

Міністерство освіти і науки України  
Український державний університет науки і технологій

Факультет «Будівництво, архітектура та інфраструктура»  
(назва факультету)

«Транспортна інфраструктура»  
(повна назва кафедри)

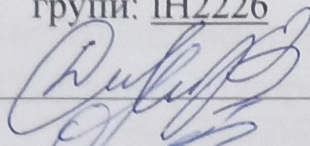
Пояснювальна записка  
до кваліфікаційної роботи  
ОС «магістр»  
(ступінь вищої освіти)

на тему: Дослідження шляхів організації цифрових видів зв'язку відповідно до вимог інтероперабельності  
за освітньою програмою «Інтероперабельність і безпека на залізничному транспорті»

зі спеціальності: 273 Залізничний транспорт  
(шифр і назва спеціальності)

Виконала: студентка групи: ІН2226

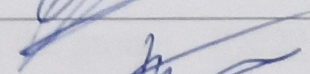
(підпис студента)(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)



/ Яна ДЕРБАЙ /

Керівник:

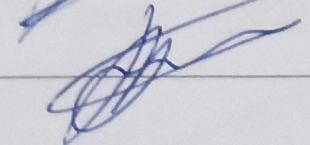
(підпис)(посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)



/ Олег ВОЗНЯК /

Нормоконтролер:

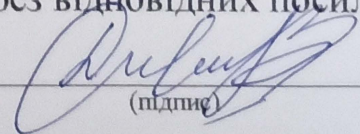
(підпис)(посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)



/ зав. каф. Олексій ТЮТЬКІН /

Засвідчую, що у цій роботі немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент

  
(підпис)

**Ministry of Education and Science of Ukraine  
Ukrainian State University of Science and Technologies**

**Building, architecture and infrastructure**  
(faculty)

**Transport infrastructure**  
(department)

**Explanatory Note  
to Master's Thesis  
Master  
(higher education degree)**

on the topic: Research ways of organizing digital types of communication in accordance with interoperability requirements

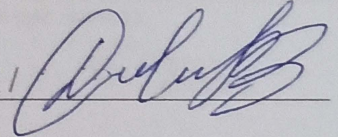
according to educational curriculum Interoperability and safety in railway transport  
in the Specialization: 273 Railway Transport

(Specialization and its code)

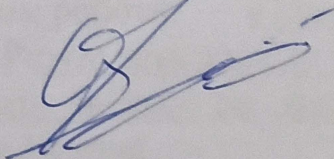
Done by the student  
(name, surname)

of the group: IH2226

/ Yana DERBAI /



Scientific Supervisor:  
(position, name, surname)



/ Oleh VOZNYAK /

Normative controller:  
(position, name, surname)

/ Head of Dept. Oleksii TIUTKIN /

Міністерство освіти і науки України  
Український державний університет науки і технологій

Факультет: «Будівництво, архітектура та інфраструктура»

Кафедра: «Транспортна інфраструктура»

Рівень вищої освіти: «Магістр»

Освітня програма: «Інтероперабельність і безпека на залізничному транспорті»

Спеціальність: 273 «Залізничний транспорт»

(шифр та назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

«Транспортна інфраструктура»

Олексій ТЮТЬКІН

(підпис)

(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Дата

29.01.2023

**ЗАВДАННЯ**

на кваліфікаційну роботу

(ступінь вищої освіти)

ОС «магістр»

студентці Дербай Яні Вікторині

(Прізвище, Ім'я По батькові)

1. Тема роботи: «Дослідження шляхів організації цифрових видів зв'язку відповідно до вимог інтероперабельності»

Керівник роботи: Возняк Олег Михайлович, к.т.н., доцент

(Прізвище, Ім'я, По батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом від

«28» квітня 2023 р.

№ 360ст

2. Строк подання студентом роботи: «15» січня 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи: Результати аналізу українських та європейських рішень організації цифрових видів зв'язку на залізничному транспорті та дані, що отримані під час пошуку в Internet.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно опрацювати):

Вступ; Розділ 1. Огляд сучасних бездротових технологій передачі даних; Розділ 2. Огляд і технічні характеристики технології LTE та особливості радіоінтерфейсу мережі E-UTRAN; Розділ 3. Визначення розташування та розрахунок покриття базових станцій; Висновки.

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

Презентація за матеріалами досліджень, викладених в магістерській роботі (PowerPoint, 10... 12 слайдів).

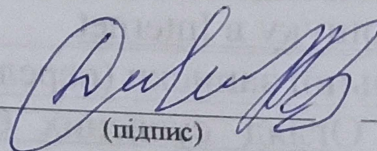
6. Консультанти розділів роботи:

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Завдання видав:<br>(підпис консультанта,<br>дата) | Завдання прийняв:<br>(підпис студента) |
|--------|---|---|--|
|        |   |   |  |

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

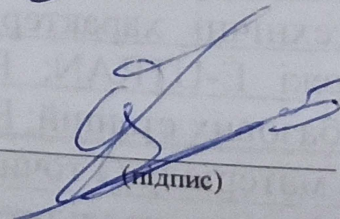
| № з/п | Назва етапів кваліфікаційної роботи   | Строк виконання етапів роботи | Примітки |
|-------|---|-------------------------------|----------|
| 1     | Розділ 1. Огляд сучасних бездротових технологій передачі даних  | 30.10.2023-<br>19.11.2023     |          |
| 2     | Розділ 2. Огляд і технічні характеристики технології LTE та особливості радіоінтерфейсу мережі E-UTRAN                    | 20.11.2023-<br>17.12.2023     |          |
| 3     | Розділ 3. Визначення розташування та розрахунок покриття базових станцій, Висновки. Оформлення ВКР.                       | 18.12.2023-<br>07.01.2024     |          |
| 4     | Перевірка роботи на наявність збігів текстових (літерних і цифрових) символів та графічних фрагментів. Отримання відгуку. | 08.01.2024-<br>14.01.2024     |          |
| 5     | Подання кваліфікаційної роботи до кафедри   | 15.01.2024                    |          |
| 6     | Захист кваліфікаційної роботи на засіданні Екзаменаційної комісії   | Згідно з<br>планом ЕК         |          |

Студентка

  
(підпис)

Яна ДЕРБАЙ  
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник роботи

  
(підпис)

Олег ВОЗНЯК  
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи магістра:

103 стор., 28 рис., 12 табл., 26 літературних джерел.

Об'єкт розробки – система залізничного радіозв'язку ділянки Рава-Руська – Львів.

Мета роботи – розробка концепції облаштування ділянки залізниці Рава-Руська – Львів цифровою мережею зонального зв'язку на базі Європейського стандарту GSM – R.

Методи дослідження – аналіз та синтез інформації, емпіричний метод, метод обчислювальних експериментів, метод чисельного моделювання, метод графічного моделювання.

У магістерській роботі розроблено пілотний проект облаштування системи GSM-R на ділянці Рава-Руська – Львів та запропоновано шлях його реалізації.

З метою підвищення ефективності систем зв'язку на залізничному транспорті України розглянуто нові технології організації передачі звукової інформації та даних, використано методику визначення радіуса покриття базової станції GSM-R, за допомогою якої розроблено план покриття базовими станціями ділянки колії.

Розглянуто принципи організації та функціонування системи GSM-R для залізничного транспорту, з метою розрахунку зони покриття проведено аналіз TCI Євросоюзу на основі яких обрано вихідні дані для проектування.

Ключові слова: GSM , GSM - R , LTE , UTRAN , РАДІОЗВ'ЯЗОК, ПЕРЕДАЧА ДАНИХ, ЗОНА ПОКРИТТЯ БАЗОВОЇ СТАНЦІЇ.

