

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ФАКУЛЬТЕТ АЕРОНАВІГАЦІЇ,  
ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ  
КАФЕДРА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ ТА РАДІОЕЛЕКТРОННИХ  
СИСТЕМ**

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри

Роман ОДАРЧЕНКО

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2022 р.

**ДИПЛОМНА  
(КВАЛІФІКАЦІЙНА)  
РОБОТА  
(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)**

**ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬО-КВАЛІФІКАЦІЙНОГО РІВНЯ  
“БАКАЛАВР”**

**Тема: “Мережа LoRaWAN аеропорту”**

**Виконавець:** \_\_\_\_\_ Володимир МАРЧУК

**Керівник:** \_\_\_\_\_ Володимир КЛИМЧУК

**Нормоконтролер** \_\_\_\_\_ Денис БАХТІЯРОВ

**Київ 2022**

**НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Факультета аеронавігації, електроніки та телекомунікацій  
Кафедра телекомунікаційних та радіоелектронних систем

Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Освітньо-професійна програма «Телекомунікаційні системи та мережі»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Роман ОДАРЧЕНКО

“ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2022 р.

**ЗАВДАННЯ**

**на виконання дипломної роботи**

Марчука Володимира Володимировича

1. Тема дипломної роботи: “Мережа LoRaWAN аеропорту”  
затверджена наказом ректора від “ 25” квітня 2022р. №433/ст.
2. Термін виконання роботи: з 23.05.2022 р. по 17.06.2022 р.
3. Вихідні дані до роботи:
  - 1) Технологія – LoRaWAN.
  - 2) Радіус радіо покриття -10 км.
  - 3) Метод модуляції – ЛЧМ.
4. Зміст пояснювальної записки:
  - 1) Вступ.
  - 2) Особливості організації метеозабезпечення цивільної авіації.
  - 3) Принципи побудови мережі LoRaWAN.
  - 4) Розробка мережі LoRaWAN типового аеропорту.
5. Перелік обов’язкового графічного (ілюстрованого матеріалу): 7-8 слайдів за тематикою роботи

## 6. Календарний план-графік

№ п/п	Завдання	Термін виконання	Відмітка про виконання
1.	Розробити деталізований зміст розділів дипломної (кваліфікаційної) роботи	23.05.2022- 25.05.2022	Виконано
2.	Вступ	26.05.2022- 29.05.2022	Виконано
3.	Принципи метеозабезпечення цивільної авіації	30.05.2022- 02.06.2022	Виконано
4.	Принципи побудови мереж LoRaWAN	03.06.2022- 08.06.2022	Виконано
5.	Організація мережі LoRaWAN в аеропорту	09.06.2022- 10.06.2022	Виконано
6.	Усунення недоліків та захист дипломної роботи	13.06.2022- 17.06.2022	Виконано

8. Дата видачі завдання: “20” травня 2022 р.

Керівник дипломної роботи \_\_\_\_\_  
(підпис керівника)

Володимир КЛИМЧУК  
(П.І.Б.)

Завдання прийняв до виконання \_\_\_\_\_  
(підпис випускника)

Володимир МАРЧУК  
(П.І.Б.)

## РЕФЕРАТ

Дипломна робота складається зі вступу, трьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел з 17 найменувань, має 50 аркушів основного тексту, 12 рисунків, 5 таблиць, загальний обсяг роботи 58 аркушів.

В роботі проведено аналіз існуючих проблем метеозабезпечення цивільної авіації. Запропоновано використання мережі LoRaWAN для комплексного та надійного забезпечення диспетчерів та екіпажів повітряних суден метеоінформацією протягом любого часу.

**Ключові слова:** МЕТЕОРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ, МЕТЕОРОЛОГІЧНИЙ ЦЕНТР, МЕТЕОРОЛОГІЧНА СТАНЦІЯ, ТЕХНОЛОГІЯ LORAWAN, МОДУЛЯЦІЯ LORA;

- **Об'єкт дослідження:** процес забезпечення метеорологічною інформацією служб організації польотів аеропорту.
- **Предмет дослідження:** Мережа передачі даних LoRaWAN на основі технології LoRa.
- **Мета:** – розробка мережі LoRaWAN на основі технології LoRa.

Матеріали дипломної роботи рекомендується використовувати при проектуванні сучасних мереж передачі даних та у навчальному процесі.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ .....	6
ВСТУП .....	7
РОЗДІЛ 1. ОСОБЛИВОСТІ ОРГАНІЗАЦІЇ МЕТЕОРОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АЕРОПОРТУ ДЛЯ ЦИВІЛЬНОЇ АВІАЦІЇ.....	9
1.1. Роль метеорологічного забезпечення для безпеки польоті.....	9
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1 .....	15
РОЗДІЛ 2. ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ ТА ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ LoRaWAN .....	16
2.1. Основи технології LoRaWAN.....	16
2.2. Ключові особливості застосування технології LORA.....	17
2.3. Принцип роботи мережі LoRaWAN.....	19
2.4. Переваги мереж LoRaWAN.....	20
2.5. Архітектура мереж LoRaWAN.....	21
2.6. Обладнання, що використовується для побудови мережі.....	22
2.7. Сфери застосування LoRaWAN.....	26
2.8. Стан та перспективи розвитку протоколу мережі LoRaWAN в Україні.....	28
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2 .....	29
РОЗДІЛ 3. ОСОБЛИВОСТІ ТЕХНОЛОГІЇ LORA .....	30
3.1. Обґрунтування ефективності технології LoRa .....	30
3.2. Енергетичний потенціал лінії зв'язку для технології LORA .....	31
3.3. Характеристика датчиків інформації системи.....	33
3.4. Архітектура мережі LORAWAN .....	34
3.5. Місткість мережі LoRa.....	35
3.6. Характеристика датчиків інформації системи.....	39
3.7. Архітектура мережі LORAWAN.....	43
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3 .....	54
ВИСНОВКИ .....	55
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	57

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

АМС – автоматична метеорологічна станція.

ЗПС – злітно-посадкова смуга.

ADR (adaptive data rate) - адаптивна зміна швидкості передачі.

Cellular Network – технології, що базуються на використанні стандартів стільникових мереж у ліцензованому діапазоні.

Cisco-американська телекомунікаційна компанія.

Device-to-Device (D2D) – технологія прямого зв'язку між пристроями стандарту LTE.

IP-адреса - адреса Інтернет-протоколу

IoT- інтернет речей (Internet of Things).

Low Power Short Range Networks – енергоефективні мережі малого радіусу дії.

Low Power Wide Area Networks (LPWAN) – енергоефективні мережі великого радіусу дії.

LoRaWAN (Long Range) - один із стандартів технології енергоефективної мережі LPWAN, що не вимагає ліцензування використовуваних частот, призначений для міжмашинних взаємодій, збору даних із датчиків, додатків.

LTE (Long-Term Evolution) – стандарт бездротової високошвидкісної передачі даних.

M2M машинно-машинна взаємодія, англ. Machine-to-Machine.

Smart City - концепція «ідеального міста»

ІТС - інтелектуальні транспортні системи

ЛМ - локальні мережі;

СКМ - система кабельних мереж;

DWDM - Dense Wavelength Division Multiplexing – щільне хвильове мультиплексування;

EDFA – Erbium Doped Fibre Amplifier - волоконно-оптичний підсилювач;

STM - Synchronous Transport Module – синхронний транспортний модуль;

SDH - Synchronous Digital Hierarchy – синхронна цифрова ієрархія;

CDMA/CD - Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (множинний доступ з контролем несучої та виявленням колізій).

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Щорічно збільшуються обсяги авіап перевезень, збільшується інтенсивність польотів, що підвищує вимоги до організації роботи аеропортів.

Одним із факторів, що впливають на безпеку авіаційних перевезень, є точність та достовірність відомостей про стан погоди. Статистика показує, що в період з 2017 по 2022 роки сталося близько 193 авіаційних інцидентів, які зумовлені недоліками метеорологічного забезпечення польотів.

Найбільш достовірними є відомості, які отримують від метеорологічних датчиків, що знаходяться в районі аеропорту. Висока вартість комутації сучасних метеорологічних датчиків - прокладання оптичного-мідного\коаксіального кабелів і складність в організації каналів зв'язку є перешкодами до встановлення таких датчиків. Тому завдання побудови мережі передачі метеорологічних даних з метою підвищення якості метеорологічного забезпечення є актуальним.

### **Мета і завдання дослідження.**

Метою цієї роботи є дослідження можливості практичної застосування технології LoRaWAN для побудови мережі метеорологічного забезпечення типового аеропорту. Для досягнення поставленої мети сформульовані такі завдання:

1. Провести аналіз особливостей організації метеорологічного забезпечення польотів цивільної авіації.
2. Оцінити можливість використання технології LORAWAN для побудови мережі передавання метеоданих відповідним службам аеропорту.
3. Сформулювати архітектуру мережі та визначити апаратні складові мережі.

**Об'єкт дослідження:** процес забезпечення метеорологічною інформацією служб організації польотів аеропорту.

**Предмет дослідження:** мережа передачі даних на основі технології LoRaWAN.

**Методи дослідження.** У роботі використовувався математичний апарат теорії електрозв'язку, теорії ланцюгів та сигналів, нелінійних імпульсних систем. Експериментальна перевірка результатів дослідження проводилося за допомогою натурних випробувань та методом моделювання на ПК.

**Практичне значення отриманих результатів.**

Матеріали дипломної роботи рекомендується використовувати при побудові сучасних телекомунікаційних мереж передачі даних та в навчальному процесі.

**Апробація отриманих результатів.** Основні положення роботи доповідалися та обговорювалися на таких конференціях:

Науково-практична конференція «Проблеми експлуатації та захисту інформаційно-комунікаційних систем», м. Київ, 2022 р.



# РОЗДІЛ 1

## ОСОБЛИВОСТІ ОРГАНІЗАЦІЇ МЕТЕОРОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АЕРОПОРТУ ДЛЯ ЦИВІЛЬНОЇ АВІАЦІЇ

### 1.1. Роль метеорологічного забезпечення для безпеки польотів

Безпека польотів повітряних суден цивільної авіації є стан авіаційної транспортної системи, за якого ризик заподіяння шкоди особам або заподіяння шкоди майну знижено до прийнятного рівня та підтримується у цьому чи нижчому рівні у вигляді безперервного процесу виявлення джерел небезпеки та контролю факторів ризику [1].

За даними Міжнародної організації цивільної авіації (ІКАО) за останні 25 років від 6 до 20% авіаційних пригод сталося через несприятливих метеорологічних умов, а 30 % випадків вони стали непрямими або супутніми причинами таких подій. Ці дані показують, наскільки важливу роль у забезпеченні безпеки польотів повітряних суден цивільної авіації грає авіаційне метеорологічне забезпечення.

До аеродромних метеорологічних органів/органів метеорологічного стеження відносяться: авіаційні метеорологічні центри (АМЦ), авіаційні метеорологічні станції (громадянські) із синоптичною частиною (АМСГ I, II та III розрядів), авіаційні метеорологічні станції (цивільні) без синоптичної частини (АМСГ IV розряду) та оперативні групи (ОГ). На АМЦ, АМСГ та ОГ покладено такі функції:

- спостереження за метеорологічними умовами на аеродромі;
- розробка та випуск прогнозів погоди та попереджень щодо аеродрому, маршрутів та районів польотів;
- проведення консультацій та надання польотної документації екіпажам повітряних суден та інших авіаційних споживачів, пов'язаних із виробництвом польотів;

- обмін метеорологічною інформацією з іншими метеорологічними органами;
- навчання та інструктаж авіаційного персоналу, залученого до виробництва метеорологічних спостережень на гелікоптерних майданчиках;
- здійснення технічного обслуговування метеорологічних приладів на аеродромі, організація їх ремонту та монтажу;
- контроль роботи з передачі метеорологічної інформації;
- вивчення кліматичних умов району польотів, що обслуговується, складання кліматичних описів та розділів «Метеорологічне забезпечення» для інструкції з виробництва польотів на аеродромі.

Ефективність, безпека та регулярність повітряного руху безпосередньо залежить від погоди на заданому маршруті, у пунктах відправлення та призначення. Своєчасне та точне визначення погоди на всіх етапах та доведення інформації до споживачів є основним фактором для регулярного та безпечного виконання польотів на аеродромі.

В даний час існують метеорологічні прилади для вимірювання параметрів атмосфери такі як метеорологічний зонд (метеозонд).

Метеозонд – це безпілотний аеростат, призначений для вимірювання різних параметри атмосфери. Він являє собою кулю, до якої прив'язана капсули з апаратурою. На кожній станції радіозондування метеозонди запускають два рази на добу: рівно опівдні та опівночі за Грінвічем.

