

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)

Кафедра електричної інженерії
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Коваль В.П.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

« 27 » січня 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня бакалавр
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва спеціальності)

студенту Хомишину Мар'яну Вікторовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка системи обліку енергоспоживання на базі технології LoRa

Керівник роботи Оробчук Богдан Ярославович, к.т.н, доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від « 31 » грудня 2025 року № 4/7-1162

2. Термін подання студентом завершеної роботи 10.06.2026 р.

3. Вихідні дані до роботи матеріали науково-практичних конференцій, наукових фахових видань, теоретичні та методичні розробки вчених, підручники, довідники, ресурси мережі Інтернет

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ

1. Аналітичний розділ

2. Проектно-конструкторський розділ

3. Розрахунковий розділ

4. Безпека життєдіяльності та основи охорони праці

Загальні висновки

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

Презентація.

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра. Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії. Кафедра електричної інженерії, група ЕТ–41. - Т. : ТНТУ, 2026.

Стор. 75; рис. 28; табл. 7; презентацій 23; джерел 30.

Кваліфікаційна робота бакалавра виконана на підставі завдання на тему: «Розробка системи обліку енергоспоживання на базі технології LoRa».

Метою роботи є розробка системи обліку енергоспоживання на базі технології LoRa, яка дозволяє проводити дистанційне зчитування параметрів електричної енергії, їх передавання та візуалізацію для кінцевого користувача.

У роботі проведено аналіз проблем обліку енергоресурсів, вивчено світовий досвід провадження систем дистанційного обліку на базі LPWAN, описано технологію LoRa та принципи побудови мереж LoRaWAN, подано практичну реалізацію системи обліку на базі технології LoRa, яка об'єднує апаратну частину вимірювання електричних параметрів, бездротову передачу даних та веб-інтерфейс для їх обробки й візуалізації, забезпечуючи цілісність процесу моніторингу від вимірювання до аналітичної інтерпретації.

Ключові слова: ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ, МОНІТОРИНГ, ОБЛІК, LORA, LoRaWAN.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	7
ВСТУП	8
1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ.....	11
1.1 Аналіз проблем обліку енергоресурсів	11
1.2 Огляд сучасних технологій малопотужного зв'язку	13
1.3 Архітектура системи обліку енергоспоживання на базі LPWAN.....	16
1.4 Світовий досвід провадження систем обліку на базі LoRaWAN	18
1.5 Сучасний стан розвитку технології LoRaWAN в Україні.	20
1.5.1 Автоматизований облік електроенергії в житловому секторі	21
1.5.2 Облік електроенергії на промислових підприємствах	21
1.5.3 Комерційний облік у комунальному господарстві	22
1.6 Висновки до розділу	23
2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ.....	24
2.1 Огляд технології LoRa та мережі LoRaWAN.....	24
2.2 Основні властивості модуляції LoRa	26
2.3 Частотний діапазон LoRa в Україні.....	28
2.4 Принцип побудови мережі LoRaWAN	30
2.4.1 Кінцеві пристрої LoRaWAN.....	32
2.4.2 Шлюзи LoRaWAN.....	33
2.4.3 Мережевий сервер LoRaWAN	36
2.4.4 Сервери додатків та приєднання	36
2.5 Класи пристроїв LoRa.....	37
2.6 Введення пристроїв LoRa в експлуатацію.....	42
2.7 Колізії даних та ортогональність коефіцієнтів рознесення	43
2.8 Перспективи розвитку мереж LoRaWAN	44
2.9 Висновки до розділу	47
3 РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ	48
3.1 Практична реалізація системи обліку енергоспоживання	48

3.2 Налаштування системи обліку енергоспоживання.....	56
3.3 Розробка веб-інтерфейсу для доступу до даних системи	60
3.4 Висновки до розділу	63
4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ	64
4.1 Аналіз небезпечних факторів при монтажі та експлуатації систем обліку енергоспоживання.....	64
4.2 Організаційні та технічні заходи для захисту персоналу від ураження електричним струмом	67
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	70
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	72

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ABP	–	Activation by Personalization <i>активація шляхом персоналізації</i>
ADR	–	Adaptive Data Rate <i>адаптивна швидкість передавання даних</i>
CSS	–	Chirp Spread Spectrum <i>розширення спектра сигналу</i>
IDE	–	Integrated Development Environment <i>інтегроване середовище розробки</i>
IoT	–	Internet of Things <i>Інтернет речей</i>
ISM	–	Industrial, Scientific and Medical <i>промислові, наукові та медичні радіочастотні діапазони</i>
LPWAN	–	Low-Power Wide-Area Network <i>малопотужна широкосмугова мережа</i>
OTAA	–	Over-the-Air Activation <i>активація через повітря</i>
SF	–	Spreading Factor <i>коефіцієнт розширення спектра</i>

ВСТУП

Актуальність теми.

Сучасні тенденції розвитку концепції Smart Grid та Інтернету речей (IoT) обумовлюють необхідність створення ефективних систем дистанційного обліку та моніторингу енергоспоживання. Традиційна модель обліку електричної енергії, що ґрунтується на періодичному ручному зніманні показань лічильників персоналом енергопостачальних організацій, дедалі менше відповідає потребам сучасного енергетичного господарства. Така модель характеризується значними витратами трудових і часових ресурсів, низькою періодичністю отримання даних (зазвичай раз на місяць), високою ймовірністю помилок при фіксації та обробці показань, а також практичною неможливістю своєчасного виявлення нештатних ситуацій – перевантажень мережі, аварійних відключень чи фактів несанкціонованого втручання в роботу обладнання обліку.

У зв'язку з цим у світовій практиці дедалі активніше впроваджуються системи автоматизованого та автоматичного обліку енергоресурсів, які забезпечують передавання даних про споживання у режимі, наближеному до реального часу, без безпосередньої участі людини. Реалізація таких систем передусім вимагає обґрунтованого вибору технології передавання даних від кінцевих вимірювальних пристроїв до центру збору й обробки інформації. Проводові рішення (PLC, Ethernet) потребують значних капіталовкладень у прокладання та обслуговування лінійних споруд; стільникові технології (GSM/GPRS, 3G/4G, NB-IoT) пов'язані з постійною абонентською платою операторам зв'язку та підвищеним енергоспоживанням комунікаційних модулів; короткорадіусні безпроводні технології (Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee) не забезпечують радіуса дії, достатнього для покриття територій багатоквартирних будинків, промислових об'єктів або населених пунктів сільського типу.

Одним із перспективних напрямків побудови таких систем є використання технології LoRaWAN, яка належить до класу мереж LPWAN

(Low Power Wide Area Network) та забезпечує передавання даних на великі відстані при мінімальній енергоспоживанні кінцевих пристроїв. Завдяки застосуванню модуляції CSS (Chirp Spread Spectrum) фізичний рівень LoRa дозволяє підтримувати стійкий радіозв'язок на відстанях від кількох до кількох десятків кілометрів навіть за низького рівня сигналу, а використання неліцензованого діапазону 868 МГц (для країн Європи) звільняє оператора мережі від необхідності отримання дозволів на використання радіочастотного спектра. Зіркова топологія мережі LoRaWAN, за якої один базовий приймач (шлюз) здатний одночасно обслуговувати тисячі кінцевих вузлів, у поєднанні з механізмом адаптивного керування швидкістю передавання даних (ADR — Adaptive Data Rate), забезпечує автономну роботу кінцевих пристроїв від батарейного живлення протягом кількох років без обслуговування. Завдяки поєднанню низької вартості розгортання, значного радіуса дії та можливості роботи в неліцензованих частотних діапазонах технологія LoRaWAN стала однією з основних платформ для реалізації систем автоматизованого обліку енергоресурсів.

Особливої актуальності тема дослідження набуває в умовах необхідності модернізації систем енергетичного обліку в Україні. Підвищення точності та оперативності обліку електроенергії, зниження комерційних і технічних втрат, а також забезпечення автономного функціонування вимірювального обладнання в умовах нестабільного електропостачання набувають стратегічного значення для енергетичної галузі країни. Розробка доступної за вартістю, енергоефективної та масштабованої системи обліку енергоспоживання на базі технології LoRa є актуальним науково-практичним завданням, вирішення якого сприятиме впровадженню елементів інтелектуальних енергетичних мереж на об'єктах різного рівня – від окремих домогосподарств до промислових підприємств.

Метою роботи є розробка системи обліку енергоспоживання на базі технології LoRa, яка забезпечує дистанційне зчитування параметрів електричної енергії, передавання отриманих даних до центру обробки

інформації, а також їх подальше зберігання та візуалізацію для кінцевого користувача.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити такі **завдання:**

1. Провести аналіз сучасного стану й тенденцій розвитку систем дистанційного обліку енергоспоживання, а також порівняльний аналіз технологій передавання даних, що застосовуються у подібних рішеннях.

2. Дослідити принципи побудови та функціонування мереж LoRa/LoRaWAN, особливості архітектури мережі, протоколів обміну даними та режимів енергоспоживання кінцевих пристроїв.

3. Розробити архітектуру системи обліку енергоспоживання на базі технології LoRa.

4. Розробити програмне забезпечення кінцевого пристрою для зчитування та передавання даних через мережу LoRaWAN.

5. Реалізувати програмний веб-модуль для візуалізації отриманих даних.

6. Провести експериментальне дослідження розробленого макета системи.

Структура роботи. Робота складається з розрахунково-пояснювальної записки та графічної частини. Розрахунково пояснювальна записка містить вступ, чотири розділи, висновки та перелік посилань. Обсяг роботи: розрахунково-пояснювальна записка – 75 аркушів формату А4, графічна частина – 23 аркуші презентації.

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Аналіз проблем обліку енергоресурсів

Ефективний облік енергоресурсів є одним із ключових чинників забезпечення раціонального використання електричної енергії, природного газу, води та теплової енергії. Проте традиційні системи збору та обробки даних про споживання енергоресурсів характеризуються низкою суттєвих недоліків, які негативно впливають на якість обліку, оперативність прийняття рішень та ефективність управління енергетичними ресурсами.

Однією з найбільш поширених проблем є несвоєчасне виявлення несправностей засобів обліку. У разі виходу з ладу лічильників або виникнення помилок вимірювання інформація про фактичне споживання енергоресурсів стає недостовірною, що може призвести до фінансових втрат як для постачальників, так і для споживачів. У традиційних системах такі несправності часто виявляються лише під час планових перевірок або після отримання скарг від користувачів.

Іншою важливою проблемою є несвоєчасна та некоректна передача показників лічильників. У багатьох випадках споживачі самостійно подають дані про обсяги споживання, що створює ризик виникнення помилок через людський фактор. Крім того, несвоєчасне надання інформації ускладнює проведення точних розрахунків та формування достовірної статистичної звітності.

Суттєвим недоліком існуючих систем також є неможливість оперативного виявлення аварійних ситуацій та визначення місця їх виникнення. Відсутність постійного моніторингу параметрів енергоспоживання призводить до затримок у реагуванні на аварії, збільшення часу їх локалізації та усунення наслідків. Це особливо актуально для розподілених мереж електро-, тепло- та водопостачання.

Значною проблемою залишається високе навантаження на персонал підприємств, відповідальний за збір показників та підготовку звітної

документації. Обробка великого обсягу інформації вручну потребує значних трудових ресурсів і часу, а також підвищує ймовірність виникнення помилок під час введення та аналізу даних.

Крім того, обмежені можливості традиційних систем щодо накопичення та аналізу історичних даних ускладнюють прогнозування майбутніх потреб в енергоресурсах. Недостатня точність планування негативно впливає на процеси закупівлі, розподілу та управління енергетичними ресурсами. Відсутність інструментів для побудови трендів і прогнозних моделей знижує ефективність стратегічного планування та прийняття управлінських рішень.

Вирішення зазначених проблем можливе шляхом впровадження автоматизованих систем обліку енергоспоживання. Такі системи забезпечують автоматичний збір, передачу та обробку даних у режимі реального часу, що дозволяє оперативно виявляти несправності засобів обліку, контролювати достовірність показників, швидко реагувати на аварійні ситуації та зменшувати навантаження на обслуговуючий персонал. Крім того, накопичення великих масивів даних створює передумови для застосування сучасних методів аналітики та прогнозування, зокрема технологій машинного навчання, що сприяє підвищенню точності планування споживання енергоресурсів та загальної ефективності функціонування енергетичних систем.

Особливого значення при побудові автоматизованих систем обліку енергоспоживання набуває вибір технології передачі даних між засобами обліку та центром збору інформації. Для забезпечення надійного функціонування таких систем необхідні засоби зв'язку, які поєднують низьке енергоспоживання, значну дальність передавання даних та можливість підключення великої кількості пристроїв. Цим вимогам значною мірою відповідають сучасні технології малопотужного широкопasmового зв'язку (LPWAN), які останніми роками набули широкого поширення у сфері Інтернету речей та автоматизованого обліку енергоресурсів [1].

1.2 Огляд сучасних технологій малопотужного зв'язку

Технології LPWAN являють собою клас бездротових телекомунікаційних рішень, призначених для забезпечення зв'язку між великою кількістю пристроїв Інтернету речей (IoT) на значних відстанях за умов мінімального енергоспоживання. На відміну від традиційних бездротових технологій, таких як Wi-Fi, Bluetooth або стільниковий зв'язок, LPWAN-мережі орієнтовані на передачу невеликих обсягів даних від сенсорів, виконавчих механізмів та інших IoT-пристроїв із тривалим терміном автономної роботи. Завдяки цьому кінцеві вузли можуть функціонувати від батареї протягом декількох років без необхідності її заміни [2].

Основними перевагами LPWAN-технологій є велика дальність зв'язку, низьке енергоспоживання, висока масштабованість мережі та відносно невисока вартість розгортання. Залежно від умов експлуатації дальність зв'язку може досягати десятків кілометрів у сільській місцевості та декількох кілометрів у міських умовах. Ці характеристики зробили LPWAN основою багатьох сучасних систем моніторингу, обліку ресурсів, промислової автоматизації, розумного сільського господарства та концепції «розумного міста».

Головна концепція LPWAN полягає в компромісі: жертвуючи швидкістю передачі даних, технологія забезпечує екстремально низьке енергоспоживання (робота пристроїв від однієї батареї кілька років) та величезний радіус дії (від кількох кілометрів у щільній міській забудові до десятків кілометрів за містом).

За типом використовуваного частотного спектра LPWAN-технології поділяються на рішення, що працюють у неліцензованих діапазонах частот, та технології, які використовують ліцензований спектр мобільних операторів:

а) неліцензований спектр – обладнання працює у загальнодоступних ISM-діапазонах частот (наприклад, 868 МГц у Європі та Україні, 915 МГц у США). Будь-яка компанія або приватна особа може розгорнути власну базову станцію без плати за частоти.

б) ліцензований спектр – розгортається мобільними операторами на базі існуючої інфраструктури 4G/5G. Обладнання працює на захищених частотах, що гарантує відсутність інтерференції (взаємних перешкод), але вимагає використання SIM-карт/eSIM та плати за тарифні плани.

Розглянемо ключові технології LPWAN більш детально [3]:

а) LoRaWAN – є однією з найбільш поширених LPWAN-технологій, розроблена та підтримувана організацією LoRa Alliance [4]. Основою технології є фізичний рівень LoRa, який використовує метод модуляції Chirp Spread Spectrum (CSS). Завдяки застосуванню розширення спектра сигналу забезпечується висока завадостійкість та можливість прийому слабких сигналів навіть за рівня шумів, що перевищують потужність корисного сигналу. Архітектура LoRaWAN передбачає використання топології типу «зірка», у якій кінцеві пристрої передають дані на шлюзи, а шлюзи пересилають отриману інформацію на мережевий сервер через IP-мережі. Однією з важливих особливостей технології є використання різних коефіцієнтів розширення спектра (Spreading Factor, SF), які дозволяють адаптувати швидкість передачі даних та дальність зв'язку відповідно до умов радіоканалу.

б) Sigfox – дана технологія використовує надвузькосмугову модуляцію (Ultra Narrow Band, UNB). Передача даних здійснюється через мережеву інфраструктуру оператора Sigfox, що значно спрощує впровадження систем моніторингу та збору даних. Основною перевагою Sigfox є надзвичайно низьке енергоспоживання кінцевих пристроїв. Водночас технологія має певні обмеження щодо швидкості передачі даних та кількості повідомлень, які можуть передаватися протягом доби. Через ці особливості Sigfox найбільш ефективно використовується у застосуваннях, де необхідно періодично передавати невеликі обсяги інформації, наприклад показники датчиків або лічильників.

в) NB-IoT – є стільниковою LPWAN-технологією, стандартизованою міжнародною організацією 3GPP. Вона використовує ліцензований частотний спектр операторів мобільного зв'язку та інтегрується безпосередньо в інфраструктуру мереж LTE. Дана технологія забезпечує високу надійність

передачі даних, покращене проникнення сигналу всередину будівель та можливість підключення великої кількості пристроїв в межах однієї базової станції. NB-IoT підтримує двосторонній обмін даними, механізми шифрування та автентифікації, успадковані від стільникових мереж. Завдяки високій надійності та захищеності технологія широко застосовується у системах обліку енергоресурсів, моніторингу інженерних мереж, промисловій автоматизації та розумних містах.

г) LTE-M – також відома як Cat-M1, є розвитком стільникових технологій для Інтернету речей. На відміну від NB-IoT, LTE-M підтримує вищу швидкість передачі даних, голосові сервіси та мобільність пристроїв. Технологія орієнтована на застосування, де необхідно передавати більші обсяги інформації або забезпечувати роботу рухомих об'єктів. Типовими сферами використання LTE-M є транспортна телематика, системи відстеження активів, моніторинг рухомих об'єктів та інтелектуальні системи керування транспортом.

Порівняння ключових LPWAN-технологій подано в таблиці 1.1 [5].

Таблиця 1.1 – Основні характеристики поширених LPWAN-технологій

Характеристика	Технологія			
	LoRaWAN	Sigfox	NB-IoT	LTE-M
Спектр	Неліцензований (ISM)	Неліцензований (ISM)	Ліцензований (Сотовий)	Ліцензований (Сотовий)
Смуга частот	868 / 915 МГц	868 / 915 МГц	LTE Діапазони	LTE Діапазони
Швидкість передачі даних	до 50 кбіт/с	до 100 біт/с	до 120-150 кбіт/с	до 1 Мбіт/с
Максимальна дальність	5-15 км	10-40 км	10-15 км	5-10 км
Проникаюча здатність	Хороша	Середня	Відмінна	Хороша
Робота в русі	Обмежено	Ні	Ні (стаціонарно)	Так (Full Mobility)
Передача голосу	Ні	Ні	Ні	Так (VoLTE)
Вартість модуля	Низька	Низька	Середня	Висока

Порівняння основних LPWAN-технологій свідчить, що кожна з них має власні переваги та сфери застосування. LoRaWAN забезпечує можливість створення автономних приватних мереж із низькими витратами на розгортання. Sigfox характеризується мінімальним енергоспоживанням, але має обмеження щодо обсягів переданих даних. NB-IoT та LTE-M забезпечують високу надійність зв'язку завдяки використанню інфраструктури мобільних операторів, проте потребують використання ліцензованого спектра та операторських послуг [6].

Для систем обліку енергоспоживання, моніторингу інженерних мереж та промислових об'єктів найбільш перспективною є технологія LoRaWAN, що дозволяє створювати власну мережеву інфраструктуру з мінімальними витратами та високою гнучкістю налаштування [7].

1.3 Архітектура системи обліку енергоспоживання на базі LPWAN

Система дистанційного обліку енергоспоживання є важливою складовою концепції Smart Grid та цифрової трансформації енергетичної галузі. Її принцип роботи системи полягає у періодичному вимірюванні електричних параметрів (напруги, струму, активної та реактивної потужності, коефіцієнта потужності, спожитої електроенергії) з подальшою передачею результатів через LoRaWAN-мережу до центрального сервера. Отримані дані можуть використовуватися для побудови графіків навантаження, виявлення аварійних режимів, прогнозування споживання та формування звітності. Загалом, така система може вимірювати та передавати будь-які інші дані, як це показано на рис. 1.1 [8].

Типова система обліку енергоспоживання на базі LoRaWAN складається з чотирьох основних рівнів:

1. Рівень збору даних – інтелектуальні лічильники електроенергії або вимірювальні модулі, обладнані мікроконтролером та LoRa-трансивером.
2. Рівень передачі даних – LoRaWAN-шлюзи, які приймають інформацію від великої кількості кінцевих пристроїв.
3. Мережевий рівень – мережевий сервер LoRaWAN, що виконує обробку

пакетів, автентифікацію пристроїв та керування мережею.

