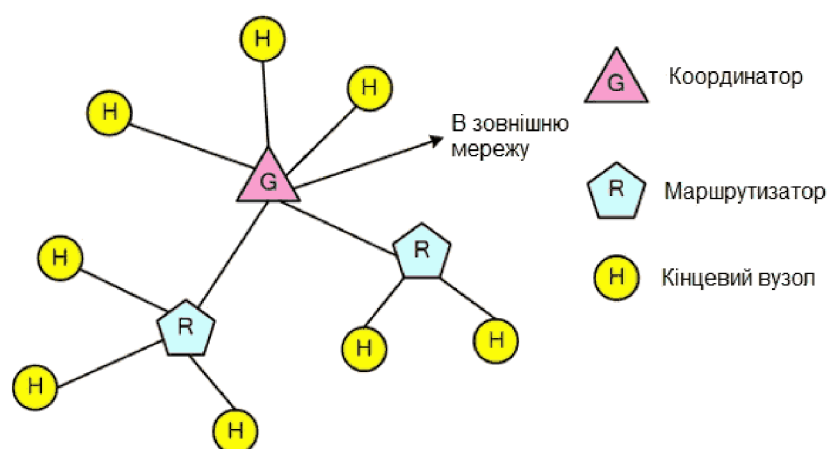


Рисунок 1.7 – Класифікація вузлів у складі БСМ

Координатор є найскладнішим пристроєм у бездротовій сенсорній мережі, оскільки забезпечує глобальну координацію, організацію та налаштування параметрів мережі. Для ефективної роботи координатор потребує максимальної обчислювальної потужності та обсягу пам'яті. У мережі має бути лише один координатор, який відповідає за доступ до зовнішньої мережі та виконує функцію шлюзу. Координатор також часто називається базовою станцією.

Маршрутизатори виконують багато функцій, таких як приймання, буферизація та передавання даних від інших вузлів БСМ, а також визначення напрямку передавання. Крім того, вони визначають активні канали, здійснюють ретрансляцію мережевих сигнальних пакетів із параметрами мережі, отриманими від координатора, керують мережевими адресами підлеглих пристроїв тощо.

Сенсорний вузол – це кінцевий пристрій, який виконує лише прикладні функції, зокрема збір інформації та керування віддаленими об'єктами, без функцій маршрутизації даних.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ГЕНЕРАЦІЇ ТА ВИКОРИСТАННЯ ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГІЇ

2.1 Технічні вимоги до системи моніторингу в домогосподарствах з ВДЕ

Загальні технічні вимоги до автоматизованих систем моніторингу виробництва та розподілу електроенергії для суб'єктів альтернативної енергетики передбачають забезпечення двостороннього обміну сигналами між приладами обліку, бездротовими модемами, концентраторами та серверами. Такий обмін дозволяє ефективно збирати інформацію та передавати її для подальшого аналізу. Система повинна підтримувати автоматичну передачу даних із приладів обліку на сервер як за розкладом, так і за запитом, що сприяє оперативному оновленню та точності зібраної інформації.

Важливим компонентом є гнучкість програмного забезпечення, яке повинно бути сумісним із різними типами вимірювальних пристроїв, що мають цифрові інтерфейси. Це забезпечує легку інтеграцію нових елементів без необхідності істотних змін у програмному коді. Крім того, необхідно гарантувати захист даних під час передачі, використовуючи шифрування та завадостійке кодування каналів зв'язку, що зберігає цілісність і конфіденційність інформації.

Системи повинні також функціонувати на базі бездротового зв'язку, для чого модеми й концентратори мають бути обладнані відповідними модулями управління і передачі даних. Такий підхід дає змогу уникнути складностей із прокладанням кабелів і забезпечує гнучкість у побудові мережі. Усі ці вимоги формують технічну основу для створення надійних і безперебійних систем автоматизованого моніторингу та керування електроенергетичними процесами.

2.2 Аналіз і вибір технологій бездротового зв'язку для IoT-систем

Забезпечення ефективного зв'язку є ключовим фактором успішного розподілу електроенергії, особливо у сфері альтернативної енергетики, де бездротова передача даних відіграє вирішальну роль. Часто станції з виробництва «зеленої» енергії розташовані далеко від населених пунктів, що може спричинити проблеми з підключенням до мережі. У такому випадку доцільно встановити систему бездротової передачі даних (Wireless Data Transfer Facility, WDF).

Вибір оптимального бездротового стандарту для забезпечення ефективного зв'язку в автоматизованих системах моніторингу є критично важливим завданням, оскільки необхідно враховувати такі параметри, як енергоспоживання, радіус покриття та пропускна здатність. Важливо, щоб бездротова сенсорна мережа БСМ була енергоефективною, забезпечувала необхідне покриття та мала достатню пропускну здатність для передавання важливих даних.

На рисунку 2.1 порівнюються різні технології за сферою застосування. Більшість технологій не можуть задовольнити потреби суб'єктів альтернативної енергетики через обмежену дальність передачі даних. Тому доцільно розглянути можливість впровадження технологій бездротових глобальних мереж.

У таблиці 2.1 порівняно та проаналізовано параметри технологій БСМ. Оскільки різні стандарти бездротового зв'язку мають свої переваги та обмеження, важливо обрати той стандарт, який найкраще відповідає конкретним умовам і потребам суб'єкта альтернативної енергетики.

Для забезпечення ефективного зв'язку в автоматизованих системах моніторингу найкращим варіантом може бути використання технології LoRaWAN, яка забезпечує надійний та енергоефективний зв'язок на великі відстані. Водночас, технологію NB-IoT доцільно застосовувати для забезпечення ефективного зв'язку на виробничих майданчиках і в підземних спорудах.