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ І СЛОВНИК ТЕХНІЧНИХ ТЕРМІНІВ

|          |  |
|----------|--|
| АЦП      | Administration Center – Адміністративний центр                                     |
| AuC      | Authentication – Центр аутентифікації  |
| BTS      | Base Telephone Station – Базова приймально-передавальна станція                    |
| EIR      | Equipment Identification Register – Реєстр ідентифікації обладнання                |
| HLR      | Home Location Register – Домашний реєстр місцеположення                            |
| I-CS     | Interface Channel Switching – Інтерфейс комутації каналів                          |
| I-PS     | Interface Packet Switching – Інтерфейс комутації пакетів                           |
| ISDN     | Integrated Service Digital Network – Цифрова мережа з інтеграцією служб            |
| lu       | Interface UTRAN-CN – Інтерфейс UTRAN-CN  |
| lub      | Interface BTS- RNC – Інтерфейс BTS- RNC  |
| lur      | Interface RNC-RNC – Інтерфейс RNC-RNC  |
| MS       | Mobile Station – Мобільна станція  |
| MSC      | Mobile Switching Center – Центр комунікації мобільного зв'язку                     |
| NMC      | Network Management Center – Центр управління мережею                               |
| OMC      | Operation and Maintenance Center – Центр експлуатації та технічного обслуговування |
| PSTN     | Public Switched Telephone Network – Телефонна мережа загального користування       |
| RNC      | Radio Network Controller – Контролер управління радіомережі                        |
| TCP / IP | Internet Protocols – Протокол управління передачею даних / Інтернет                |
| UE       | User Equipment – Користувацький пристрій   |

|                     |   |
|---------------------|---|
| UTRAN               | UMTS Terrestrial RAN – Мережа наземного радіодоступу  |
|                     | UMTS  |
| Uu                  | Interface UE-BTS – Інтерфейс UE-BTS   |
| VLR                 | Visit Location Register – Візитний реєстр місцеположення  |
| ALT 1,5 / 2         | ATM Link Termination Diversity – Кінцевий набір ATM-підключення                                   |
| DNT                 | Diversity Handover Terminal – пристрій проведення хендовера з рознесеним прийомом                 |
| ET-1,5/2,<br>ET-155 | Exchange Terminal – Кінцеві термінали   |
| MIO                 | Multiplexing Input / Output – Багатоцільовий пристрій введення / виведення                        |
| MP                  | Main processor – Основний процесор  |
| PWC                 | Power Connection – Підключення електроживлення  |
| RCU                 | Reference Clock Unit – Блок опорного сигналу синхронізації  |
| RNC                 | Radio Network Controller – Контроллер радіомережі   |
| TU                  | Timing Unit – Тактовий генератор  |
| WOS                 | WCDMA Operation System – операційна система WCDMA   |
| BRI                 | Basic Rate Interface – Інтерфейс основної швидкості   |
| EK                  | Echo Canceller – Ехокомпенсатор   |
| IWF                 | Interworking Function – Функція взаємодії   |
| MIO                 | Multifunctional Input-Output Device – Багатофункціональний пристрій введення / виведення сигналів |
| MSC                 | Mobile Switching Center – Центр комунікації мобільного зв'язку                                    |
| PADP                | Packet services Adaptation – Пристрій адаптації пакетних послуг                                   |
| POTS                | Plain Ordinary Telephone Services – традиційний (аналоговий) телефонний сервіс                    |
| PRI                 | Primary Rate Interface – Інтерфейс первинної швидкості  |

## ЗМІСТ

|  |           |
|--|-----------|
| <b>ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ І СЛОВНИК ТЕХНІЧНИХ ТЕРМІНІВ .....</b>                      | <b>6</b>  |
| <b>ВСТУП.....</b>  | <b>10</b> |
| <b>1 СУЧАСНІ БЕЗДРОТОВІ ТЕХНОЛОГІЇ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ .....</b>                      | <b>12</b> |
| <b>1.1 СТАНДАРТ GSM (ГЛОБАЛЬНА СИСТЕМА МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ) .....</b>             | <b>12</b> |
| <b>1.2 СТАНДАРТ UMTS (УНІВЕРСАЛЬНА СИСТЕМА МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ).....</b>          | <b>23</b> |
| <b>1.3 СТАНДАРТНИЙ Wi-Fi (WIRELESS FIDELITY) .....</b>                           | <b>31</b> |
| <b>1.4 СТАНДАРТ WIMAX (WORLDWIDE INTEROPERABILITY FOR MICROWAVE ACCESS).....</b> | <b>35</b> |
| <b>1.5 ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ ЗОНАЛЬНИХ МЕРЕЖ .....</b>                               | <b>39</b> |
| <b>1.6 ЦИФРОВІ СТАНДАРТИ ЗОНАЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ .....</b>                            | <b>44</b> |
| <b>1.7 ЗОНАЛЬНА СИСТЕМА ЦИФРОВОГО СТАНДАРТУ GSM - R.....</b>                     | <b>46</b> |
| <b>1.8 РЕАЛІЗАЦІЯ ОСНОВНИХ ФУНКЦІЙ РАДІОЗВ'ЯЗКУ СТАНДАРТУ GSM - R.....</b>       | <b>50</b> |
| <b>2 ОГЛЯД І ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕХНОЛОГІЇ LTE ТА</b>                       |           |
| <b>ОСОБЛИВОСТІ РАДІОІНТЕРФЕЙСУ МЕРЕЖІ E-UTRAN.....</b>                           | <b>55</b> |
| <b>2.1 ТЕХНОЛОГІЯ LTE (LONG TERM EVOLUTION).....</b>                             | <b>55</b> |
| <b>2.2 АРХІТЕКТУРА ТЕХНОЛОГІЇ LTE.....</b>                                       | <b>56</b> |
| <b>2.3 ЧАСТОТНІ ДІАПАЗОНИ ДЛЯ FDD І TDD І ВИМОГИ ДО ТЕХНОЛОГІЇ LTE.....</b>      | <b>60</b> |
| <b>2.4 ДІАПАЗОНИ ЧАСТОТ, ЯКІ ПІДТРИМУЮТЬСЯ ТЕХНОЛОГІЄЮ LTE .....</b>             | <b>61</b> |
| <b>2.5 ОРТОГОНАЛЬНО-ЧАСТОТНЕ МУЛЬТИПЛЕКСУВАННЯ OFDM І БАГАТОКРАТНА</b>           |           |
| <b>ТЕХНОЛОГІЯ ДОСТУПУ OFDMA .....</b>  | <b>62</b> |
| <b>2.6 МЕХАНІЗМ ДИСПЕТЧЕРИЗАЦІЇ.....</b>   | <b>63</b> |
| <b>2.7 МУЛЬТИАНТЕННІ СИСТЕМИ.....</b>  | <b>64</b> |
| <b>2.8 ОСОБЛИВОСТІ РАДІОІНТЕРФЕЙСУ МЕРЕЖІ E-UTRAN НИЗХІДНОГО КАНАЛУ .....</b>    | <b>66</b> |
| <b>2.9 МОДЕЛЮВАННЯ ЗАВАД, ЯКІ ВПЛИВАЮТЬ НА ЛІНІЙНИЙ СИГНАЛ У МЕРЕЖІ E-</b>       |           |
| <b>UTRAN .....</b>   | <b>71</b> |
| <b>3 ВИЗНАЧЕННЯ РОЗТАШУВАННЯ ТА РОЗРАХУНОК ПОКРИТТЯ</b>                          |           |
| <b>БАЗОВИХ СТАНЦІЙ .....</b>   | <b>76</b> |
| <b>3.1 КРИТЕРІЇ ВИБОРУ МАЙДАНЧИКА ДЛЯ РОЗТАШУВАННЯ БС .....</b>                  | <b>76</b> |
| <b>3.2 ПЕРЕВІРОЧНИЙ РОЗРАХУНОК ПОКРИТТЯ.....</b>                                 | <b>76</b> |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>3.3 МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ПОКРИТТЯ .....</b>                            | <b>79</b> |
| <b>3.4 РОЗРАХУНОК ЗОНИ ПОКРИТТЯ РАДІОЗВ'ЯЗКУ СТАНДАРТУ GSM-R .....</b> | <b>88</b> |
| <b>ВИСНОВКИ.....</b>   | <b>93</b> |
| <b>БІБЛІОГРАФІЯ .....</b>  | <b>95</b> |
| <b>ДОДАТКИ .....</b>   | <b>98</b> |

## ВСТУП

Сучасний залізничний транспорт гостро відчуває потребу в нових радіомережах технологічного зв'язку, які призначені для оперативного управління рухом поїздів і підвищення безпеки руху, оперативного керівництва проведенням ремонтно-відновлювальних робіт різними підрозділами залізничного господарства і підвищення ефективності обробки складів поїздів на сортувальних станціях.