4. Прикладний рівень – сервер баз даних і програмне забезпечення для візуалізації, аналізу та зберігання інформації про енергоспоживання.



Рисунок 1.1 – Сфери застосування систем дистанційного обліку

Використання LoRaWAN дозволяє створювати масштабовані системи збору даних без необхідності прокладання додаткових комунікаційних ліній. Один шлюз може обслуговувати тисячі кінцевих пристроїв у радіусі кількох кілометрів [9].

Особливо ефективним є використання LoRaWAN у таких об'єктах:

- багатоквартирні житлові будинки;
- промислові підприємства;
- адміністративні будівлі;
- навчальні заклади;
- виробничі та агропромислові комплекси.

Завдяки високій проникній здатності сигналу можливий збір даних навіть із лічильників, встановлених у підвальних приміщеннях або технічних шахтах.

1.4 Світовий досвід провадження систем обліку на базі LoRaWAN

Практичне впровадження систем обліку енергоресурсів на основі LoRaWAN активно розвивається у різних країнах світу, що підтверджується як науковими дослідженнями, так і промисловими кейсами. Основною причиною широкого використання є можливість забезпечення довготривалого автономного зв'язку з великою кількістю розподілених лічильників при мінімальних витратах на інфраструктуру. Розглянемо найбільш цікаві науково-дослідницькі та реалізовані проєкти:

У роботі [10] запропоновано та протестовано прототип системи обліку електроенергії з використанням LoRaWAN у міських умовах Лівану. Система включала інтелектуальні лічильники, LoRaWAN-шлюзи та центральний сервер обробки даних. Отримані результати показали стабільну передачу даних у щільній забудові, можливість інтеграції з існуючою електромережею та низьку вартість розгортання у порівнянні з GSM-рішеннями.

У дослідженні [11] реалізовано експериментальну LoRaWAN-мережу для збору даних зі Smart-лічильників у кампусному середовищі (Бельгія). Основна увага приділялась якості зв'язку в складних умовах (підвали, бетонні конструкції). Встановлено, що LoRaWAN забезпечує надійний зв'язок навіть у приміщеннях із високим затуханням сигналу, а затримки передачі є прийнятними для задач періодичного обліку. Запропонована система придатна для масштабування до рівня міських енергомереж.

У рамках дослідження [12] розроблено відкриту платформу, що поєднує стандартні протоколи енергомоніторингу DLMS/COSEM із LoRaWAN для передачі даних. Особливостями даної системи є інтеграція з існуючими “розумними” лічильниками та можливість передачі як споживання, так і генерації енергії.;

Промислове впровадження LoRaWAN реалізовано для моніторингу теплових лічильників на великому нафтохімічному підприємстві [13]. Проведено заміну GSM-інфраструктури на приватну LoRaWAN-мережу, що

дозволило знизити операційні витрати та підвищити стабільність збору даних у реальному часі.

Компанія Semtech реалізувала систему інтелектуального обліку електроенергії у багатоквартирних будинках із використанням LoRaWAN (Індонезія) [14]. Це дозволило автоматизувати зняття показників, усунути ручний обхід лічильників та зменшити витрати на експлуатацію.

Масштабний проєкт розгортання понад 1,3 млн інтелектуальних водяних лічильників із використанням LoRaWAN інфраструктури у Великій Британії описано у роботі [15]. Хоча це й облік водопостачання, його архітектура повністю аналогічна електроенергетиці: довготривала автономна робота пристроїв, централізований збір даних та масштабування до національного рівня.

У пілотному проєкті [16] розроблено IoT-платформу для моніторингу ресурсів із використанням LoRaWAN-модемів на базі Raspberry Pi (Чехія). Особливості даного проєкту є модульна архітектура, низька вартість вузлів та можливість розширення до енергетичних систем.

В експериментальних академічних дослідженнях [17] LoRaWAN використовувався для передачі даних зі Smart-лічильників при різних радіоумовах. Отримані результати показали ефективність LoRaWAN у задачах обліку з низькою частотою передачі, високу масштабованість та необхідність оптимізації параметрів SF та потужності.

У роботі [18] запропоновано комерційне рішення для багатоквартирних будинків (Південно-Східна Азія), де LoRaWAN використовувався для обліку споживання електроенергії, води та газу. Це дозволило усунути ручний збір даних та впровадити централізовану білінгову систему.

Проведений огляд реальних проєктів показує, що LoRaWAN:

- ефективно застосовується в системах Smart Metering різного масштабу (від будівель до національних мереж);
- забезпечує економічно вигідну альтернативу GSM/NB-IoT у приватних мережах;
- є технологічною основою для інтегрованих Smart Grid систем;

– підтримує як електроенергетичні, так і мультиенергетичні (вода, тепло, газ) рішення.

Найбільш критичними факторами успішного впровадження є правильний вибір параметрів радіоканалу (параметр SF, потужність, частота передачі), а також побудова оптимальної архітектури розміщення шлюзів.

1.5 Сучасний стан розвитку технології LoRaWAN в Україні

В Україні інтерес до технології LoRaWAN суттєво зріс після початку реалізації концепцій «розумного міста» та цифрової трансформації комунального господарства. Завдяки можливості передавання даних на відстань до декількох кілометрів без використання дорогих стільникових мереж LoRaWAN стала привабливим рішенням для дистанційного збору показників лічильників електроенергії, води, газу та теплової енергії.

Потреба модернізації систем обліку енергоресурсів в Україні обумовлена значними втратами електроенергії під час передачі та розподілу, наявністю застарілих засобів обліку та необхідністю переходу до концепції Smart Grid. У багатьох регіонах країни досі використовуються системи ручного збору показників, що потребує значних трудових ресурсів та не дозволяє оперативно контролювати режими споживання.

Технологія LoRaWAN забезпечує низку переваг для побудови автоматизованих систем комерційного та технічного обліку електроенергії і розглядається як одна з базових для створення інтелектуальних систем обліку енергоресурсів у багатоквартирних будинках, промислових підприємствах та об'єктах критичної інфраструктури.

Перші пілотні мережі LoRaWAN в Україні почали з'являтися приблизно у 2017–2018 роках. Основними напрямками їх використання стали системи моніторингу міської інфраструктури, екологічний моніторинг та дистанційний облік комунальних ресурсів. Суттєвий внесок у розвиток технології зробили українські телекомунікаційні оператори та інтегратори IoT-рішень, які почали

розгортати мережі LoRaWAN у великих містах України. Найбільш активно технологія почала розвиватися у Києві [19], Хмельницькому [20], Кривому Розі [21] та інших містах. У більшості випадків впровадження здійснюється за моделлю приватних мереж (private LoRaWAN), коли підприємство самостійно встановлює шлюзи та сервер мережі для забезпечення повного контролю над передачею даних. Такий підхід є особливо актуальним для енергетичних компаній та операторів систем розподілу електроенергії.

1.5.1 Автоматизований облік електроенергії в житловому секторі

Одним із найпоширеніших напрямків використання LoRaWAN в Україні стало створення систем автоматизованого збору показників електролічильників у житлових комплексах.

Типова архітектура таких систем включає:

- електронні лічильники з інтерфейсом RS-485;
- концентратори збору даних;
- LoRaWAN-модулі передачі інформації;
- базові станції (шлюзи);
- сервер обробки та зберігання даних.

Використання LoRaWAN дозволяє отримувати показники в режимі реального часу без необхідності доступу персоналу до лічильників. Це особливо актуально для багатоповерхових житлових будинків та котеджних містечок. Практичний досвід експлуатації подібних систем показує можливість отримання даних з періодичністю від 5 хвилин до 1 години залежно від налаштувань мережі та вимог замовника.

1.5.2 Облік електроенергії на промислових підприємствах

На промислових підприємствах LoRaWAN використовується для створення багаторівневих систем енергомоніторингу.

Основними завданнями таких систем є:

- контроль споживання електроенергії окремими дільницями;
- виявлення пікових навантажень;
- аналіз режимів роботи обладнання;
- прогнозування енергоспоживання;
- виявлення несанкціонованого відбору електроенергії.

Завдяки значній дальності зв'язку один шлюз може забезпечувати покриття території великого підприємства площею декілька квадратних кілометрів. Це дозволяє суттєво зменшити витрати на створення мережевої інфраструктури.

1.5.3 Комерційний облік у комунальному господарстві

Окремим напрямком є впровадження комплексних систем обліку електроенергії, води та тепла на базі єдиної LoRaWAN-мережі. Подібний підхід використовується в рамках концепції «розумне місто» (Smart City), коли одна мережева інфраструктура обслуговує різні типи датчиків та лічильників [22]. Світовий досвід показує, що саме сектор комунального господарства є одним із найбільших споживачів технології LoRaWAN. Серед найбільших реалізованих проєктів відзначаються багатомільйонні розгортання інтелектуальних лічильників води та газу в країнах Європи. Українські муніципалітети використовують аналогічний підхід для побудови систем диспетчеризації комунальних мереж та автоматизованого збору даних від приладів обліку [23].

Незважаючи на значні переваги, впровадження LoRaWAN в Україні супроводжується певними труднощами.

До основних проблем належать:

- недостатнє покриття мережами LoRaWAN у невеликих населених пунктах;
- необхідність модернізації застарілих лічильників;
- потреба у підготовці кваліфікованого персоналу;

- питання кібербезпеки та захисту даних;
- обмежена нормативна база щодо використання IoT-технологій в енергетиці.

Водночас розвиток концепцій Smart Grid, Smart Metering та цифрових підстанцій створює значний потенціал для подальшого поширення технології.

1.6 Висновки до розділу

1. Аналіз існуючих проблем обліку енергоресурсів свідчить про необхідність переходу від традиційних способів збору показників до автоматизованих систем моніторингу та обліку. Використання сучасних інформаційно-комунікаційних технологій забезпечує підвищення точності обліку, оперативності контролю, ефективності управління енергоресурсами та створює основу для побудови інтелектуальних систем енергоменеджменту.

2. Вибір конкретної технології зв'язку залежить від бізнес-задачі. Якщо необхідно створити повністю автономну приватну мережу на закритому об'єкті без абонплати — обирають LoRaWAN. Якщо проєкт розгортається в межах країни з використанням готової інфраструктури і критична максимальна надійність – перевагу віддають сотовому NB-IoT.

3. Світова та вітчизняна практика впровадження систем обліку енергоспоживання на базі LoRaWAN свідчить про високу перспективність даної технології для створення сучасної інфраструктури автоматизованого обліку енергоресурсів. Основними перевагами є велика дальність передачі даних, низьке енергоспоживання кінцевих пристроїв, простота масштабування мережі та невисока вартість експлуатації.

4. Подальший розвиток технології пов'язаний із впровадженням концепції «розумне місто», використанням методів штучного інтелекту для аналізу даних та інтеграцією систем обліку в єдині цифрові платформи управління енергетичними ресурсами.

2. ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Огляд технології LoRa та мережі LoRaWAN

LoRa – це технологія радіочастотної модуляції для мереж з низьким енергоспоживанням та великим радіусом дії (LPWANs). Назва LoRa походить від надзвичайно великої дальності передачі даних, яку забезпечує ця технологія. Створена компанією Semtech для стандартизації мереж LPWAN, LoRa забезпечує зв'язок на великі відстані: до п'яти кілометрів у міських районах та до 15 кілометрів у зоні прямої видимості. Ключовою характеристикою рішень на базі LoRa є надзвичайно низькі вимоги до енергоспоживання [24], що дозволяє створювати пристрої, які працюють від батарей і можуть прослужити до 10 років. Розгорнута у зірковій топології, мережа на базі відкритого протоколу LoRaWAN ідеально підходить для застосувань, що вимагають зв'язку на великі відстані або глибоко всередині будівель між великою кількістю пристроїв, які мають низькі вимоги до енергоспоживання та збирають невеликі обсяги даних [25].

В Європі оператори мобільних мереж застосовують подвійну стратегію для вирішення проблем, пов'язаних із розміром пакетів та затримкою. Вони часто пропонують одночасно LoRaWAN і Cat-M1 – технології, що доповнюють одна одну. LoRaWAN задовольняє потребу в тривалішому терміні служби акумулятора, але при цьому має більшу затримку та менший розмір пакетів. Натомість Cat-M1 можна використовувати для передачі більших обсягів даних із меншою затримкою, ніж це можливо в LoRaWAN.

На рис. 2.1 показано важливі переваги розгортання мережі LoRaWAN:

а) дальність дії – один шлюз на базі LoRa може приймати та передавати сигнали на відстань понад 15 кілометрів на відкритій місцевості. Навіть у густонаселених міських районах повідомлення можуть проникати на відстань до п'яти кілометрів, залежно від того, наскільки глибоко всередині приміщення розташовані кінцеві пристрої (кінцеві вузли);

б) тривалість роботи від акумулятора – енергія, необхідна для передачі

пакета даних, є досить мінімальною, враховуючи, що пакети даних дуже малі й передаються лише кілька разів на день. Крім того, коли кінцеві пристрої перебувають у режимі сну, споживання енергії вимірюється в міліватах (мВт), що дозволяє акумулятору пристрою працювати протягом багатьох років [26];



Рисунок 2.1 – Переваги розгортання мережі LoRaWAN

в) пропускна здатність – мережа LoRaWAN може підтримувати мільйони повідомлень. Однак кількість повідомлень, що підтримуються в конкретному розгортанні, залежить від кількості встановлених шлюзів. Один 8-ми каналний шлюз може підтримувати кілька десятків тисяч повідомлень протягом 24-годинного періоду. Якщо потрібна більша пропускна здатність, достатньо просто додати до мережі додаткові шлюзи;

г) вартість – з огляду на можливості кінцевих вузлів та шлюзів на базі LoRa, для обслуговування великої кількості кінцевих вузлів потрібно лише

кілька шлюзів, з'єднаних у мережу типу «зірка». Це означає, що капітальні та операційні витрати можна утримати на відносно низькому рівні. Крім того, коли економічно вигідні радіомодулі LoRa, вбудовані в недорогі кінцеві вузли, використовуються разом із відкритим стандартом LoRaWAN, рентабельність інвестицій може бути значною.

У мережі LoRaWAN між пристроями на базі LoRa та шлюзами немає прямого зв'язку. Це означає, що повідомлення, які надсилаються до кінцевих пристроїв та від них, проходять через усі шлюзи, що знаходяться в зоні дії. Видалення дублікатів здійснюється мережевим сервером.

2.2 Основні властивості модуляції LoRa

LoRa – це запатентована технологія модуляції з розширеним спектром, що базується на існуючій технології Chirp Spread Spectrum (CSS). Вона забезпечує оптимальний баланс між чутливістю та швидкістю передачі даних, працюючи в каналах з фіксованою пропускну здатністю 125 кГц або 500 кГц для каналів висхідного зв'язку (uplink) та 500 кГц для каналів низхідного зв'язку (downlink). Крім того, LoRa використовує ортогональні коефіцієнти розширення. Це дозволяє мережі зберегти час роботи від батареї підключених кінцевих вузлів за рахунок адаптивної оптимізації рівнів потужності та швидкості передачі даних окремих кінцевих вузлів. Наприклад, кінцевий пристрій, розташований поблизу шлюзу, повинен передавати дані з низьким коефіцієнтом розширення, оскільки для цього потрібно дуже мало ресурсів каналу. Однак кінцевий пристрій, розташований за кілька кілометрів від шлюзу, повинен передавати дані з набагато вищим коефіцієнтом розширення. Цей вищий коефіцієнт розширення забезпечує більший коефіцієнт обробки та вищу чутливість прийому, хоча швидкість передачі даних, звісно, буде нижчою. На рис. 2.2 представлено семирівневу мережеву модель LoRa.

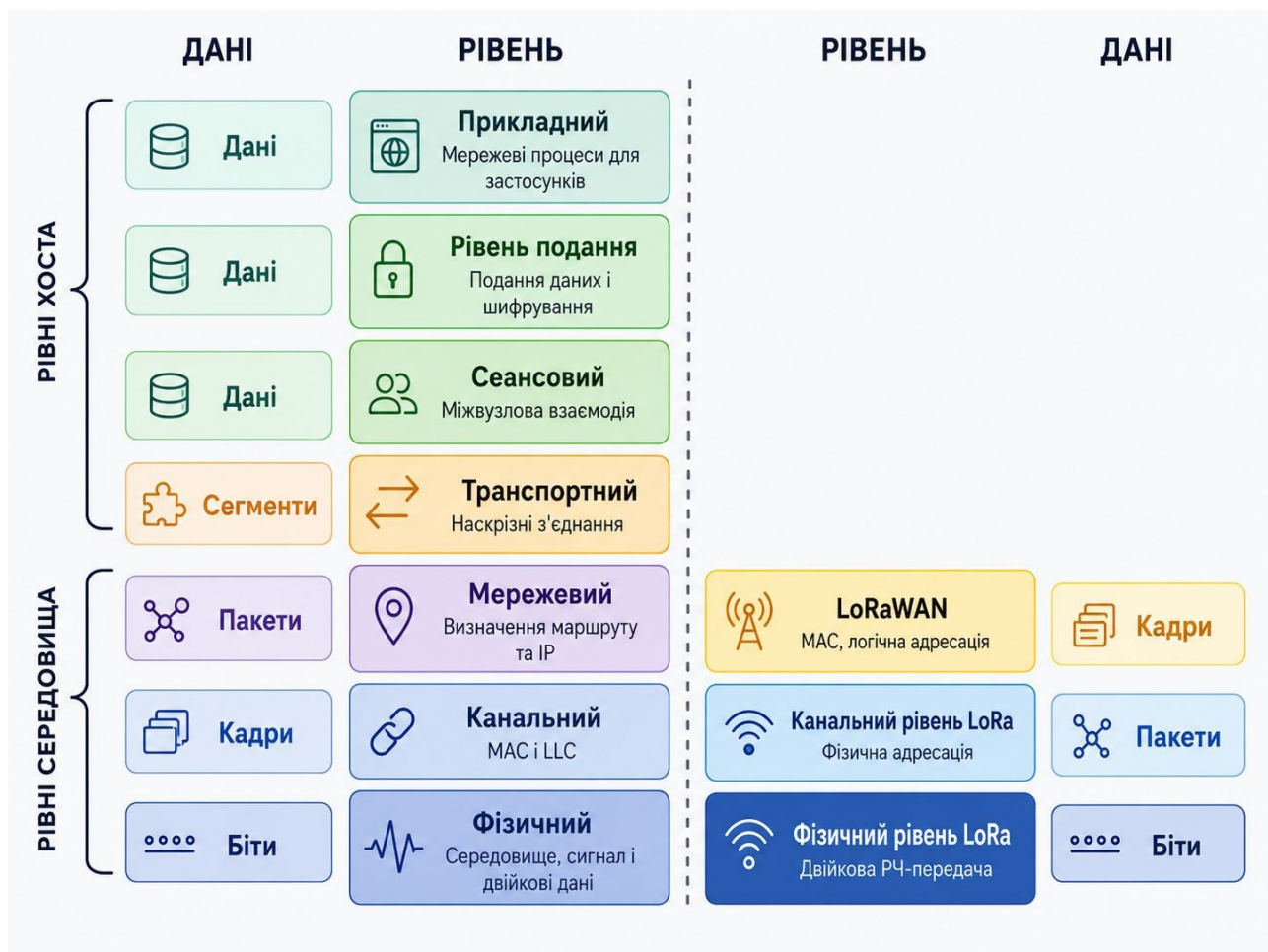


Рисунок 2.2 – Семирівнева мережева модель LoRa

Модуляція LoRa має загалом шість коефіцієнтів розширення (від SF7 до SF12). Чим більший коефіцієнт розширення використовується, тим далі сигнал зможе поширюватися і при цьому без помилок прийматися приймачем.

В табл. 2.1 показано чотири різні коефіцієнти розширення (SF7...SF10), які можна використовувати для повідомлень зі смугою пропускання шириною 125 кГц. Також у ній подано еквівалентну швидкість передачі даних, орієнтовну дальність (залежить від рельєфу місцевості) та час передачі пакета в ефірі (Time on Air, TOA) для корисного навантаження розміром 11 байт при використанні кожного з чотирьох факторів розширення [27].

Важливою особливістю модуляції LoRa є те, що фактори розширення (Spreading Factors) є взаємно ортогональними. Це означає, що сигнали, модульовані з використанням різних факторів розширення та передані одночасно на одному частотному каналі, практично не створюють взаємних

завад. Натомість сигнали з різними значеннями фактору розширення сприймаються один одним як фоновий шум. Завдяки цьому забезпечується одночасна передача даних кількома пристроями в межах одного частотного каналу, що сприяє підвищенню ефективності використання спектра та збільшенню пропускної здатності мережі LoRaWAN.