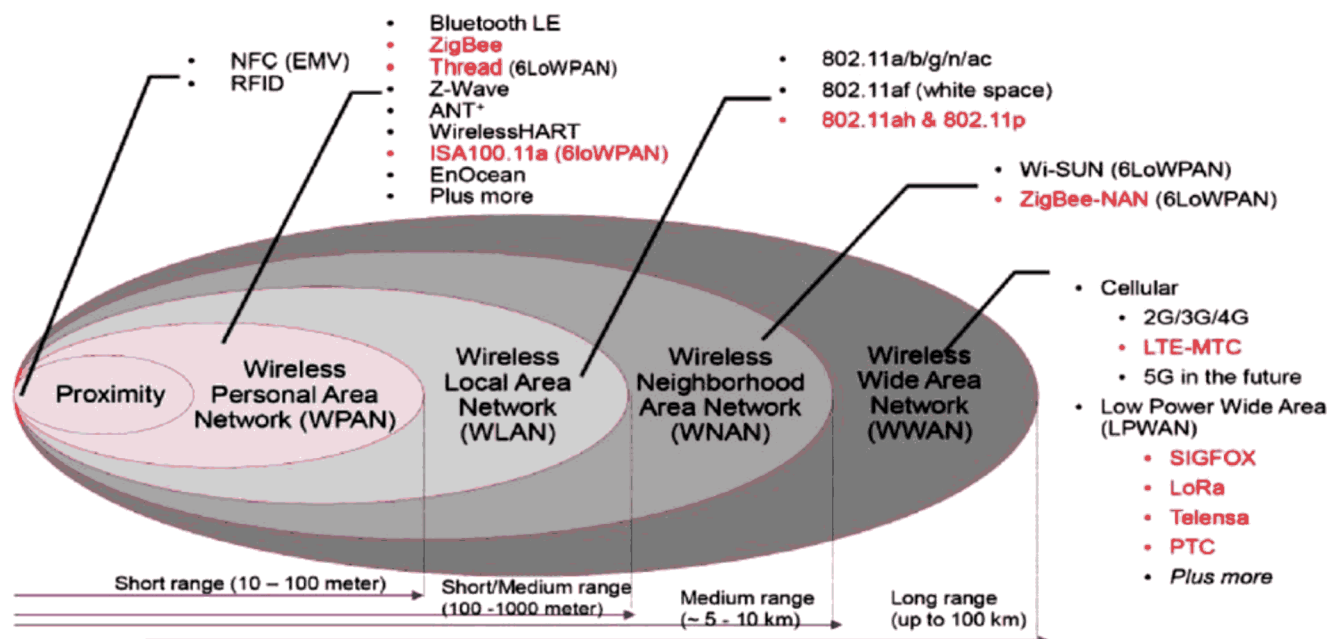


Рисунок 2.1 – Класифікація технологій бездротового зв'язку за радіусом дії [16]

Таблиця 2.1 – Порівняння основних параметрів технологій БСМ

Характеристика	LTE-M	LoRaWAN	NB-IoT	Sigfox
Тип стандарту	3GPP	власна специфікація	3GPP	власна специфікація
Діапазон частот	700–2200 МГц, 452,5–467,5 МГц	433 МГц, 868 МГц, 915 МГц	700–2200 МГц, 452,5–467,5 МГц	868 МГц, 915 МГц, 921 МГц
Швидкість передачі даних	до 1 Мбіт/с	до 50 Кбіт/с	до 200 Кбіт/с	до 0,1 Кбіт/с
Топологія мережі	типу «зірка»	типу «зірка»	типу «зірка»	типу «зірка»
Кількість пристроїв	велика кількість підключень	велика кількість підключень	велика кількість підключень	велика кількість підключень
Далекодія	до 5 км	в межах від 5 до 15 км	до 5 км	від 10 до 50 км
Потужність	високий рівень	помірний рівень	високий рівень	помірний рівень
Сфера використання	для мобільних та локальних застосувань	для мобільних та локальних застосувань	для мобільних та локальних застосувань	для мобільних та локальних застосувань

2.3 Порівняння технологій LoRaWAN і NB-IoT для застосування в енергетиці

Проведемо деталізований порівняльний аналіз технічних характеристик технологій LoRaWAN та NB-IoT. Однією з найбільш істотних відмінностей між ними є простота розгортання. Щоб розпочати використання мережі NB-IoT, спочатку необхідно отримати ліцензію на використання частот. Мережі NB-IoT функціонують у ліцензованому частотному спектрі, зокрема в діапазоні 1800 МГц або нижче. Крім того, для розгортання мереж NB-IoT може використовуватись існуюча інфраструктура 4G. LoRaWAN, на відміну від NB-IoT, не потребує ліцензії на використання частоти. Це означає, що пристрої можна легко та швидко розгорнути там, де вони потрібні.

Ще одна важлива відмінність – синхронізація. Оскільки NB-IoT є стільниковою мережею, пристрої, підключені до неї, повинні «прокидатися» та синхронізуватися з мережею, щоб отримувати або надсилати повідомлення. Це може призвести до підвищеного енергоспоживання і скорочення терміну служби акумулятора. LoRaWAN, натомість, працює інакше: пристрої передають дані лише тоді, коли це необхідно, що дозволяє заощаджувати енергію та подовжувати термін служби акумулятора.

Надійність і швидкість передачі даних є ключовими аспектами ефективного використання IoT-пристроїв. У цьому контексті NB-IoT має перевагу, забезпечуючи середню швидкість передачі даних 200 кбіт/с порівняно з 50 кбіт/с у LoRaWAN. Це робить його більш придатним для застосувань, де потрібна висока швидкість обміну.

Пропускна здатність – ще один важливий критерій. Зазвичай NB-IoT має вищу пропускну здатність завдяки використанню частоти 180 кГц, тоді як для LoRaWAN типовою є ширина 125 кГц.

Ще один фактор, що заслуговує на увагу – покриття мережі. NB-IoT працює найкраще в умовах щільної міської забудови з високою надмірністю

продуктивності. Однак у приміських або сільських районах його ефективність може знижуватись. Натомість LoRaWAN не залежить від мобільного інтернету, а його покриття залишається стабільним незалежно від умов місцевості. Отже, LoRaWAN може бути кращим вибором для IoT-пристроїв у віддалених регіонах.

Керування SIM-картами також є важливою складовою роботи мереж NB-IoT. Для підключення до мережі можуть використовуватися різні формати SIM-карт: стандартні, термостійкі – для роботи в екстремальних умовах, а також SIM-чіпи – для компактних пристроїв.

Втім, поява технології LoRa створила конкуренцію для стільникових IoT-рішень, оскільки вона не потребує SIM-карти, а кінцеві вузли можуть безкоштовно підключатися до мережі. Наразі для пристроїв 2G і 3G потрібна окрема SIM-карта. Проте для LPWAN-мереж на основі 4G розробляються модулі з вбудованими програмованими SIM-чіпами, що здешевить і спростить взаємодію з операторами. Узагальнені результати порівняння наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Технічні особливості технологій LoRaWAN і NB-IoT

Характеристика	LoRaWAN	NB-IoT
Тип модуляції	CSS (Chirp Spread Spectrum)	OFDMA / DSSS
Діапазон частот	неліцензований (ISM)	ліцензований
Швидкість передавання даних	від 0,3 до 50 кбіт/с	(UL): 1–144 кбіт/с (DL): 1–200 кбіт/с
Тривалість автономної роботи	понад 10 років	До 10 років
Радіус покриття	до 5 км у місті, до 20 км у сільській місцевості	до 1 км у місті, до 10 км у сільській місцевості
Ширина каналу	125 кГц	164 кГц
Максимальний рівень втрат (MCL)	165 дБ	164 дБ
Пікове енергоспоживання	32 мА	120 мА
Струм у режимі сну	1 мкА	5 мкА
Захист даних	шифрування AES-128	стандарти 3GPP (128–256 біт)

2.4 Структурна схема системи моніторингу генерації та використання відновлюваної електроенергії

Наступним етапом є розробка структури системи моніторингу генерації та використання відновлюваної електроенергії (на основі бездротової сенсорної мережі LoRaWAN), яку показано на рисунку 2.2.