У верхніх шарах атмосфери метеозонд за допомогою датчиків фіксує стан параметрів: тиск, температуру, вологість. По траєкторії руху зонда та його

швидкості на різній висоті оцінюють силу та напрямок вітру.

Радіомодуль передає дані на локатор, що знаходиться на аерологічній станції (з радіостанціями), звідки вони надходять на комп'ютер обробки інформації. Програма аналізує дані, і далі вони йдуть до метеослужби. Саме на основі отриманих з метеозонду показань синоптики складають прогнози погоди на кілька днів.

Метеозонди одноразові, на висоті 40-50 км куля лопається від надлишкового тиску. Пінопластова капсула падає на землю і повторно не використовується. Тому при виготовленні метеозонду основний упор робиться на його дешевизну конструкції, так як отримана інформація представляє набагато більшу цінність, чим сам прилад. Щоразу фахівці аерологічної станції збирають та запускають у небо новий метеозонд.

Незважаючи на регулярність збору інформації за допомогою метеозондування, складання довгострокових прогнозів на кілька днів, існує необхідність у проведенні короткострокового метеозондування в районі аеродрому, в межах від 2-х годин до 15 хв. Від цього безпосередньо залежить пропускна спроможність аеропорту.

В даний час у найбільш завантажених аеропортах пропускна спроможність становить 56–62 літаки на годину, залежно від пори року та доби. Довгострокові прогнози погоди у випадку погіршення метеоумов можуть впливати на пропускну спроможність аеропорту, отже, завдавати збитків.

Для забезпечення виконання короткострокових метеопрогнозів (від 15 хв до 2 годин) в районі аеропорту необхідно проводити регулярні, з інтервалом 15-30 хв. (відповідно до довгострокового прогнозу) виміри параметрів атмосфери, особливо на курси зльоту та посадки.

Для виконання цих вимог доцільно використати безпілотні літальні апарати (БПЛА) постачання апаратурою виміру параметрів атмосфери та радіомодулем, для передачі в режимі он-лайн.

Залежно від класу аеродрому, схеми заходу на посадку, різних рельєфних умов місцевості можливе застосування як БПЛА літакового типу, так і квадрокоптерів.

Наприкінці слід зазначити, що у зв'язку з щорічно зростаючим інтенсивністю цивільних авіап перевезень дозріла необхідність оновлення технології зняття метеорологічних параметрів, удосконалення та розробки нових метеорологічних приладів та швидкої адаптації до запитів та вимог цивільної авіації.

Безпека польотів у районі аеродрому (зліт, захід на посадку, посадка тощо) багато в чому визначається достовірністю метеорологічних спостережень, достовірністю метеопрогнозів та прогнозів небезпечних метеорологічних явищ (НМЯ) [1,2].

До найбільш небезпечних метеоявищ в районі аеродрому відносяться тумани, сильна турбулентність, вертикальні пориви та зрушення вітру, температурні інверсії та зледеніння.

Одним з основних параметрів атмосфери є температура повітря на висотах польоту повітряних суден (ПС). Метеопрогнози та прогнози ЗМЗ у районі аеродрому багато в чому ґрунтуються на знанні реального профілю температури.

Крім цього, температурні інверсії та наявність нададіабатичного профілю температури при земному шарі надає небезпечний вплив на зліт та посадку ПС.

Сучасні аеродромні метеорологічні системи та комплекси типу КРАМС-2 (рис.1.1.), АМПС-2000 мають досить досконалі характеристики і широким спектром можливостей для проведення метеорологічних вимірювань та спостережень з метою розробки метеопрогнозів погоди та прогнозів ЗМЗ у районі аеродрому. Проте, як показав аналіз, номенклатура обладнання цих систем не цілком відповідає реальним метеорологічним загрозам, особливо в умовах зростання інтенсивності повітряного руху [3,4].

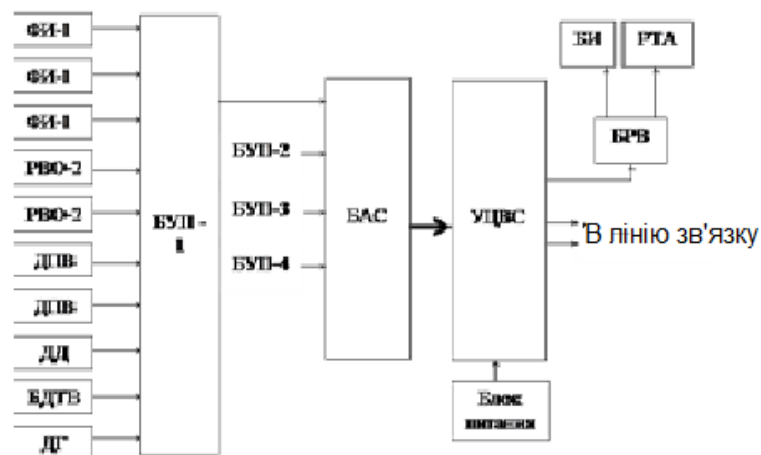


Рис.1.1. Блок-схема метеорологічного комплексу КРАМС -2

Сучасний етап розвитку аеродромних метеорологічних систем та комплекс і характеризується переходом до аеродромних мобільних метеосистем (АММС), які розміщуються на шасі автомобілів (КАМАЗ, Газель та ін.) або в мобільних модулях, легко доставляються до місця встановлення як автомобільним, і повітряним транспортом.

Аналізуючи завдання, які має вирішувати сучасна АММС, необхідно обґрунтовано вибрати склад системи, при цьому структурна та функціональна організації АММС має враховувати принципи побудови та функціонування метеорологічних систем, що входять до АММС, особливості їх інформаційного, функціонального та структурного виконання, а також їх програмного забезпечення. При цьому АММС повинна включати не тільки традиційні (вимірювачі температури та вологості повітря, швидкості та напрямки вітру, атмосферного тиску, вимірники видимості та ін.) засоби метеорологічних спостережень та вимірювань, але також і сучасні метеорологічні системи, такі як метеорологічні радіолокаційні системи (РЛС) X-діапазону, вітрові лідори, вітрові та температурні профілемери. Крім цього, до складу АММС доцільно включити безпілотний метеорозвідник (БМР), що забезпечує вимірювання основних параметрів атмосфери (температури, вологості та параметрів вітру) на висотах до 3000 м.

До мінімального складу автоматичної метеорологічної вимірювальної системи(АМВС) повинні входити:

- датчик атмосферного тиску;
- датчик швидкості вітру;
- датчик напрямку вітру;
- датчик температури та вологості повітря;
- датчик атмосферних опадів;
- датчик видимості;
- датчик яскравості фону;
- датчик висоти нижньої межі хмар.

В АМВС мають бути реалізовані три рівні обробки метеоінформації:

- первинний (алгоритми первинної обробки метеорологічної інформації);

- вторинний (алгоритми комплексної обробки метеорологічної інформації);
- третинний (алгоритми прогнозування метеорологічних параметрів атмосфери та ОМЯ).

Первинний рівень обробки метеоінформації реалізується в кожній із систем, що входять до АММС. Вторинний рівень обробки метеоінформації є найважливішим для вирішення задач прогнозування метеорологічних параметрів атмосфери та НМЯ. При цьому головною перевагою АММС є те, що забезпечується можливість максимально повного використання наявної інформаційної надмірності простані атмосфери та НМЯ.

Комплексне оброблення інформації (КОІ) про профіль температури потрібне для вирішення наступних основних завдань:

- визначення/прогнозування температурних інверсій та наявності нададіабатичного профілю температури в приземному шарі;
- прогнозування зон обледеніння;
- прогнозування туманів.

Достовірну інформацію про профіль температури можна отримати, використовуючи алгоритми КОІ про профіль температури на основі інформації від температурного профілемера (типу МТР-5) та БМР. У БМР реалізовано контактний метод виміру температури, а в МТР-5 – дистанційний, тому слід очікувати на вигаш від комплексування цих вимірників у задачах прогнозу профілю температури та ЗМЗ.

Синтез оптимальних алгоритмів КОІ щодо профілю температури з використанням вимірних значень на виході температурного профілемера та БМР передбачає опис статистичної динаміки зміни температури в горизонтальній та вертикальній поверхні. Математична модель динаміки зміни профілю температури може бути отримана на підставі статистичної обробки вимірних профілів температури за досить тривалий період. Крім цього, слід

враховувати географічне розташування аеродрому. Зміна температури з висотою суттєво, причому вертикальний градієнт температури може досягати

чималих значень. У зв'язку з цим при синтезі алгоритмів КОІ слід розглядати вертикальний профіль температури.

На основі модельних та практичних експериментів показано, що бездротовий канал зв'язку LoRaWaN здатний об'єднати весь потік даних, що надходять з віддалених метеорологічних датчиків, які використовують різні протоколи взаємодії один з одним. У ході виконання експерименту отримано позитивні результати, що доводять можливість організації таких каналів зв'язку для метеозабезпечення аеродромів. Також наводиться структурна схема організації каналу зв'язку. При цьому не потрібне прокладання кабельних комунікацій зв'язку, коли вартість такого виду робіт, включаючи погодження, часто значно перевищує вартість самого метеорологічного обладнання.

## **ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1**

1. Безпека польотів у районі аеродрому (зліт, захід на посадку, посадка тощо) у значній мірі визначається достовірністю метеорологічних спостережень, достовірністю метеопрогнозів та прогнозів небезпечних метеорологічних явищ.

2. У зв'язку з щорічно зростаючим інтенсивністю цивільних авіаперевезень дозріла необхідність оновлення технології зняття метеорологічних параметрів, удосконалення та розробки нових метеорологічних приладів та швидкої адаптації до запитів та вимог цивільної авіації.

3. Зростання вимог до безпеки польотів вимагає удосконалення системи збору, обробки та використання метеорологічної інформації.

4. Зростання кількості метеорологічних датчиків підвищує достовірність інформації про метеорологічні умови, але вимагає сучасних рішень передавання та обробка такої інформації від датчиків.

5. Ефективним рішенням буде використання мережі передачі метеоданих на основі технології LoRAWAN.

## РОЗДІЛ 2

# ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ ТА ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ LoRaWAN

### 2.1. Основи технології LoRaWAN

У березні місяці 2015 року Semtech Corporation зробили заяву про нове та важливе досягнення у сфері технологій бездротової передачі даних. Вони презентували мережевий енергоефективний протокол LoRaWAN (Long Range Wide Area Networks). Цей протокол забезпечує масу переваг на відміну від Wi-Fi та стільниковими мережами, завдяки застосуванню технологій M2M (міжмашинних комунікацій). На ринку бездротового зв'язку технологія викликала величезний інтерес у виробників та вендорів. Для її підтримки, розвитку та стандартизації створено альянс LoRa (LoRa Alliance). Нині альянс розвивається, кількість його членів постійно зростає. За останні три роки альянс збільшився на понад 500 компаній. Членами альянсу стали компанії з виробництва пристроїв, технологій та різноманітних сервісів. До складу альянсу увійшли всесвітньо відомі виробники електроніки: Cisco, IBM, Kerlink, IMST, Semtech, Microchip Technology, а також провідні телекомунікаційні оператори (Bouygues Telecom, KPN, SingTel, Proximus, Swisscom). Було сформульовано основне завдання альянсу: об'єднати апаратне та програмне забезпечення на базі стандарту LoRaWAN. Це дозволить операторам зв'язку надавати послуги Інтернету речам комерційним організаціям та приватним фірмам. Використання цього стандарту дасть можливість значною мірою спростити з'єднання зростаючої кількості пристроїв. Технологія LoRa відноситься до класу LPWAN дає можливість проникати сигналу углиб приміщень у місті, а також стабільно забезпечить покриття зони у сільській місцевості. Все це дасть можливість реалізувати на базі LoRa розробляти та вдосконалювати різноманітні програми для Розумного міста. Semtech Corporation – один із засновників LoRa Alliance, а також виробник своїх пристроїв LoRa та бездротової радіочастотної технології LoRa та мереж LoRaWAN. LoRa-технологія та метод модуляції.



LoRaWAN — це відкритий протокол для мереж, які мають високу ємність (близько 1 мільйона пристроїв), низьке енергоспоживання та великий радіус дії (до 15 км на відкритій місцевості). Цей протокол забезпечує зв'язок між вузлами мережі та використовує особливі методи шифрування, що забезпечує надійність та безпеку системи. Втіленням сценарію розвитку Інтернету речей є концепція розвитку Розумного міста. Що ж таке Розумне місто? Це амбітна містобудівна концепція, що передбачає оптимізацію та раціоналізацію управління усіма міськими системами. Основним об'єктом Розумного міста є розумна ЖКГ. Усі елементи цього комплексу пов'язані: це теплопостачання, газопостачання, електропостачання, бази техобслуговування і т.д. Контроль за всіма системами міста стає можливим завдяки застосуванню нових технологій. Саме технологія LoRa допоможе вирішити безліч завдань з обслуговування Розумного міста. Далі детально подано протокол LoRaWAN. Продемонстровано його можливості та переваги у застосуванні в Розумному місті.