Таблиця 2.1 – Коефіцієнти розширення спектра LoRa

Коефіцієнт розширення	Швидкість передачі, біт/с	Дальність передачі, км	Час в ефірі (для 11-байтового корисного навантаження), мс
SF10	980	8	371
SF9	1760	6	185
SF8	3125	4	103
SF7	5470	1	61

Сигнали LoRa характеризуються високою завадостійкістю та значною стійкістю як до внутрішньо смугових, так і до позасмугових перешкод. Модуляція LoRa також забезпечує ефективний захист від багатопроменевого поширення сигналу та завмирань, що робить цю технологію особливо придатною для використання в міських і приміських умовах, де зазначені явища є домінуючими. Крім того, доплерівський зсув спричиняє лише незначне зміщення частоти сигналу в часовій області базової смуги. Висока стійкість до частотних відхилень зменшує вимоги до точності опорних тактових генераторів, що робить технологію LoRa ефективним рішенням для передачі даних від мобільних пристроїв.

2.3 Частотний діапазон LoRa в Україні

В Україні використання LoRaWAN базується на європейському регіональному плані частот EU863–870 (також відомому як EU868), що

відповідає вимогам ETSI та забезпечує сумісність із більшістю європейських мереж. Робочий частотний діапазон LoRaWAN в Україні охоплює смугу 863–870 МГц, яка належить до неліцензованого ISM-діапазону (Industrial, Scientific and Medical). Це дозволяє використовувати пристрої LoRa без необхідності отримання окремих ліцензій на радіочастоти, за умови дотримання технічних обмежень щодо потужності випромінювання та циклу зайнятості каналу.

У стандартному частотному плані EU868 передбачено кілька груп каналів. Основними є три обов'язкові канали, які повинні підтримувати всі кінцеві пристрої LoRaWAN: 868,1 МГц, 868,3 МГц та 868,5 МГц. Саме ці канали найчастіше використовуються для початкового приєднання пристроїв до мережі (процедура join). Окрім них, оператори мереж зазвичай додають додаткові канали в діапазоні 867,1–867,9 МГц, що дозволяє рівномірно розподіляти навантаження та підвищувати пропускну здатність мережі.

Окремо слід зазначити службові частоти. Для двонаправленого зв'язку використовується також канал 869,525 МГц, який застосовується як приймальний канал у другому вікні прийому (RX2). Крім того, частота 868.8 МГц іноді використовується для FSK-модуляції у специфічних сценаріях обміну даними. Перелік каналів LoRaWAN в Україні подано в табл. 2.2.

Робочий цикл (анг. Duty cycle) – це частка часу, протягом якого пристрій LoRa може передавати сигнал у певному діапазоні (коефіцієнт зайнятості каналу). Обчислюється за формулою:

$$DC = \frac{T_{акт}}{T_{повн}} \cdot 100 \%,$$

де $T_{акт}$ – час передачі; $T_{повн}$ – повний цикл (передача + пауза). Тобто, якщо пристрій передає 1 с та мовчить 99 с, $DC = 1 \%$.

В Україні для LoRaWAN діють обмеження на потужність передавачів: максимальна ефективна випромінювана потужність (EIRP) становить 25 мВт (≈ 14 dBm) у діапазоні 868 МГц, що відповідає європейським нормам ETSI. Це означає, що пристрої повинні працювати з низькою потужністю, щоб уникати завад та відповідати вимогам радіочастотного регулювання.

Таблиця 2.2 – Перелік каналів LoRaWAN в Україні

Канал	Частота, МГц	Ширина смуги пропускання, кГц	Робочий цикл	Примітка
Канал 0	868,1	125	1 %	Обов'язковий
Канал 1	868,3	125	1 %	Обов'язковий
Канал 2	868,5	125	1 %	Обов'язковий
Канал 3	867,1	125	1 %	Додатковий
Канал 4	867,3	125	1 %	Додатковий
Канал 5	867,5	125	1 %	Додатковий
Канал 6	867,7	125	1 %	Додатковий
Канал 7	867,9	125	1 %	Додатковий
Канал 8	868,8	125	1 %	Приймання даних
Канал 9	869,1	125/250/500	0,1 %	Спеціальний
Канал 10	869,5	125/250/500	10 %	Широкопasmугове приймання даних

Таким чином, частотний діапазон LoRaWAN в Україні є чітко стандартизованим і гармонізованим із європейськими вимогами. Це створює сприятливі умови для розвитку IoT-рішень, зокрема систем моніторингу енергоспоживання, телеметрії та інфраструктурних сенсорних мереж, які потребують надійного зв'язку на великі відстані при мінімальному енергоспоживанні.

2.4 Принцип побудови мережі LoRaWAN

Для повного розуміння принципів роботи мережі LoRaWAN перш за все необхідно розглянути її технологічний стек (рис. 2.3) . З рисунку 2.3 видно, що LoRa – це фізичний рівень, тобто метод бездротової модуляції, що використовується для створення каналу зв'язку на великі відстані. LoRaWAN – це відкритий мережевий протокол, який забезпечує безпечний двосторонній

зв'язок, мобільність та послуги локалізації, які є стандартизовані та підтримуються альянсом LoRa [4]. На рис. 2.4 показано типову повну реалізацію мережі LoRaWAN починаючи від кінцевих пристроїв і закінчуючи панеллю моніторингу даних.

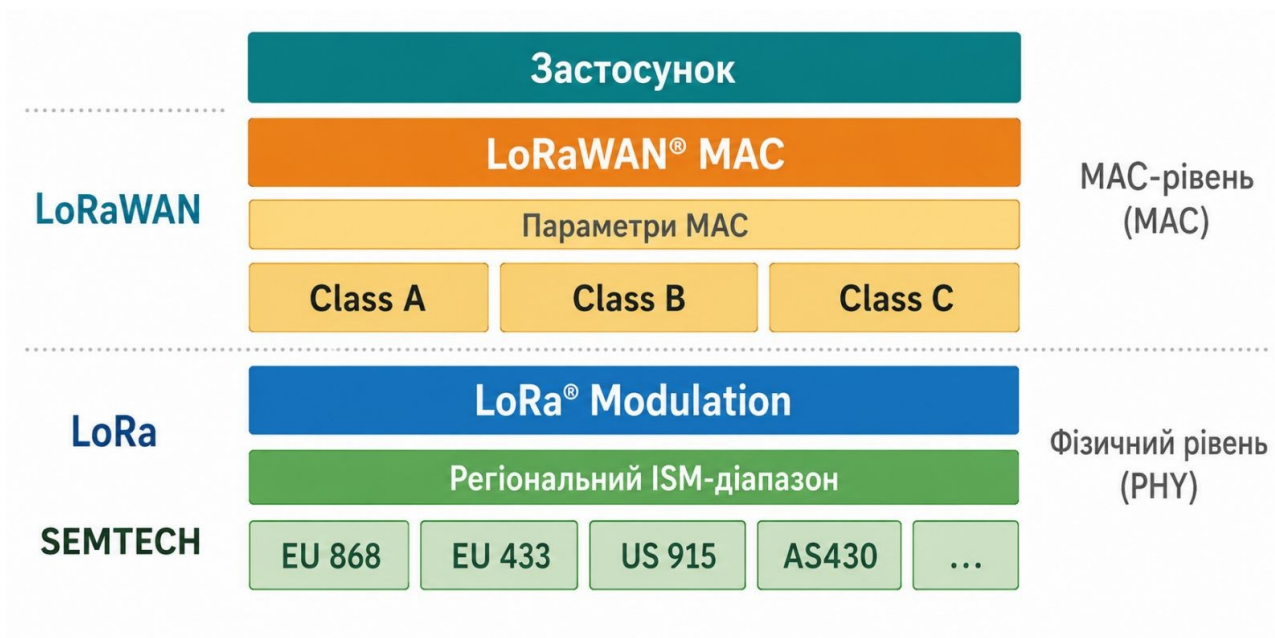


Рисунок 2.3 – Технологічний стек LoRaWAN

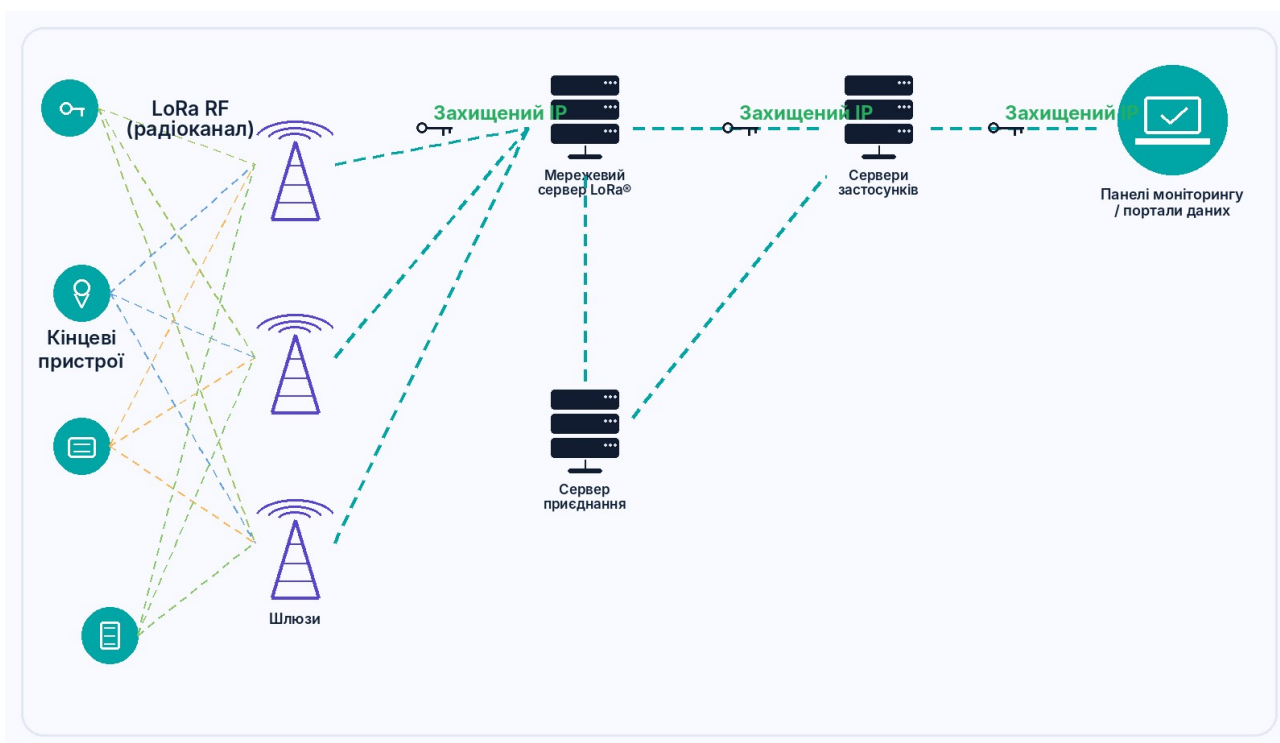


Рисунок 2.4 – Типова реалізація мережі LoRaWAN

2.4.1 Кінцеві пристрої LoRaWAN

Кінцевий пристрій – це датчик або виконавчий пристрій, який бездротово підключається до мережі LoRaWAN через радіошлюзи за допомогою радіочастотної модуляції LoRa. У більшості випадків кінцевий пристрій – це автономний датчик, що часто працює від батареї, який перетворює фізичні параметри та події навколишнього середовища в цифрові дані. Типові сфери застосування виконавчих механізмів на базі технології LoRa подано в табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Виконавчі механізми на базі технології LoRa

Галузь / Сфера	Приклад застосування
Енергетика	дистанційне вмикання та вимикання електрообладнання, керування навантаженням, системами резервного живлення та розподільчими пристроями
Промислова автоматизація	керування насосами, клапанами, вентиляторами, компресорами та іншим технологічним обладнанням
Розумні будівлі (Smart Building)	автоматичне керування кондиціонуванням, освітленням, жалюзі, електрозамками та іншими інженерними системами
Житлово-комунальне господарство	керування системами освітлення, опалення, вентиляції та водопостачання
Системи безпеки	дистанційне відкривання воріт, шлагбаумів, дверей, активація сирен та інших виконавчих пристроїв
Системи розумного міста (Smart City)	дистанційне керування вуличним освітленням, світлофорами, дорожніми знаками та іншою міською інфраструктурою
Логістика та транспорт	керування дорожніми інформаційними табло, автоматичними воротами, системами контролю доступу та зарядними станціями
Сільське господарство	автоматизація систем зрошення, керування насосними станціями, вентиляцією теплиць, годівницями та поїлками

Під час виробництва пристроям на базі LoRa присвоюються кілька унікальних ідентифікаторів. Ці ідентифікатори використовуються для безпечної активації та адміністрування пристрою, забезпечення безпечної передачі пакетів через приватну або публічну мережу та доставки зашифрованих даних у хмару.

2.4.2 Шлюзи LoRaWAN

Шлюз LoRaWAN приймає радіочастотні повідомлення з модуляцією LoRa від будь-якого кінцевого пристрою, що знаходиться в зоні дії, і надсилає ці дані на сервер мережі LoRaWAN (LNS), який підключений через магістральну IP-мережу. Між кінцевим пристроєм і конкретним шлюзом немає фіксованого зв'язку. Натомість один і той самий датчик може обслуговуватися кількома шлюзами в зоні дії. Завдяки LoRaWAN кожен пакет, надісланий кінцевим пристроєм, буде отримано всіма шлюзами в зоні дії (рис. 2.5).

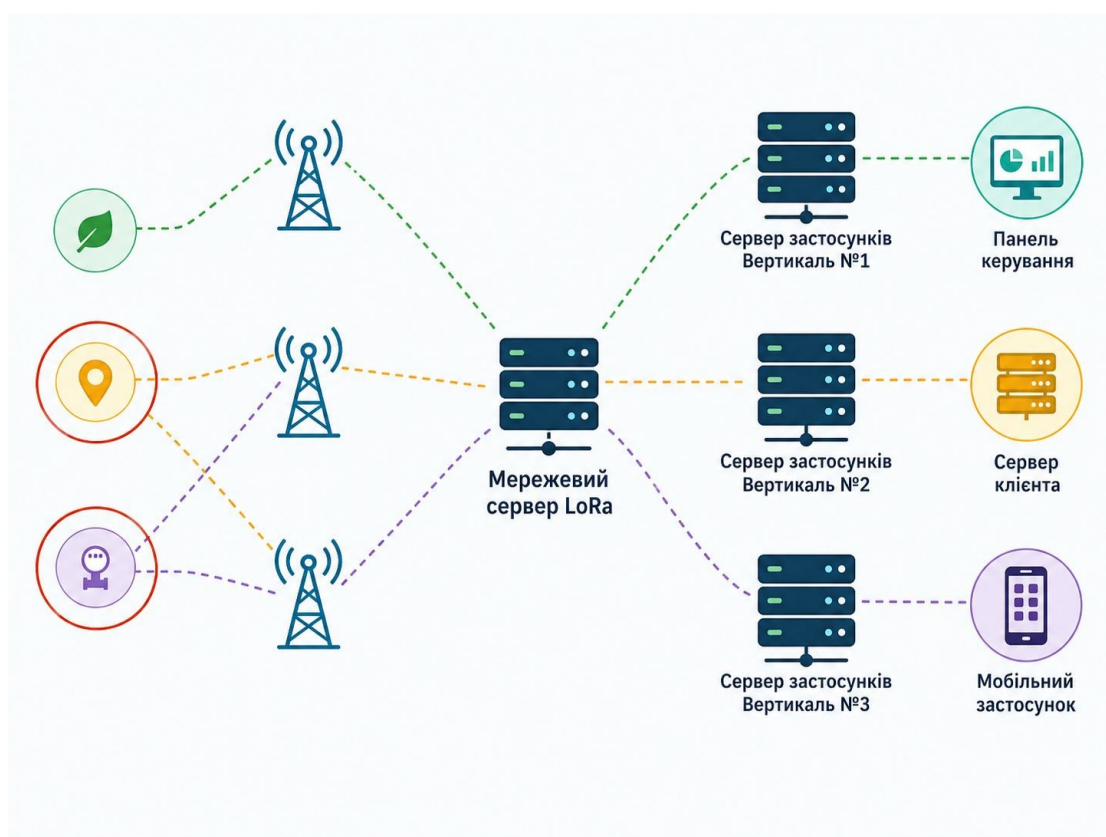


Рисунок 2.5 – Шлюзи, що приймають і передають повідомлення від кількох кінцевих пристроїв

Така організація значно зменшує частоту помилок пакетів (оскільки ймовірність того, що хоча б один шлюз отримає повідомлення, є дуже високою), значно зменшує навантаження на батарею мобільних датчиків та дозволяє здійснювати геопозиціонування з низькими витратами (за умови, що відповідні шлюзи підтримують функцію геопозиціонування).

IP-трафік від шлюзу до мережевого сервера може передаватися через Wi-Fi, кабельний Ethernet або стільниковий зв'язок. Шлюзи LoRaWAN працюють виключно на фізичному рівні і, по суті, є лише ретрансляторами радіоповідомлень LoRa. Вони перевіряють лише цілісність даних кожного вхідного радіоповідомлення LoRa. Якщо цілісність порушена, повідомлення буде відкинуто. Якщо дані коректні, шлюз пересилає його до мережевого серверу LoRa (LNS) разом із деякими метаданими, що включають рівень RSSI прийому повідомлення, а також опціональний часовий штамп. Для низхідних каналів LoRaWAN шлюз виконує запити на передачу, що надходять від LNS, без будь-якого тлумачення корисного навантаження. Оскільки кілька шлюзів можуть отримувати одне й те саме радіоповідомлення LoRa від одного кінцевого пристрою, LNS виконує дедуплікацію даних і видаляє всі копії. Залежно від рівнів RSSI однакових повідомлень мережевий сервер зазвичай вибирає шлюз, який отримав повідомлення з найкращим RSSI під час передачі повідомлення в низхідному каналі, оскільки саме цей шлюз знаходиться найближче до відповідного кінцевого пристрою.

Крім того, LoRa дозволяє реалізувати масштабовані та економічно оптимізовані багатоканальні шлюзи залежно від цілей розгортання. Для мереж LoRaWAN кількість каналів шлюзу визначає, скільки сигналів він може приймати одночасно. Чим більше каналів має шлюз, тим вища його пропускна здатність і тим більшу кількість кінцевих пристроїв він здатний обслуговувати:

а) 8-канальні шлюзи є найпоширенішими в комерційних мережах LoRaWAN. Вони здатні одночасно приймати сигнали на восьми частотних каналах, підтримуючи всі доступні коефіцієнти розширення спектра (SF7–SF12). Такі шлюзи забезпечують достатню пропускну здатність для більшості

застосувань Інтернету речей та можуть обслуговувати від сотень до кількох тисяч кінцевих пристроїв залежно від інтенсивності передавання даних. Основними перевагами 8-канальних шлюзів є відносно невисока вартість, простота розгортання та повна сумісність зі стандартними регіональними частотними планами LoRaWAN. Вони широко використовуються в системах моніторингу навколишнього середовища, розумного обліку ресурсів, аграрних застосуваннях та системах «розумного міста»;

б) 16-канальні шлюзи LoRaWAN забезпечують удвічі більшу кількість одночасно обслуговуваних каналів порівняно з 8-канальними рішеннями. Це дозволяє значно підвищити пропускну здатність мережі та зменшити ймовірність колізій при великій кількості активних кінцевих пристроїв. Такі шлюзи доцільно використовувати в міських умовах, на промислових підприємствах, у кампусних мережах та інших сценаріях із високою щільністю IoT-пристроїв. Завдяки більшій кількості каналів шлюз може одночасно приймати більше пакетів даних, що покращує загальну ефективність мережі та її масштабованість.

в) 64-канальні шлюзи LoRaWAN належать до високопродуктивного обладнання операторського класу. Вони призначені для розгортання масштабних мереж LoRaWAN із великою кількістю кінцевих пристроїв та значним обсягом трафіку. Такі шлюзи здатні одночасно обробляти десятки пакетів на різних частотах та коефіцієнтах розширення спектра. Використання 64-канальних шлюзів особливо актуальне для великих міських мереж, індустріальних зон, логістичних центрів, транспортної інфраструктури та національних операторських мереж IoT. Завдяки значній кількості приймальних каналів забезпечується висока пропускну здатність, покращується якість приймання сигналів і знижується ризик втрати пакетів у перевантажених мережах.

Загалом, зі збільшенням кількості каналів зростають пропускну здатність, масштабованість та стійкість мережі до перевантажень. Проте одночасно збільшуються вартість обладнання, енергоспоживання та складність його

реалізації. Для більшості локальних та регіональних мереж достатньо 8-канальних шлюзів, тоді як 16- та 64-канальні рішення використовуються в мережах із високою щільністю кінцевих пристроїв та підвищеними вимогами до продуктивності.