Наскрізні IoT-пристрої (лічильники електроенергії) підключаються до шлюзу LoRaWAN у топології «зірка» та використовують модуляцію LoRa для передачі сигналу між пристроями. У цьому випадку дані передаються одночасно на всі доступні базові станції в зоні покриття, а не лише на одну. Оскільки немає необхідності прив'язуватися до певного шлюзу, це дозволяє забезпечити безперервну передачу інформації та, за потреби, здійснювати контроль над датчиками в русі.

Уся інформація, що передається від кінцевих IoT-пристроїв, захищена наскрізним шифруванням із використанням двох рівнів: 128-бітного мережевого ключа та 128-бітного ключа сеансу програми.



Рисунок 2.2 – Структурна схема системи моніторингу генерації та використання відновлюваної електроенергії на основі мережі LoRaWAN

Технологія LoRaWAN дає змогу легко підключати нові сенсорні вузли, причому їхня кількість не обмежується рівнем енергоспоживання. Кожен шлюз (базова станція) реєструється в мережі LoRaWAN і пересилає отримані пакети даних безпосередньо на мережевий сервер, використовуючи найбільш відповідний спосіб підключення до мережі (3G, 4G, Wi-Fi, Ethernet, волоконно-оптичний або радіорелейний зв'язок) [12].

Мережевий сервер керує всією мережею: він отримує дані від шлюзу, видаляє дублікати повідомлень, пересилає їх на відповідний сервер додатків і контролює швидкість передавання даних. Сервер додатків обробляє отримані дані та надсилає їх на підключений кінцевий пристрій [12]. Отримані дані можна інтерпретувати та використовувати для вирішення бізнес-завдань.

2.5 Обґрунтування вибору апаратних компонентів

У якості базових станцій можна використати KONA Macro, яка має низькі витрати на мережеве зберігання, покращене покриття та високу ємність. Станція компактна і проста в установці. Базова станція KONA Macro є потужною зовнішньою LoRaWAN-базовою станцією, яка призначена для роботи в різних регіональних діапазонах ISM, зокрема EU868, AU915, AS923, JP920, CN779, NA902–928 та CN470–510. Він має захищений корпус зі ступенем захисту IP67, що забезпечує стійкість до пилу та вологи, а також може працювати в екстремальному температурному діапазоні від -40°C до $+60^{\circ}\text{C}$. Цей пристрій досить компактний, з габаритами $144 \times 282 \times 92$ мм і масою 2,6 кг, що полегшує його монтаж. Живлення здійснюється або від джерела 48 VDC, або через PoE (стандарт 802.3af). Він споживає менше 12 Вт, що робить його енергоефективним.

Базова станція має вбудовану GPS-антену для точного визначення геолокації, а також вбудовану антену для 3G/4G-зв'язку, однак не підтримує Wi-

Гі. Для LoRa-зв'язку використовується антена типу N-Type, а потужність передавача регулюється в межах від 14 до 27 дБм.

Завдяки високій надійності (MTBF 850 000 годин) і можливості працювати в умовах вологості від 10 % до 100 % без утворення конденсату, KONA Macro підходить для використання в складних зовнішніх умовах. Для підключення до мережі використовується стандартний Ethernet-порт RJ-45. Зовнішній вигляд базової станції KONA Macro наведено на рисунку 2.3.

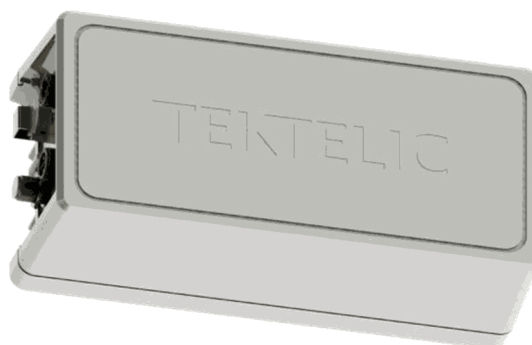


Рисунок 2.3 – Приклад базової станції типу KONA Macro

Антенa TEKTELIC LoRaWAN 2,5/3 dBi (рис. 2.4) – це спрямована антена для мереж LoRaWAN. Пристрій має компактні розміри – всього 25 на 470 міліметрів, з номінальним імпедансом 50 Ом. Його азимутальна ширина діаграми спрямованості на рівні 3 дБ становить 360 градусів, а коефіцієнт підсилення дорівнює 2,5 dBi. Антена підтримує вертикальну поляризацію та працює в частотному діапазоні від 860 до 870 МГц при ширині смуги 10 МГц і одному каналі. Максимальна вхідна потужність становить 20 Вт.



Рисунок 2.4 – Зображення антени виробництва TEKTELIC

Лічильники електроенергії нового покоління серії SL7000 (ACE7000) – це багатофункціональні трифазні електронні пристрої з програмованими функціями. Окрім вимірювання параметрів енергоспоживання, вони також здатні здійснювати додаткові вимірювання показників якості електроенергії. Лічильники можуть бути як прямого, так і трансформаторного типу та мають такі розширені функції, як багатотарифний облік електроенергії для енергетичних і промислових підприємств, автоматичне зчитування та архівування розрахункових параметрів.

Лічильники використовують універсальне джерело живлення та мають широкий діапазон вимірювання, що дозволяє охопити всі можливі варіанти застосування. Це дає змогу використовувати один і той самий тип лічильника на всій території, яку обслуговує енергетична компанія.

Лічильники серії SL7000 доступні в класах точності 0,2; 0,5 або 1,0. Вони оснащені сучасними комунікаційними інтерфейсами, протоколами передавання даних і мовою DLMS-COSEM відповідно до новітніх міжнародних стандартів. Це гарантує можливість легкої інтеграції приладу в автоматизовані системи обліку та інші системи технічного контролю. Електричний лічильник SL7000 показано на рисунку 2.5.



Рисунок 2.5 – Пристрої обліку електроенергії типу SL7000

2.6 Алгоритмічна модель функціонування IoT-системи моніторингу

Відповідно до завдання дослідження розроблено алгоритм роботи системи моніторингу генерації та використання відновлюваної електроенергії.

На початковому етапі кінцеві пристрої – лічильники або інші енергонезалежні модулі здійснюють вимірювання параметрів енерговитрат. Вони фіксують ці значення в режимі реального часу або з певною періодичністю, залежно від налаштувань системи.

Після того як дані зібрані, наступним кроком є передача цих даних радіоканалом до шлюзу. Шлюз виконує роль проміжного пристрою між кінцевими модулями та більш складною обчислювальною інфраструктурою.

Він не просто передає дані далі — він виконує первинну обробку. Це може включати перевірку цілісності даних, фільтрацію шуму, агрегацію або попереднє сортування. Така обробка дозволяє зменшити обсяг трафіку до мережевого сервера і підвищити загальну ефективність системи.

Далі оброблені або агреговані дані надсилаються на мережевий сервер. На цьому рівні може відбуватись глибший аналіз: нормалізація значень, виявлення аномалій, збереження інформації у базі даних та підготовка її до подальшого використання. Мережевий сервер, фактично, є мозковим центром системи, що керує обміном інформації, безпекою доступу та зберіганням історичних даних.