## 2.2. Ключові особливості застосування технології LORA

Розробляючи мережі бездротових датчиків, велике значення надається максимальній дальності радіозв'язку, щоб уникнути додаткових ретрансляторів сигналу. Це скоротить витрати та спростить топологію. Тому основним параметром, що характеризує ефективність системи, є бюджет каналу зв'язку. Він складається з чутливості приймача та потужності передавача. Висока чутливість (-148 дБм) – одна з найважливіших характеристик пристроїв LORA, яка досягається завдяки LORA-модуляції (табл. 2.1).

Таблиця 2.1

Відношення сигнал/шум для різних методів модуляції

Тип модуляції	Відношення сигнал/шум, дБ
LoRa SF=12	-20
LoRa SF=10	-15
GMSK	9

При такому способі модуляції використовується технологія розширення спектру, при цьому дані кодуються широкосмуговими ЛЧМ-імпульсами з частотою, що збільшується або зменшується на певному часовому інтервалі. Це рішення дає приймачеві стійкість до відхилень частоти від номінального значення і значно спрощує вимоги до тактового генератора. Якщо врахувати максимально дозволена вихідну потужність трансіверів, бюджет каналу буде 168 дБ, і це дозволить утворити лінію зв'язку на великих відстанях. Це становитиме до 15 км за межею міста і близько 5 км у щільно забудованому міському середовищі. При використанні інтелектуальних приладів обліку з іншим видом модуляції дальність передачі становить близько 2 км. Передавачі LORA з великим радіусом дії забезпечують простоту розгортання мережі. Вони використовують топологію «зірка», і ця найпростіша архітектура не вимагає передачі через ретранслятори. У такій мережі можна точно розрахувати тривалість роботи всіх вузлів під час автономної роботи. Це робить її універсальною для застосування у різних приладах обліку. Також трансівери кінцевих вузлів мають дуже низьке енергоспоживання, що робить їх унікальними для пристроїв із батарейним живленням. При розгортанні такої мережі з величезною кількістю вузлів важлива також сумісність. Розгортання мережі має низьку вартість, тому що відсутні ретранслятори, використовується неліцензований діапазон, доступний безкоштовний протокол. Це є вирішальним чинником використання систем для користувачів.

Таким чином, ключовими рисами технології LoRa є:

- 1) висока чутливість приймача;
- 2) низьке енергоспоживання;
- 3) не велика потужність передавача(порядка 25...50 мВт);
- 4) попереджувальна система корекції помилок за умов імпульсних перешкод.

## 2.3. Принцип роботи мережі LoRaWAN

Стандарт LoRaWAN на ринку мережевих програм відносно недавно, але вже є безліч прикладів його застосування. На рис. 2.1 показано, як станція LoRa здійснює збір даних з кінцевих вузлів-датчиків. Ці вузли у вигляді шлюзів утворюють невидимі мости, вони з'єднуються з центральним сервером. Кінцеві вузли належать абонентам, а центральний сервер та шлюзи контролює оператор.

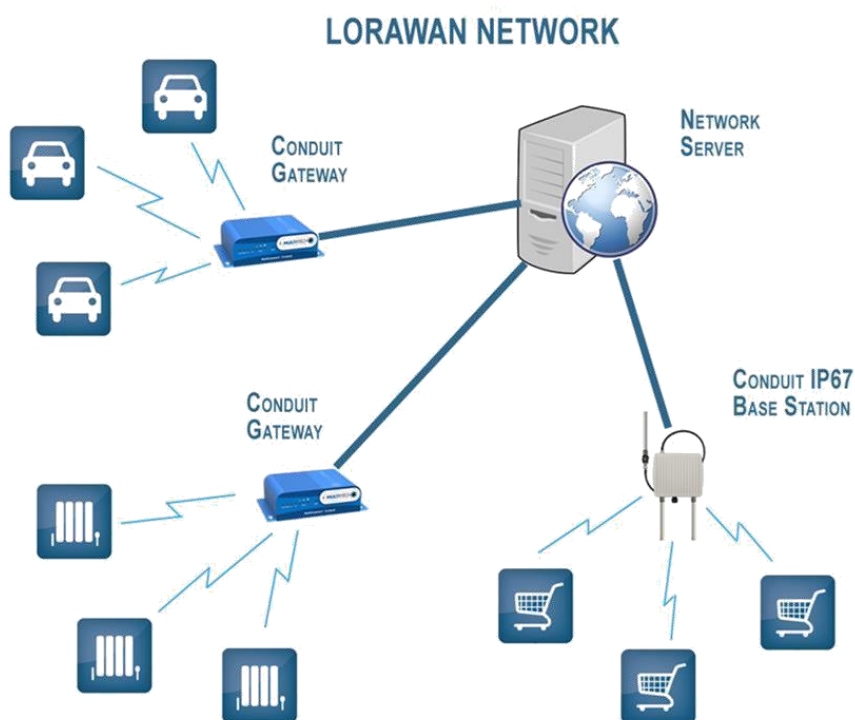


Рис. 2.1. Типова бездротова мережа LoRaWAN

LoRaWAN – це глобальна мережа. Тому головне завдання розробників – забезпечити захист даних користувачів. Для цього проводиться кодування на кількох рівнях: на мережному рівні, наскрізна безпека на рівні додатків. Типова бездротова мережа LoRaWAN є сукупністю шлюзів (gateways), що пересилають повідомлення між кінцевими пристроями (end-devices) і центральним сервером (Network Server, NS), і характеризується «зоряною» топологією «star-of-stars». Шлюзи іноді називають концентраторами та базовими станціями, а кінцеві пристрої називаються датчиками. Зв'язок шлюзів і центральним сервером

відбувається через стандартні IP-з'єднання та між шлюзами та кінцевими пристроями через бездротові з'єднання. Весь процес призначений для низькошвидкісної бездротової передачі в неліцензійних діапазонах частот на великі відстані. Зв'язок є двостороннім, але основний обсяг даних передається від кінцевих пристроїв-датчиків до шлюзів.

У мережі LoRaWAN передбачено використання трьох класів пристроїв. Вони використовуються для вирішення різних завдань залежно від сфери застосування.

1. Двонаправлені кінцеві пристрої "класу А" (Bi-directional enddevices, Class A). Ці кінцеві пристрої застосовуються, коли потрібна мінімальна споживана потужність передачі даних на сервер.

2. Двонаправлені кінцеві пристрої класу Б (Bi-directional enddevices, Class B). Відмінна риса від класу А – додаткове вікно прийому. Його пристрій відкривається за розкладом. Це означає, що передача даних із сервера здійснюватиметься лише тоді, коли кінцевий пристрій вийде на зв'язок. Складання розкладу для кінцевого пристрою здійснить синхронізацію сигналу від шлюзу.

3. Двонаправлені кінцеві пристрої класу С (Bi-directional enddevices, Class C). Ці пристрої мають максимальне вікно прийому. Вони призначені для отримання великого обсягу даних та мають майже безперервне вікно прийому даних. Таким чином, один шлюз мережі обслуговує близько 5 тисяч кінцевих пристроїв.

## **2.4. Переваги мереж LoRaWAN**

Мережі LoRaWAN працюють у діапазоні частот, які не потребують ліцензування. Вони мають високу завадостійкість. Термін служби акумулятора – близько 10 років. Одна базова станція обслуговує десятки тисяч пристроїв. У мережі багато переваг.

Термін служби акумулятора. Обмін даними відбувається асинхронно і лише тоді, коли є необхідність. У звичайних мережах пристрої "прокидаються",

синхронізуються з мережею, перевіряють повідомлення. Весь процес призводить до витрати електроенергії та зносу акумулятора. Термін служби батареї у 3-5 разів вищий, ніж в інших технологіях.

Місткість мережі. Для того щоб забезпечити оптимальну роботу мережі шлюз повинен мати дуже високу пропускну здатність або отримувати інформацію з величезної кількості кінцевих пристроїв. Велика ємність мережі LoRaWAN досягається за рахунок використання самоорганізації швидкості передачі даних, а також за рахунок використання багатоканального передавача в шлюзі. Це забезпечує одночасне отримання повідомлень на кількох каналах. Шлюзи дають можливість одним каналом одночасно отримувати інформацію з пристроїв з різною швидкістю передачі даних. Адаптація швидкості передачі даних також збільшує час роботи акумулятора.

Мережі LoRaWAN розвертаються із мінімальною кількістю інфраструктури. При збільшенні кількості пристроїв у мережі можлива зміна швидкості передачі даних, а також збільшення кількості шлюзів.

Стійкість до радіоперешкод. Мережа має велику проникаючу здатність радіосигналу. Вона забезпечить стабільний зв'язок, де іншим технологіям не впоратися.

## **2.5. Архітектура мереж LoRaWAN**

Термін «топологія мережі» означає спосіб підключення пристроїв до мережі. Інакше її називають структурою чи конфігурацією мережі. Вона визначає місця розміщення пристроїв, спосіб прокладання кабелів, обладнання. На етапі використовують кілька топологій. Найчастіше «шина», «кільце», «зірка». В архітектурі мереж LoRaWAN використовується топологія "зірка".

Це топологія для локальної мережі, в якій кожен пристрій підключено до центрального пристрою. При побудові мереж LoRaWAN ця топологія стала основною. Це сталося тому що дана топологія має багато переваг: якщо одна робоча станція виходить з ладу, то це не позначиться на роботі мережі, прекрасна масштабованість, досить легко вбудовується нове обладнання.

У LoRaWAN-мережі шлюзи передають дані, отримані з кінцевих пристроїв на центральний сервер (мережевий сервер).

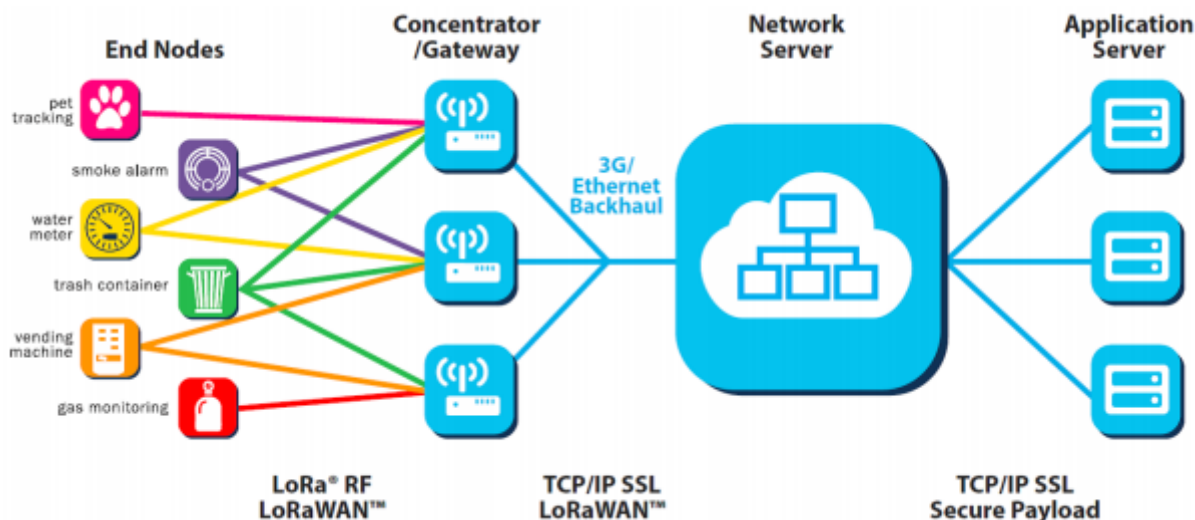


Рис. 2.2. Архітектура мереж LoRaWAN

Усі дані зашифровані. Кінцеві пристрої містять набір датчиків. Далі дані йдуть на сервер додатків, а звіди до кінцевого користувача. Кінцеві пристрої виконують функції вимірювання, керування та контролю.

Шлюз LoRaWAN або базова станція приймає дані від кінцевих пристроїв радіоканалу. Декілька таких базових станцій забезпечать велику зону покриття, а також передачу даних між сервером і кінцевими вузлами. Сервер мережі потрібний для керування всією мережею. Він задає розклад, дозволяє прийом, зберігання та обробку даних, займається адаптацією швидкості. Сервер програм зайнятий збором даних з кінцевих вузлів і веде віддалений контроль за їх роботою.