2.4.3 Мережевий сервер LoRaWAN

Мережевий сервер LoRaWAN (LNS) керує всією мережею, динамічно регулює її параметри для адаптації системи до постійно мінливих умов та встановлює захищені 128-бітні AES-з'єднання для передачі даних від кінцевого пристрою LoRaWAN до кінцевих користувачів додатку, для управління трафіком, що проходить від кінцевого пристрою LoRaWAN до LNS і назад. Мережевий сервер забезпечує автентичність кожного давача в мережі та цілісність кожного повідомлення. Водночас мережевий сервер не бачить і не має доступу до даних додатку.

Загалом, усі сервери мережі LoRaWAN мають такі спільні функції:

- перевірка адреси пристрою;
- аутентифікація кадрів та управління лічильником кадрів;
- підтвердження отримання повідомлень;
- регулювання швидкості передачі даних за допомогою протоколу ADR;
- відповідь на всі запити рівня MAC, що надходять від пристрою;
- передача даних висхідного каналу до відповідних серверів та додатків.

2.4.4 Сервери додатків та приєднання

Сервери додатків відповідають за безпечну обробку, управління та інтерпретацію даних з давачів. Вони також формують усі корисні дані на рівні додатків для передачі на підключені кінцеві пристрої.

Сервер приєднання керує процесом бездротової активації кінцевих пристроїв, що додаються до мережі. Сервер приєднання містить інформацію,

необхідну для обробки кадрів запиту на приєднання у висхідному каналі та генерації кадрів прийняття приєднання у низхідному каналі. Він повідомляє мережевому серверу, який сервер додатків повинен бути підключений до кінцевого пристрою, та виконує виведення ключів шифрування сеансу мережі та додатка. Він передає ключ сеансу мережі пристрою мережевому серверу, а ключ сеансу додатка – відповідному серверу додатків.

З цією метою сервер приєднання повинен містити таку інформацію щодо кожного кінцевого пристрою, що перебуває під його контролем:

- унікальний серійний ідентифікатор кінцевого пристрою (DevEUI);
- ключ шифрування додатка (AppKey);
- ключ шифрування мережі (NwkKey);
- ідентифікатор сервера додатків;
- профіль обслуговування кінцевого пристрою.

2.5 Класи пристроїв LoRa

Кінцеві пристрої на базі LoRa можуть працювати в одному з трьох режимів, залежно від класу пристрою. Усі такі пристрої повинні підтримувати режим класу А. Пристрої класу В повинні підтримувати як режим класу А, так і режим класу В, а пристрої класу С повинні підтримувати режим класу А, причому режим класу В є необов'язковим. Ці режими роботи пов'язані зі способом взаємодії пристроїв із мережею.

На рис. 2.6 показано, як працює режим класу А. У даному випадку кінцевий пристрій більшу частину часу перебуває в режимі очікування (сну). Коли в навколишньому середовищі відбуваються зміни, пов'язані з тим, що пристрій налаштований відстежувати (наприклад, спрацював давач), він виходить із режиму сну та ініціює передачу даних у мережу (Tx), надсилаючи інформацію про змінений стан. Потім пристрій очікує відповіді від мережі, зазвичай протягом однієї секунди (хоча тривалість цього періоду можна налаштувати). Якщо протягом цього вікна прийому (Rx1) відповідь не

отримана, пристрій на короткий час повертається в режим сну, прокидаючись через певний проміжок часу, щоб знову чекати на відповідь (Rx2). Якщо протягом цього другого вікна Rx відповідь не надійшла, пристрій повертається в режим сну до наступного разу, коли у нього з'являться дані для передачі. Затримка між Rx1 і Rx2 налаштовується як затримка від моменту закінчення передачі від кінцевого пристрою. На рис. 2.7 показано ці моделі комунікації. Зовнішньою командою ніяк не можна вивести пристрій класу А із режиму очікування. З огляду на це обмеження, пристрої класу А, як правило, не підходять для використання в якості виконавчих механізмів.

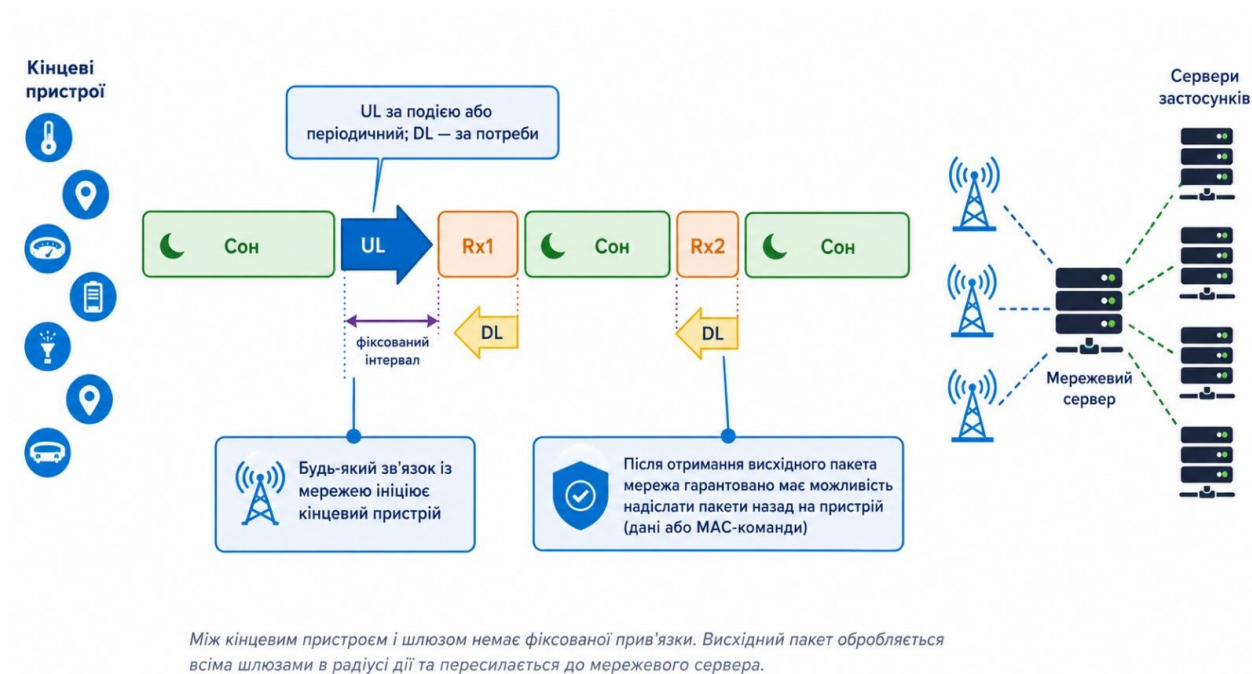


Рисунок 2.6 – Робота в класі А

Режим класу В, який є вдосконаленим варіантом класу А, надає кінцевим пристроям можливість регулярно, у фіксований час, отримувати дані з мережі, завдяки чому кінцеві пристрої класу В підходять як для датчиків моніторингу, так і для виконавчих механізмів. Усі кінцеві пристрої на базі LoRa запускаються в режимі класу А, однак пристрої, запрограмовані під час виробництва на роботу зі стеком класу В, можуть бути переведені в режим класу В на рівні програмного забезпечення.

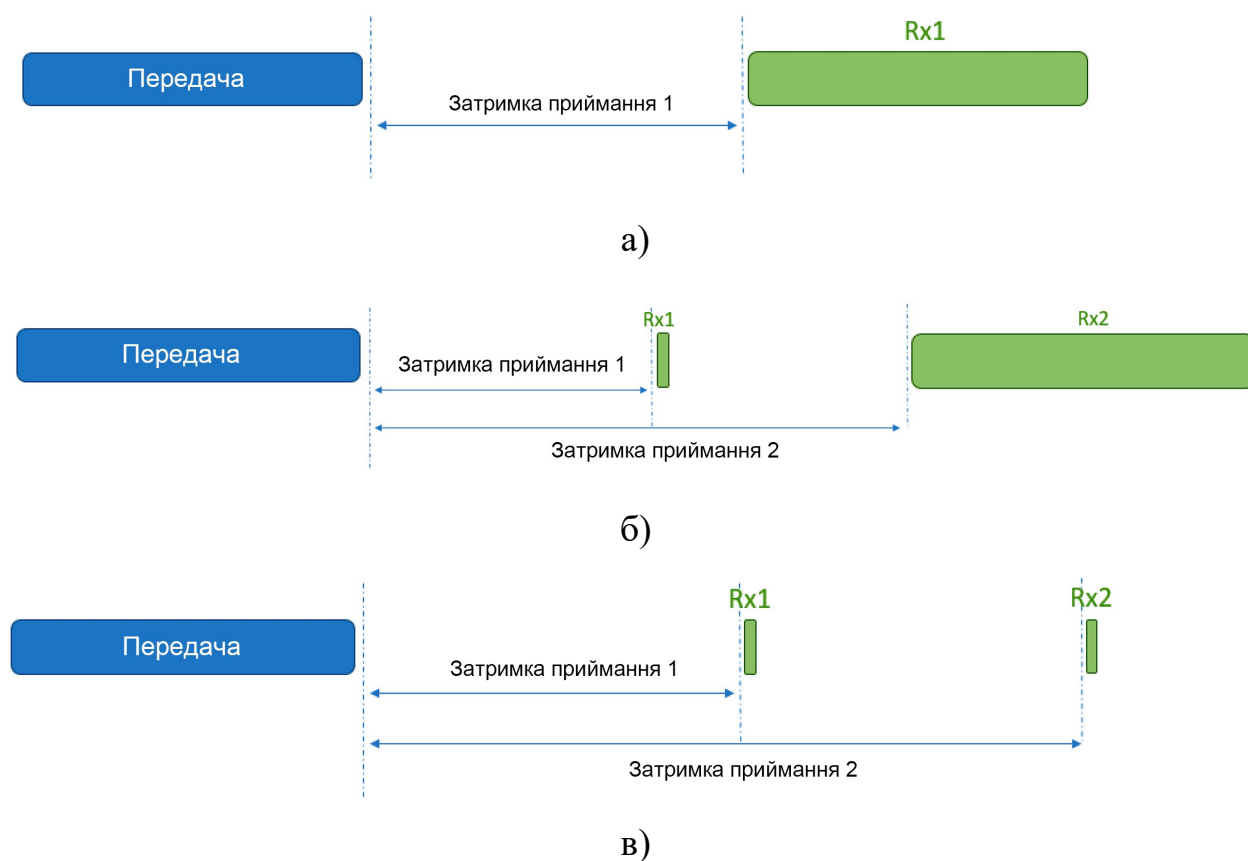


Рисунок 2.7 – Робота в режимі класу А при отриманні пакета
 а – пакет прийнято у вікні Rx1; б – пакет прийнято у вікні Rx2;
 в – не надійшло жодного сигналу

Кінцеві пристрої в режимі класу В забезпечують регулярні вікна прийому, на додаток до тих, що відкриваються щоразу, коли на сервер надсилається висхідний канал у стилі класу А. Для забезпечення роботи режиму зв'язку класу В необхідний процес, який називається передачею маякових сигналів. Під час передачі маякових сигналів мережа через шлюзи повинна періодично транслювати синхронізований за часом маяк (рис. 2.8). Кінцевий пристрій повинен періодично отримувати один із таких мережесих маяків, щоб синхронізувати свій внутрішній еталон часу з мережею. Між кінцевим пристроєм і шлюзом немає фіксованої прив'язки. Висхідний пакет обробляється всіма шлюзами в радіусі дії та пересилається до мережевого сервера.

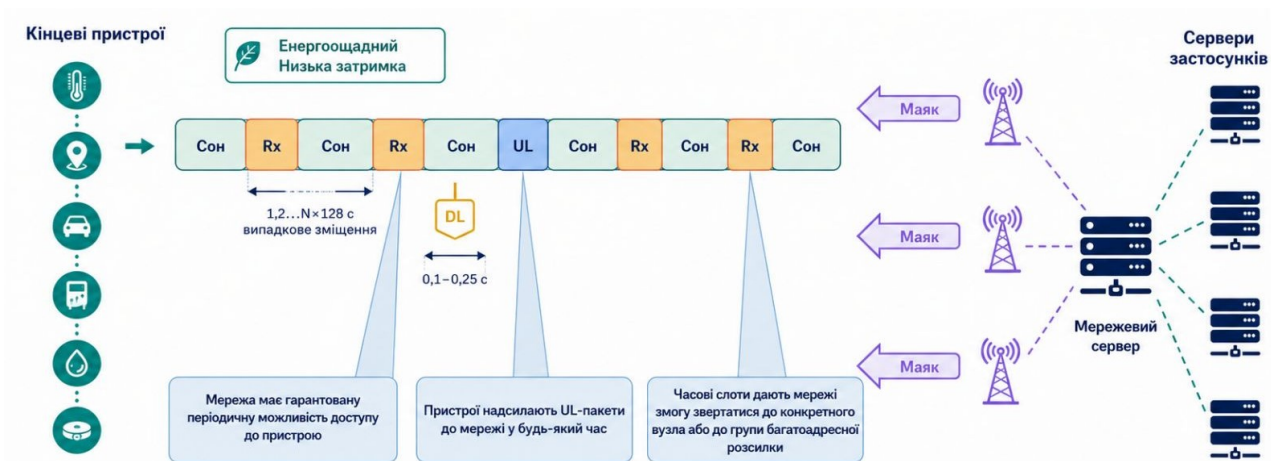


Рисунок 2.8 – Робота маяків класу В

Пристрої використовують маяки для визначення часу та синхронізації своїх внутрішніх годинників із мережею. Якщо пристрій уже синхронізовано, йому не потрібно обробляти кожен маяк. У більшості випадків достатньо проводити синхронізацію кілька разів на день, що має мінімальний вплив на час роботи від акумулятора (рис. 2.9).

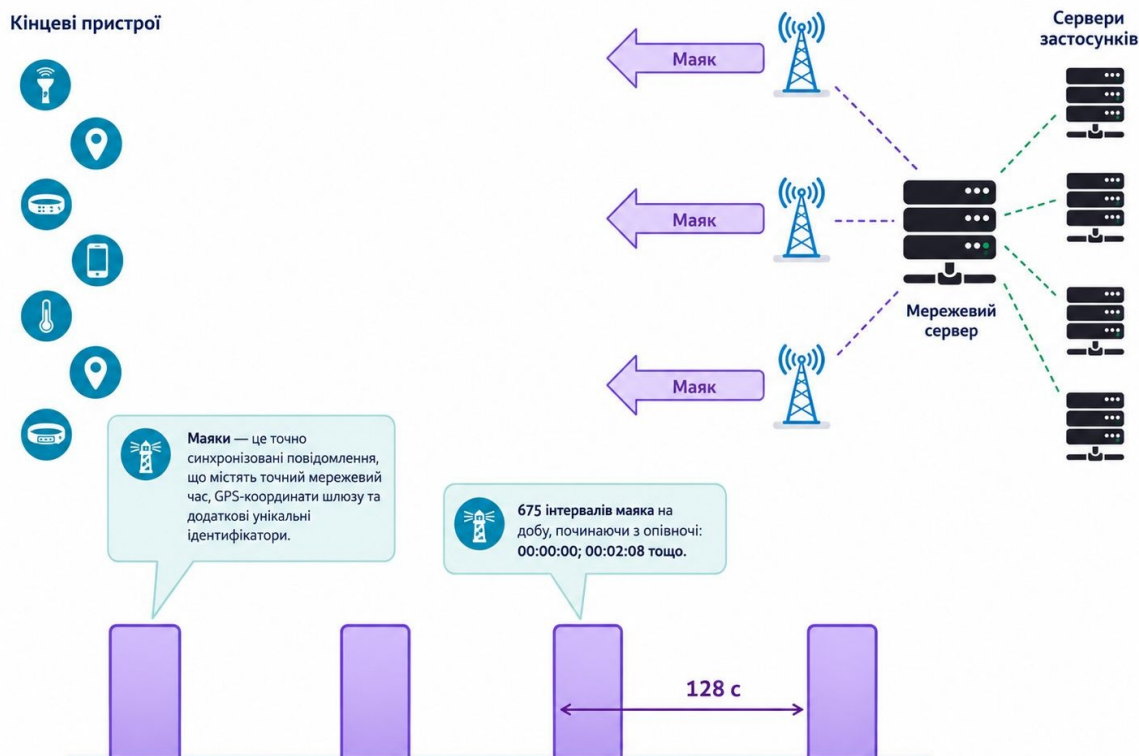


Рисунок 2.9 – Періодична передача сигналу маяка класу В для синхронізації пристроїв

На основі часової опорної точки маяка кінцеві пристрої можуть періодично відкривати вікна прийому (слоти ping). Будь-який із цих слотів може використовуватися мережевою інфраструктурою для ініціювання зв'язку в напрямку до бази (рис. 2.10). Щоб мережа LoRaWAN підтримувала пристрої класу B, усі шлюзи LoRaWAN у цій мережі повинні мати вбудований джерело синхронізації GPS, щоб всі вони могли бути синхронізовані з точним часом маяка. Пристрої класу B також можуть працювати в режимі класу A.

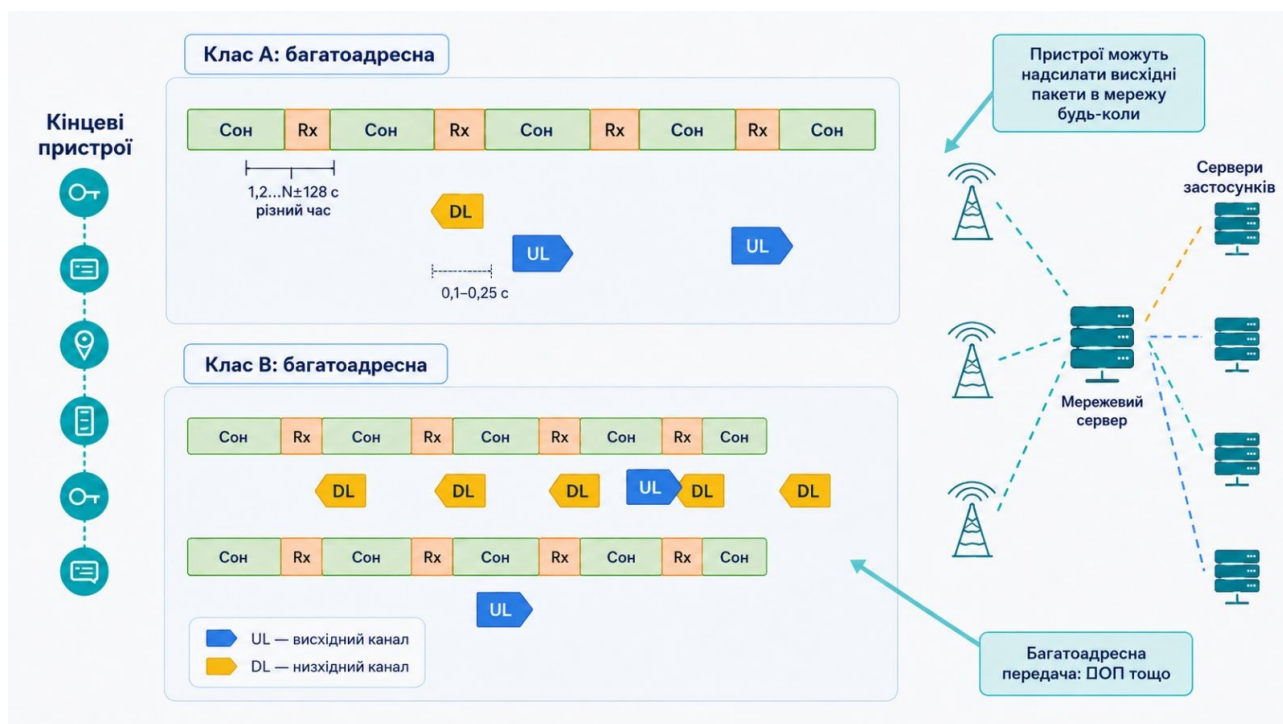


Рисунок 2.10 – Слот для запитів ping класу B

Пристрої класу C завжди перебувають у ввімкненому стані, тобто не залежать від живлення від батареї. До пристроїв класу C належать, зокрема, вуличні ліхтарі, електролічильники тощо. Ці пристрої постійно перебувають у режимі прийому повідомлень у напрямку «вниз», якщо вони не здійснюють передачу у напрямку «вгору». Як наслідок, вони забезпечують найнижчу затримку при передачі даних від сервера до кінцевого пристрою.