Після цього інформація надсилається на сервери додатків — тобто у ті системи, де дані набувають прикладного значення. Це можуть бути мобільні застосунки, панелі моніторингу, системи звітності чи автоматизовані механізми прийняття рішень. Користувачі або адміністратори систем отримують візуалізацію даних, отримують повідомлення про критичні зміни або можуть взаємодіяти з пристроями дистанційно.

Завершальним етапом алгоритму є періодичне оновлення даних відповідно до заданого інтервалу часу. Система працює циклічно: після завершення одного

циклу всі етапи повторюються, що дозволяє забезпечити актуальність інформації та реагувати на зміни в режимі реального часу.

У скороченій версії розроблений алгоритм можна представити наступним чином:

- вимірювання енерговитрат кінцевими пристроями;
- передача даних до шлюзу за допомогою радіоканалу;
- обробка даних шлюзом;
- передача даних зі шлюзу на мережевий сервер;
- обробка інформації мережевим сервером;
- подальша передача даних на сервери додатків;
- оновлення даних згідно із заданим інтервалом часу.

Таким чином, побудова ефективного алгоритму взаємодії в IoT-системі є результатом чітко організованої послідовності дій, що забезпечує надійне функціонування всієї інфраструктури — від вимірювання фізичних параметрів до інтеграції результатів у кінцеві сервіси.

РОЗДІЛ 3

ОПТИМІЗАЦІЯ ІНФОРМАЦІЙНОГО ОБМІНУ В ІoT-СИСТЕМАХ ЕНЕРГЕТИЧНОГО МОНІТОРИНГУ

3.1 Розрахунок тривалості передачі даних у мережах LoRaWAN

Кожен пакет даних, що передається через мережу LoRaWAN, складається з блоку даних фізичного рівня та преамбули. Преамбула містить однобайтову послідовність 10101011, яка вказує на початок пакета, та сім байтів чергування 1 і 0 (кожен байт є послідовністю 101010). Ці значення використовуються для синхронізації приймальної сторони. Кількість символів у преамбулі, позначена як $n_{preamble}$, може бути налаштована в межах від 6 до 65535.

Швидкість передачі даних у мережі LoRaWAN визначається комбінацією рівня модуляції, коефіцієнта розповсюдження та пропускної здатності каналу. Ці параметри впливають на фізичну швидкість передачі та час перебування в ефірі. Коефіцієнт розповсюдження (SF) – це ціле число, яке може набувати значень від 7 до 12. Чим вище значення SF , тим більше можливе спотворення сигналу на 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 $PL = 12 + FRM$ – об'єм корисних даних у блоці даних на фізичному рівні;

SF – коефіцієнт розширення спектра;

CRC – коефіцієнт перевірки цілісності циклічної суми ($CRC = 1$, якщо активовано передачу блоку корисного навантаження, у протилежному випадку $CRC = 0$);

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 – коефіцієнт оптимізації швидкості відправки даних ($ADR = 1$, якщо увімкнено оптимізацію для низьких швидкостей, у протилежному випадку коефіцієнт $ADR = 0$);

CR – швидкість коду, що приймає значення у діапазоні від 1 до 4;

$ceil$ – вказівник на округлення результату до найближчого цілого числа.

Тривалість процесу передачі преамбули може бути визначена відповідно до виразу (3.2):

$$T_{preamble} = (n_{preamble} + 4.25) \cdot T_{sym}, \quad (3.2)$$

де T_{sym} – тривалість процесу відправки передачі одного символу, яку можна обчислити за формулою (3.3):

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

де BW – ширина смуги одного радіоканала.

Тривалість процесу відправки одного блоку даних на фізичному рівні можна розрахувати згідно з формулою (3.4):

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

На завершальному етапі обчислень визначається тривалість процесу відправки повного пакета даних у мережі LoRaWAN. Для цього використаємо формулу (3.5):

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

Проведемо розрахунок для передачі одного вихідного пакета, який міститиме 10 байт корисного навантаження від кінцевого пристрою до сервера додатків. Результати розрахунків для різних коефіцієнтів розповсюдження SF наведено у таблиці 3.1. У розрахунках використаємо такі початкові параметри:

- ширина смуги радіоканалу: $BW = 125$ кГц;
- кількість символів преамбули: $n_{preamble} = 6$;
- обсяг корисної інформації ($FRMPayload$): $FRM = 10$ байт;

- розмір фізичного пакета даних (*PHYPayload*): $PL = 23$ байт (для SF7 – SF12);
- прапорець додавання заголовка: $H = 0$ (заголовок не включено);
- прапорець додавання контрольної суми *CRC*: $CRC = 1$ (включено);
- параметр автоматичного регулювання швидкості: $ADR = 0$ (не використовується);
- коефіцієнт кодування: $CR = 1$.

Таблиця 3.1 – Результати обчислення тривалості передачі одного вихідного пакета (UL-пакета)

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 домінуючим значенням коефіцієнта розповсюдження є $SF = 12$, оскільки воно забезпечує найкращий захист від перешкод. Із таблиці 3.1 видно, що для такого коефіцієнта тривалість передачі пакета є найбільшою і становить 1253,38 мс.

3.2 Оцінка пропускної здатності мережі LoRaWAN у задачах енергомоніторингу

Усі пристрої в мережі LoRaWAN, включаючи кінцеві пристрої та базові станції, використовують асинхронний доступ до спільного середовища передавання даних. Кожен пристрій планує надсилання пакетів даних у випадковий момент часу в межах механізму доступу відповідно до своїх потреб. Цей механізм ґрунтується на протоколі «Pure ALOHA» і забезпечує гнучкість та ефективність передавання даних у мережах LoRaWAN.

Оцінка пропускної здатності протоколу «Pure ALOHA» ґрунтується на кількох ключових припущеннях. Передусім вважається, що користувачі мають довільний доступ до каналу передачі — їхні дії не координуються і не синхронізуються між собою, тобто кожен користувач може почати передавання в будь-який момент. Інтенсивність надходження пакетів у таку систему моделюється пуассонівським потоком, де час між окремими надходженнями є випадковою величиною з експоненціальним розподілом.

Передавання даних здійснюється незалежно, тому колізії виникають лише у випадках, коли декілька користувачів намагаються передати пакети одночасно. Якщо ж така колізія стається, вважається, що користувачі, які її спричинили, чекатимуть певний випадковий проміжок часу, перш ніж спробувати знову передати інформацію. Цей інтервал очікування визначається з урахуванням навантаження на систему.

Крім того, припускається наявність ідеального механізму виявлення колізій. Це означає, що система миттєво розпізнає, коли кілька пакетів надсилаються одночасно, і розцінює це як конфлікт, що потребує повторної передачі.