## 2.6. Обладнання, що використовується для побудови мережі

З розвитком технологій Інтернету речей ми все більше стикаємося з необхідністю впровадження найбільш ефективної бездротової мережі. Існуючі технології що неспроможні забезпечити зростаючі потреби. Мета такої

технології – надання якісного зв'язку з передачі інформації. Важливим моментом є вибір

обладнання. Чим правильніший підбір, тим надійніше функціонування мережі. Також важливий момент полягає в тому, що потрібно передбачити подальшу модернізацію. Цей напрямок дуже популярний серед виробників технологій Інтернету речей. виробництва обладнання LoRaWAN є компанія Орion Система. Компанія Ринок пропозицій великий, про що вже говорилося вище. У нашій країні представником виробляє радіомодулі, базові станції, а також розробляє програмне забезпечення Orion Network Server. У роботі представлено обладнання, вироблене цією компанією, що вже зарекомендувало себе. Також представлене обладнання, виготовлене іншими виробниками. Базові станції виробництва ORION призначається для передачі різних даних по каналу радіозв'язку від датчиків, приладів обліку, вуличного та домашнього освітлення, приладів навігації, систем сигналізацій за протоколом LoRaWAN. Інформація надсилається на центральний сервер. За допомогою настроєної базової станції дуже легко наростити мережу. Потрібно просто налаштовану базову станцію підключити через інтернет. Станція має займати домінуючу висоту. Якщо ще одна базова станція буде розташована вище, станція простоюватиме і займатиме місце в ефірі. Отже, встановлюючи базові станції, необхідно розрахувати їх кількість на територію.



Рис. 2.3. Базова станція ORION gateway.

Модулі.

Модуль- це інформаційні ресурси, підключені до програми. Він поєднує пов'язані ресурси і може містити опис змінних та підпрограм. Розробники для

збільшення дальності каналу зв'язку, а також зменшення вартості виробу пропонують модулі з підтримкою технології LoRa™ на основі вдосконаленого методу ЛЧМ-модуляції. Застосування модулів дає такі переваги: зниження критичності до розладу за частотою та підвищення чутливості приймача.

У режимі прийому модулі характеризуються низьким споживанням енергії.

Сенсори та датчики.

У сучасному пристрої датчики є невід'ємною частиною. З їх допомогою регулюються, управляються та вимірюються всі процеси. Датчики перетворюють будь-яку величину на потрібний сигнал. Величина може визначати тиск, рух, швидкість, струм, витрата та ін. Вона перетворюється на оптичний, електричний або інший сигнал, який зручний для вимірювання, перетворення та зберігання інформації. Тобто. датчик- це пристрій , яке перетворює вхідний вплив фізичної величини сигнал, який зручний для подальшого використання та обробки.[12].



Датчик паркування

Датчик передачі тиску

Рис. 2.4. Різні датчики

Далі на рис. 2.4 представлені датчики, які використовують обслуговування мереж LoRaWAN.

Сенсори LoRaWAN мають можливість передачі інформації на великі відстані. Дальність у сприятливому середовищі сягає 100 кілометрів. Якщо це сільська місцевість або невелике місто, то до 15 км, а в сучасному мегеполісі 2-3 км. Швидкість обміну даними від 300 біт/с до 100 Кбіт/с. До того ж вони споживають дуже мало енергії і це дає їм безперебійно працювати до 10 років,



запитуючи від 1 акумулятора. Сенсори є пристрої для вимірювання фізичного чи хімічного параметра. Вони перетворюють потрібний параметр на зручний для використання сигнал, частіше електричний.



Рис. 2.5. GPS трекер та принцип його роботи

На рис. 2.5 представлений мініатюрний GPS-трекер. Цей пристрій займає особливу увагу серед способів отримання інформації. Прилад використовується у різних сферах. GPS трекер (маячок, мітка) легко визначить місцезнаходження та передасть координати на сайт сервера. За допомогою повідомлення на ваш телефон або програми для смартфона можна без проблем дізнатися розташування об'єкта, якщо на ньому встановлено маячок. Трекер може виконувати охоронну функцію. За його командою можна заблокувати двигун автомобіля у разі спроби угону.

За сигналом із супутника пристрій визначить місце розташування об'єкта, передасть географічні координати з точністю до 10 метрів.

Пристрої для тестування мереж LoRaWAN™. Тестери здійснюють перевірку параметрів мереж. Як правило, у них вбудований акумулятор. Тому

вони можуть працювати без підживлення кілька годин. Тестер відправляє по мережі сигнал і мережа відповідає скільки базових станцій прийняло це сигнал, а також звітує про якість сигналу. З його допомогою оптимально розміщуються

базові станції при розгортанні мережі, здійснюється їх налаштування. Тестер швидко аналізує дані про роботу мережі, радіопакети в мережах, роботу датчиків. Вся інформація відображається на екрані. Тестери можуть працювати в умовах дуже високих і вкрай низьких температур.

Нижче наведено тестер з літій-іонним акумулятором. Час його автономної роботи близько 20-ї години. У нижній частині пристрою є USB роз'єм, через який підключається зарядний пристрій.



Рис. 2.6. Тестер LoRaWAN

## 2.7. Сфери застосування LoRaWAN

Вже зазначалося раніше, що мережі LoRaWAN вигідно виглядають на тлі інших мереж. Їхня перевага: великий радіус дії та тривалий термін роботи вузлів без обслуговування. Застосування таких економічних мереж робить їх досить привабливими у багатьох сферах життя. На сучасному етапі LPWAN-мережі, що базуються на LoRa, стали досить поширеними у багатьох країнах

світу. Їх використовують уже більш як у 40 країнах. Спектр застосування LoRaWAN досить великий. Найперспективнішим напрямком вважається «Розумне місто». З огляду на особливості технології, простір для застосування неосяжний. Урбанізація йде швидкими темпами і проблеми міст збільшуються. Застосування технології в системі ЖКГ є найбільш затребуваним і перспективним. Бездротові інтелектуальні лічильники допоможуть організувати облік та допоможуть заощадити ресурси. З їх допомогою можна організувати моніторинг витоків води, газу, електроенергії, а також контролювати їхню витрату. За допомогою мереж LoRaWAN можна керувати системою «Розумний дім». За допомогою програми на смартфоні власники та екстрені служби будуть моментально повідомлені про задимлення, пожежі та інші екстрені ситуації. Крім цього, технологія дозволяє подбати і про комфорт людей. Розумний транспорт дозволить заощадити масу часу, датчики встановлять сприятливу температуру повітря та вологість приміщень. LoRaWAN попередить про стан погоди та атмосферний тиск, камери відеоспостереження зроблять життя городян безпечнішим. Перспективно використовувати такі мережі у промисловості. Мережі LoRaWAN можуть працювати в ізольованих умовах, тому вони можуть бути розгорнуті у віддалених районах, в морі. LoRaWAN – супутниковий зв'язок допоможе стежити за станом робочих систем та механізмів підприємства. Це допоможе уникнути простоїв через поломки та матеріальні втрати. У сільському господарстві датчики відстежують стан ґрунту, вологість повітря та ґрунту, кількість застосовуваних добрив. Система сама займеться зрошенням ділянки, що висихає, причому уникне і перезволоження, що значно заощадить витрату води. Багато перспективних проєктів ще тільки чекають свого впровадження. Сфери застосування не обмежуються переліченими. Наразі йде впровадження протоколу в медицині, транспорті, управління відходами, управління вуличним освітленням та в багатьох інших сферах життя

## 2.8. Стан та перспективи розвитку протоколу мережі LoRaWAN в Україні

На сьогоднішній день в Україні активно йде формування ринку Інтернету речей. У всьому світі цей ринок буде великою статтею доходу у бюджеті країн. Експерти прогнозують, що до 2025 року в Україні кількість пристроїв, підключених до Інтернету, досягне 100 мільйонів штук. Для України це оптимальна технологія створення Розумних міст. LoRa є доступною, відкритою технологією. На ринку виробників мережного обладнання чимало економічних, просунутих пропозицій. Понад 80 операторів зв'язку віддали їй свою перевагу. Впровадження даної технології не вимагатиме великих інвестицій, виділення та перерозподілу додаткових частот, перебудови мережі мобільного зв'язку. Усі провідні виробники підтримують цей тренд, так що нестачі обладнання чи програмного забезпечення немає. Для нашої країни головною проблемою є слабка цифровізація муніципального господарства. Хоча останнім часом цій проблемі приділяють більше уваги. Для вирішення цього завдання буде запущено проект хмарного відеоспостереження. Проект передбачає розгортання мережі із підключенням 19 тисяч камер. Це дозволить окремим людям отримати доступ до певних камер через мобільний додаток, а також правоохоронним органам для забезпечення безпеки міст. Далі планується використання відеоаналітики. Це програмна платформа розпізнаватиме обличчя в автоматичному режимі. Таке рішення можна використовувати у освіті, медицині та інших областях [15].

Перспективним є використання технології для побудови мережі метеозабезпечення польотів цивільної авіації.

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

1. У розділі розглянуто принципи побудови та функціонування мережі передавання даних за технологією LoRaWAN з метою проектування на її основі мережі передачі метеоданих аеропорту.

2. Проведений аналіз показує переваги технології LoRaWAN перед іншими технологіями передавання даних, що виражається в її перевагах:

- оперативність розгортання;
- висока чутливість приймача;
- низьке енергоспоживання;
- не велика потужність передавача(порядка 25...50 мВт);

3. Наявність відпрацьованого обладнання різних розробників дає змогу використати технологію для побудови мережі передавання даних в багатьох областях використання, в тому числі в мережах метеозабезпечення аеропортів.

## РОЗДІЛ 3

### ОСОБЛИВОСТІ ТЕХНОЛОГІЇ LORA

#### 3.1. Обґрунтування ефективності технології LoRA

Технології бездротового зв'язку за пропускну здатністю та дальністю передачі даних значно відрізняються одна від одної.

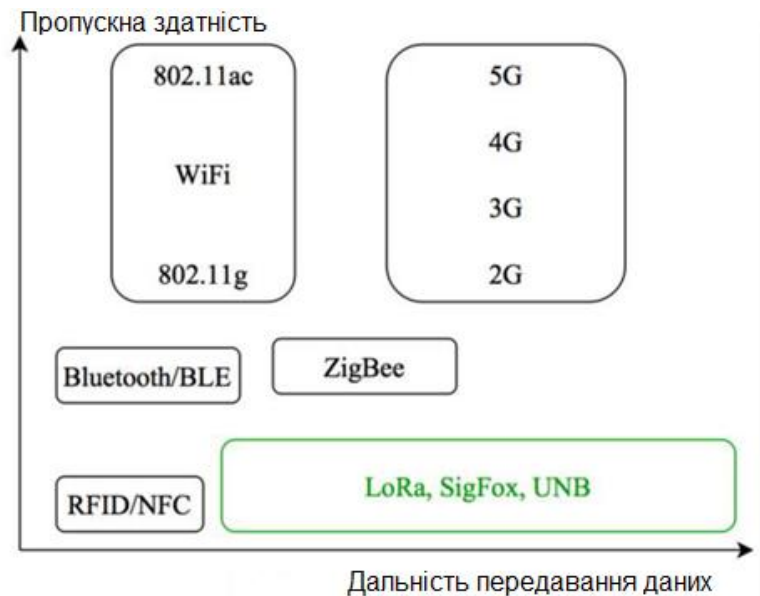


Рис. 3.1. Порівняння технологій безпроводового зв'язку

Малу пропускну здатність мають технології RFID і NFC. Вони призначені для роботи на дуже близьких відстанях та передають мінімальну кількість даних. Технології ґрунтуються на застосуванні радіочастотної ідентифікації. В основному застосовується в області контролю доступу та як спосіб безконтактних платежів через мобільні пристрої. Діапазон читання радіотега становить 10 метрів та швидкість передачі даних близько 400 кбіт/сек.

Технології Bluetooth і BTLE (Bluetooth Low Energy - Bluetooth з низьким споживанням енергії) мають вже помітно більшу дальність (до 20 метрів пристроїв класу A) і пропускну здатність (до 1Мбіт/с).

Ще вище за шкалою пропускну спроможності перебувати технологія Wi-Fi.

Принцип роботи бездротової мережі побудований на використанні радіохвиль, а сам обмін даними багато в чому нагадує переговори з використанням радіозв'язку. Пристрої Wi-Fi використовують частоти 2,4 ГГц або 5 ГГц, які суттєво вищі, що дозволяє передавати більше даних.