Побудова зазначених радіомереж неможлива без застосування нових систем радіозв'язку з однієї сторони, а з іншої – без використання значної кількості радіоканалів.

Вимоги, які висуваються експлуатаційним персоналом до систем радіозв'язку, виходять за рамки послуг, що надаються операторами сотового та пейджингового радіозв'язку. Це:

- мінімальний час встановлення зв'язку;
- можливість організації як індивідуального, так і групового виклику;
- гарантія безперервності зв'язку;
- гарантія конфіденційності зв'язку;
- можливість передачі та прийому кодових повідомлень;
- можливість передачі та прийому даних;
- робота через диспетчера;
- режим напівдуплексного або симплексного зв'язку;
- можливість документування переговорів і повідомлень;
- встановлення пріоритетності абонентів.

Перерахованим вимогам у найбільшій мірі відповідають зональні системи радіозв'язку.

Нові системи організації радіозв'язку для служб дороги необхідні у зв'язку з тим, що діючі радіозв'язки на базі радіостанцій систем ЖР-УК і частина апаратури комплексу залізничного радіозв'язку «Транспорт» у значній мірі застарілі. Вони не відповідають сучасним високим вимогам до надійності та якості зв'язку, не виконують багато необхідних функцій для забезпечення

безпечного високошвидкісного руху поїздів, передачі даних, автоматичного контролю справного стану пристроїв радіозв'язку тощо. У складній економічній обстановці високі експлуатаційні витрати та значне енергоспоживання також є істотними недоліками діючих систем технологічного радіозв'язку.

Застосування зональних систем радіозв'язку дозволить реалізувати всі переваги, які притаманні сучасним інтелектуальним системам зв'язку:

- зменшення необхідної кількості радіоканалів, тобто значна економія радіочастотного спектру;

- динамічний розподіл навантаження в мережі;

- доступність будь-якої зони вільного радіоканалу кожному абоненту;

- висока ступінь готовності та захищеності від відмов;

- гнучка організація груп за функціональними чи виробничими ознаками;

- надання з'єднання з урахуванням пріоритетності статусу абонентів;

- екстрений виклик, скорочений набір номерів;

- груповий виклик;

- протоколювання всіх операцій у системі;

- можливість контролю за проведенням переговорів та їх документування;

- автоматичний контроль стану всіх елементів системи;

- співробітництво з сторонніми відомствами та міськими телефонними мережами, а також з мережами мобільного зв'язку.

Мета роботи – розробка концепції облаштування ділянки залізниці Рава-Руська – Львів цифровою мережею зонального зв'язку на базі Європейського стандарту GSM – R

Об'єктом дослідження в даній роботі є система залізничного радіозв'язку ділянки Рава-Руська – Львів.

Предметом дослідження є система радіозв'язку GSM-R.

# 1 СУЧАСНІ БЕЗДРОТОВІ ТЕХНОЛОГІЇ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ

Зональна система радіозв'язку забезпечує наступні режими функціонування:

- внутрішньогруповий зв'язок – у цьому режимі є можливість організації радіозв'язку між абонентами тієї чи іншої групи користувачів. Таких груп може бути досить багато (залежить від інформаційної ємності зональної системи). При цьому виключається взаємний вплив, тобто абоненти однієї групи не можуть слухати переговори всередині інших груп;

- індивідуальний радіозв'язок - у цьому режимі будь-який абонент зональної системи з присвоєним індивідуальним номером може зв'язуватися з будь-яким абонентом під іншим індивідуальним номером. Режим виклику зі звичайним набором номерів абонента мережі АТС;

- спряження з телефонною мережею – користувачі зональної системи мають можливість зв'язуватися з абонентами телефонної мережі та навпаки;

- екстренні виклики – спеціальний режим, який дозволяє в позаштатних ситуаціях оперативно забезпечити оповіщення всіх членів групи або всю систему;

- запобігання несанкціонованому доступу в систему радіозв'язку – тільки дійсні абоненти можуть входити в зональну систему. Всі викрадені чи втрачені абонентські радіостанції відключаються дистанційно засобами радіо;

- сигналізація про вихід із зони дії системи;

- передача кодових повідомлень (підтримка режиму пейджингу);

- пріоритетність користувачів – кожному абоненту може бути наданий певний рівень доступу в систему [3];

- фіксація всіх іменованих місць сеансів радіозв'язку з метою обліку при справлянні абонентської плати.

## 1.1 Стандарт GSM (Глобальна система мобільного зв'язку)

Стандарт GSM передбачає роботу передатчиків у двох діапазонах частот: 890-915 МГц (для передатчиків рухомих станцій MS), 935-960 МГц (для передатчиків базових станцій BTS). У стандарті GSM використовується

вузькополосний TDMA (NB TDMA). У структурі TDMA кадру міститься вісім часових позицій на кожній із 124 несучих. Для захисту від помилок застосовується блочне і згорнуте кодування з чергуванням. Підвищення ефективності кодування та чергування при малій швидкості переміщення рухомих станцій досягається шляхом повільного перемикання робочих частот (SFH) у процесі сеансу зв'язку. Для боротьби з інтерференційними завмираннями використовуються еквалайзери, які забезпечують вирівнювання імпульсних сигналів із середніми відхиленнями часу затримки до 16 мкс.

Таблиця I – Основні характеристики стандарту GSM

| Параметр  | Значення    |
|---|-------------|
| Частота передачі, МГц:  |             |
| рухомої станції   | 890-915     |
| базової станції   | 935-960     |
| Дуплексне рознесення частот, МГц  | 45          |
| Швидкість, кбіт / с:  |             |
| передача в радіоканалі  | 270,833     |
| перетворення мовного кодека   | 13          |
| Ширина смуги каналу, кГц  | 200         |
| Максимальна кількість каналів   | 124         |
| Максимальна кількість каналів, організованих у базовій станції                  | 16-20       |
| Вид модуляції   | GMSK        |
| Індекс модуляції  | BT 0,3      |
| Ширина смуги передмодуляційного гаусівського фільтра, кГц                       | 81,2        |
| Кількість стрибків по частоті за секунду  | 217         |
| Часове рознесення в інтервалах TDMA-кадру (передача-прийом) для рухомої станції | 2           |
| Вид мовного кодека  | RPE / LTR   |
| Максимальний радіус соти, км  | до 35       |
| Схема організації каналів   | TDMA / FDMA |

Система синхронізації розрахована на компенсацію абсолютного часу затримки сигналів до 233 мкс, що відповідає максимальному радіусу соти у 35 км [21, 17].

Обробка мови здійснюється в рамках прийнятої системи переривистої передачі речей (DTX), яка забезпечує увімкнення передавача тільки за наявності мовленнєвого сигналу та відімкнення передавача у паузах і в кінці розмови. У якості пристрою перетворення мови обрано мовний кодек з регулярним імпульсним збудженням / тривалочасовим прогнозом і лінійним передикативним кодуванням з прогнозуванням (RPE / LTR-LPC-кодек). Загальна швидкість перетворення мовного сигналу - 13 кбіт / с. У стандарті GSM забезпечується шифрування повідомлень за алгоритмом шифрування з відкритим ключем (RSA).