У цьому випадку ймовірність того, що k пакетів надійдуть від усіх мережевих терміналів протягом часу передавання пакета T , визначається за формулою Пуассона (3.6)

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

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

Якщо протягом інтервалу передавання повідомлення та попереднього інтервалу ($k = 0$) не відбувається передавання пакетів від інших кінцевих пристроїв мережі, ймовірність успішної передачі дорівнює:

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

Середня кількість успішно переданих пакетів за час T , тобто пропускна здатність мережі, визначається за формулою:

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

Використовуючи формулу (3.7), розрахуємо ймовірність успішного передавання пакета даних для значень G від 0 до 1,5 з кроком 0,1 та представимо результати графічно на рисунку 3.1.

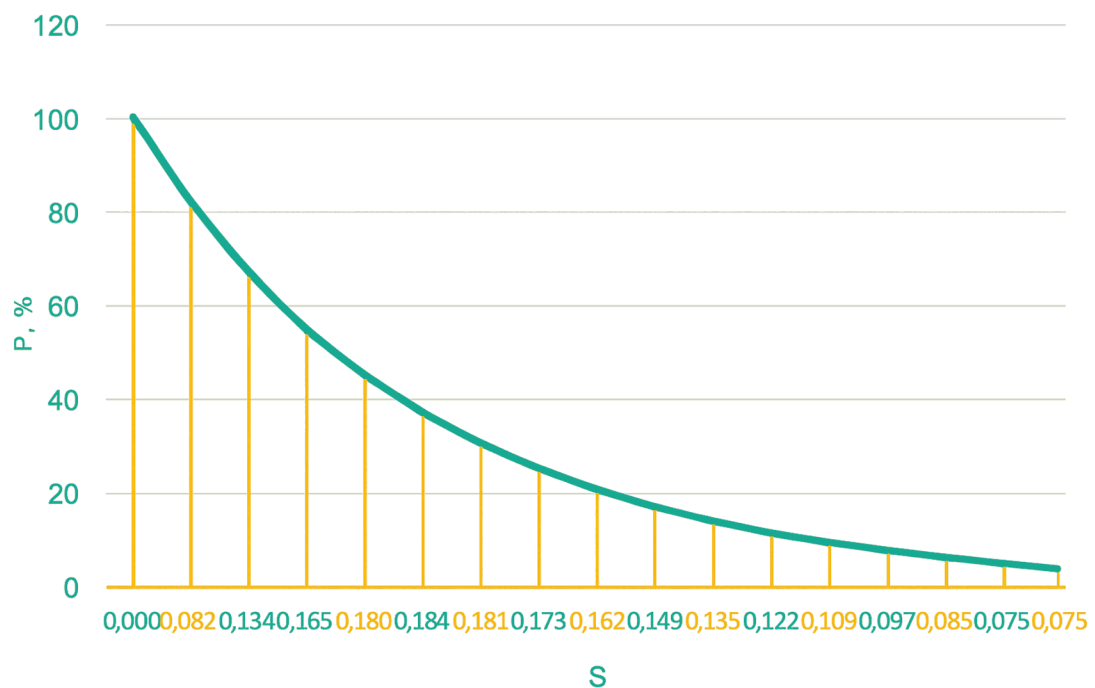


Рисунок 3.1 – Залежність ймовірності успішної передачі пакета від пропускної здатності

А рівнянням (3.8) скористаємося для того, щоб обчислити пропускну здатність розроблюваної системи для значень G від 0 до 1,5 з кроком 0,1 та відобразимо результати графічно на рисунку 3.2.

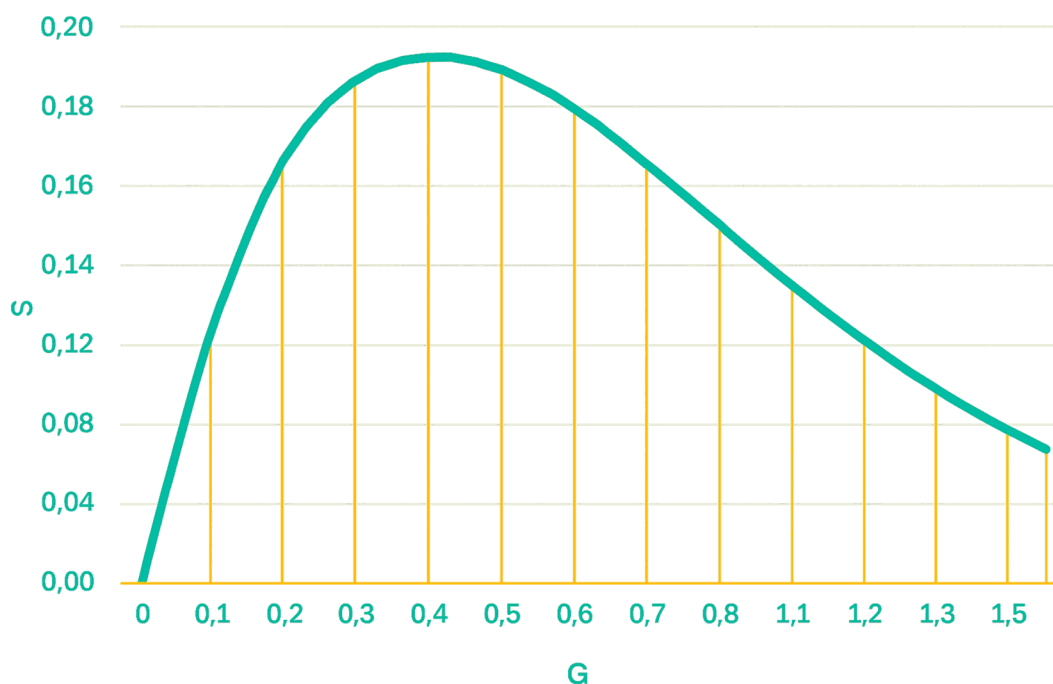


Рисунок 3.2 – Графік зміни пропускної здатності LoRaWAN-мережі

З рисунка 3.2 видно, що коли інтенсивність надходження пакетів (G) дорівнює 0,5, значення пропускної здатності є найвищим і становить 0,184.

Тоді на рисунку 3.1 можна побачити, що при максимальній пропускній здатності мережі ймовірність успішного передавання пакета даних (в умовах колізії) становить приблизно 37%.

3.3 Розрахунок параметрів модуляції та чутливості приймача

Широкопasmова модуляція LoRa використовує метод лінійної частотної модуляції, який дозволяє розширити спектр сигналу шляхом постійної зміни його частоти. Однією з головних переваг цього підходу є еквівалентність у синхронізації та зміщенні частоти між передавачем і приймачем, що спрощує конструкцію приймача. Смуга пропускання частотної модуляції відповідає ширині спектру сигналу.

Розрахунок швидкості модуляції LoRa (R_b) можна виконати за формулою:

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

де ширина каналу пропускання BW може приймати значення: 125 kHz, 250 kHz або 500 kHz.

Розрахуємо швидкість передачі окремих символів R_s :

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

А повну швидкість передачі даних чіпа R_c можна розрахувати як:

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

Модуляція LoRa також використовує змінну схему корекції помилок, що підвищує надійність передавання сигналу завдяки додатковій надмірності. Отже, мінімальну швидкість передавання даних сигналу R_b можна визначити за формулою (3.12)

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

де CR – кодова швидкість, яку можна встановити як 4/5, 4/6, 4/7 або 4/8.