Технології LoRa, SigFox (дуже схожа технологія з LoRa) та інші UNB технології (Ultra Narrow Band – понад вузькі смуги пропускання) мають екстремально велику дальність – до кількох десятків кілометрів, але пропускна здатність у них достатня мала.

Між далекобійними технологіями типу LoRa та високошвидкісною технологією Wi-Fi знаходяться всі технології мобільного зв'язку, які мають середню дальність та пристойну пропускну здатність.

Всі існуючі на сьогоднішній день технології зв'язку надають певний баланс із трьох бажаних властивостей:

- велика дальність зв'язку, висока пропускна здатність та низьке енергоспоживання. Мобільні телефони досягають хорошу дальність та швидкість передачі даних, але споживають значну енергію;
- LoRa має значну дальність і низьке енергоспоживання, але вона має малу пропускну здатність;
- Wi-Fi має велику пропускну здатність і споживає трохи енергії, але дальність у неї через це невелика.

### **3.2. Поширення радіохвиль**

Максимально можлива зміна потужності сигналу для успішного приймання приймачем називається енергетичним потенціалом лінії зв'язку (Link Budget). Це величина, що визначає скільки енергії є у сигналу для подолання деякого відстань або проникнення крізь перешкоди на шляху поширення радіохвиль від передавача до приймача.

Розглянемо процес поширення радіохвиль у просторі. Втрати по дорозі поширення (FSPL - Free Space Path Loss) визначається формулою (3.1).

$$FSPL = (4\pi d\lambda)^{-2} = (4\pi d f c)^{-2}, \quad (3.1)$$

де  $d$ - відстань, м,

$f$ - частота, Гц.

Основний висновок, який можна зробити з даної формули, те, що втрати на шляху розповсюдження змінюються в залежності від відстані між передавачем і приймачем, причому залежність - квадратична.

Формула (3.1) схожа з формулою знаходження площі поверхні сфери, оскільки сигнал поширюється сферично.

На рис. 3.2 видно, що густина сигналу, що проходить через фіксовану площу  $A$ , зменшується за квадратичною залежністю від відстані. На відстані  $r$  – площа поверхні даної частини сфери дорівнює  $A$ , але на відстані  $3r$  – площа стає рівною  $9A$ , через що щільність сигналу зменшується в 9 разів.

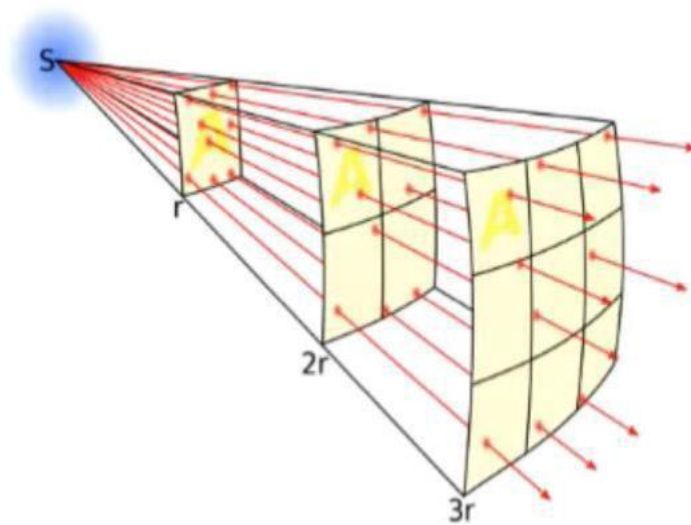


Рис. 3.2. Принцип розсіювання сигналу у постійній площі зі збільшенням відстані

У формулі (3.1) втрати шляху поширення залежать як від відстані, а ще й від частоти. Ця залежність лише опосередковано пов'язана із частотою сигналу. Зі збільшенням частоти, прилад змушений використовувати антену меншого розміру, тому що довжина антени залежить від довжини хвилі, яка обернена



пропорційна частоті. Але зменшуючи розмір антени, зменшується площа приймача, яка умовно позначена як на рис. 3.2.

Формула (3.1) зручна для асоціації геометричної форми хвилі з математичним уявленням, але для розрахунку втрат на шляху поширення чаші використовують її логарифмічну версію (dB – децибел), зважаючи на великі значення, одержувані в мега- та гігагерцевих діапазонах.

$$FSPL_{dB} = 20\log_{10}(d) + 20\log_{10}(f) - 147,55$$

1. подвоєння відстані призводить до зменшення потужності 6dB.
2. різниця у втратах на шляху розповсюдження між 868МГц (LoRa) та 2.4ГГц (Wi-Fi) становить близько 9dB. Іншими словами - LoRa, використовуючи частоту 868 МГц, може покрити в півтора рази більше відстані, ніж WiFi, що використовує 2.4ГГц.

### 3.3. Чутливість приймача

Чутливість приймача (Sensitivity) визначається за такою формулою (3.2).

$$Sensitivity(dBm) = -174 + 10\log_{10}(BW) + NF + SNR, \quad (3.2)$$

де BW (Bandwidth) – ширина смуги пропускання,

NF (Noise floor) – тепловий шум (від руху електронів у схемі), SNR (Signal to Noise Ratio) – відношення сигнал/шум.

Важливо, що чутливість залежить від десяткового логарифму ширини смуги пропускання. Це означає, що приймач технології з великою шириною смуги пропускання буде менш чутливим.

Приймачі LoRa завдяки методам модуляції та обробки сигналу, що використовуються, мають високу чутливість до -137 дБм. Зважаючи на малу ширину смуги пропускання, є дуже чутливими і здатні розпізнавати корисний сигнал, навіть коли той перебувати на рівні нижче рівня шуму.

### 3.4. Енергетичний потенціал лінії зв'язку для технології LORA

Розглянемо приклад системи, побудовану на основі LoRa, з наступними параметрами:

Потужність передавача (TX Power): 14dBm.

Ширина смуги пропускання (Bandwidth): 125кГц.

У логарифмічному варіанті:  $10 \cdot \log_{10}(125000) = 51\text{dB}$ .

Режим SF12 дозволяє розпізнати сигнал, який знаходиться 20dB під рівнем шуму, тому:

SNR (відношення сигналу до шуму): - 20 dB.

Коефіцієнт шуму (Noise Figure): 6dB (у базовій станції він може бути і нижче).

Використовуючи формулу (3.2) отримуємо:

Чутливість приймача:

$$-174 + 51 + 6 - 20 = -137 \text{ dBm}$$

Оскільки енергетичний потенціал дорівнює сумі потужності передавача та чутливості приймача отримуємо:

$$\text{Енергетичний потенціал: } 14 + 137 = 151 \text{ dB}$$

Згідно з формулою (3.1) – максимальна можлива відстань передачі при частоті 868 МГц та втратах на шляху розповсюдження рівних 150dB становить 80км. Це означає, що в умовах, наближених до ідеальних, де немає шумів і перешкод LoRa передавач може передавати дані на відстань до 80 км! На практиці такі відстані для технології неможливі через те, що на шляху від передавача до приймача завжди є перешкоди та об'єкти, які відображають, поглинають та заломлюють сигнал.

Радіолінії в мережі LoRa забезпечують енергетичний бюджет для наведених вище швидкостей передачі даних із рівнем понад 160 дБ.

Споживаний струм абонентських пристроїв мережі LoRa становить 40 мА при передачі сигналу і 10 мА при прийомі, при напругі живлення 3В. Енергоспоживання визначає тривалість роботи цих пристроїв без заміни

батареї. LoRa має перевагу над іншими технологіями у сегменті передачі від 1 байта до 10 кбайт на годину.

Розробка та впровадження технології LoRa для вузькосмугової передачі даних з розширеною зоною покриття істотно посилила конкуренцію на ринку бездротових технологій IoT для стільникових технологій, що використовують смуги частот, що ліцензуються, і вимагають використання SIM-карт.

В даний час LoRa має ряд переваг по технічним параметрів, використання неліцензійного спектра, простота регулювання, відсутність необхідності отримання ліцензії на надання послуг передачі даних.

### 3.5. Місткість мережі LoRa

Час передачі пакетів через радіоінтерфейс.

Кожен пакет, що передається по мережі LoRaWAN, включає преамбулу і блок даних фізичного рівня. Кількість символів у преамбулі є конфігурованим в діапазоні 6..65535 Кількість символів у блоці даних фізичного рівня визначається наступною формулою:

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

де  $PL = 12 + FRM$  – кількість байт корисних даних у блоці фізичного рівня (PHYPayload);

$FRM$  – кількість байт корисних даних на рівні програми (FRMPayload);

$SF$  – коефіцієнт розширення спектру;

$CRC = 1$ , коли передача поля CRC блоку корисного навантаження включена та  $CRC=0$  – коли вимкнена;

$H=0$ , коли передача заголовка (PHDR + PHDR\_CRC) включена та  $H=1$  – коли заголовок відсутня;

DE=1, коли оптимізація для низьких швидкостей передачі включена і DE=0 – коли вимкнена (для SF=11 та SF=12 оптимізація швидкостей передачі має бути включена);

CR=1..4 – швидкість коду;

ceil – операція округлення до найближчого цілого числа.

Тривалість передачі преамбули.

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

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

Тривалість передачі блоку даних фізичного рівня:

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

Тривалість передачі всього пакету через мережу LoRaWAN:

$$T_{packet} = T_{preamble} + T_{payload}$$

$$T_{sym} = \frac{2^{SF}}{W}$$

де  $T_{pr}$  - тривалість передачі одного символу – тривалість передачі одного символу (див. табл.3.1),

W – смуга одного радіоканалу (125кГц).

Таблиця 3.1

### Результати розрахунку

SF	7	8	8	10	11	12
W, кГц	125	125	125	125	125	125
Tsym, мс	1,024	2,048	4,096	8,192	16,384	32,768

Розрахунок ємності мережі.

Всі LoRaWAN пристрої класу "A", включаючи кінцеві пристрої, а також LoRa-шлюз, використовують довільний (не синхронізований) доступдо

загального середовища передачі. У цьому тимчасові інтервали відправлення пакетів плануються кінцевими пристроями з урахуванням потреб. Даний механізм доступу являє собою протокол типу "чиста" "ALOHA" (pure ALOHA). Оцінка пропускної спроможності системи "чиста ALOHA" визначається за наступними припущеннями:

- дані користувача, призначені для передачі, надходять на термінали випадково, утворюючи пуассонівський потік;
- відкинуті через помилки передачі пакети передаються повторно, утворюючи також пуассонівський потік;
- всі пакети даних мають однакову довжину та передаються однакою час;
- у мережі знаходиться нескінченна кількість віддалених терміналів (при цьому якщо якийсь термінал вже передає дані, це ніяк не впливає на можливість передачі даних іншими терміналами).

В цьому випадку:

- ймовірність того, що за час передачі одного пакета  $T$  надійде ще  $k$  пакетів від усіх терміналів мережі, визначається формулою Пуассона:

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

де  $G$  - інтенсивність надходження пакетів (або середня кількість повідомлень для передачі, що з'явилося на всіх терміналах мережі за час  $T$ );

- колізія не виникне, якщо на інтервалі передачі повідомлення, а також на одному попередньому інтервалі не з'являться пакети для передачі від інших кінцевих пристроїв мережі ( $k=0$ ). Отже, ймовірність успішної

передачі складає;

- середня кількість успішно переданих за час  $T$  пакетів, тобто. Пропускна здатність мережі, становить.

Графік пропускної спроможності наведено рис. 3.3.

Максимальне значення пропускної спроможності досягається при інтенсивності надходження пакетів ( $G$ ), що дорівнює 0,5 і становить 0,184 (при цьому ймовірність втрати пакетів через колізію – PLOSS становитиме 63%).

При інтенсивності надходження пакетів ( $G$ ), що дорівнює 0,0256, ймовірність втрати пакетів через колізію ( $p\_LOSS$ ) становить 5%.

Час передачі пакетів через мережу LoRa, і навіть ємність мережі визначаються використанням передачі коефіцієнтом розширення спектра, а кінцевому підсумку – якістю сигналу мережі.