Основні характеристики стандарту GSM наведені у табл. I.

Склад обладнання наведено на структурній схемі рис. 1 : MSC (Mobile Switching Centre) – центр комутації рухомого зв'язку, BSS (Base Station System) – обладнання базової станції; OMC (Operations an Maintenance Centre) – центр управління та обслуговування; MS (Mobile Stations) – рухомі станції; BTS (Base Transceiver Station) – приймач-передавач базової станції; BSC (Base Station Controller) – контролер базової станції; TCE (Transcoder) – транскодер; VLR (Visited Location Register) – реєстр переміщення; HLR (Home Location Register) – реєстр положення; AUC (Authentication Center) – центр аутентифікації; EIR (Equipment Identification Register) – реєстр ідентифікації обладнання; NMC (Network Management Center) - центр управління мережею; ADC (Administration Centre) – адміністративний центр; SSS (Switching Sub System) – підсистема комутації; PSTN (Public Switched Telephone Network) – комуттована телефонна мережа загального користування; PDN (Packet Data Network) – мережа пакетної комутації; ISDN (Integrated Services Digital Network) – цифрова мережа інтегрального обслуговування.

Усі мережеві компоненти стандарту GSM взаємодіють відповідно до системи сигналізації ITU-T SS № 7 (CCITTSS № 7).

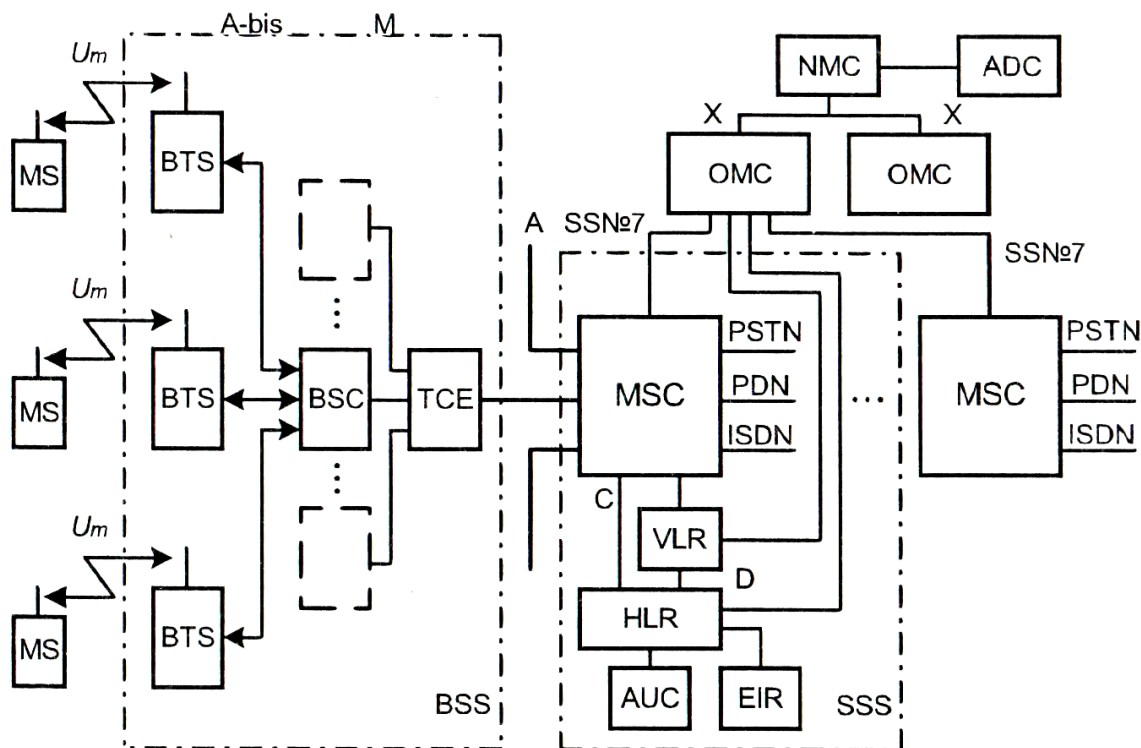


Рисунок 1 – Структурна схема GSM

MSC аналогічна комутаційній станції ISDN і становить інтерфейс між фіксованими мережами (PSTN, PDN, ISDN тощо) і мережею рухомого зв'язку. Він забезпечує маршрутизацію викликів і функції управління викликами. Крім функцій ISDN комутаційної станції, на MSC передбачені функції комутації радіоканалів: "естафетна передача", в процесі якої забезпечується безперервність зв'язку при переміщенні рухомої станції з соти в соту, перемикання каналів в соті при появі пошкоджень чи несправностей.

MSC забезпечує обслуговування мобільних абонентів у визначеній географічній зоні (наприклад, обласному центрі та області), керує процедурами виклику та маршрутизації. Він формує дані, необхідні для виписування рахунків за послуги зв'язку, накопичує дані за розмовами, які виникли, і передає їх у центр розрахунків (білінговий центр), складає статистичні дані, необхідні для контролю роботи та оптимізації мережі, підтримує процедури безпеки, забезпечує управління доступом до радіоканалів.

Центр комунікації не тільки бере участь в управлінні викликами, але й керує процедурами реєстрації місця розташування та передачі керування, крім передачі

керування в підсистемі базових станцій BSS. Реєстрація місця розташування рухомих станцій необхідна для забезпечення виклику доставки рухомих абонентам, що переміщуються, від абонентів PSTN або інших рухомих абонентів. Процедура передачі виклику дозволяє зберігати з'єднання та забезпечувати ведення розмови, коли рухома станція переміщується з однієї зони обслуговування в іншу. Передача викликів в сотах, керованих одним контролером базових станцій BSC, здійснюється цим BSC. Коли передача викликів здійснюється між двома мережами, які управляються різними BSC, первинне управління здійснюється в MSC. Передбачено процедуру передачі виклику між мережами, які відносяться до різних MSC. Центр комутації здійснює слідування за рухомими станціями, використовуючи реєстри положення HLR і переміщення VLR рис 2 .