Ще одним важливим фактором є чутливість приймача. Цей показник визначає найменшу потужність сигналу LoRa, яку приймач здатен розпізнати та демодулювати. Чутливість приймача LoRaWAN можна розрахувати за формулою:

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

де SNR – відношення сигнал/шум;

S – чутливість приймача;

NF – коефіцієнт шуму приймача.

У таблиці 3.2 наведено номінальну швидкість передачі і чутливість приймача для смуги 125 кГц. Відповідні значення R_b (швидкість передачі бітів) і SF (фактор розширення спектру) розраховані за формулами 3.9-3.12.

Для значень, наведених у таблиці 3.2, максимальна відстань зв'язку в мережі LoRaWAN становить близько 10 кілометрів. Однак таке значення не враховує вплив радіоперешкод і інших завад, які можуть виникнути на шляху поширення сигналу [18].

Таблиця 3.2 – Номінальні значення 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

3.4 Аналіз навантаження базової станції LoRaWAN

Проведемо аналіз мережі LoRa, використовуючи для розрахунку частоту 868 МГц і смугу пропускання 125 кГц з $Nf = 8$ радіочастотними каналами. Припустимо, що вузол передає пакети з корисним навантаженням 10 байтів і преамбулою 6 символів зі швидкістю передачі 1 пакет на годину. Припустимо, що ймовірність зіткнення, яке спричинить пошкодження, становить $P_{\text{vtr}} = 5\%$. Якщо два або більше вузлів одночасно передають пакети з однаковим коефіцієнтом поширення SF , відбудеться зіткнення.

Тривалість передачі пакета даних 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 базової станції;

$T_{SF DLpack}$ – час передачі пакету з підтвердженням від базової станції до вузла.

Продуктивність базової станції LoRa, тобто кількість пакетів, що обслуговуються шлюзом за день, можна обчислити:

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

де $N_{EN\text{пак}}$ – кількість пакетів, надісланих за 24 години одним кінцевим вузлом;

G – визначена інтенсивність отримання пакетів даних при $P_{\text{втр}} = 5\%$ ($G = 0,0256$);

P_{SF} – ймовірність використання відповідної SF ;

N_f – повна кількість радіоканалів у досліджуваній мережі LoRaWAN.

Розрахуємо потужність базової станції LoRa, де вузли розподілені по різних зонах радіопокриття.

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

Скориставшись формулою (3.15) та даними таблиці 3.1, можна визначити пропускну спроможність базової станції LoRa та відповідну кількість кінцевих вузлів для кожної базової станції. Результати розрахунку потужності базової станції LoRa наведено в таблиці 3.3 [17]

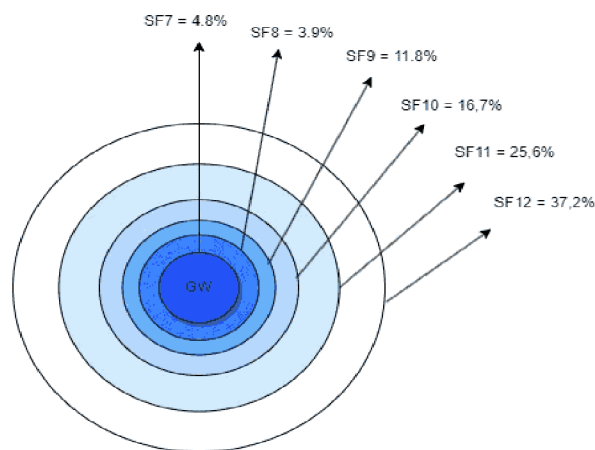


Рисунок 3.3 – Розподіл ймовірностей використання пристроїв у різних зонах SF

Таблиця 3.3 – Розрахована ємність базової станції LoRa

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

3.5 Шляхи покращення ефективності інформаційного обміну

При плануванні розгортання системи моніторингу генерації та використання відновлюваної електроенергії необхідно враховувати рельєф місцевості, оскільки базові станції повинні розташовуватися на висоті, поширеній у цій місцевості, та вище рівня сенсорних вузлів. Крім того, бажано, щоб кожен вузол перебував у зоні покриття щонайменше двох базових станцій.

Також розташування антени GSM-900 поблизу пристрою LoRaWAN може бути ще одним фактором, що спричиняє перешкоди у бездротовій мережі. Цю проблему можна вирішити, розмістивши базову станцію та сенсорні вузли мережі LoRaWAN на відстані щонайменше 100 метрів від антени GSM-900.

У майбутньому з'явиться можливість модернізувати системи моніторингу генерації та використання відновлюваної електроенергії шляхом розширення їхніх функціональних можливостей, що сприятиме підвищенню загальної ефективності. Для цього можна оновити та оптимізувати програмне забезпечення, додати резервні джерела живлення та замінити стандартну антену на більш потужну.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Забезпечення охорони праці під час розробки та експлуатації інформаційної системи моніторингу

У процесі розробки та впровадження інформаційної системи моніторингу генерації та використання відновлюваної електроенергії в приватних домогосподарствах надзвичайно важливо приділяти увагу питанням охорони праці. Це стосується як етапу проектування та програмування, так і подальшої експлуатації системи.

Під час розробки програмного забезпечення необхідно забезпечити безпечні умови праці для розробників. Робочі місця повинні відповідати вимогам ергономіки, мати належне освітлення та вентиляцію. Важливо також забезпечити належний рівень електробезпеки, зокрема заземлення обладнання та використання захисних пристроїв.

На етапі впровадження системи в домогосподарствах слід враховувати специфіку роботи з електрообладнанням, таким як сонячні панелі, інвертори та акумулятори. Монтаж та обслуговування цих пристроїв повинні здійснюватися кваліфікованими фахівцями з дотриманням вимог техніки безпеки. Особливу увагу слід приділяти роботам на висоті, забезпечуючи використання засобів індивідуального захисту та страхувальних систем.

Крім того, важливо проводити регулярні інструктажі та навчання для користувачів системи щодо безпечного використання обладнання та програмного забезпечення. Це дозволить мінімізувати ризики виникнення аварійних ситуацій та забезпечити ефективну експлуатацію системи.

4.2. Безпека в надзвичайних ситуаціях при використанні відновлюваних джерел енергії

Використання відновлюваних джерел енергії в приватних домогосподарствах пов'язане з певними ризиками, особливо в умовах надзвичайних ситуацій. Тому важливо розробити та впровадити заходи, спрямовані на забезпечення безпеки в таких умовах.

Одним із ключових аспектів є пожежна безпека. Встановлення та експлуатація обладнання для генерації відновлюваної енергії повинні відповідати вимогам пожежної безпеки. Необхідно забезпечити наявність засобів пожежогасіння, таких як вогнегасники, та доступ до них у разі потреби. Також слід проводити регулярні перевірки стану електропроводки та обладнання на предмет можливих несправностей, які можуть призвести до пожежі.