Кінцеві пристрої класу C реалізують ті самі два вікна прийому, що й пристрої класу A, але вони не закривають вікно Rx2, доки не надішлють

наступну передачу назад на сервер. Тому вони можуть приймати сигнал у вікні Rx2 майже в будь-який час. Коротке вікно з частотою та швидкістю передачі даних Rx2 також відкривається між кінцем передачі та початком вікна прийому Rx1 (рис. 2.11).

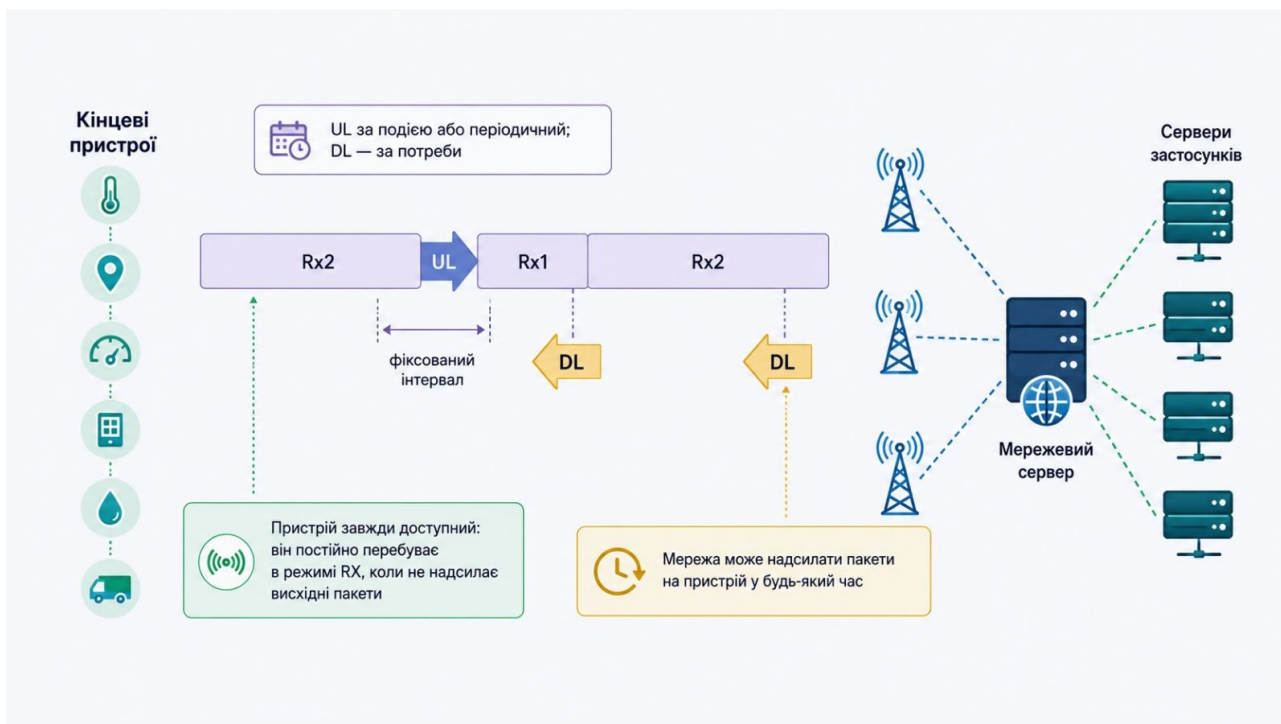


Рисунок 2.11 – Робота в режимі класу C

2.6 Введення пристроїв LoRa в експлуатацію

З міркувань безпеки, якості обслуговування, обліку та інших потреб, пристрої необхідно ввести в експлуатацію та активувати в мережі на початку роботи. Процес введення в експлуатацію забезпечує безпечну синхронізацію кожного пристрою з мережею щодо основних параметрів налаштування (таких як ідентифікатори, ключі шифрування та розташування серверів)

Специфікація LoRaWAN передбачає два типи активації: активацію через повітря (OTAA) (рекомендована) та активацію шляхом персоналізації (ABP). В таблиці 2.4 показано різні характеристики кожного з цих типів активації.

Таблиця 2.4 – Типи активації LoRa пристроїв

Активація через повітря (OTAA)	Активація шляхом персоналізації (ABP)
<ul style="list-style-type: none"> – виробники пристроїв самостійно генерують необхідні параметри ініціалізації; – захищені ключі (сеансові та похідні) можуть регулярно оновлюватися; – пристрої можуть зберігати декілька «ідентичностей» для динамічного та безпечного перемикавання між мережами й операторами протягом усього терміну служби; – доступні високорівневі, стійкі до несанкціонованого втручання механізми безпеки. 	<ul style="list-style-type: none"> – спрощений (але менш безпечний) процес підключення до мережі; – ідентифікатори (ID) та ключі налаштовуються ще на етапі виробництва; – пристрої починають працювати одразу після ввімкнення живлення, процедура приєднання (Join) пропускається; – пристрої прив'язані до конкретної мережі/служби; NetID є частиною мережевої адреси пристрою.

2.7 Колізії даних та ортогональність коефіцієнтів рознесення

У технології LoRa пакети, що використовують різні коефіцієнти розширення спектра SF, є ортогональними, тобто практично не впливають один на одного. Як зазначалося раніше, сигнали з різними значеннями SF сприймаються лише як шум. Тому два пакети, які надходять одночасно на одному приймальному каналі, але використовують різні коефіцієнти розширення спектра, не створюють колізії, і обидва можуть бути успішно демодульовані модемом шлюзу. Водночас два пакети з однаковим значенням SF, що надходять одночасно на той самий канал, можуть спричинити колізію. Однак якщо рівень одного із сигналів перевищує рівень іншого щонайменше на 6 дБ, сильніший сигнал буде успішно прийнятий.

Пропускна здатність мережі LoRaWAN залежить від щільності

розміщення шлюзів. Для максимізації ємності мережі важливим є використання механізму адаптивної швидкості передавання даних (Adaptive Data Rate, ADR). Основною метою ADR є зменшення енергоспоживання кінцевих пристроїв LoRaWAN. Пристрої, розташовані поблизу шлюзу, можуть передавати дані з використанням найменшого значення коефіцієнта розширення спектра, що скорочує тривалість передачі пакета (Time on Air) та сприяє збільшенню терміну служби батареї. Пристрої, які знаходяться на більшій відстані від шлюзу, використовують вищі значення SF. Таким чином досягається компроміс між дальністю зв'язку та енергоспоживанням, оскільки збільшення коефіцієнта розширення спектра дає змогу підтримувати надійний зв'язок із пристроями, розташованими на значній відстані від шлюзу.

2.8 Перспективи розвитку мереж LoRaWAN

Міжнародною некомерційною організацією, яка об'єднує виробників обладнання, розробників програмного забезпечення, операторів мереж, наукові установи та інші зацікавлені сторони, що працюють у сфері Інтернету речей (IoT) та технологій бездротового зв'язку, є LoRa Alliance [28]. Вона заснована з метою розвитку та популяризації технології LoRaWAN та налічує сьогодні налічує понад 500 компаній-учасниць з різних країн світу, що робить її одним із найбільших та найактивніших технологічних об'єднань у галузі низькопотужних глобальних мереж передачі даних. Діяльність альянсу спрямована на створення відкритої екосистеми, яка забезпечує взаємодію пристроїв різних виробників та сприяє широкому впровадженню стандартів Інтернету речей у промисловості, енергетиці, сільському господарстві, логістиці, транспорті, охороні здоров'я та інших сферах.

Основною метою LoRa Alliance є розвиток та стандартизація LPWAN мереж. Для досягнення поставлених цілей LoRa організація розробляє та підтримує специфікацію LoRaWAN — відкритий протокол мережевого рівня, який визначає правила взаємодії між кінцевими пристроями, шлюзами,

мережевими серверами та прикладними серверами. Специфікація LoRaWAN надається безкоштовно та доступна для всіх зацікавлених розробників і виробників. Відкритість стандарту сприяє створенню великої кількості сумісних пристроїв та програмних рішень, що позитивно впливає на розвиток екосистеми Інтернету речей у глобальному масштабі.

Важливою перевагою специфікації LoRaWAN є її базування на принципах відкритих стандартів. Це забезпечує незалежність користувачів від конкретного виробника обладнання та створює умови для чесної конкуренції між учасниками ринку. Завдяки стандартизованим механізмам взаємодії кінцеві пристрої, вироблені різними компаніями, можуть успішно функціонувати в межах однієї мережевої інфраструктури. Такий підхід значно спрощує процес інтеграції нових рішень та знижує загальну вартість впровадження систем Інтернету речей.

Одним із ключових напрямів діяльності LoRa Alliance є забезпечення сумісності та інтероперабельності обладнання різних виробників. Для цього організація впровадила програму сертифікації LoRaWAN, яка дозволяє підтвердити відповідність пристроїв вимогам чинних версій специфікації. Сертифікація гарантує, що обладнання підтримує всі необхідні функції протоколу та може безперешкодно взаємодіяти з іншими сертифікованими компонентами мережі. Наявність сертифіката LoRaWAN є важливим показником якості та надійності продукції для виробників, інтеграторів та кінцевих користувачів.

З метою спрощення процесу підготовки пристроїв до сертифікації LoRa Alliance надає спеціалізовані програмні інструменти для тестування відповідності обладнання вимогам стандарту. Використання таких засобів дозволяє виробникам виконувати попередню перевірку функціональності своїх пристроїв ще на етапі розроблення. Завдяки цьому можуть бути своєчасно виявлені та усунені можливі помилки реалізації протоколу, що значно підвищує ймовірність успішного проходження офіційних сертифікаційних випробувань.

Після завершення внутрішнього тестування пристрої можуть бути

направлені до авторизованих випробувальних лабораторій, акредитованих LoRa Alliance. У таких лабораторіях проводиться комплексна перевірка відповідності обладнання встановленим вимогам щодо функціональності, безпеки та сумісності. Лише після успішного проходження всіх етапів випробувань пристрій отримує офіційний сертифікат LoRaWAN та може бути внесений до переліку сертифікованих продуктів альянсу.

Діяльність LoRa Alliance відіграє важливу роль у розвитку сучасних бездротових технологій та формуванні глобальної екосистеми Інтернету речей. Завдяки відкритості специфікації LoRaWAN, широкій підтримці виробників та наявності ефективної системи сертифікації створюються сприятливі умови для впровадження надійних, енергоефективних і масштабованих рішень у різноманітних галузях економіки. Саме тому LoRa Alliance сьогодні є одним із ключових рушіїв розвитку LPWAN-технологій та сприяє поширенню інноваційних цифрових сервісів у всьому світі.

2.9 Висновки до розділу

1. Проведений аналіз показав, що технологія LoRa та мережевий протокол LoRaWAN є ефективним рішенням для побудови малопотужних глобальних мереж передачі даних (LPWAN), які забезпечують значну дальність зв'язку, тривалий термін автономної роботи кінцевих пристроїв та низькі витрати на розгортання і експлуатацію інфраструктури.

2. Встановлено, що використання модуляції Chirp Spread Spectrum та ортогональних коефіцієнтів розширення спектра забезпечує високу завадостійкість, можливість роботи при низьких значеннях відношення сигнал/шум, а також ефективне використання радіочастотного ресурсу завдяки одночасній передачі даних великою кількістю пристроїв.

3. Досліджено особливості побудови мережі LoRaWAN, яка складається з кінцевих пристроїв, шлюзів, мережевого сервера, сервера приєднання та серверів додатків. Така архітектура забезпечує масштабованість, надійність передачі даних, централізоване керування мережею та високий рівень інформаційної безпеки завдяки використанню механізмів автентифікації та AES-шифрування.

4. Визначено, що в Україні технологія LoRaWAN функціонує в неліцензованому частотному діапазоні EU863–870 (EU868), гармонізованому з європейськими стандартами ETSI. Це створює сприятливі умови для впровадження систем дистанційного моніторингу, телеметрії та автоматизованого обліку енергоресурсів без необхідності отримання окремих ліцензій на використання радіочастот.

5. Аналіз сучасних тенденцій розвитку LoRaWAN свідчить про зростання ролі цієї технології в екосистемі Інтернету речей. Відкритість стандарту, підтримка міжнародної організації LoRa Alliance, наявність механізмів сертифікації обладнання та можливість інтеграції з хмарними сервісами забезпечують подальше поширення LoRaWAN у сферах енергетики, промисловості, ЖКГ, логістики та концепції «розумного міста».

3 РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ

3.1 Практична реалізація системи обліку енергоспоживання

Система обліку та моніторингу енергоспоживання на базі технології LoRa, що пропонується у даній роботі, базується на модульній архітектурі, й представлена на рис. 3.1. Ліва частина системи (вимірювальна компонента) являє собою апаратний пристрій для вимірювання енергетичних величин й складається з чотирьох внутрішніх модулів: блоку давачів, блоку обробки сигналів давачів, блок керування та блоку формування та обробка даних. Останній блок з'єднуються з модулем № 5 (шлюз LoRa) бездротово за допомогою протоколу LoRa на частоті 868 МГц на відстані до 5 км у прямому полі зору. Шлюз LoRa через WiFi-з'єднання з'єднується з хмарою на надсилає зібрані дані на програмну платформу моніторингу.

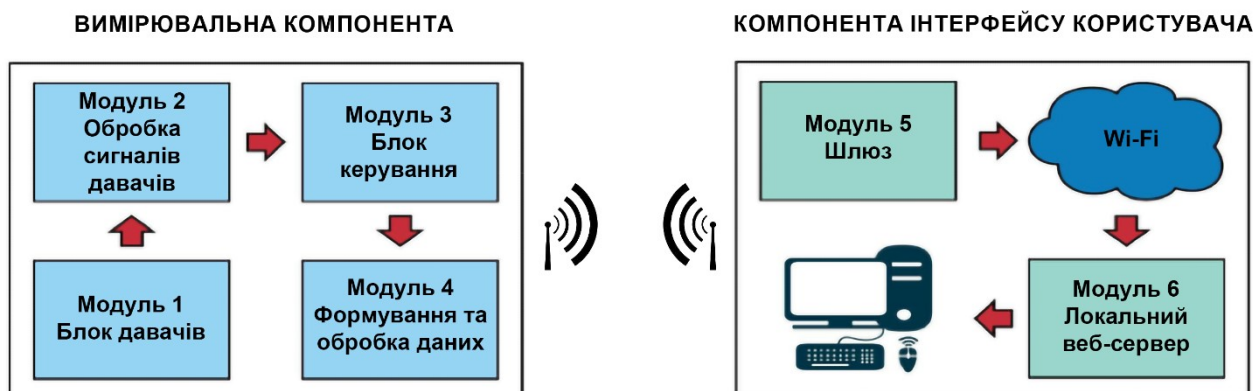


Рисунок 3.1 – Архітектура системи обліку енергоспоживання

Розглянемо більш детально кожен із модулів:

а) модуль 1 – складається з трьох давачів (трансформаторів струму) типу УНDC SCT016S [28]. Загальний вигляд та технічні характеристики давача представлено на рис. 3.2 та у табл. 3.1.

б) модуль 2 – Мікросхема Atmel M90E32AS – це багатофазна високопродуктивна вимірювальна мікросхема з широким динамічним діапазоном. M90E32AS включає 6 незалежних АЦП другого порядку сигма-

дельта, які можуть використовуватися в трьох каналах напруги (фази А, В і С) і трьох каналах струму (фази А, В, С) в типовій трифазній чотирипровідній системі. M90E32AS має вбудований цифровий сигнальний процесор (DSP), який виконує розрахунок активної енергії, реактивної енергії, повної енергії, основної та гармонійної активної енергії за сигналом АЦП та опорною напругою на мікросхемі. DSP також обчислює параметри вимірювання, такі як середньоквадратичне значення напруги та струму, а також середню активну / реактивну / повну потужність. Між M90E32AS та зовнішнім мікроконтролером передбачений чотирипровідний інтерфейс SPI. АЦП та технологія автоматичної температурної компенсації опорної напруги забезпечують довготривалу стабільність M90E32AS при змінах параметрів мережі та навколишнього середовища. Напруга живлення мікросхеми складає 2,8 – 3,6 В, при цьому споживання струму у звичайному режимі близько 13 мА. Діапазон робочих температур – від -40 °С до +85 °С [29].

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики давача YHDC SCT016S

Параметр	Значення
Робоча напруга, В	660
Робоча температура, °С	-25°С – +60
Діапазон частот, Гц	50 – 60
Номінальний вхідний струм, А	150
Максимальний вхідний струм, А	200
Вихідний струм, мА	50
Точність, %	± 1
Лінійність, %	≤ 0,2
Клас вогнестійкості:	UL94-V0

в) модуль 3 – Мікроконтролер ESP32-WROOM-32 – це універсальний модуль зі вбудованими інтерфейсами Wi-Fi + BT + BLE та високопродуктивним мікроконтролером. Модуль підтримує мережеві пристрої обробки даних та

обслуговування датчиків. Ядром модуля є мікроконтролер ESP32-D0WDQ6, який є масштабованим та адаптивним. ESP32 поєднує широкий спектр периферійних пристроїв, включаючи підсилювачі з низьким рівнем шуму, SD-карту, інтерфейс Ethernet, високошвидкісні інтерфейси SDIO/SPI, UART, I²S і I²C та ін.

г) модулі 4 та 5 – дві плати розробки Heltec ESP32 LoRa, які забезпечують зв'язок та роботу через класичні елементи Інтернету речей (IoT) з функціями LoRa, Wi-Fi та Bluetooth (рис. 3.3).

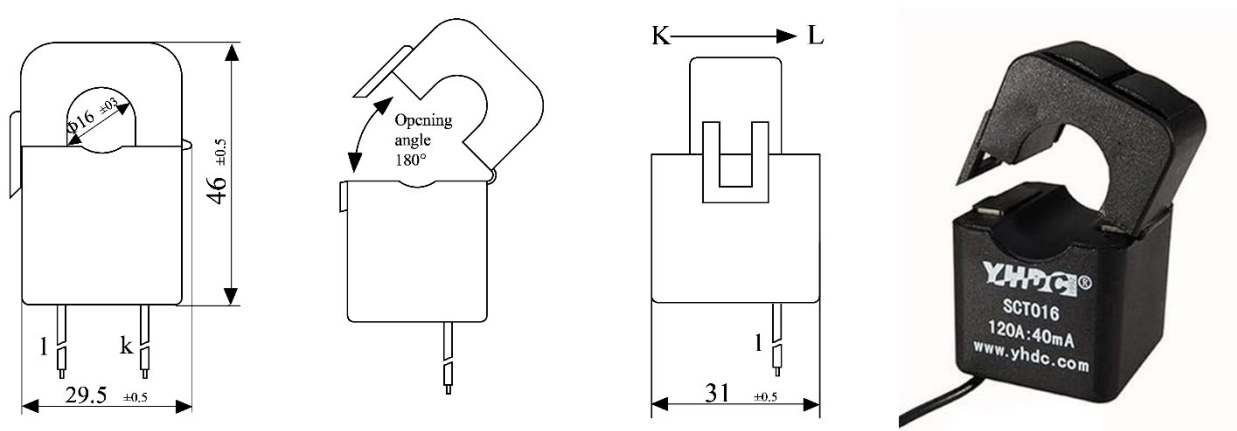


Рисунок 3.2 – Датчик YHDC SCT016S

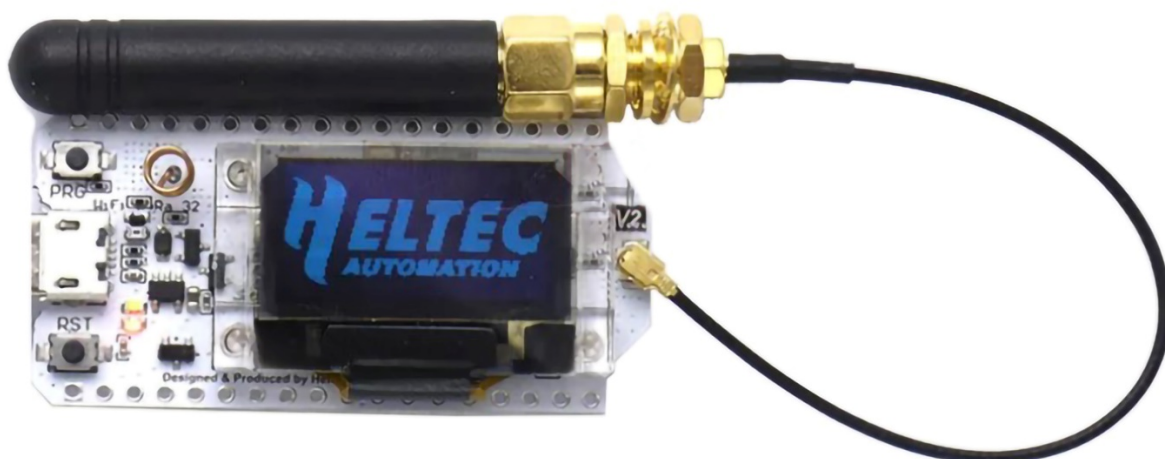


Рисунок 3.3 – Модуль Heltec ESP32 LoRa

На основі документації по застосуванню мікросхеми Atmel-M90E32AS розроблено принципову електричну схему лічильника енергії (рис. 3.4).