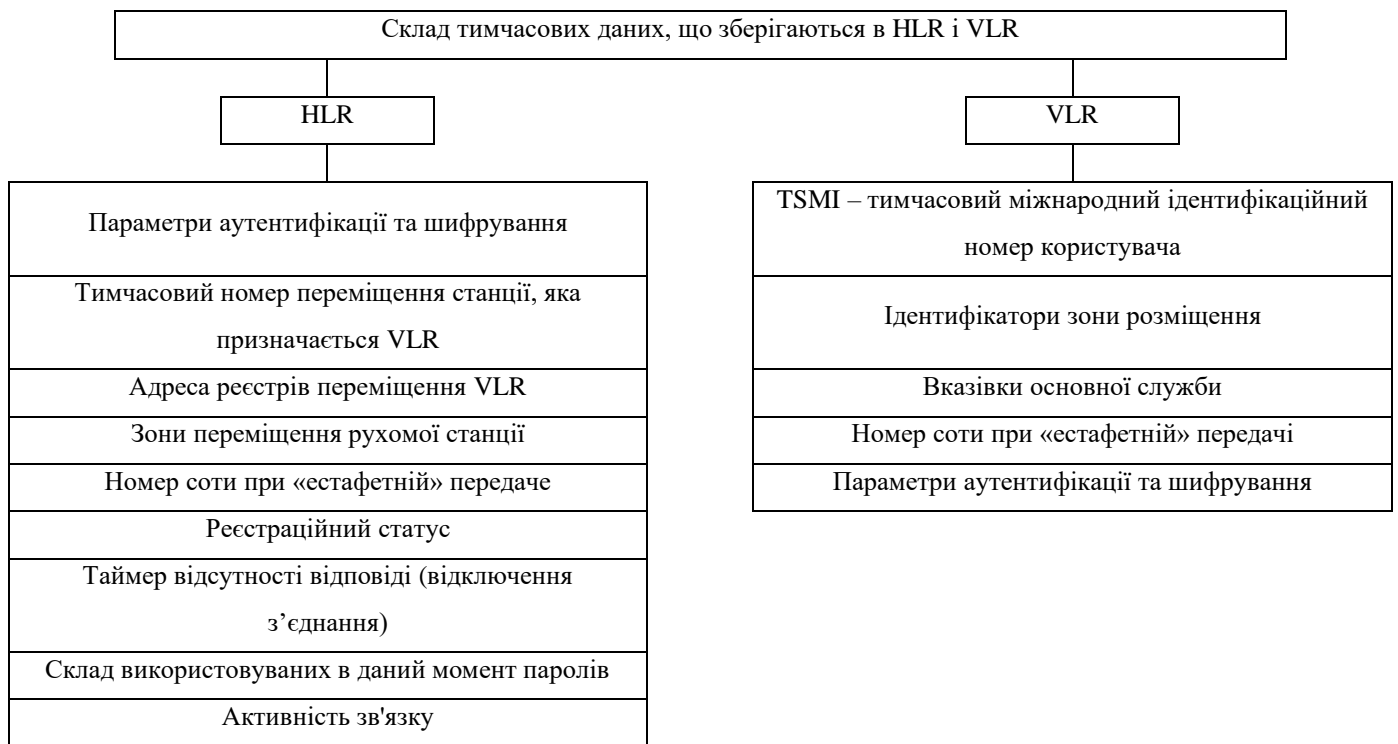


Рисунок 2 – Склад реєстрів HLR і VLR

У HLR зберігається та частина інформації про положення рухомої станції, яка дозволяє центру комутації доставити їй виклик. Реєстр HLR містить міжнародний ідентифікаційний номер рухомого абонента IMSI. Він

використовується для розпізнавання рухомої станції в центрі аутентифікації AUC. HLR – це база даних про постійно прописаних в мережі абонентів. У ньому містяться ідентифікаційні номери та адреси, а також параметри дійсного стану абонентів, склад послуг зв'язку, спеціальна інформація про маршрутизацію. Ведеться реєстрація даних про роумінг абонента, включаючи дані про тимчасовий ідентифікаційний номер (TMSI) і відповідний VLR. Дані, які містяться в HLR, мають дистанційний доступ до всіх мереж MSC і VLR, якщо в мережі є кілька HLR, в базі даних міститься тільки один запис про абонента, тому кожен HLR є певною частиною загальної бази даних мережі, який містить інформацію про конкретного абонента. Доступ до бази даних, що містить інформацію про абонентів, здійснюється за номером IMSI або MS ISDN (номер рухомого абонента в мережі ISDN). У базі даних можна отримати доступ до MSS або VLR, що ережвідноситься до інших мереж у рамках забезпечення міжмережевого потоку.

Другий основний пристрій, що забезпечує контроль за переміщенням рухомої станції із зони в зону, - переміщення реєстрації VLR. З його допомогою забезпечується функціонування рухомої станції за межами зони, контрольованої HLR. Коли рухома станція переходить із зони дії одного BSC в зону другого BSC, вона створюється новим BSC, і в VLR передається інформація про номери області зв'язку, яка забезпечує доставку реєстрів виклику рухомої станції. Для збереження даних, що знаходяться в HLR і VLR, у разі сбоев передбачений захист пристроїв пам'яті цих реєстрів.

VLR містить такі ж дані, як і HLR, але ці дані містяться в VLR тільки до тих пір, поки абонент знаходиться в зоні, яка контролюється даним VLR.

У мережі GSM соти групуються в географічні зони (LA), яким присвоюється свій ідентифікаційний номер (LAC). Кожен VLR містить дані про абонентів кількох LA. Коли рухомий абонент переміщується з одного LA в інший, дані про його роботу оновлюються у VLR. Якщо стара і нова LA знаходяться під управлінням різних VLR, то дані на старому VLR стираються після їх копіювання в новий. Поточна адреса абонента VLR, що міститься в HLR, також оновлюється.

Реєстр VLR забезпечує присвоєння номера рухомої станції (MSRN). Коли рухома станція приймає вхідний виклик, VLR вибирає його з MSRN і передає його в MSC, який здійснює маршрутизацію цього виклику до базових станцій, які знаходяться поруч із рухомим абонентом. VLR розподіляє номери передачі управління при передачі з'єднань від одного MSC до іншого. Він керує розподілом нових TMSI і передає їх у HLR, а також керує процедурами встановлення довжини під час обробки виклику. За рішенням оператора TMSI може періодично змінюватися для ускладнення процедури ідентифікації абонентів. Доступ до бази даних VLR може забезпечуватися через IMSI, TMSI або MSRN. В цілому VLR є локальною базою даних про рухомого абонента для цієї зони, де знаходиться абонент, дозволяє відключити постійні запити в HLR і скоротити час на виклики обслуговування [4].

Щоб уникнути несанкціонованого використання ресурсів системи вводяться механізми аутентифікації – ідентифікації абонента. Центр аутентифікації формує ключі та алгоритми аутентифікації. З його допомогою перевіряються повна повноважень абонента і забезпечується його доступ до мережі. Центр AUC приймає рішення про параметри аутентифікації та визначає ключі шифрування абонентських станцій на основі бази даних в реєстрі ідентифікації обладнання EIR.

Кожен мобільний абонент під час користування системою отримує стандартний модуль справжності абонента (SIM), який містить міжнародний ідентифікаційний номер (IMSI), індивідуальний ключ аутентифікації (Ki), алгоритм аутентифікації (A3). За допомогою записаної на SIM-карті інформації в результаті взаємного обміну даними рухомої станції з мережею забезпечується повний цикл аутентифікації та дозволяється доступ абонента до мережі.

Процедура перевірки мережею достовірності абонента реалізується таким чином. Мережа передає випадковий номер (RAND) на рухому станцію. На ній за допомогою Ki і алгоритму аутентифікації A3 визначається значення відгуку (SRES), тобто  $SRES = Ki * [RAND]$ . Рухома станція надсилає обчислене значення SRES у мережу, яка звіряє його із значенням SRES, яке обчислене мережею. Якщо

значення співпадають, рухома станція приступає до передачі повідомлень. У протилежному випадку зв'язок обривається і індикатор рухомої станції показує, що розпізнавання не відбулося. Для забезпечення секретності, обчислення SRES відбувається в рамках SIM. Несекретна інформація (наприклад, Кі) не піддається обробці в модулі SIM.

EIR містить централізовану базу даних підтвердження довжини міжнародного ідентифікаційного номера обладнання рухомої станції (IMEI). Ця база даних складається зі списків номерів IMEI, організованих таким чином.

Білий список – номери IMEI, про які є відомості, що вони закріплені за санкціонованими станціями; чорний список – номери IMEI станцій, які викрадені, чи такі, яким відмовлено у обслуговуванні; сірий список – номери IMEI станцій, у яких існують проблеми.

У базі даних EIR є доступ MSC даної мережі та інших рухомих мереж.

IWF – міжмережевий інтерфейс, який є одним із складових частин MSC. Він забезпечує доступ абонентів до засобів перетворення протоколу і швидкості передачі даних, щоб їх можна було передавати між термінальним обладнанням (DIE) мережі GSM і звичайним термінальним обладнанням фіксованої мережі. Межмережевий інтерфейс "виділяє" модем зі своїм банком обладнання для зв'язку з певним модемом фіксованої мережі. IWF забезпечує інтерфейси типу прямого з'єднання для обладнання, яке постачається клієнтам, наприклад, для пакетної передачі даних PAO за протоколом X.25.