У разі виникнення надзвичайних ситуацій, таких як відключення електроенергії або стихійні лиха, важливо мати план дій для забезпечення безпеки мешканців. Це включає евакуаційні маршрути, місця збору та засоби зв'язку з екстреними службами. Крім того, слід забезпечити наявність резервних джерел живлення для підтримки роботи критично важливих систем, таких як освітлення та зв'язок.

Особливу увагу слід приділяти кібербезпеці інформаційної системи моніторингу. Захист від несанкціонованого доступу та зловмисних дій є критично важливим для забезпечення безперебійної роботи системи та захисту персональних даних користувачів. Для цього необхідно впроваджувати сучасні засоби захисту, такі як шифрування даних, багаторівнева аутентифікація та регулярне оновлення програмного забезпечення.

Загалом, забезпечення охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях є невід'ємною складовою впровадження та експлуатації інформаційної системи моніторингу генерації та використання відновлюваної електроенергії в приватних домогосподарствах.

4.3 Основні ризики, пов'язані з використанням ВДЕ в приватних домогосподарствах

Використання відновлюваних джерел енергії в приватних домогосподарствах стає все більш популярним. Це пов'язано з низкою факторів, таких як зростання цін на традиційні енергоносії, прагнення до екологічно чистого життя та урядові стимули. Однак, важливо пам'ятати, що використання ВДЕ пов'язане з певними ризиками для здоров'я та безпеки. Тому, важливо вживати заходів з охорони праці, щоб мінімізувати ці ризики.

Основні ризики, пов'язані з використанням ВДЕ в приватних домогосподарствах, включають:

Падіння з висоти. Це може статися при монтажі та обслуговуванні систем ВДЕ, таких як сонячні панелі та вітрові турбіни. Використовувати спеціальні засоби індивідуального захисту при роботі на висоті, наприклад Анкерні системи, Засоби страхування та позиціонування, Засоби захисту голови, Засоби захисту обличчя та очей.

Електричний удар. Електричний струм може завдати серйозної шкоди, або й призвести до смерті. Він не має запаху, ні кольору, ні звуку, тому його наявність можна визначити лише за допомогою спеціальних приладів або візуальних ознак пошкодження ізоляції. В основному електричний удар може статися при роботі з електричними компонентами систем ВДЕ.

Пожежа. Вибір засобів пожежогасіння для ВДЕ в приватних домогосподарствах залежить від типу ВДЕ, потенційних ризиків та об'єму використовуваних матеріалів.

1. Сонячні панелі:

- - вогнегасники: порошкові вогнегасники (клас ABC);
- - вогнегасники на водній основі (клас А);
- - пісок: ємність з піском, достатньою для засипання невеликого вогню;
- - вода: бочка з водою або шланг з водопроводу.

2. Вітряні турбіни:

- вогнегасники: порошкові вогнегасники (клас ABC);
- пісок: ємність з піском, достатньою для засипання невеликого вогню;
- вода: бочка з водою або шланг з водопроводу.

3. Геобіологічні джерела енергії (теплові насоси, біогаз):

- вогнегасники: порошкові вогнегасники (клас ABC);
- вогнегасники на водній основі (клас А);
- пісок: ємність з піском, достатньою для засипання невеликого вогню;
- вода: бочка з водою або шланг з водопроводу.

Отруєння. Використання ВДЕ в приватних домогосподарствах може нести в собі певні ризики для здоров'я, пов'язані з отруєнням шкідливими речовинами.

1. Сонячні панелі:

- свинець: використовується в деяких типах сонячних батарей. Отруєння може відбутися при пошкодженні батареї або неправильній утилізації;
- кадмій: використовується в деяких типах сонячних батарей. Отруєння може відбутися при пошкодженні батареї або неправильній утилізації;
- аміак: використовується в деяких системах охолодження сонячних панелей.

Витік аміаку може призвести до отруєння при вдиханні.

2. Вітряні турбіни:

- - мастильні матеріали: використовуються для змащення механізмів вітряної турбіни. Отруєння може відбутися при ковтанні або контакті зі шкірою;
- гідравлічна рідина: використовується в деяких типах вітряних турбін. Отруєння може відбутися при ковтанні або контакті зі шкірою.

3. Геобіологічні джерела енергії (теплові насоси, біогаз):

- чадний газ (CO): може утворюватися при неповній згорянні палива. Отруєння чадним газом може призвести до летального результату;
- метан (CH₄): виділяється при розкладанні органічних речовин. Висока концентрація метану може призвести до задухи;

– сірководень (H_2S): може утворюватися при розкладанні органічних речовин. Отруєння сірководнем може призвести до летального результату.

Важливо дотримуватись інструкцій виробника щодо встановлення, експлуатації та обслуговування ВДЕ. Необхідно забезпечити належну вентиляцію в приміщеннях, де встановлені ВДЕ. Використовуйте засоби індивідуального захисту при роботі з ВДЕ. Негайно зверніться за медичною допомогою при появі симптомів отруєння.

Заходи з охорони праці. Щоб мінімізувати ризики, пов'язані з використанням ВДЕ, важливо вживати таких заходів з охорони праці: Пройти відповідну підготовку. Перед монтажем, експлуатацією та обслуговуванням систем ВДЕ важливо пройти відповідну підготовку. Це допоможе вам зрозуміти ризики та знати, як їх безпечно контролювати.

В Україні, згідно з Правилами безпечної експлуатації електроустановок, для електротехнічних працівників, які обслуговують електроустановки, встановлено п'ять груп з електробезпеки:

I група. Особи, які не мають електротехнічної освіти та не пройшли навчання з питань електробезпеки. До цієї групи належать, наприклад, прибиральники, охоронці, офісні працівники, які не мають доступу до електроустановок.

II група. Особи, які пройшли інструктаж з електробезпеки під керівництвом особи, відповідальної за електрогосподарство, або особи з групи з електробезпеки

III група. До цієї групи належать, наприклад, електромонтери з електротехнічною освітою, які не мають права самостійно виконувати роботи в електроустановках. III група. Особи, які пройшли навчання та склали іспит з питань електробезпеки згідно з програмою, затвердженою Міністерством енергетики України. До цієї групи належать, наприклад, електромонтери, які мають право самостійно виконувати роботи в електроустановках до 1000 В.

IV група. Особи, які пройшли навчання та склали іспит з питань електробезпеки згідно з програмою, затвердженою Міністерством енергетики

України. До цієї групи належать, наприклад, електромонтери, які мають право самостійно виконувати роботи в електроустановках вище 1000 В.

V група. Особи, які мають вищу технічну освіту за спеціальністю "Електротехніка" та пройшли навчання та склали іспит з питань електробезпеки згідно з програмою, затвердженою Міністерством енергетики України. До цієї групи належать, наприклад, керівники електрогосподарств, інженери з експлуатації електроустановок. Використовувати засоби індивідуального захисту (ЗІЗ). При роботі з системами ВДЕ важливо використовувати ЗІЗ, такі як шоломи, захисні окуляри, рукавички та взуття.