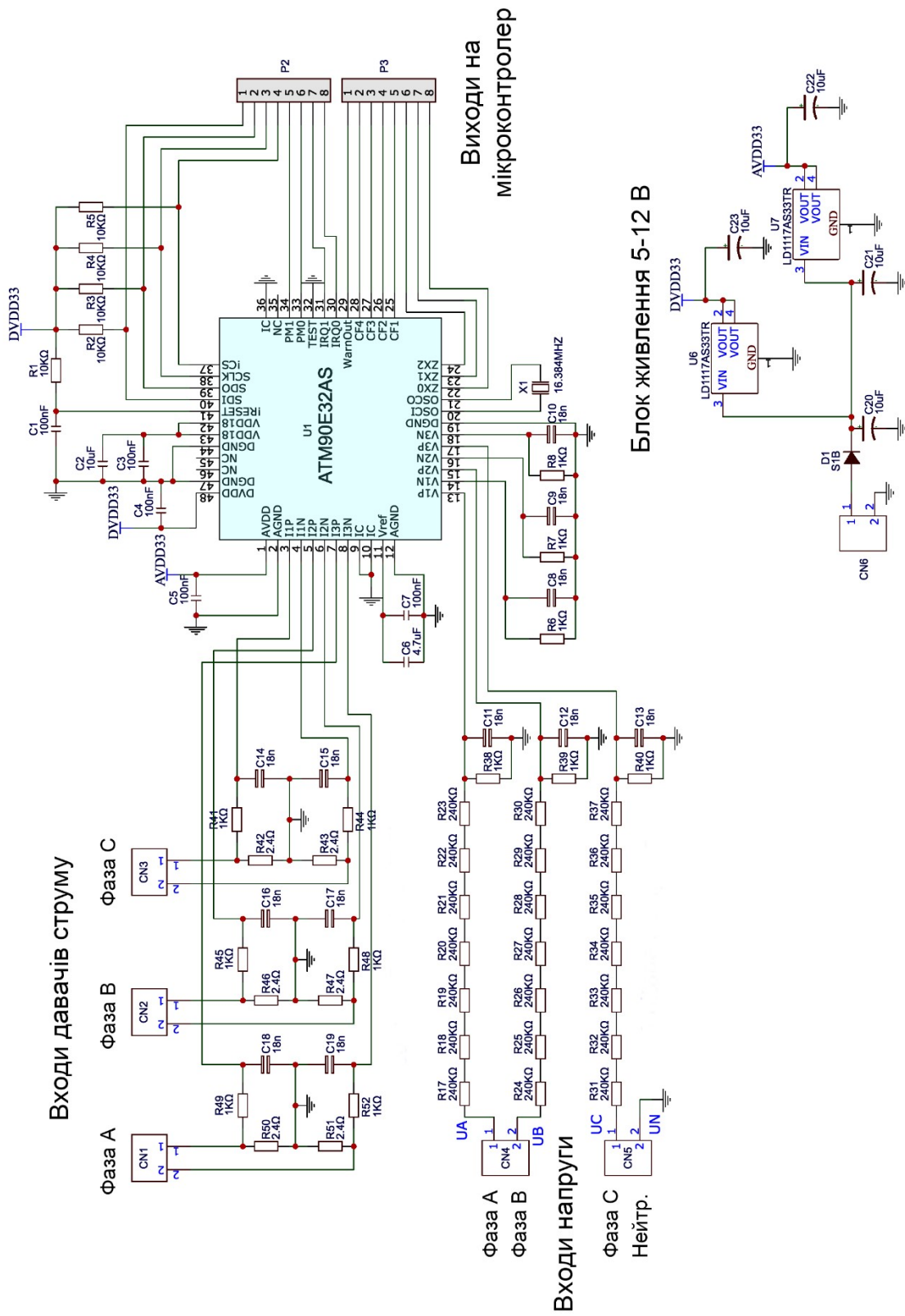


Рисунок 3.4 – Принципова електрична схема лічильника енергії

Даний пристрій дозволяє вимірювати силу струму, напругу, активну потужність, реактивну потужність, повну потужність, коефіцієнт потужності та частоту мережі – усі важливі параметри для аналізу споживання та якості електроенергії для трьох фаз. Система портативна, проста в установці та дозволяє передавати інформацію про величини від точки вимірювання на відстань до 5 км у зоні прямої видимості.

Проектування друкованої плати проводилося з використанням онлайн-сервісу EasyEDA, результат показано на рис. 3.5. Перелік та кількість електронних компонентів подано в табл. 3.2. Підготовлена плата лічильника з напаяними компонентами показана на рис. 3.6.

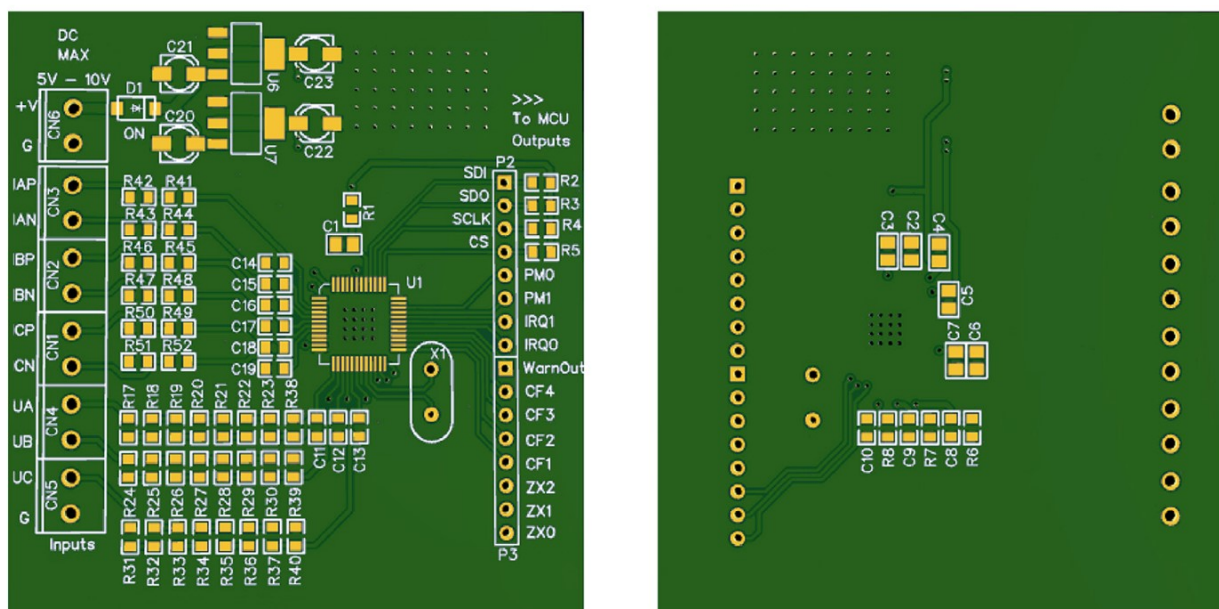


Рисунок 3.5 – Друкована плата лічильника енергії

Фінальний результат розробки системи обліку енергоспоживання на базі технології LoRa з врахуванням всіх необхідних компонентів представлено на рис. 3.7. Комплекс, зокрема, включає: три датчі струму (трансформатори струму); три входи для вимірювання змінної напруги; лічильник енергії; передавач LoRa; шлюз LoRa. Загальна схема підключення системи обліку енергоспоживання показана на рис. 3.8, а приклад її підключення в електрощитовій – на рис. 3.9.

Таблиця 3.2 – Перелік електронних компонентів схеми

Тип	Номинал / Назва	Кількість
Кварц	16,384 МГц	1
Резистор	1 кОм	12
Резистор	10 кОм	5
Резистор	240 кОм	21
Резистор	2,4 Ом	6
Конденсатор	100 нФ	5
Конденсатор	10 мкФ	1
Конденсатор	4,7 мкФ	1
Конденсатор	18 нФ	12
Діод	DO-214AC	1
Роз'єм	MKDS1/2–3,81	6
Роз'єм	Штекер-вилка-2,54_1x8	2
Стабілізатор напруги	LD1117AS33TR (3,3 В)	2
Мікросхема	Atmel M90E32AS	1

Живлення: +5..12 В
 Земля
 Давач струму А +
 Давач струму А –
 Давач струму В +
 Давач струму В –
 Давач струму С +
 Давач струму С –
 Фаза А
 Фаза В
 Фаза С
 Нейтраль

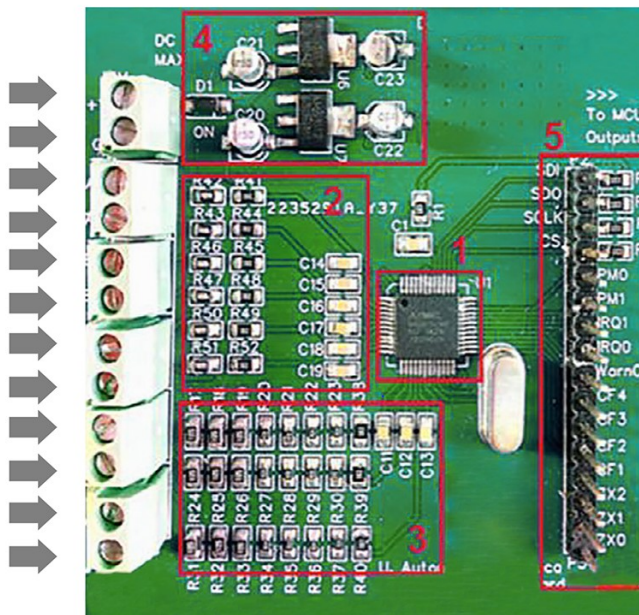


Рисунок 3.6 – Плата лічильника електричної енергії

1 – мікроконтролер АТМ90Е32АS; 2 – ланка вимірювання струму;

3 – ланка вимірювання напруги; 4 – вузол живлення;

5 – виходи на мікроконтролер

Систему рекомендується встановлювати поблизу електрощитової не більше одного метра від шин. Слід уникати розміщення поблизу обладнання, що генерує електромагнітні перешкоди, наприклад двигунів. Для забезпечення бездротового зв'язку не рекомендується повністю розміщувати пристрій у металевій коробці, оскільки це створює ефект клітки Фарадея, що може погіршити якість передачі даних через мережу LoRa. Затискачі для вимірювання напруги підключаються безпосередньо до шин або клем вимірюваної ланцюга, трансформатори струму – на кожній з фаз, що вимірюються.

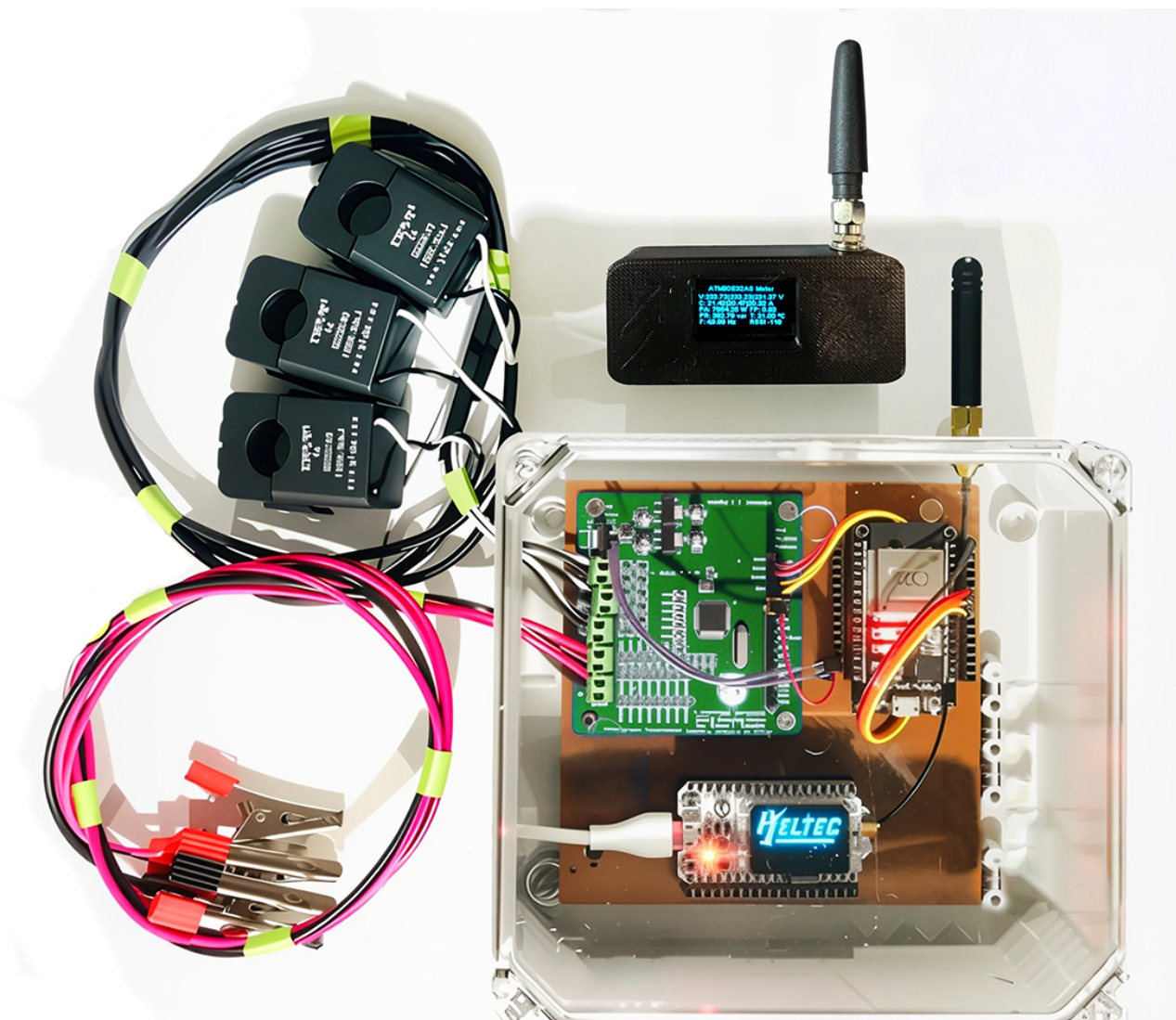


Рисунок 3.7 – Результат розробки апаратного забезпечення

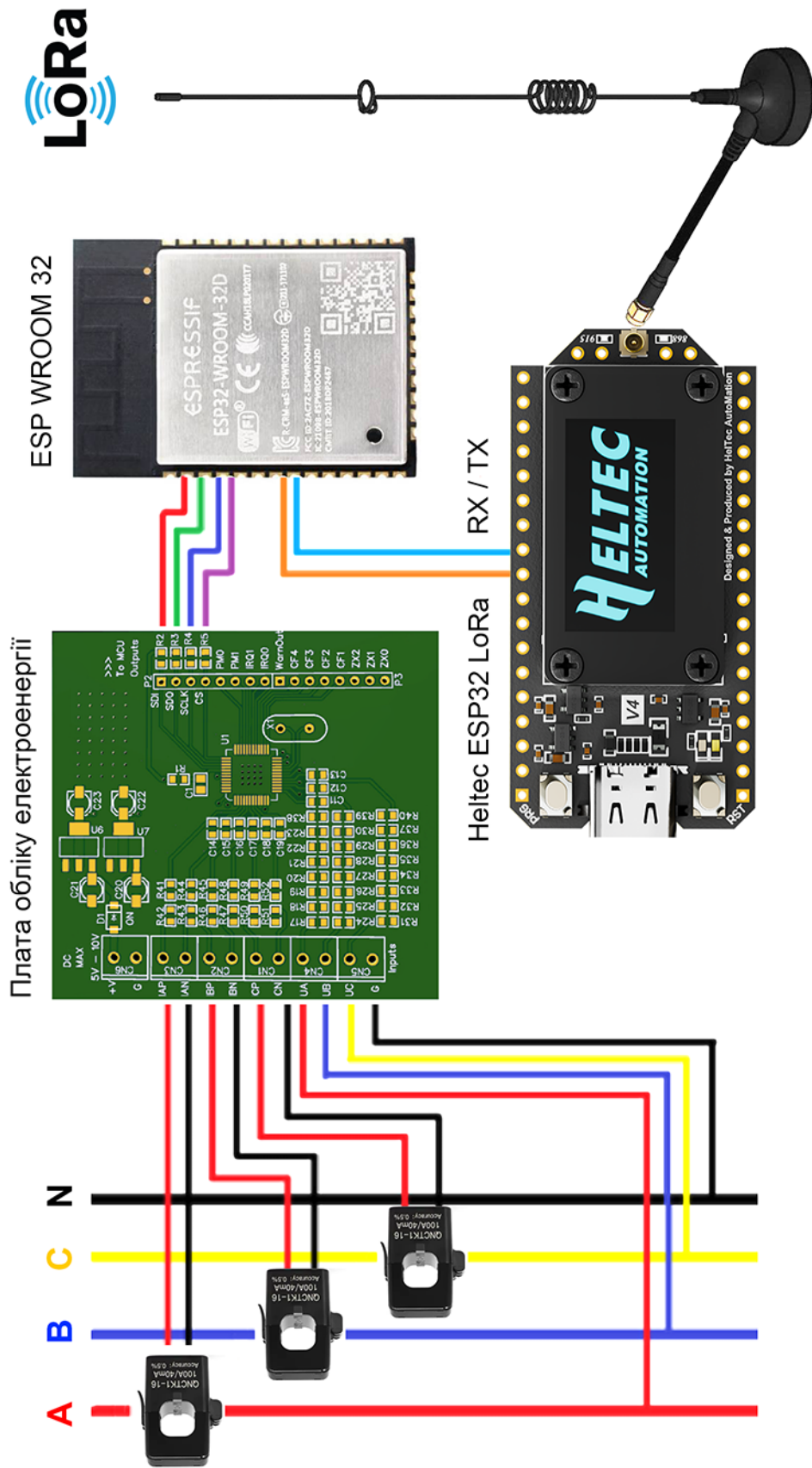


Рисунок 3.8 – Загальна схема підключення системи обліку енергоспоживання

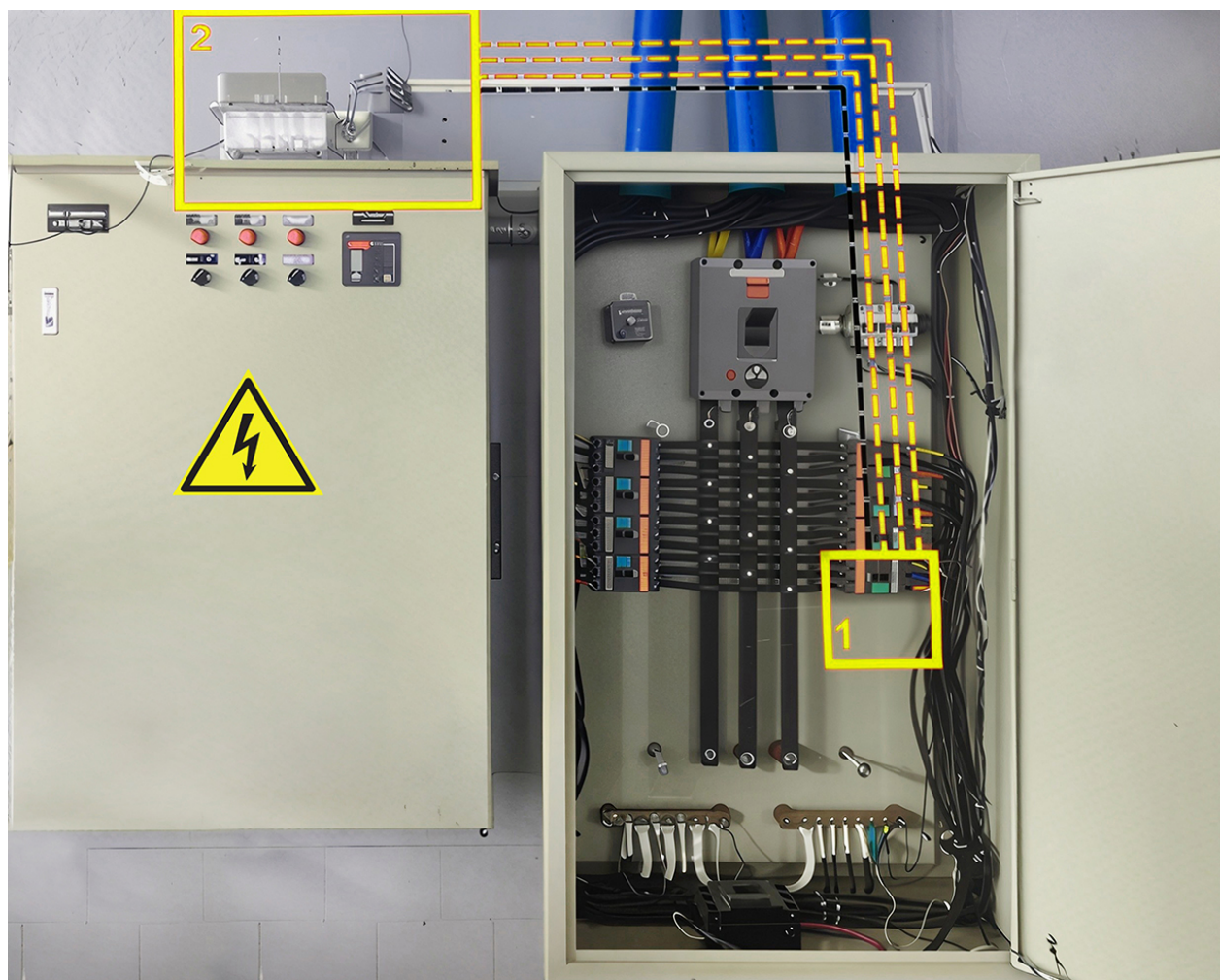


Рисунок 3.9 – Підключення системи обліку в електрощитовій
 1 – точка підключення до вимірювального контуру; 2 – розташування пристрою

3.2 Налаштування системи обліку енергоспоживання

Наступним кроком після підготовки електронної плати та встановлення електронних компонентів є завантаження файлів прошивки в блок управління ESP32, LoRa-передавач та шлюз LoRa. Для виконання цієї задачі ми використали програму Arduino IDE.