EH – ехопоглинач, що використовується в MSC зі сторони PSTN для всіх телефонних каналів (незалежно від їх протяжності) внаслідок фізичних затримок в рамках тракту, включаючи радіоканал та мережу GSM. Типовий ехопоглинач може забезпечувати поглинання в інтервалі 68 мс на ділянці між виходом ЕП і телефоном фіксованої телефонної мережі. Загальна затримка в каналі GSM при поширенні в прямому і зворотному напрямках, викликані обробкою сигналу, кодуванням-декодуванням мови, каналним кодуванням тощо становить біля 180 мс. Ця затримка була б незамітною для рухомого абонента, якщо б в телефонному каналі не був включений гібридний трансформатор з перетворенням тракту з двох

на чотири провідний режим, необхідний, оскільки стандартне з'єднання з PSTN є двома проводами. При підключенні двох абонентів фіксованої мережі ехо-сигнали відсутні. Без включення ЄС затримка від поширення сигналів в тракці GSM буде викликати роздрознення абонентів, переривати мовлення і відвертати увагу [6].

ОМС – центр експлуатації та технічного обслуговування, є центральним елементом управління мережею, забезпечує контроль та управління іншими компонентами мережі, а також забезпечує контроль якості роботи мережі. ОМС з'єднується з іншими компонентами мережі засобами каналів пакетної передачі протоколу X.25. Він забезпечує функції обробки аварійних сигналів, призначених для оповіщення обслуговуючого персоналу і реєструє відомості про аварійні ситуації в компонентах мережі. Залежної від характеру несправності ОМС дозволяє забезпечити її усунення автоматично або при активному втручанні персоналу.

NMC - центр управління мережею, який дозволяє реалізовувати раціональне ієрархічне управління мережею GSM. Він забезпечує експлуатацію та технічне обслуговування на рівні всієї мережі, яка підтримується центрами ОМС, які відповідають за управління регіональними мережами. Центр забезпечує управління трафіком і диспетчерське управління мережею за складних аварійних ситуацій. Він контролює стан пристроїв автоматичного управління, задіяних в обладнанні мережі і відображає на дисплеї стан мережі для операторів NMC. Це дозволяє операторам контролювати регіональні проблеми і, за потреби, надавати допомогу ОМС, відповідальному за конкретний регіон. Таким чином, персонал NMC знає стан всієї мережі та може дати вказівку персоналу ОМС змінити стратегію вирішення регіональних проблем. NMC зосереджує увагу на маршрутах сигналізації та з'єднань між вузлами для того, щоб не допускати умов, за яких виникають перевантаження в мережі. Контролюються також маршрути з'єднань між мережами GSM і PSTN для запобігання поширення умов перевантаження між мережами. При цьому персонал NMC координує питання управління мережею з персоналом інших NMC. Центр забезпечує також можливість управління

трафіком для мережевого обладнання підсистеми базових станцій BSS. Оператори NMS в екстремальних ситуаціях можуть задіяти такі процедури управління, як «пріоритетний доступ», коли тільки абоненти з високим пріоритетом (екстрені служби) можуть отримати доступ до системи. NMS може брати на себе відповідальність у будь-якому регіоні, коли місцевий OMS не обслуговується, при цьому OMS діє як транзитний пункт між NMC та обладнанням мережі.

BSS – обладнання базової станції, що складається з контролера базової станції (BSC) і базових приймально-передавальних станцій (BTS). Контролер базової станції може керувати кількома приймальними і передавальними блоками. BSS керує розподілом радіоканалів, контролює з'єднання, регулює їх черговість, забезпечує режим роботи з частотою виклику, модуляцію і демодуляцію сигналів, кодування і декодування повідомлень, кодування мовлення, адаптацію швидкості передачі слів, даних і виклику, визначає почерговість передачі повідомлень персонального виклику.

TCE – транскодер, який забезпечує перетворення вихідних сигналів каналу передачі мови і даних MSC (64 кбіт / із ІКМ) у виді, який відповідає рекомендаціям GSM щодо радіоінтерфейсу (Рекомендація GSM 04.08). Відповідно до цих вимог швидкість передачі мовлення, поданого у цифровій формі, становить 13 кбіт/с. Цей канал передачі цифрових мовних сигналів називається "повношвидкісним". Стандарт в перспективі передбачає використання напівшвидкісного мовного каналу (швидкість передачі 6,5 кбіт / с). Зниження швидкості передачі забезпечує застосування спеціального мовноперетворювального пристрою, який використовує лінійне передативне кодування (LPQ), довгострокове прогнозування (LTP), остаточне імпульсне збудження (RPE - іноді називається RELP). Транскодер зазвичай доступний разом з MSC. Передача цифрових повідомлень у напрямку до контролера базових станцій BSC ведеться з додаванням до потоку зі швидкістю передачі 13 кбіт/с додаткових бітів (стаффінг) до швидкості передачі даних 16 кбіт/с. Потім здійснюється ущільнення з кратністю чотири в стандартний канал 64 кбіт / с. Так формується визначена Рекомендаціями GSM 30-канальна ІКМ-лінія, яка

забезпечує передачу 120 мовних каналів. Шінадцятий канал (64 кбіт / с), «часове вікно», виділяється окремо для передачі інформації сигналізації і часто містить трафік SS №7 або LAPD. У другому каналі (64 кбіт/с) можуть передаватись також пакети даних, які узгоджуються з протоколом X.25 ITU-T. Таким чином, результуюча швидкість передачі за вказаним інтерфейсом становить  $30 \times 64 \text{ кбіт / с} + 64 \text{ кбіт / с} + 64 \text{ кбіт / с} = 2048 \text{ кбіт / с}$ .

MS – рухома станція, що складається з обладнання, яке служить для організації доступу абонентів мереж GSM до існуючих фіксованих мереж. У рамках стандарту GSM прийнято п'ять класів рухомих станцій від 1-го класу з вихідною потужністю 20 Вт, що встановлюються на транспортному засобі, до портативного 5-го класу з максимальною потужністю 0,8 Вт (табл. II ). Передбачається адаптивне регулювання потужності передавача, що забезпечує необхідну якість зв'язку.

Таблиця II – Класифікація рухомих станцій за потужністю

| Клас рухомої станції | Максимальна потужність передавача, Вт | Допустиме відхилення, дБ |
|----------------------|---------------------------------------|--------------------------|
| 1                    | 20                                    | 1,5                      |
| 2                    | 8                                     | 1,5                      |
| 3                    | 5                                     | 1,5                      |
| 4                    | 2                                     | 1,5                      |
| 5                    | 0,8                                   | 1,5                      |

Абоненти рухомої станції незалежні один від одного. Як відзначалося раніше, кожен абонент має свій міжнародний ідентифікаційний номер IMSI, записаний на його інтелектуальну картку (SIM-карту). Такий підхід дозволяє встановити радіотелефони, наприклад, в таксі та автомобілях, що здаються на прокат. Кожній рухомій станції також привласнюється свій IMEI. Цей номер використовується для запобігання доступу до мережі GSM викраденої станції чи станції без повноважень [10, 3].

## 1.2 Стандарт UMTS (Універсальна система мобільного зв'язку)

UMTS (англ. Universal Mobile Telecommunications System - Універсальна Мобільна Телекомунікаційна Система) – технологія сотового зв'язку, розроблена Європейським інститутом стандартів телекомунікацій (ETSI) для впровадження 3G в Європі. Як спосіб передачі даних повітряним простором використовується WCDMA, стандартизована технологія згідно з проектом 3GPP, відповідь європейських учених і виробників за вимогою ІМТ-2000, опублікована Міжнародним союзом електрозв'язку як набір мінімальних критеріїв мережі сотового зв'язку третього покоління. З метою відмінності від конкурентних рішень, UMTS також часто називають 3GSM з метою підтвердження належності технології до мереж 3G і її переваги в розробці з мережами стандарту GSM.