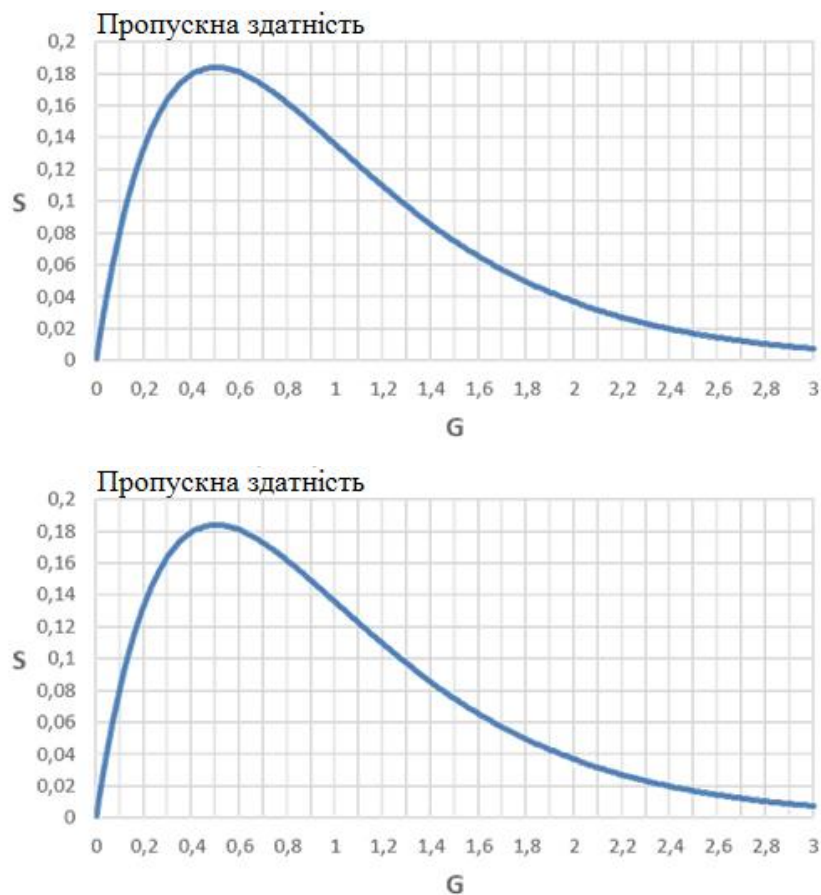


Рис. 3.3. Пропускна здатність мережі LoRa

Так, тривалість передачі одного up-link пакета з корисним навантаженням 10 байт за мінімального коефіцієнта розширення спектра ( $SF=7$ ) становить 59,65мс, а за максимального ( $SF=12$ ) – 1 253,38мс.

Додатково на ємність мережі LoRa будуть впливати такі фактори, як:

- переповтори повідомлень, втрачених через помилки на адіоінтерфейсі та колізій;

- ефект множинного прийому під час знаходження клієнтських пристроїв у зоні дії кількох LoRa-шлюзів.
- Використання другого вікна прийому (RX2).[19]

### 3.6. Характеристика датчиків інформації системи

Згідно завдання проєктована мережа буде виконувати інформаційне об'єднання датчиків метеорологічної інформації аеропорту. Така інформація на сучасному етапі формується аеродромними метеорологічними станціями(АМС), частина датчиків якої розміщується біля злітно-посадкової смуги(рис.3.4).

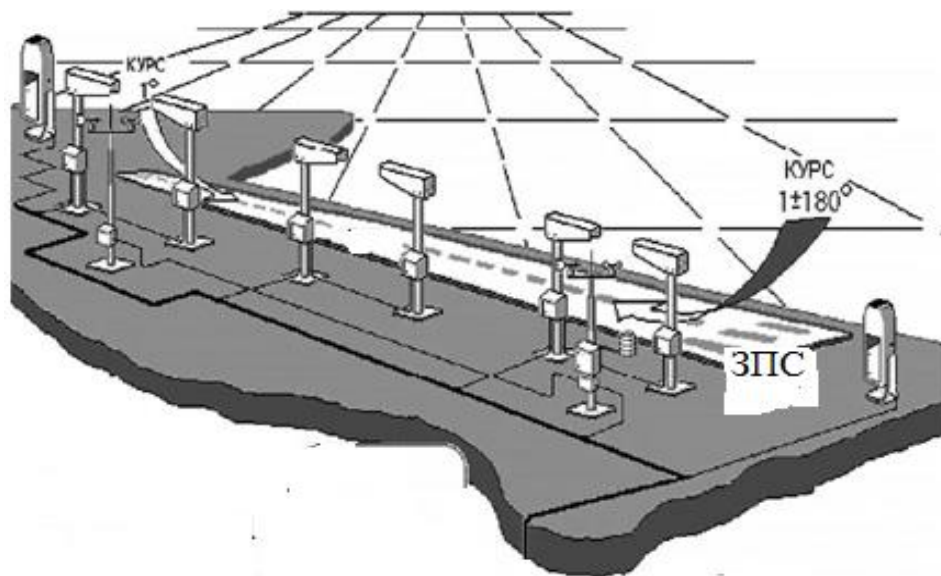


Рис. 3.4. Умовна схема розміщення датчиків АМС

Аеродромні метеорологічні станції призначені для автоматичних вимірів метеорологічних параметрів: температури повітря, відносної вологості повітря, швидкості, напрямку та сили вітру, атмосферного тиску, висоти хмар, метеорологічної оптичної дальності, а також для їх обробки, відображення на дисплеї, формування метеорологічних повідомлень, їх реєстрації та архівації, для забезпечення метеорологічною інформацією служби управління повітряним рухом з метою забезпечення безпеки зльоту та посадки повітряних суден на аеродромі.

До складу групи датчиків біля ЗПС входять сучасні цифрові датчики:

- датчик атмосферного тиску;
- датчик швидкості вітру;
- датчик напрямку вітру;
- датчик температури та вологості повітря;
- датчик атмосферних опадів;
- датчик видимості;
- датчик яскравості фону;
- датчик висоти нижньої межі хмар.

Крім того, в районі злітно-посадкової смуги розміщуються інші автономні датчики, а саме:

- лазерний датчик рівня коефіцієнта зчеплення колеса шасі літака з ЗПС;
- датчики льоду на ЗПС;
- датчики грози та блискавки тощо.

Розглянемо технічні характеристики деяких датчиків.

Датчик FOST02A призначений для вимірювання температури та вологості – датчики нового покоління із цифровим виходом(рис.3.5).

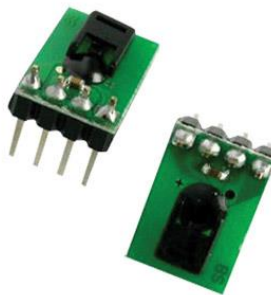


Рис. 3.5. Датчик температури та вологості повітря

Опис.

- датчик відносної вологості та температури
- можливість розрахунку точки роси



- повне калібрування обох датчиків із записом на заводі калібрувальних коефіцієнтів в енергонезалежну пам'ять, вихідний інтерфейс I2C

- висока довготривала стабільність

- пристрій не потребує додаткових зовнішніх компонентів

- надмале споживання, можливість використання в обладнанні, що носить.

- наявність версії з SMD корпусом

- повна ідентичність датчиків у партії

- малі розміри та вага

- автоматичний перехід у режим вимкнення споживання

Пристрій складається з чутливого полімерного елемента вимірювання відносної вологості і платиного термоопору в якості датчика температури.

Показання цих датчиків через мультиплексор подаються на 12-бітове АЦП, в якому з урахуванням калібрувальних коефіцієнтів формується результуючий код. Він завантажується в інтерфейсний модуль і може бути зчитаний відповідною командою.

Характеристики:

- точність вимірювання відносної вологості становить  $\pm 4,5\%$ ;

- лінійність не гірша за 1%;

- стабільність не гірша за 0,5%/рік;

- бітність 12 біт;

- точність вимірювання температури  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ ;

- вихідні сигнали - 0...20 мА, 4...20 мА, 0...10 В, RS 485/RS 422, SDI-12,

CAN

- діапазон  $-40 +123^\circ\text{C}$ ;

- напруга живлення 2,5-5,5 В пост струму;

- струм споживання 550 мкА - вимірювання, 1 мкА в режимі очікування.

Датчик напрямку та швидкості вітру TM-830-U(рис.3.6).

**Технічні характеристики:**

- діапазон вимірювання -  $0..360^\circ$ ,  $0..100\text{ м/с}$ ;

- точність вимірювання- $\pm 0.1$  м/с и  $\pm 1$  %;
- вихідні сигнали-0...20 мА, 4...20 мА, 0...10 V, RS 485/RS 422, SDI-12;
- ел. живлення- 5-36 В.



Рис. 3.6. Датчик швидкості та напрямку вітру

Датчик коефіцієнта зчеплення MD30 (рис.3.7).

Датчик MD30 - це мобільний датчик дорожніх умов та стану ЗПС для проведення обслуговування в зимовий період. Компактний датчик MD30 вимірює всі ключові погодні параметри поверхні та підходить для використання на снігоприбиральних машинах та інших автомобілях. Дані MD30 дозволяють приймати більш поінформовані рішення про операції з обслуговування та оптимізувати витрати солі.

Технічні дані:

Специфікації вимірювань

Зчеплення та стан поверхні

Реєстрований рівень зчеплення 0,09...0,82

Реєстровані стани поверхні Суха, волога, мокра, сніг, лід, сльота

Товщина поверхневого шару

Вода 0...5 мм

Лід 0...2 мм

Сніг (водний еквівалент) 1) 0–1 мм

Точність, вода та лід  $\pm 10$  % при 0... 2 мм

Температуру поверхні

Діапазон вимірювань  $-40 \dots +60 \text{ }^\circ\text{C}$

Температура та відносна вологість повітря

Діапазон вологості  $0\text{--}100 \%$  відносної вологості;

Входи та виходи Електроживлення  $-12 \dots 32 \text{ В DC}$ ;

Максимальна споживана потужність  $-15 \text{ Вт}$ ;

Протокол  $\text{-RS-232}$ ;

Тип даних- Двійкові.



Рис. 3.7. Датчик коефіцієнта зчеплення MD30

### 3.7. Архітектура мережі LORAWAN

Під «Інтернетом речей» мається на увазі сукупність електронних пристроїв, що оточують нас, спілкуються між собою без втручання людини і мають вихід в єдину глобальну мережу. В даний час елементи IoT повсюдно впроваджуються в системи безпеки, промислової автоматизації, логістики, транспорту тощо, але особливо потрібні вони при вирішенні завдань вимірювання споживання ресурсів (води, газу, електрики, тепла) та віддаленого управління інженерними системами забезпечення авіаційних, автомобільних та залізничних перевезень. При цьому для забезпечення ефективного моніторингу, враховуючи специфіку застосування, існує потреба в бездротових компонентах

з автономним живленням, низьким власним енергоспоживанням, великим радіусом дії та тривалим терміном експлуатації (не менш як міжповітряний інтервал приладів обліку). Таким вимогам відповідають елементи малопотужних мереж LPWAN, що становлять новий тип мереж передачі невеликих пакетів телеметричних даних від різних пристроїв, сенсорів, датчиків на далекі відстані. LPWAN-технології є значною частиною IoT і демонструють найбільш бурхливе зростання. Серед усіх поширених LPWAN технологій вигідно виділяється відкритий стандарт LoRaWAN (Long Range Wide Area Networks), розроблений спільно компаніями Semtech та IBM [1]. В його основі лежить використання фізично запатентованого Semtech способу модуляції LoRa, що є різновидом методу розширення спектру і забезпечує рекордні показники бюджету каналу зв'язку (до 168 дБ). До інших переваг мереж LoRaWAN відносяться:

- дальність передачі даних: до 5 км в умовах щільної міської та промислової забудови, до 15 км у зоні прямої видимості;
- використання не ліцензованих частот ISM-діапазонів (433, 868, 915 МГц), що не вимагають отримання дозволу та плати за радіочастотний спектр;
- висока проникаюча здатність радіосигналу в будинках та закритих приміщеннях при організації каналу зв'язку на даних частотах;
- низьке власне енергоспоживання кінцевих пристроїв мережі: багато хто може безперебійно функціонувати до 10 років, живлячись від одного акумулятора АА;
- базова топологія типу «зірка» без використання повторювачів забезпечує відмінну масштабованість мережі.

Типова архітектура мережі LoRaWAN включає кінцеві вузли, базову станцію (шлюз), мережевий сервер і сервер додатків. Принцип їхньої взаємодії простий. Базова станція є прозорим мостом для обміну зашифрованими повідомленнями між кінцевими вузлами, що виконують функції вимірювання та управління, та центральним сервером. Зв'язок здійснюється за допомогою традиційних технологій (Ethernet, Wi-Fi, 4G/LTE) за протоколом TCP/IP. Центральний сервер пересилає дані на сервер додатків і контролює параметри

всієї мережі: швидкість, потужність передавача, порядок і періодичність зв'язку і т. д. . Свою лінійку кінцевих вузлів мережі LoRaWAN випускає компанія Adeunis. Розроблені бездротові модеми є пристрої з інтерфейсами і можливостями, специфічними до виконання конкретної завдання. Розглянемо їх характеристики та відмінні риси. Бездротові LoRaWAN-пристрою Adeuni. Безпроводні LoRaWAN-пристрої Adeunis.