Arduino IDE є інтегрованим середовищем розробки, призначеним для створення, редагування, компіляції та завантаження програмного коду на мікроконтролерні плати Arduino. Дане середовище широко використовується у сфері робототехніки, автоматизації, електроніки та навчальних проєктів завдяки простоті використання, відкритому програмному забезпеченню та

великій кількості доступних бібліотек.

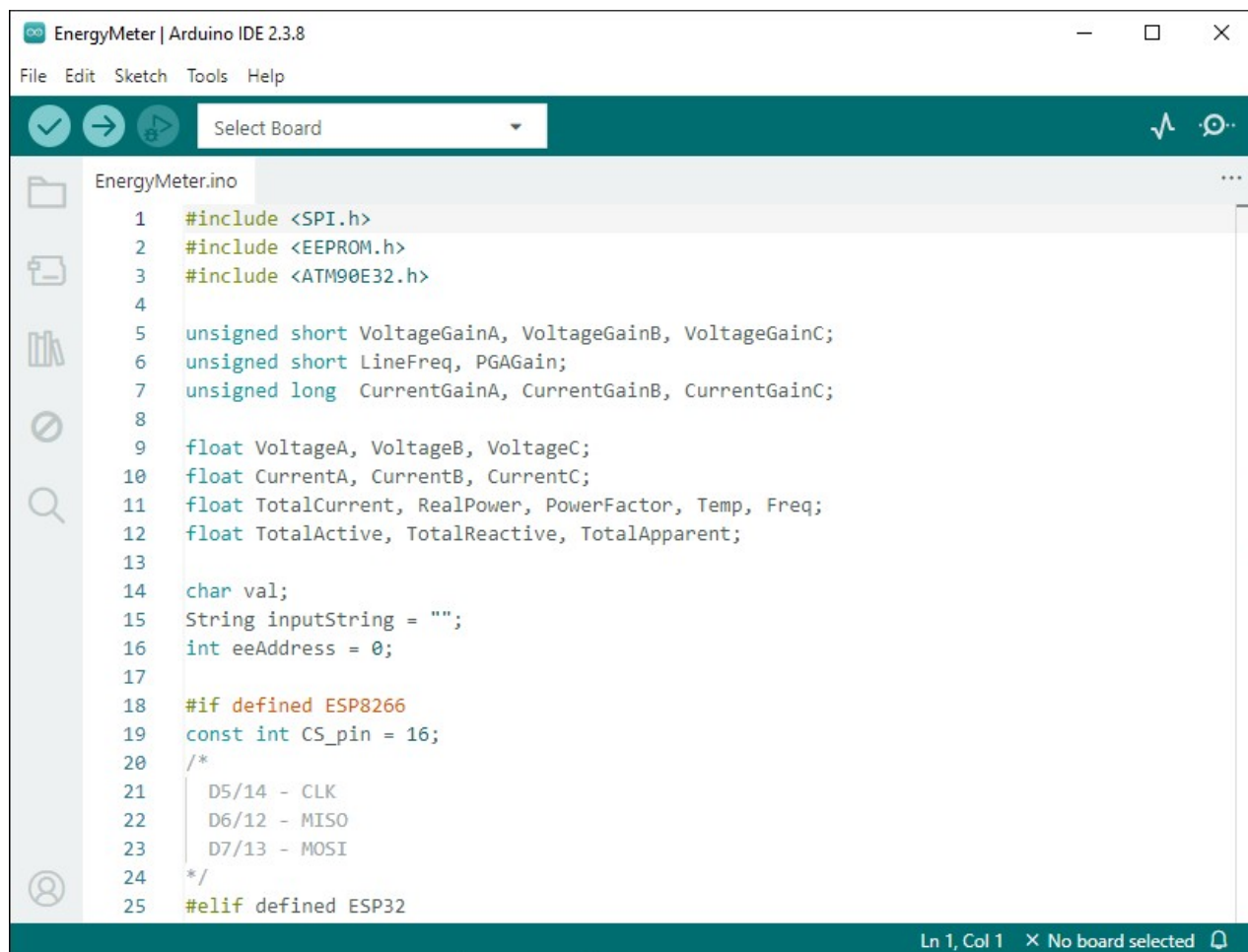
Arduino IDE підтримує програмування мовою C/C++, адаптованою для роботи з мікроконтролерами. Програми в Arduino називаються «скетчами» та мають розширення .ino. Типовий скетч складається з двох основних функцій: `setup()` та `loop()`. Функція `setup()` виконується один раз після запуску пристрою та використовується для початкового налаштування параметрів роботи системи, тоді як функція `loop()` виконується циклічно протягом усього часу роботи мікроконтролера.

Інтерфейс Arduino IDE є простим та інтуїтивно зрозумілим. Основними елементами середовища є текстовий редактор програмного коду, панель інструментів, область повідомлень та консоль компіляції. Панель інструментів містить кнопки перевірки коду, завантаження програми на плату, створення нового проєкту, відкриття та збереження файлів. Для коректної роботи необхідно обрати тип плати та COM-порт, через який здійснюється зв'язок із мікроконтролером.

Однією з важливих переваг Arduino IDE є підтримка великої кількості бібліотек, що значно спрощує роботу з різноманітними датчиками, дисплеями, модулями зв'язку та іншими периферійними пристроями. Бібліотеки дозволяють використовувати готові програмні функції без необхідності самостійної реалізації низькорівневих алгоритмів роботи обладнання.

Arduino IDE підтримує роботу в операційних системах Windows, Linux та macOS, що забезпечує універсальність використання середовища на різних комп'ютерних платформах. Завдяки відкритому вихідному коду та активній спільноті користувачів середовище постійно оновлюється та доповнюється новими можливостями.

У даній бакалаврській роботі використано останню актуальну версію Arduino IDE 2.3.8 [30]. За допомогою даного середовища здійснювалося написання, налагодження та завантаження програмного коду на апаратну платформу, що дозволило реалізувати функціональні можливостей розробленої системи (рис. 3.10).



```

EnergyMeter | Arduino IDE 2.3.8
File Edit Sketch Tools Help
Select Board

EnergyMeter.ino
1  #include <SPI.h>
2  #include <EEPROM.h>
3  #include <ATM90E32.h>
4
5  unsigned short VoltageGainA, VoltageGainB, VoltageGainC;
6  unsigned short LineFreq, PGAGain;
7  unsigned long   CurrentGainA, CurrentGainB, CurrentGainC;
8
9  float VoltageA, VoltageB, VoltageC;
10 float CurrentA, CurrentB, CurrentC;
11 float TotalCurrent, RealPower, PowerFactor, Temp, Freq;
12 float TotalActive, TotalReactive, TotalApparent;
13
14 char val;
15 String inputString = "";
16 int eeAddress = 0;
17
18 #if defined ESP8266
19 const int CS_pin = 16;
20 /*
21  D5/14 - CLK
22  D6/12 - MISO
23  D7/13 - MOSI
24  */
25 #elif defined ESP32

```

Рисунок 3.10 – Середовище Arduino IDE з фрагментом реалізованого коду

Після встановлення вимірювального модуля його необхідно підключити до джерела живлення за допомогою адаптера напруги $\sim 220\text{ В} / 5\text{ В} (2\text{ А})$. Шлюз повинен бути розміщений на відстані, що забезпечує покриття, та підключений до джерела живлення за допомогою адаптера напруги $\sim 220\text{ В} / 5\text{ В}$. На рис. 3.11 показано приклад практичного застосування системи, де відстань між двома пристроями становить приблизно 280 м. Після підключення в прошивку необхідно ввести дані доступу до мережі Wi-Fi: SSID та пароль. Після завантаження прошивки перевіряємо підключення до мережі Wi-Fi та прийом даних у модулі шлюзу LoRa (рис. 3.12).

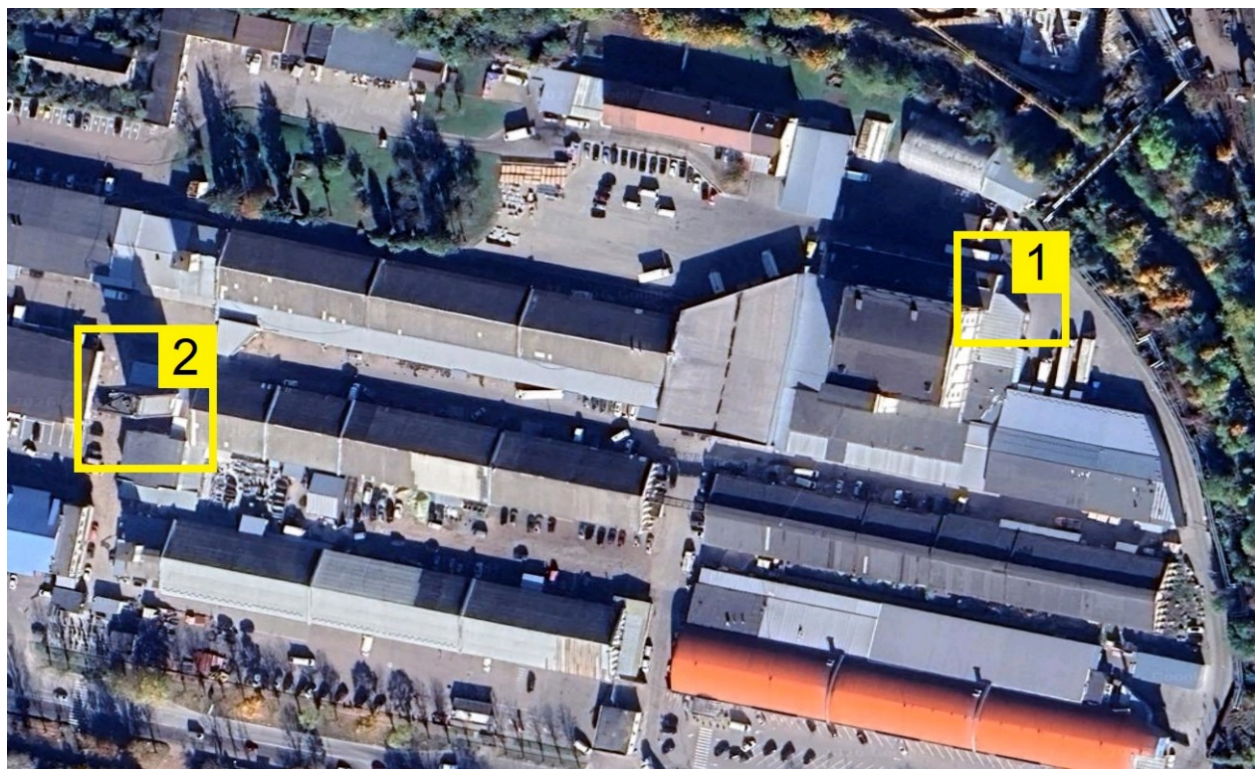


Рисунок 3.11 – Розташування системи обліку на об'єкті дослідження
1 – передавач LoRa (лічильник); 2 – шлюз LoRa (в адмінбудівлі)



Рисунок 3.12 – Шлюз LoRa (приймач даних)

3.3 Розробка веб-інтерфейсу для доступу до даних системи

Наступним етапом нашої роботи є розробка та встановлення у локальному режимі або на сервері веб-додатку, де зберігатимуться дані про споживання електроенергії, зібрані системою.

У даному проєкті для цієї задачі ми використали XAMPP – безкоштовний програмний пакет для розгортання локального веб-сервера на комп'ютері. Він використовується для розробки, тестування та налагодження веб-застосунків без необхідності підключення до віддаленого хостингу. XAMPP підтримує операційні системи Windows, Linux і macOS та є популярним серед веб-розробників й студентів.

Основними перевагами XAMPP є: простота встановлення та налаштування; зручний графічний інтерфейс керування; можливість швидкого запуску локального сервера; підтримка популярних веб-технологій; безкоштовне поширення.

До складу XAMPP входять:

- веб-сервер Apache;
- система керування базами даних MariaDB/MySQL;
- інтерпретатор PHP;
- phpMyAdmin для адміністрування баз даних;
- додаткові модулі та утиліти для веб-розробки.

Інтерфейс веб-додатку, розроблений з використанням HTML, CSS та JavaScript, подано на рис. 3.13. Веб-додаток пропонує користувачеві різні графічні звіти, такі як гістограми, лічильники або файли, сумісні з Microsoft Excel, які можна завантажити. Після запуску веб-додатку необхідно обрати електричну величину, щоб переглянути зібрані за нею дані (рис. 3.14).

Наступні графіки були створені веб-додатком, в якому було зроблено зріз одного дня для аналізу поведінки електричних величин у досліджуваній мережі (рис. 3.15, 3.16). З графіків видно, що коливання напруги фаз та частоти електромережі лежить в допустимих межах: $230 \text{ В} \pm 10 \%$ та $50 \text{ Гц} \pm 1 \%$.



СИСТЕМА ОБЛІКУ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ

Технологія LoRa

Рисунок 3.13 – Інтерфейс веб-додатку

ГРАФІКИ

НАПРУГА

СТРУМ

ЧАСТОТА

**АКТИВНА
ЕНЕРГІЯ**

**РЕАКТИВНА
ЕНЕРГІЯ**

**КОЕФІЦІЄН
ПОТУЖНОСТІ**

Рисунок 3.14 – Розділ вибору необхідного графіка

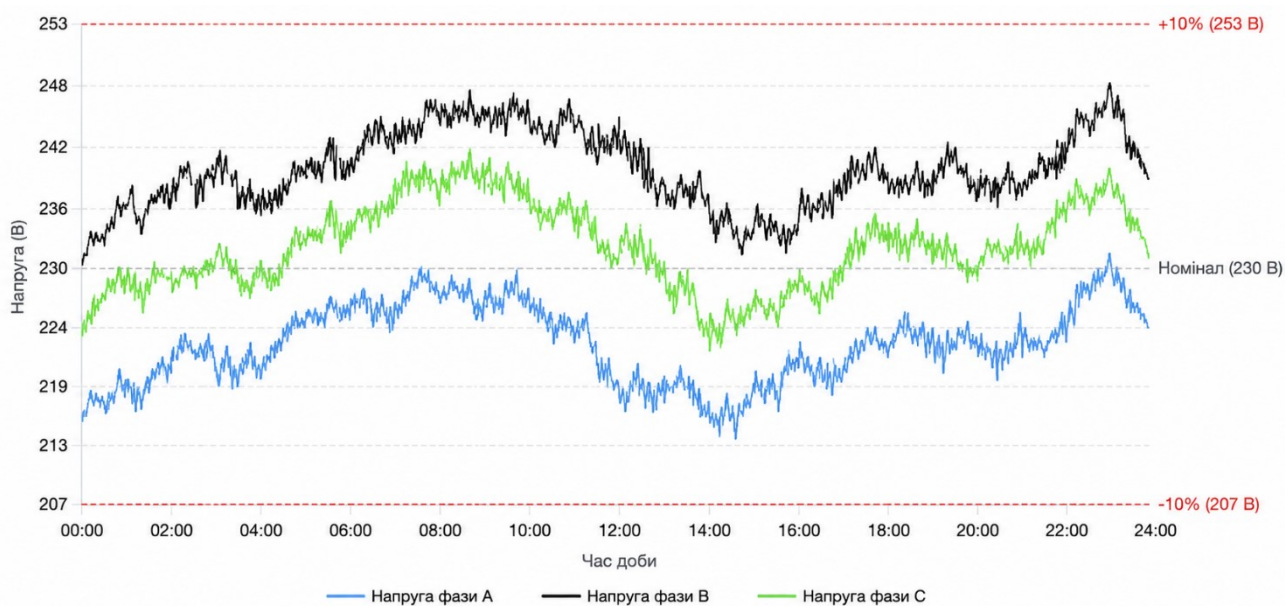


Рисунок 3.15 – Добовий графік напруги

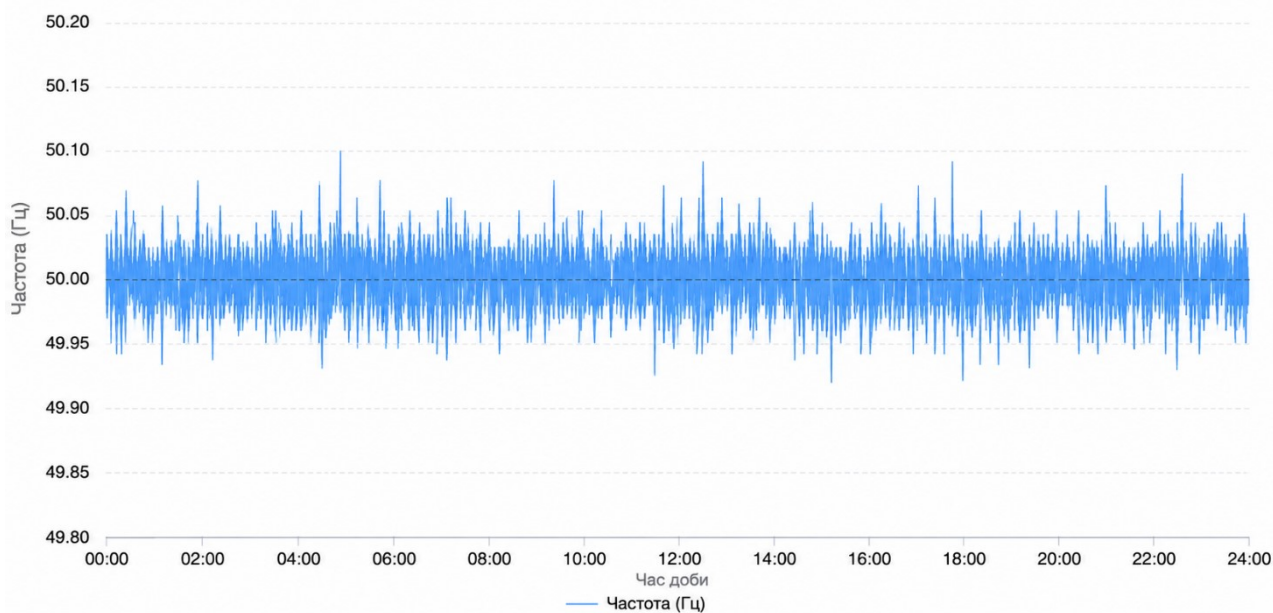


Рисунок 3.16 – Добовий графік частоти

З добового графіку напруги (рис. 3.15) можна помітити, що з 8:30 до 15:00 спостерігається незначне зниження напруги у фазах. Зокрема, саме в цей період відбувається повне виконання майже всієї адміністративної роботи компанії (робота офісного персоналу), а також інтенсивне використання кондиціонерів для охолодження приміщень у період з 11:00 до 14:00.