Детальний приклад. Захисний одяг:

- комбінезон або костюм з негорючого матеріалу;
- захисний головний убір;
- захисні окуляри;
- захисні рукавички;
- взуття з захисними носками;
- дихальний захист: респіратор (за необхідності);
- захист слуху: навушники або беруші (за необхідності).

Захист від електричного струму:

- ізольовані інструменти;
- діелектричні рукавички;
- гумові чоботи.

Захист від сонячного випромінювання:

- сонцезахисні окуляри;
- різного виду креми від опіків.

ЗІЗ для роботи з вітряними турбінами. Захист від падіння з висоти:

- страховочна система;
- каска.

Захист від вітру та холоду:

- теплий одяг;

- вітрозахисний одяг.

ЗІЗ для роботи з геотермальними системами. Захист від хімічних речовин:

- хімічно стійкий одяг;
- респіратор;
- захисні окуляри;
- захисні рукавички.

Захист від опіків:

- вогнестійкий одяг;
- захисні рукавички.

Також використання діелектричних інструментів, є життєво важливим фактором для забезпечення безпеки при роботі з електроустановками.

Дотримуватися інструкцій виробника: Важливо уважно прочитати та дотримуватися інструкцій виробника щодо монтажу, експлуатації та обслуговування систем ВДЕ. Регулярно проводити огляд та обслуговування: Важливо регулярно проводити огляд та обслуговування систем ВДЕ, щоб переконатися, що вони знаходяться в належному стані.

Звернутися до кваліфікованого фахівця: Якщо виникли будь-які питання або сумніви щодо безпеки систем ВДЕ, важливо звернутися до кваліфікованого фахівця.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі здійснено розробку інформаційної системи моніторингу генерації та використання відновлюваної електроенергії в межах приватних домогосподарств. Розгляд сучасного стану автоматизованих систем контролю показав, що традиційні підходи, зокрема на основі GSM CSD, не забезпечують необхідної частоти, надійності та швидкості передачі даних, що обмежує можливості ефективного керування енергопотоками. Як альтернатива запропоновано створення системи на базі бездротових сенсорних мереж з використанням технології LoRaWAN, яка поєднує енергоефективність, широкий радіус дії та можливість інтеграції великої кількості пристроїв.

В рамках дослідження розроблено структурну схему системи, побудовано її алгоритмічну модель і обґрунтовано вибір апаратних засобів. Аналіз пропускної здатності та параметрів передачі даних в мережі LoRaWAN дозволив кількісно оцінити ефективність запропонованого рішення. Зокрема, встановлено, що при коефіцієнті розширення спектра $SF = 12$ тривалість передачі одного пакета даних становить 1253,38 мс. Водночас зі збільшенням SF зростає чутливість приймача: при $SF = 7$ вона становить -122 дБм, а при $SF = 12$ — вже -137 дБм, однак це супроводжується зменшенням швидкості передачі з 5697 до 305 біт/с відповідно. Таким чином, існує баланс між енергоспоживанням, дальністю та швидкістю, що потребує оптимального налаштування системи під конкретні умови експлуатації.

Під час оцінки пропускної здатності мережі встановлено, що при максимальному її значенні ймовірність успішної передачі пакета в умовах колізій становить 37 %, що є характерним обмеженням протоколу Pure ALOHA, на якому базується LoRaWAN. У той же час, базова станція здатна обслуговувати до 2681 вузла без втрати продуктивності, забезпечуючи одночасну передачу до 64 349 пакетів, що підтверджує масштабованість та придатність мережі до розгортання в умовах великої кількості сенсорних пристроїв.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Про ринок електричної енергії : Закон України від 13 квіт. 2017 р. № 2019-VIII [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/2019-19#Text> (дата звернення 05.06.2025 р.)
2. Президент підписав Закон про гарантії для встановлення гібридних систем з виробництва електроенергії в Укргідроенерго [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://uhe.gov.ua/ukrhydroenergonews-09062022> (дата звернення 05.05.2025 р.)
3. Про затвердження Кодексу системи передачі : постанова від 14 берез. 2018 р. № 309 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0309874-18#Text> (дата звернення 05.06.2025 р.)
4. Akyildiz I. F., Su W., Sankarasubramaniam Y., Cayirci E. A survey on sensor networks // IEEE Communications Magazine. – 2020. – Vol. 40, No. 8. – P. 102–114.
5. Alguliev R. M., Fataliev T. Kh., Agaev B. S., Aliev T. S. Sensor Networks: the state, Decisions and prospects. – P. 1317–1327.
6. Chavan S. V., Ladgaonkar B. P., Tilekar S. K. An overview of sensor nodes for wireless sensor network applications: a review. – P. 175–180.
7. Sharma D., Verma S., Sharma K. Network Topologies in Wireless Sensor Networks: A Review // April–June 2013. – P. 93–97.
8. eTutorials.org [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <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/> (дата звернення 15.05.2025 р.)
9. Atiko [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.atiko.com.ua/articles-ua/obzor-tekhnologii-lorawan-ua/> (дата звернення 25.05.2025 р.)
10. NB-IoT [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://shopgsm.ua/blog/chto-takoe-set-nb-iot-i-kakovy-ee-osobennosti/> (дата звернення 05.06.2025 р.)

11. KONA Macro [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://tektelic.com/products/gateways/kona-macro-iot-gateway/> (дата звернення 25.05.2025 р.)
12. TEKTELIC LoRaWAN® Antenna [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.mz-connect.com/shop/en/lorawan-antenna-fortektelic-kona-macro-gateway-p-169986>
13. ACE SL7000 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.itron.com/na/solutions/product-catalog/ace-sl7000>
14. A Study of Efficient Power Consumption Wireless Communication Techniques / Modules for Internet of Things (IoT) Applications [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.scirp.org/journal/paperinformation.aspx?paperid=65802> (дата звернення 05.06.2025 р.)
15. 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 доступу: https://www.itu.int/dms_pubrec/itur/rec/p/R-REC-P.1238-7-201202-S!!PDF-E.pdf (дата звернення 05.06.2025 р.)
16. Ковальчук О. А., Пилипенко Ю. М. Система управління сонячними панелями [Електронний ресурс] // Технології та дизайн. – 2020. – № 1 (34). – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/td_2020_1_12
17. Автоматизовані системи обліку електричної енергії. Загальні положення : ДСТУ 5003.1:2008. – Введ. 2008-05-21. – К. : Держстандарт України. – Режим доступу: http://online.budstandart.com/ua/catalog/docpage?id_doc=55920 (дата звернення 05.06.2025 р.)
18. Автоматизовані системи обліку електричної енергії. Терміни та визначення понять : ДСТУ 5003.2:2008. – Введ. 2008-05-21. – К. : Держстандарт України. – Режим доступу: http://online.budstandart.com/ua/catalog/docpage.html?id_doc=55923 (дата звернення 05.06.2025 р.)