Модеми, що пропонуються Adeunis, адаптовані для вирішення завдань вимірювання різних фізичних і електричних величин і передачі отриманих значень на сервер [2]. Всі вони відповідають європейським стандартам безпеки та електромагнітної сумісності EN 300 220, EN 301 489 та EN 60950. Готові до використання бездротові пристрої не вимагають складної процедури підключення до мережі LoRaWAN. Після монтажу на місці та з'єднання з первинними перетворювачами (датчиками) запуск пристрою проводиться за допомогою звичайного магніту, що розміщується у певній точці корпусу (зазначено в документації). Після увімкнення кожен кінцевий вузол автоматично виконує операцію активації. За замовчуванням використовується ОТАА (Over-The-Air Activation, активація «по повітрю»), під час якої задаються для кожного пристрою: локальна адреса в мережі (DevAddr), сесійні ключі шифрування (NwkSKey та AppSKey) та ідентифікатор програми (AppEUI). За запитом виробником може бути передбачена АВР (Activation By Personalization, активація шляхом персоналізації), при якій ключі шифрування та адреса записуються в пристрій заздалегідь, і відразу після включення воно вже готове до передачі даних. Типова структура модемів Adeunis відповідає поширеній структурі кінцевих вузлів для різних систем збирання даних. Всі вони побудовані на базі низькоспоживаючих мікроконтролерів серії STM32L з ядром ARM Cortex M3, що працюють спільно з LoRa-трансіверами SX1272 виробництва компанії Semtech.

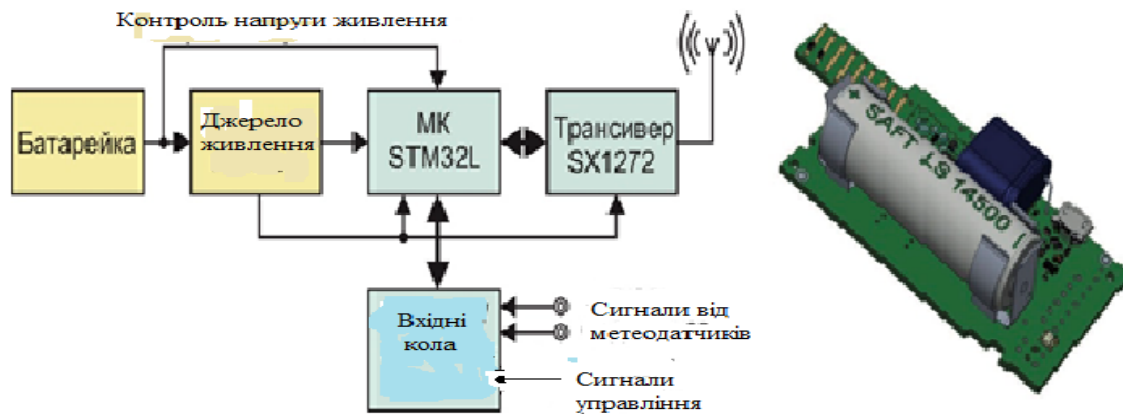


Рис.3.8. LoRA-модем

Вбудована планарна антена, розташована на основній друкованій платі, дозволяє скоротити зовнішні габарити. Тривалий термін безперебійної експлуатації вузлів LoRaWAN має на увазі необхідність використання якісного джерела автономного живлення. Adeunis для своїх пристроїв обрала французького виробника батарей та акумуляторів – компанію SAFT. Вбудована літій-тіоніл хлоридна (Li-SOCl<sub>2</sub>) батарея LS14500 з номінальною напругою 3,6 В та ємністю елемента 2600 мА/год найкраще підходить для пристроїв з безперервним споживанням струму до 50 мА. Циліндричний гальванічний елемент серії LS, виконаний у корпусі форм-фактора АА, має струм саморозряду менше 1% на рік і може працювати за температури навколишнього середовища  $-60...+85$  °С. Конструктивно вся серія, незалежно від функціонального призначення, виготовляється в аналогічних малогабаритних корпусах зі ступенем захисту IP67 (IP68 на запит), зовнішніми розмірами 105×50×27 мм і масою не більше 80 г. Корпус складається з верхньої та нижньої частин, що з'єднуються за допомогою засувки, друкованої плати з електронікою та герметичного кабельного введення.

Набір кріпильних виробів, що входить в комплект поставки, дозволяє виконати монтаж пристроїв на DIN-рейку, стіну, трубу і т. д. Основні відмінності пристроїв усередині серії - вхідні/вихідні ланцюги узгодження та набори програмованих регістрів, унікальні для кожного конкретного призначення. В іншому вони мають схожі параметри і робочі режими, тому для

розуміння принципів функціонування досить детально розглянути будь-яке з них. Наприклад, модем ARF8180BA з робочою частотою 868 МГц призначений для віддаленого вимірювання температури та передачі показань на верхній рівень мережі LoRaWAN [3]. Основне призначення - робота у зв'язці з різноманітними датчиками, в тому числі і метеорологічними, також можлива експлуатація у складських приміщеннях, холодильних камерах та інших промислових об'єктах. Моніторинг температури проводиться за допомогою вбудованого датчика з робочим діапазоном  $-30 \dots +70 \text{ }^\circ\text{C}$  або шляхом підключення зовнішнього NTC-сенсора (Negative Temperature Coefficient - негативний температурний коефіцієнт) за необхідності розширення діапазону (від  $-55$  до  $+155 \text{ }^\circ\text{C}$ ). У будь-якому випадку гарантується точність вимірювання  $\pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$  та роздільна здатність  $0,01 \text{ }^\circ\text{C}$ . Передача накопичених даних та дистанційний контроль стану батареї здійснюються періодично або за виникненням певної події, головною з яких є вихід показань за межі встановлених порогів. Налаштування режимів роботи, періоду передачі, програмування коефіцієнтів та параметрів вбудованого АЦП та інші зміни конфігурації пристроїв виконуються за допомогою USB-інтерфейсу. У роботі бездротового пристрою Adeunis можна відзначити кілька режимів. Спочатку модем знаходиться в режимі очікування, що відрізняється мінімальним енергоспоживанням. Після старту пристрій переходить у режим роботи. Режим максимального енергозбереження ініціюється при детектуванні розрядженої батареї, вихід із нього можливий лише за її заміни. Командний режим дозволяє користувачам змінити вміст конфігураційних регістрів модему, перехід до нього здійснюється передачею певної AT-команди. У робочому режимі можливі такі варіанти спілкування з сервером: періодичний вимір та передача даних згідно з алгоритмом, зображеним на рис.3.9, передача при виході контрольованих параметрів межі порогів, і навіть регулярна сервісна передача станів конфігураційних регістрів і регістрів даних.

Перший варіант є переважним, період передачі та кількість вимірювань між двома сеансами зв'язку в цьому випадку визначаються за допомогою спеціалізованих регістрів. Так, у таблиці 3.1 наведено приклад налаштувань

модему, у яких вимірювання виробляються кожні 15 хв, а усереднені результати відправляються споживачам раз на годину. Другий варіант, заснований на періодичному порівнянні вимірюваних показань із встановленими граничними значеннями внутрішнього та зовнішнього датчиків, активується записом нуля в регістр S301 (рис. 3.9). Максимальні та мінімальні температури, а також їх гістерезис задаються шляхом використання додаткових регістрів S309-S316. Передача пакета даних виконується лише при виникненні заданої події (перевищення того чи іншого порога). Необхідність третього варіанта обумовлена тим, що з передачі за подією часто виникають ситуації, коли вузол мережі тривалий час «мовчить».

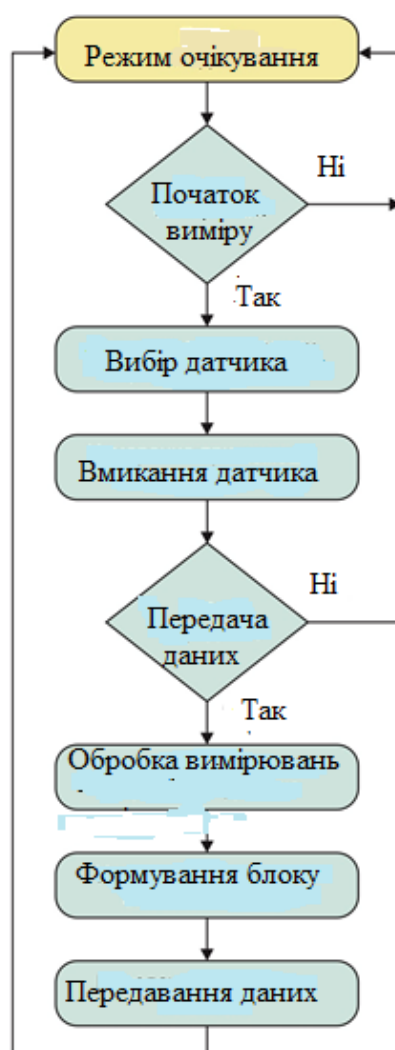


Рис. 3.9. Алгоритм управління роботою метеодатчиків



Тому для отримання інформації про стан віддаленого об'єкта формується регулярний звіт, період відправлення якого складає від однієї години до одного дня і задається регістром S300. Як було зазначено вище, для налаштування модему використовується підключення до комп'ютера через USB-роз'єм (тип B), спілкування здійснюється за допомогою віртуального COM-порту. Драйвери, що необхідні для роботи, доступні на офіційному сайті виробника. Передачу команд управління можна виконати, скориставшись звичним для користувачів терміналом, наприклад, COM Port Toolkit. У налаштуваннях з'єднання потрібно вибрати запропонований операційною системою номер COM-порту та задати наступні параметри: швидкість 115200 біт/с, без контролю парності, 8 біт даних, 1 стопбіт. Перехід у командний режим виконується подачею AT-команди +++ або 0x2B 0x2B 0x2B у шістнадцятковому форматі. Якщо все нормально, то у зворотному напрямку надсилається квитанція CM. У таблиці 2 наведено приклади типових команд та відгуків на них. Всі регістри поділяються на дві групи: функціональні S3xx дозволяють регулювати поведінку радіомодему на прикладному рівні, мережеві S2xx (однакові для всіх пристроїв серії) відповідають за налаштування характеристик вбудованих LoRaWAN-трансіверів (коефіцієнта розширення спектру, ширини смуги пропускання, вихідної потужності, ідентифікації), ключів шифрування тощо). До зміни останніх слід відноситися з обережністю, тому що вони безпосередньо впливають на якість зв'язку. За замовчуванням регістри S2xx блоковані, будь-яке звернення до них викликає помилку, дозволити їх зміну можна командою AT+T63 PROVIDER. Пристрій ARF8170BA (внутрішня назва LoRaWAN DRY CONTACTS) дозволяє, з одного боку, отримувати повідомлення про стан віддалених об'єктів (вкл. або викл.), а з іншого - дистанційно керувати цими об'єктами за допомогою чотирьох цифрових входів/виходів, що конфігуруються (рис. 3.10). Цей модем позиціонується, в основному, для застосування в інженерно-технічних системах будівель: для запуску обладнання, контролю доступу, управління освітленням і т. д. Двосторонній канал обміну даними організований на частоті 868 МГц, максимальна вхідна та вихідна напруга всіх каналів 24 В, еквівалентний

вхідний опір 500 кОм, струм виходу (навантаження) не перевищує 100 мА [4]. Будь-який канал налаштовується окремо, за допомогою регістрів S302-S305 вибирається тип окремого виведення (вхід або вихід). Для входів задається режим роботи - періодичний або за події; подіями є перепади логічних рівнів, аналіз проводиться за фронтом, спадом імпульсу або їх комбінації. У періодичному режимі проводиться підрахунок подій, чергові дані надсилаються на сервер через інтервал часу, який визначається регістром S301. Кожен вхід має захист від брязкоту контактів, доступно п'ятнадцять значень тимчасової затримки, що програмується в межах від 10 мс до 10 хв. При використанні висновків як виходу ними встановлюються логічні рівні (високі чи низькі) залежно від завдання. Кожен вихід виконаний за схемою з відкритим колектором, тому потребує зовнішньої підтяжки. Модем ARF8190BA (LoRaWAN ANALOG), що працює на частоті 868 МГц, підходить для роботи з будь-якими датчиками, що мають аналогові вихідні сигнали формату 0-10 або 4-20 мА. До типових застосувань відносяться бездротові вимірювачі температури, тиску, рівня, вологості, CO<sub>2</sub>, переміщення, освітленості тощо, що вбудовуються в інженерні системи управління будівлями (опалення, кондиціонування, вентиляції), промислове обладнання різного призначення, телеметричну апаратуру. Кожен пристрій здатний одночасно обслуговувати до двох сенсорів, їхнє підключення здійснюється через різьбові клемні колодки [5]. Дані з датчиків оцифровуються за допомогою вбудованого АЦП із розрядністю 12 біт. Два додаткові цифрові канали дозволяють виконувати функції контролю та управління аналогічно раніше розглянутому модему ARF8170BA. "Прошитий" стек протоколу LoRaWAN спрощує процедуру підключення пристрою до існуючої мережі. Такі самі завдання вирішує ARF8200AA (LoRaWAN ANALOG PWR), який відрізняється від попереднього пристрою необхідністю застосування зовнішнього живлення. Цей модем не має батарейки і може бути корисним за наявності в зоні досяжності джерела постійного струму з напругою 6-24 В, що дозволяє збільшити термін експлуатації модему. Модем ARF8230AA (LoRaWAN PULSE) призначений для користувачів, які шукають спосіб організації віддаленого збору показань із