Архітектура системи UMTS показана на рис 3 . Вона використовує ту ж архітектуру, яка використовується у всіх основних системах другого покоління та подібну до вже розглянутої архітектури системи GSM.

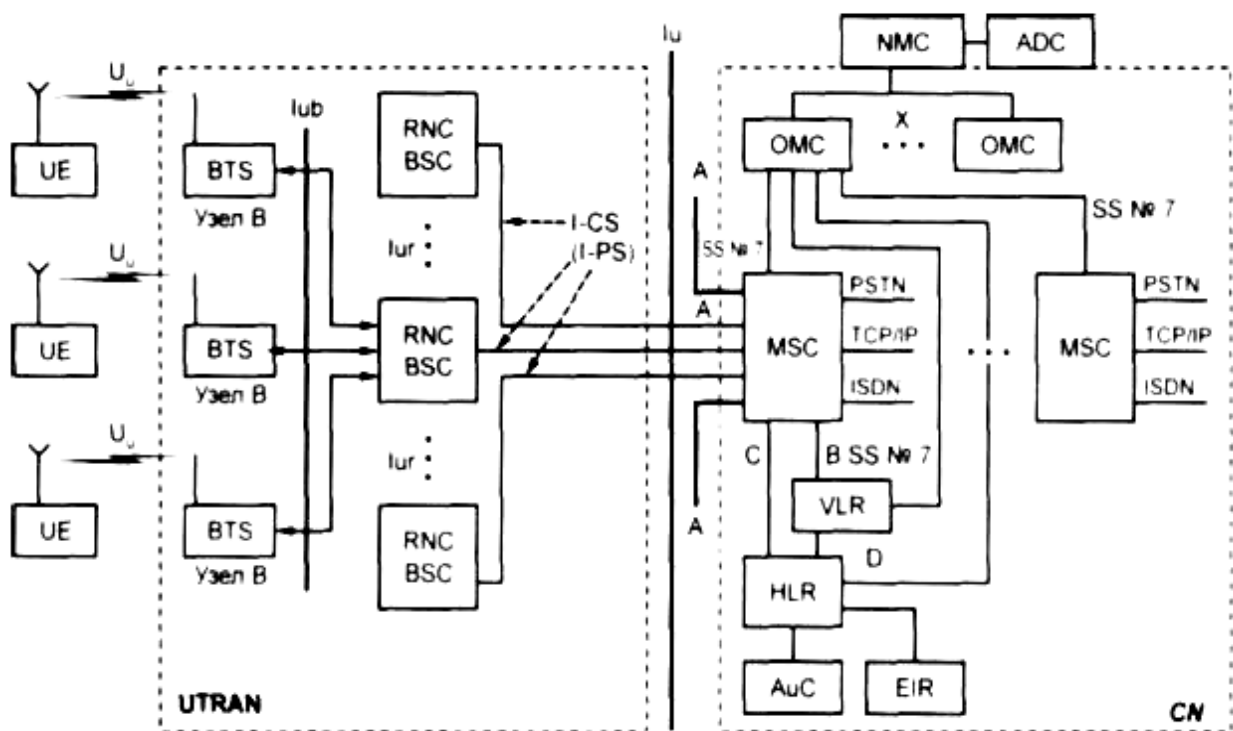


Рисунок 3 – Архітектура мережі та інтерфейси UMTS:

ADC (Administration Center) - адміністративний центр

AuC (Authentication) - Центр аутентифікації

BTS (Base Telephone Station) - Базова приймально-передавальна станція  
EIR (Equipment Identification Register) - реєстр ідентифікації обладнання  
HLR (Home Location Register) - Домашній реєстр місцеположення  
I-CS (Interface Channel Switching) - Інтерфейс комутації каналів  
I-PS (Interface Packet Switching) - Інтерфейс комутації пакетів  
ISDN (Integrated Service Digital Network) - цифрова мережа з інтеграцією служб  
Iu (Interface UTRAN-CN) - Інтерфейс UTRAN-CN  
Iub (Interface BTS- RNC) - Інтерфейс BTS- RNC  
Iur (Interface RNC-RNC) - Інтерфейс RNC-RNC  
MS (Mobile Station) - Мобільна станція  
MSC (Mobile Switching Center) - Центр комутації мобільного зв'язку  
NMC (Network Management Center) - Центр управління мережею  
OMC (Operation and Maintenance Center) - Центр експлуатації і технічного обслуговування  
PSTN (Public Switched Telephone Network) - Телефонна мережа загального користування  
RNC (Radio Network Controller) - Контролер управління радіомережі  
TCP / IP (Internet Protocols) - Протокол управління передачею даних / Інтернет-протокол  
UE (User Equipment) - пристрій користувача  
UTRAN (UMTS Terrestrial RAN) - Мережа наземного радіодоступу UMTS  
Uu (Interface UE-BTS) - Інтерфейс UE-BTS  
VLR (Visit Location Register) - Візитний реєстр розміщення переваг, як глобальний роумінг.  
Але в перспективі UMTS орієнтується на швидкодіючу мережу на базі технологій ATM.

Мережа 3G побудована на базі наступних компонентів: мобільна телефонна станція, в системі UMTS вона називається UE (User Equipment) базова телефонна станція, за термінологією, що використовується, - вузол B; контролер базової станції (BSC) і центр комутації рухомого зв'язку (MSC).

У системі WCDMA замість терміну «контролер базової станції» застосовується термін - «контролер управління радіомережею» (RNC - Radio Network Controller).

UE і мережа наземного радіодоступу UMTS (UTRAN - UMTS Terrestrial Radio Access Network) працюють у відповідності з абсолютно новими протоколами, побудованими на основі потреб нової технології радіозв'язку WCDMA (широкополосний груповий доступ з кодовим розподілом). І наоборот, побудова

основної мережі - CN (Core Network) - повторює GSM. Це дає система з новою технологією радіозв'язку глобальної бази з відомою та перевіреною технологією, що дозволяє прискорити її впровадження та дозволяє використовувати такі чудові переваги, як глобальний роумінг. Але в перспективі UMTS орієнтується на швидкодіючу мережу на базі технологій ATM.

За своїми функціями елементи мережі групуються в набір UTRAN, який працює з усіма функціями, що відносяться до радіозв'язку, і в базовий набір CN, який забезпечує комутацію і маршрутизацію викликів, а також канали передачі даних у зовнішні мережі. У системі UMTS застосовується обладнання користувача (UE - User Equipment), яке взаємодіє з ним і радіоінтерфейсом Iu [21].

Іншим способом групування компонентів мережі UMTS служить її розділення на підмережі. Система UMTS є модульною в тому сенсі, що вона може включати кілька елементів мережі одного і того ж типу. У принципі, мінімальною вимогою для того, щоб система працювала і реалізовувала всі свої функціональні можливості, є наявність, за крайньою мірою, одного логічного елемента мережі кожного типу (деякі функції та, відповідно, деякі елементи мережі, не є обов'язковими). Можливість мати кілька об'єктів одного і того ж типу дозволяє розділити систему UMTS на підмережі, що працюють або самостійно, або разом з іншими підмережами. Така мережа UMTS називається PLMN (наземна мобільна мережа загального користування). Зазвичай одна PLMN експлуатується одним оператором і з'єднується з іншими PLMN так само, як і з іншими типами мереж, наприклад ISDN, PSTN, Інтернет тощо. Обладнання користувачів (UE) включає дві частини:

- Рухоме обладнання - радіотермінал, який використовується для радіозв'язку через інтерфейс Uu;

- Модуль ідентифікації абонента UMTS-SIM (USIM - UMTS Subscriber Identification Module), який є інтелектуальною платою, яка аналогічна SIM-карті служить ідентифікатором абонента, виконує алгоритми аутентифікації та шифрування, а також надає деякі дані про послуги, якими в праві користуватися абонент у роботі з терміналом.