3.4 Висновки до розділу

1. Запропоновано недорогу систему для оцінки та візуалізації енергоспоживання в низьковольтних електричних ланцюгах, яка дозволяє оцінювати такі електричні величини, як напруга, струм, активна та реактивна енергія, коефіцієнт потужності. Результати, надані системою дозволили виявити дисбаланс навантаження між фазами, базове споживання, надмірне споживання та якість електроенергії.

2. Розроблена система є перспективною альтернативою для оцінки енергоспоживання завдяки своїй низькій вартості, простоті встановлення та можливості тиражування. Наявність такого типу електронних систем, які можуть бути використані як діагностичні інструменти, є особливо важливим в умовах обмежених ресурсів, коли можна уникнути використання професійних вимірювальних приладів для отримання даних про споживання на невеликих підприємствах або в домашніх умовах. У нашому дослідженні на досліджуваному підприємстві було виявлено застаріле обладнання з високим рівнем енергоспоживанням.

4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

4.1 Аналіз небезпечних факторів при монтажі та експлуатації систем обліку енергоспоживання

Під час розроблення, монтажу, налагодження та експлуатації систем обліку енергоспоживання особлива увага повинна приділятися питанням електробезпеки. Електрична енергія є невід'ємною складовою функціонування будь-якої автоматизованої системи обліку, проте її використання пов'язане з виникненням небезпечних та шкідливих виробничих чинників, які можуть становити загрозу для життя і здоров'я персоналу. Аналіз таких чинників дозволяє визначити необхідні організаційні та технічні заходи щодо їх усунення або мінімізації.

Відповідно до вимог нормативних документів у галузі охорони праці, електробезпека являє собою систему організаційних і технічних заходів та засобів, спрямованих на захист працівників від небезпечного впливу електричного струму, електричної дуги, електромагнітного поля та статичної електрики. У процесі створення системи обліку енергоспоживання використовуються електронні лічильники, трансформатори струму, комунікаційні модулі, шлюзи передачі даних, серверне обладнання та джерела живлення. Робота з таким обладнанням може супроводжуватися впливом ряду небезпечних факторів, серед яких найбільшу загрозу становить ураження електричним струмом.

При виконанні робіт із системами дистанційного збору даних на базі сучасних технологій передачі інформації, зокрема LoRaWAN, GSM або Ethernet, працівники взаємодіють з мережевим обладнанням, джерелами безперебійного живлення та комутаційними пристроями. Незважаючи на використання у них низьковольтних кіл зв'язку, блоки живлення такого обладнання підключаються до мережі змінного струму напругою 220 В, що також створює потенційну небезпеку ураження електричним струмом.

Аналіз умов експлуатації системи обліку енергоспоживання показує, що

найбільш ймовірними небезпечними факторами є:

- дотик до струмоведучих частин електроустановок;
- поява напруги на металевих корпусах обладнання;
- короткі замикання та аварійні режими роботи;
- виникнення електричної дуги;
- вплив електромагнітних полів;
- дія статичної електрики;
- пожежна безпека, пов'язана з електричними несправностями.

Небезпека ураження електричним струмом виникає при випадковому дотику людини до струмоведучих частин електроустановок, які перебувають під напругою. Особливістю електричного струму є те, що він не може бути виявлений органами чуття людини до моменту контакту. Ступінь небезпеки визначається величиною струму, тривалістю його проходження через організм, шляхом протікання, частотою струму та індивідуальними особливостями людини. Найбільш небезпечним для людини є змінний струм промислової частоти 50 Гц. Встановлено, що струм силою понад 10 мА викликає судомне скорочення м'язів, а струм понад 100 мА може призвести до фібриляції серця та смертельного наслідку. При виконанні монтажних та налагоджувальних робіт у системах обліку електроенергії можливе виникнення таких видів ураження електричним струмом: електричні удари, електричні опіки, металізація шкіри, механічні пошкодження внаслідок судомного скорочення м'язів.

Одним із найпоширеніших небезпечних чинників є прямий дотик до струмоведучих частин. Така ситуація може виникнути під час обслуговування електрощитів, заміни приладів обліку, перевірки правильності підключення лічильників або виконання ремонтних робіт. Причиною може бути відсутність захисних кожухів, пошкодження ізоляції проводів або недотримання правил безпечної експлуатації електроустановок.

Іншим небезпечним фактором є непрямий дотик до металевих частин обладнання, які опинилися під напругою внаслідок пошкодження ізоляції. У системах обліку енергоспоживання до таких елементів належать корпуси шаф

керування, серверні стійки, корпуси блоків живлення та комунікаційного обладнання. За відсутності захисного заземлення або занулення виникає значна ймовірність ураження персоналу електричним струмом.

Особливу небезпеку становить поява крокової напруги та напруги дотику. Крокова напруга виникає поблизу місця замикання струму на землю і може призвести до проходження струму через ноги людини. Напруга дотику виникає між корпусом пошкодженого обладнання та поверхнею землі або іншими заземленими конструкціями. Такі ситуації можуть спостерігатися під час аварійних режимів роботи електромереж.

До шкідливих виробничих чинників також належать електромагнітні поля, які створюються силовими кабелями, трансформаторами струму, джерелами живлення та телекомунікаційним обладнанням. Хоча рівні електромагнітного випромінювання сучасних систем обліку енергоспоживання зазвичай не перевищують допустимих норм, тривалий вплив електромагнітних полів може спричинити підвищену втому, головний біль, зниження працездатності та погіршення самопочуття працівників.

Додатковим шкідливим фактором є статична електрика. Її накопичення можливе на пластикових корпусах обладнання, кабельних ізоляціях та елементах комп'ютерної техніки. Електростатичні розряди можуть не лише негативно впливати на людину, а й призводити до пошкодження чутливих електронних компонентів системи обліку енергоспоживання.

Під час експлуатації серверного та комунікаційного обладнання виникає небезпека коротких замикань. Основними її причинами є пошкодження ізоляції провідників, помилки під час монтажу, перевантаження електричних кіл та вплив зовнішніх факторів. Короткі замикання супроводжуються значним збільшенням сили струму, що може спричинити руйнування обладнання, займання ізоляційних матеріалів та виникнення пожежі.

Також особливу увагу необхідно приділяти умовам виробничого середовища. Підвищена вологість повітря, наявність струмопровідного пилу, висока температура або конденсація вологи значно збільшують ризик ураження

електричним струмом. Вологе середовище знижує електричний опір шкіри людини, що сприяє проходженню через організм більшого струму при однаковій напрузі.

Своєчасне виявлення зазначених факторів та впровадження відповідних заходів захисту дозволяє забезпечити необхідний рівень електробезпеки персоналу, підвищити надійність функціонування системи та запобігти виникненню нещасних випадків і аварійних ситуацій.

Для зниження рівня ризику необхідно застосовувати комплекс організаційних і технічних заходів електробезпеки, зокрема захисне заземлення, автоматичне відключення живлення, використання захисних пристроїв, періодичний контроль стану ізоляції, проведення інструктажів та навчання персоналу безпечним методам роботи.

4.2. Організаційні та технічні заходи для захисту персоналу від ураження електричним струмом

Під час розроблення, монтажу, налагодження та експлуатації систем обліку енергоспоживання особлива увага приділяється питанням електробезпеки. Використання електронних засобів вимірювання, контролерів, комунікаційного обладнання, джерел живлення та іншого електротехнічного устаткування створює потенційну небезпеку ураження персоналу електричним струмом. З метою забезпечення безпечних умов праці застосовується комплекс організаційних і технічних заходів, спрямованих на запобігання виникненню нещасних випадків, аварій та пожеж, пов'язаних із використанням електричної енергії.

До організаційних заходів належить насамперед професійний відбір та навчання персоналу. Працівники, які виконують роботи з електрообладнанням системи обліку енергоспоживання, повинні пройти відповідне навчання, інструктажі з охорони праці та перевірку знань правил безпечної експлуатації електроустановок. Допуск до робіт здійснюється лише після присвоєння відповідної групи з електробезпеки.

Важливим елементом організаційних заходів є проведення вступного, первинного, повторного, позапланового та цільового інструктажів. Під час інструктажів працівники ознайомлюються з особливостями обладнання, можливими небезпечними ситуаціями, порядком дій у разі аварії та правилами надання домедичної допомоги потерпілим від дії електричного струму.

До організаційних заходів також належать:

- оформлення нарядів-допусків та розпоряджень на виконання робіт;
- призначення відповідальних осіб за безпечне проведення робіт;
- контроль технічного стану електрообладнання;
- проведення планових оглядів і профілактичних випробувань;
- організація безпечного доступу до електроустановок.

Особливе значення мають технічні заходи електробезпеки. Вони спрямовані на усунення або зниження небезпеки ураження електричним струмом шляхом застосування спеціальних технічних рішень і засобів захисту.

Одним із основних заходів є забезпечення надійної ізоляції струмоведучих частин. Усі провідники, кабелі та електронні модулі повинні мати ізоляцію, яка відповідає робочій напрузі та умовам експлуатації. Пошкоджена ізоляція є однією з найпоширеніших причин ураження електричним струмом і виникнення коротких замикань.

Для запобігання випадковому дотику до струмоведучих частин застосовуються захисні оболонки, корпуси, огороження та шафи керування. Конструкція обладнання повинна унеможливити доступ персоналу до небезпечних елементів без використання спеціального інструменту.

Ефективним засобом захисту є захисне заземлення. Усі металеві неструмоведучі частини обладнання, які можуть опинитися під напругою внаслідок пошкодження ізоляції, підлягають приєднанню до системи заземлення. У разі пробоя ізоляції струм замикання відводиться до землі, що знижує напругу дотику до безпечного рівня та забезпечує спрацювання апаратів захисту. У мережах із глухозаземленою нейтраллю додатково застосовується занулення. При цьому корпуси електрообладнання

приєднуються до нульового захисного провідника, що забезпечує автоматичне вимкнення пошкодженої ділянки мережі у разі виникнення аварійного режиму.

Для підвищення рівня безпеки в системі обліку енергоспоживання використовуються автоматичні вимикачі та пристрої захисного вимкнення (ПЗВ). Автоматичні вимикачі забезпечують захист від струмів короткого замикання та перевантаження, а ПЗВ реагують на появу струмів витоку та швидко відключають живлення, запобігаючи ураженню людини електричним струмом.

Для виконання робіт у діючих електроустановках використовуються засоби індивідуального захисту. До них належать діелектричні рукавички, діелектричне взуття, ізолювальні штанги, покажчики напруги, інструмент з ізольованими ручками та захисні окуляри. Усі засоби захисту повинні проходити періодичні випробування та мати відповідне маркування.

Під час технічного обслуговування системи обліку енергоспоживання необхідно виконувати технічні заходи підготовки робочого місця. До них належать відключення обладнання від джерел живлення, запобігання помилковому поданню напруги, перевірка її відсутності, встановлення переносних заземлень та огороження робочої зони. На приводах комутаційних апаратів вивішуються заборонні плакати безпеки.

Важливою складовою електробезпеки є пожежна безпека електроустановок. Для попередження загорянь необхідно контролювати навантаження електричних кіл, забезпечувати якісний монтаж кабельних ліній, своєчасно підтягувати контактні з'єднання та виконувати термографічний контроль вузлів, схильних до нагрівання. Приміщення, де розміщується обладнання системи обліку енергоспоживання, повинні бути оснащені первинними засобами пожежогасіння та системами аварійного відключення живлення.

Таким чином, забезпечення електробезпеки під час експлуатації системи обліку енергоспоживання досягається шляхом комплексного поєднання організаційних і технічних заходів.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Розроблена система обліку та моніторингу енергоспоживання, побудована на базі технології LoRa, є комплексним технічним рішенням, спрямованим на підвищення ефективності контролю електричних параметрів у розподілених енергетичних системах. Запропонований підхід поєднує апаратну частину вимірювання електричних величин із бездротовою передачею даних та програмним веб-інтерфейсом для їх обробки й візуалізації, що забезпечує цілісність процесу моніторингу від моменту вимірювання до аналітичної інтерпретації результатів.

Використання технології LoRa як каналу зв'язку дозволяє організувати надійну передачу даних на значні відстані при низькому енергоспоживанні, що є особливо важливим для систем, які працюють у режимі постійного моніторингу. Це дає змогу ефективно застосовувати розроблену систему в умовах невеликих підприємств, виробничих об'єктів, складських комплексів, а також у побутових електромережах, де відсутня розвинена інфраструктура дротових мереж передачі даних або її використання є економічно недоцільним.

Розроблений веб-інтерфейс забезпечує зручну взаємодію користувача з системою та дозволяє здійснювати оперативний контроль основних електричних параметрів у режимі реального часу. Зокрема, здійснюється моніторинг напруги, струму по фазах, активної та реактивної потужності (або енергії), коефіцієнта потужності, а також частоти мережі. Візуалізація цих параметрів у графічному вигляді дає можливість не лише спостерігати поточні значення, але й аналізувати їх зміну в часі, виявляти характерні закономірності навантаження та фіксувати відхилення від нормативних режимів роботи електромережі.

Отримані дані формують інформаційну базу для подальшого аналізу та прийняття техніко-економічних рішень. На основі накопиченої статистики можуть бути визначені періоди пікового навантаження, оцінені втрати електроенергії, а також виявлені неефективні режими споживання. Це створює

передумови для впровадження заходів з енергоменеджменту, спрямованих на оптимізацію споживання електроенергії, зниження витрат та підвищення загальної енергоефективності об'єкта.

Запропонована система має не лише вимірювальне, але й аналітичне та прикладне управлінське значення. Її впровадження дозволяє підвищити рівень контролю за електроспоживанням, забезпечити прозорість енергетичних процесів та створити основу для подальшої автоматизації систем енергоменеджменту, що підтверджує її практичну цінність та доцільність використання у сучасних енергетичних мережах різного масштабу.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Röhrig C. LPWAN based IoT architecture for distributed energy monitoring in deep indoor environments. Proceedings of the 6th International Conference on Building Energy and Environment (COBEE 2025), Eindhoven / ed. by B. Cramer. 2025. С. 1404–1411.
2. LPWAN Technologies for IoT: Real-World Deployment Performance and Practical Comparison / D. Orlovs et al. IoT. 2025. Vol. 6, no. 4.
3. Röhrig C., Cramer B. Experimental Evaluation of LPWAN Technologies: mioty, LoRaWAN, Sigfox, NB-IoT, and LTE-M in Deep Indoor Environments. IDiAL – Institute for the Digital Transformation of Application and Living Domains Dortmund University of Applied Sciences and Arts, Dortmund. 2026. С. 6.
4. LoRa Alliance - Homepage. LoRa Alliance®. URL: <https://lora-alliance.org> (дата звернення: 01.05.2026).
5. Топал О., Любарець М., Прищепов Є. Інтелектуальні системи обліку споживання енергетичних ресурсів: складники, технології радіозв'язку та перспективи впровадження в Україні. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки. 2020. Т. 31(70), ч. 1 № 6. С. 27–34. URL: <https://doi.org/10.32838/TNU-2663-5941/2020.6-1/05>.
6. Naumann H., Oelers W. LPWAN comparison – low energy consumption with NB-IoT, LoRaWAN and Sigfox. 2021.
7. Schreiber D. LPWAN protocol selection for IoT-based energy measurement systems: A comparative analysis of mioty and NB-IoT technologies. 2025 International Conference on Electromechanical and Energy Systems / ed. by C. Fosala. 2025. С. 046–051.
8. Застосування технології LoRaWAN в АСУ ТП і системах технічного обліку енергоресурсів. ТОВ «Інфоком ЛТД». URL: https://ia.ua/wp-content/uploads/2025/02/byklet_lorawan_for_industry_v1_uk_compressed.pdf (дата звернення: 01.05.2026).
9. Röhrig C., Heß D., Trinh B. H. D. System design for distributed energy

management using multiple LPWAN technologies. IECON 2025 - 51th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Madrid. 2025. C. 1–7.

10. LoRaWAN IoT Technology for Energy Smart Metering Case Study Lebanon / C. Zaraket et al. Key Engineering Materials. 2021. Vol. 886. C. 30–41.

11. Sánchez-Sutil F., Cano-Ortega A., C. Hernández J. Design and Implementation of a Smart Energy Meter Using a LoRa Network in Real Time. Electronics, Jaén. 2021. C. 26.

12. Open Source LoRaWAN Telemetry Test Bench for Smart Grid – a DLMS/COSEM Implementation Case Study / C. Zaraket et al. AIP Conference Proceedings, Athens, 28 May 2021. 2021. C. 20

13. Advantech. LoRaWAN-Based Heat Meter Monitoring. Advantech Co-Creating the Future of the IoT World. URL: <https://www.advantech.com/en-sg/resources/case-study/lorawan-based-heat-meter-monitoring> (дата звернення: 13.06.2026).

14. Semtech. Smart Electricity Metering with LoRa Technology URL: <https://www.semtech.com/lora/lora-applications/smart-electricity-metering>. (дата звернення: 01.05.2026).

15. Semtech. Semtech LoRaWAN® Powers Yorkshire Water’s Smart Meter Savings URL: <https://www.semtech.com/company/press/semtech-lorawan-powers-yorkshire-waters-smart-meter-savings> (дата звернення: 22.05.2025).

16. A Pilot Study. An Integrated IoT Architecture for Smart Metering Using Next Generation Sensor for Water Management Based on LoRaWAN Technology URL: <https://www.semtech.com/company/press/semtech-lorawan-powers-yorkshire-waters-smart-meter-savings> (дата звернення: 20.08.2020).

17. Performance Evaluation of the LoRa Protocol in the context of Smart Meter. arXiv.org. URL: <https://arxiv.org/abs/1907.12355> (дата звернення: 13.06.2026).

18. Semtech. Smart Electricity Metering with LoRa Technology URL: <https://www.semtech.com/lora/lora-applications/smart-electricity-metering> (дата звернення: 01.05.2026).

19. Київ став першим містом в Україні з власною інфраструктурою для інтернету речей. Офіційний портал Києва. URL: https://kyivcity.gov.ua/news/kiv_stav_pershim_mistom_v_ukrani_z_vlasnoyu_infrastrukturoyu_dlya_internetu_rechey/ (дата звернення: 01.05.2026).

20. Про створення робочої групи з питань впровадження та розвитку мережі інтернету речей за технологією LoRaWAN у м. Хмельницькому. Хмельницька міська рада. URL: <https://www.khm.gov.ua/uk/node/68226> (дата звернення: 01.05.2026).

21. Розгортання LoRaWAN інфраструктури в територіальній громаді м. Кривий Ріг. Міністерством розвитку громад та територій України. URL: <https://dream.gov.ua/ua/pip/DREAM-UA-081025-785FA582> (дата звернення: 01.05.2026).

22. Сучасні системи моніторингу та обліку електроенергії / Н. Соколова та ін. Вісник ХНТУ. 2025. Т. 3(94), № 1. С. 263–268. URL: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.31>.

23. Разінков В. Аналіз проблем функціонування системи енергомоніторингу комунального сектору. Електротехнічні та комп'ютерні системи. 2025. № 43(119). С. 28–33. URL: <https://doi.org/10.15276/eltecs.43.119.2025.3>.

24. Оптимізація енергоспоживання у сенсорних вузлах LoRaWAN / Л. Савицька та ін. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2026. № 2. С. 15–20. URL: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2026-185-2-15-20>.

25. Руденко В. Огляд протоколу LoRa та перспективи використання. Системи управління, навігації та зв'язку. 2025. № 2. С. 244–248. URL: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2025.2.244>.

26. Baumker E., Miguel Garcia A., Woias P. Minimizing power consumption of LoRa® and LoRaWAN for low-power wireless sensor nodes. Journal of Physics: Conference Series. 2018. С. 1–5.

27. Шпатар П., Нічий Б., Нічий С. Дослідження енергоефективності технологій LoRa в безпроводних моніторингових мережах. Вимірювальна та

обчислювальна техніка в технологічних процесах. 2024. С. 166–174. URL: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-79-21>.

28. SCT016S pdf, SCT016S Description, SCT016S Datasheet, SCT016S view. AllDatasheet. URL: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1159369/YNDC/SCT016S.html> (дата звернення: 01.05.2026).

29. Enhanced Poly-Phase High-Performance Wide-Span Energy Metering IC. Atmel. URL: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-46003-SE-M90E32AS-Datasheet.pdf> (дата звернення: 01.05.2026).

30. App Lab: from Sketch to Linux to AI, all in one place. Arduino. URL: <https://www.arduino.cc/en/software/> (дата звернення: 01.05.2026).