різних приладів обліку енергоресурсів (води, електрики, газу та тепла), обладнаних імпульсним виходом. Він може працювати з лічильниками, мінімальна тривалість імпульсів яких становить 8 мс, а максимальна частота їхнього проходження не перевищує 33 Гц [6]. Готовий до використання пристрій забезпечує підключення по радіоканалу обладнання керуючих та постачаючих організацій до промислових мереж стандарту LoRaWAN, автоматизуючи тим самим роботу служб аеропорту. Відмінною особливістю ARF8230AA є можливість одночасного підключення двох різних датчиків до одного радіомодему, що дозволяє знизити витрати на впровадження системи. Для швидкого налаштування застосовується DIP-перемикач з шістьма контактними групами, за допомогою якого вибирається тип лічильника, що використовується, з відповідними параметрами імпульсів і періодичність відправлення накопичених даних. Також пристрій може бути налаштований за допомогою з'єднання по радіоканалу і передачі значень відповідних регістрів. Гарантований термін служби від вбудованої батареї при передачі двох пакетів даних на добу не менше 10 років. Корисним доповненням серії є портативний тестер ARF8123AA для частот 863-870 МГц, який дозволяє перевірити параметри мереж стандарту LoRaWAN до моменту розгортання готових рішень [7]. Він виконує функції передачі, прийому та швидкого аналізу радіопакетів у мережах, що поєднують бездротові датчики, обладнання інтелектуальних будівель, вимірювальні пристрої, системи безпеки та міжмашинної взаємодії. На РК-екрані пристрою відображається вся операційна інформація (GPS-координати, температура, рівень заряду батареї) та дані про роботу мережі (стан каналу до хосту, пристроїв, коефіцієнт розширення спектру, коефіцієнт помилок пакетів тощо). Інтегрований високоточний модуль GPS дозволяє здійснювати геолокацію. Як джерело живлення застосовується літій-іонний акумулятор з вихідною напругою 3,7 В та ємністю 2000 мАг, якого вистачає на 20 год автономної роботи. Зовнішній зарядний пристрій підключається через USB-роз'єм у нижній частині пристрою (мал. 8). Тестер, призначений для експлуатації в діапазоні робочих температур  $-40...+85$  °С, виготовляється із стандартного чорного ABS-пластику завтовшки 1,6 мм, має зовнішні габарити

186,2×75,2×22,8 мм та масу 150 г. Параметри зв'язку визначаються вбудованим трансівером: допустима швидкість обміну даними лежить у межах від 183 біт/с до 50 кбіт/с, вихідна потужність – 14 дБм, чутливість до прийому – –137 дБм. Виробником гарантується відповідність вимогам стандартів EN 300-220, EN 301-489 та EN 60950. Вітчизняні аналоги Насамкінець скажемо про вітчизняні аналоги. Зростання популярності стандарту LoRaWAN призвело до появи компаній, що пропонують як готові комплексні рішення (сукупність кінцевих пристроїв, базових станцій, серверного та клієнтського ПЗ), так і окремі програмні та апаратні продукти для реалізації відповідної мережевої технології. Не залишився осторонь і вітчизняний LoRaWAN-ринок. У першій з них можна відзначити автономні лічильники імпульсів CI-11 та CI-12 із чотирма незалежними каналами, які також можуть бути налаштовані на використання як входи для охоронних датчиків. Спілкування з базовою станцією складає частотах діапазону 860–1000 МГц. Двоканальні лічильники імпульсів CI-13-232 та CI-13-485 із зовнішнім живленням (8–36 В) можуть працювати в режимі прозорих радіомодемів LoRaWAN–RS-232 або LoRaWAN – RS-485 відповідно або виконувати підрахунок електричних імпульсів, що надходять. Приладів обліку комунальних ресурсів Конвертер ТП-11 призначений для зчитування даних з пристроїв з інтерфейсом 4-20 мА, він має два охоронні входи, по спрацьовування яких відправляє повідомлення про тривогу в мережу LoRaWAN, і два виходи типу «відкритий колектор» для керування зовнішніми пристроями. Датчик температури ТД-11 являє собою передавальний LoRaWAN-пристрій із зовнішнім вимірювальним елементом, що передає показання температури в мережу із заданим періодом. На всі пристрої надається п'ятирічна гарантія. Бездротові модеми з різними вимірювальними інтерфейсами, вироблені компанією Adeunis, широко застосовуються як кінцеві вузли мережі LoRaWAN. Тривала автономна робота при батарейному живленні, великий радіус дії, міцні корпуси зі ступенями захисту до IP68 - все це разом дозволяє успішно вирішувати завдання управління та моніторингу у складі автоматизованих систем комерційного обліку ресурсів, систем «розумний будинок», дистанційного збору даних та у багатьох інших додатках.

Базова станція мережі зображена на рис. 3.10.



Рис. 3.10. Базова станція мережі LoRAWAN

Таким чином, архітектура мережі забезпечення метеорологічною інформацією служби аеропорту має вигляд (рис. 3.11).

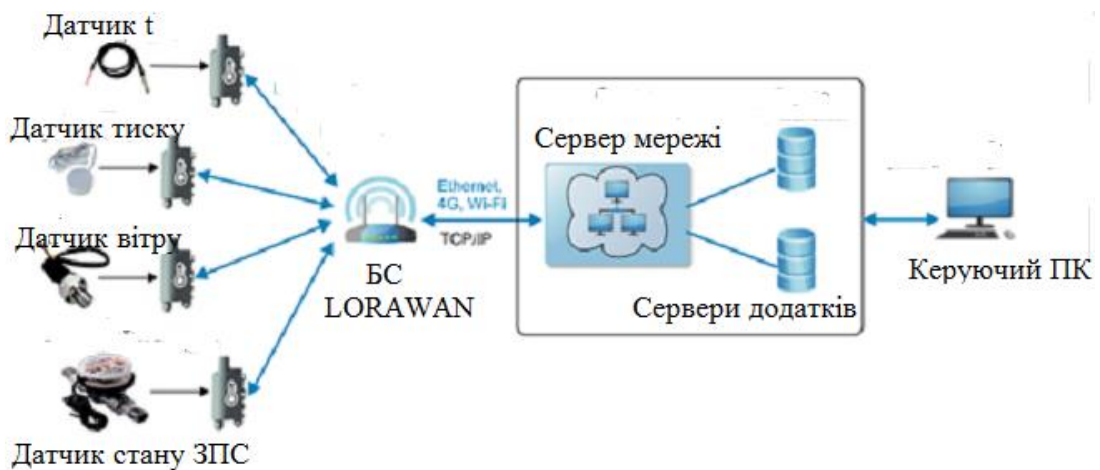


Рис.3.11. Структура мережі метеозабезпечення аеропорту

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

1. В розділі проведено аналіз сучасних датчиків метеорологічних даних, приведені технічні характеристики датчиків з метою формування обліку мережі передавання даних від приведених датчиків. Розміщення датчиків знаходиться на відстані не більше 10 км. Датчики видають виміряні параметри у цифровій формі, що дозволяє легко узгодити передачу через мережу LoRAWAN.

2. На основі вхідних даних проведено розрахунок основних параметрів мережі передавання метеоданих.

3. Запропоновано архітектуру мережі LoRAWAN.

4. Проведено вибір комплектуючих пристроїв мережі передачі метеоданих

## ВИСНОВКИ

1. Безпека польотів у районі аеродрому (зліт, захід на посадку, посадка тощо) у значній мірі визначається достовірністю метеорологічних спостережень, достовірністю метеопрогнозів та прогнозів небезпечних метеорологічних явищ.

2. У зв'язку з щорічно зростаючим інтенсивністю цивільних авіаперевезень дозріла необхідність оновлення технології зняття метеорологічних параметрів, удосконалення та розробки нових метеорологічних приладів та швидкої адаптації до запитів та вимог цивільної авіації.

3. Зростання вимог до безпеки польотів вимагає удосконалення системи збору, обробки та використання метеорологічної інформації.

4. Зростання кількості метеорологічних датчиків підвищує достовірність інформації про метеорологічні умови, але вимагає сучасних рішень передавання та обробки такої інформації від датчиків.

5. У роботі розглянуто принципи побудови та функціонування мережі передавання даних за технологією LoRaWAN з метою проектування на її основі мережі передачі метеоданих аеропорту.

6. Проведений аналіз показує переваги технології LoRaWAN перед іншими технологіями передавання даних, що виражається в її перевагах:

- оперативність розгортання;
- висока чутливість приймача;
- низьке енергоспоживання;
- не велика потужність передавача;
- використання не ліцензованих частот.

7. Проведено розрахунок та запропоновано архітектуру мережі LoRaWAN для передавання метеорологічних даних в районі аеропорту з наступними характеристиками:

- робоча частота– 860....870 МГц;

- потужність передавача LoRA-модема – 25 мВт;
- радіус радіо покриття БС – не менше 10 км;
- пропускна здатність-не менше 1000 датчиків;
- швидкість передавання даних-64кбіт/сек;
- ЛЧМ- модуляція з параметрами:
- коефіцієнт розширення спектру SF – 10;
- ширина смуги – 125 кГц.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Безпека польотів: Підручник для вузів/Р.В. Сакач, Б.В. Зубків, М.Ф. Давиденко та ін.: За ред. Р.В. Ірпінь. - М.: Транспорт, 1989. - 239 с.
2. Богаткін О.Г. Основи авіаційної метеорології. Підручник - СПб.: Изд. РДДМУ, 2009.339с.
3. Болелов Е.А. Комплексна обробка метеоінформації в аеродромних мобільних комплексах метеолокації та зондування атмосфери / Е.А. Болелов, Ю.Н. Корабльов, Н.А. Баранов, С.С. Дьомін, А.А. Єщенко // Науковий вісник ДержНДІ ГА. – 2018. – N 20(331). - С. 82-92.
4. Болелов Е.А. Метеорологічне забезпечення польотів цивільної авіації: проблеми та шляхи їх вирішення // Науковий вісник МДТУ ГА. - 2018. - Т. 21.
5. Вимірювання та спостереження на авіаційних метеорологічних станціях. Навчальний посібник. - СПб.: Изд. РДДМУ, 2009. 339с.
6. Шахнович, І. В. Сучасні технології бездротового зв'язку. Видання друге, виправлене і доповнене / І. В. Шахнович. - М.: Техносфера, 2006. - 288 с.
7. Специфікація LoRaWAN. Основні поняття та класи кінцевих пристроїв. 2016 р. <https://habr.com/ua/post/316954/>
8. Плотніков О. Мережі LoRaWAN. 2017
9. Технологія LoRAWAN для "розумних" міст. 2016 р.
10. Сітдіков Д.Р. Основні параметри бездротової технології LORAWAN 2018 р. <https://habr.com/ua/post/316954/>
11. Тунеголовець Д. К. Технологія lorawan для організації метеозабезпечення аеродромів місцевих ліній. Бездротові технології. - 2019. - № 5. - С. 48-54.
12. Технологія LoRa компанії Semtech: новий імпульс розвитку «Інтернету речей»/К. Верхулевський// Бездротові технології. - 2015. - № 3. - С. 42-48.
13. SX1272/73 - 860 to 1020 MHz Low power long range transceiver. <http://www.semtech.com>.

14. SX1301 – Base band processor for data concentrator for long range communication network. <http://www.semtech.com>.

15. Посібник розробника пристроїв LoRAWAN. Сайт <http://lora-alliance.org/>.

16. МСЕ-R Р.1411-3, Дані про поширення радіохвиль та методи прогнозування для планування зовнішніх систем ближнього радіозв'язку та локальних радіомереж в діапазоні частот від 300 МГц до 100 ГГц, 18 с.

17. Верхулевський К. Особливості та тенденції розвитку технології LoRaWAN // Бездротові технології. 2017. №1.