Мобільна станція повинна бути розрахована на підтримку всіх видів послуг мережі третього покоління, зокрема, вона повинна забезпечувати:

- Передачу мови із прийнятим для системи набором швидкостей;
- Послуги служб відеоконференцій і додатків відеотелефонії, що базуються як на комутаційних каналах (ISDN), так і використання передачі пакетів (TCP / IP);
- Послуги мережі Інтернет зі швидкостями до 473,6 Кбіт / с при роботі в звичайному режимі, і з максимально можливою швидкістю в режимі best effort (негарантованого обслуговування з кращими з можливих в даний момент характеристиками);
- Віддалений доступ до інших корпоративних локальних мереж для роботи з файловими серверами, базами даних і додатками електронної пошти.

UTRAN складається з двох елементів: базової станції та контролера базової станції [17,18].

Базова станція (за термінологією 3GPP (проект партнерства виробників систем сотового зв'язку третього покоління) - вузол B) перетворює потік даних між інтерфейсами Iub і Iu. Вона також приймає участь в управлінні радіоресурсами. Базова станція повинна забезпечувати пропускну здатність базових і керуючих каналів для підтримки перерахованих служб.

Контролер базової станції (за термінологією 3GPP - контролер радіомережі - RNS) забезпечує інтерфейси зі станціями з комутацією каналів I-CS або пакетною комутацією I-PS.

Кожна з цих станцій має традиційну архітектуру, але з урахуванням нових сервісів і технологій. Коротко розглядаємо архітектуру RNC. Оскільки вона залежить від місць станцій у мережі та зв'язку з іншими станціями цієї та інших систем, архітектура може бути різною. Тому приведемо конкретний приклад. У цьому прикладі представлений інший типовий склад пристроїв, що забезпечує типовий набір послуг. Архітектура орієнтована на роботу в швидкодіючих мережах АТМ. Ця система показує можливості станцій 3-го покоління WCDMA.

Контролер радіомережі (RNC) архітектури, яка показана на рис. 4 забезпечує наступні функції:

- Управління радіоресурсами, обробку прийнятих сигналів і м'який хендовер;
- Кодування та декодування сигналів (якщо кодери та декодери встановлені в контролері)
- Прийом і передача інформації від мобільних станцій засобами інтерфейсу Iub, що забезпечує взаємодію з системою АТМ зі швидкістю 1,5 / 2 Мбіт / с;
- Передача інформації в центр комунікації мобільного зв'язку каналами АТМ зі швидкістю 155 Мбіт / с засобами інтерфейсу Iub;
- Передача неструктурованих даних (послуги UDI)
- Відлік часу і синхронізацію.

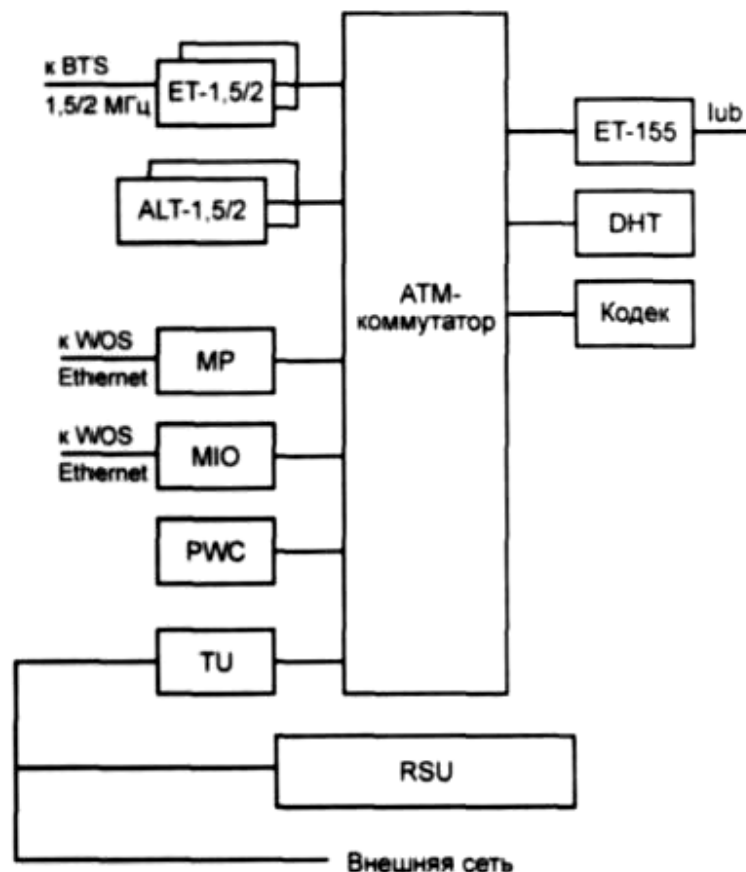


Рисунок 4 – Архітектура контролера радіомережі:

ALT -1,5 / 2 (ATM Link Termination Diversity) - кінцевий набір АТМ-підключення

DHT (Diversity Handover Terminal) - пристрій проведення хендовера з рознесеним прийомом

ET-1,5 / 2, ET-155 (Exchange Terminal) - кінцевий термінал

Iu - інтерфейс між BTS і RNC

Iub - Інтерфейс RNC і MSC

MIO (Multiplexing Input / Output) - Багатоцільовий пристрій входу / виходу

MP (Main Processor) - основний процесор

PWC (Power Connection) - Підключення електроживлення

RSU (Reference Clock Unit) - Блок опорного сигналу синхронізації

RNC (Radio Network Controller) - контролер радіомережі

TU (Timing Union) - Тактовий генератор

WOS (WCDMA Operation System) - система функціонування WCDMA

До одного контролера радіомережі можуть бути підключені мінімум три базові станції. При цьому будь-яка з них може використовувати до двох Iub-каналів 1,5 / 2 Мбіт / с. Транспортна ємність конфігурації, представлена на рис 1.4, становить близько 160 мобільних станцій, які можуть встановити з'єднання одна з одною або з мережею фіксованого зв'язку. Кожне підключення комується в MSC через АТМ-комутатор. В останній час проводяться роботи по заміні АТМ-комутаторів на Softswitch (гнучкий програмний комутатор) [12].

У мережі UMTS в процесі м'якого хендвера з одним UE можуть працювати два контролера RNC. Тоді один з них (який завершує з'єднання) називається обслуговуючим (SRNC - Service RNC), а інший - дрейфуючим (DRNC - Drift RNC).

Центр комутації рухомого зв'язку (MSC) системи UMTS, архітектура якого представлена на рис 5 містить усі типові елементи станції того ж типу для системи GSM і виконує ті ж функції.

MSC забезпечує:

- Підключення до фіксованих мереж (таким, наприклад, як ТфЗП і ISDN)
- Передачу сигналів між функціональними об'єктами в підсистемі мережі з використанням ОКС-7;
- Обслуговування рухомих абонентів, розташованих в межах визначеної географічної зони;

- Обслуговування групи сот і всіх видів з'єднань, які потребує в процесі роботи рухома станція; MSC аналогічна комутаційній станції ISDN і реалізує інтерфейс між фіксованими мережами (PSTN, Інтернет, ISDN тощо);
- Взаємодію з RNC через інтерфейс Iub, а з мережами ISDN і локальними комп'ютерними АТМ- мережами - через інтерфейси фіксованих мереж;
- Маршрутизацію викликів і функції управління викликами, виконання процедур управління, всі функціональні можливості мобільного абонента, такі як реєстрація, аутентифікація, оновлення місця розташування, хендовер;
- Формування даних, необхідних для виписки рахунків за надані мережею послуги зв'язку;
- Підтримку процедур безпеки, що застосовуються для управління доступом до радіоканалів.

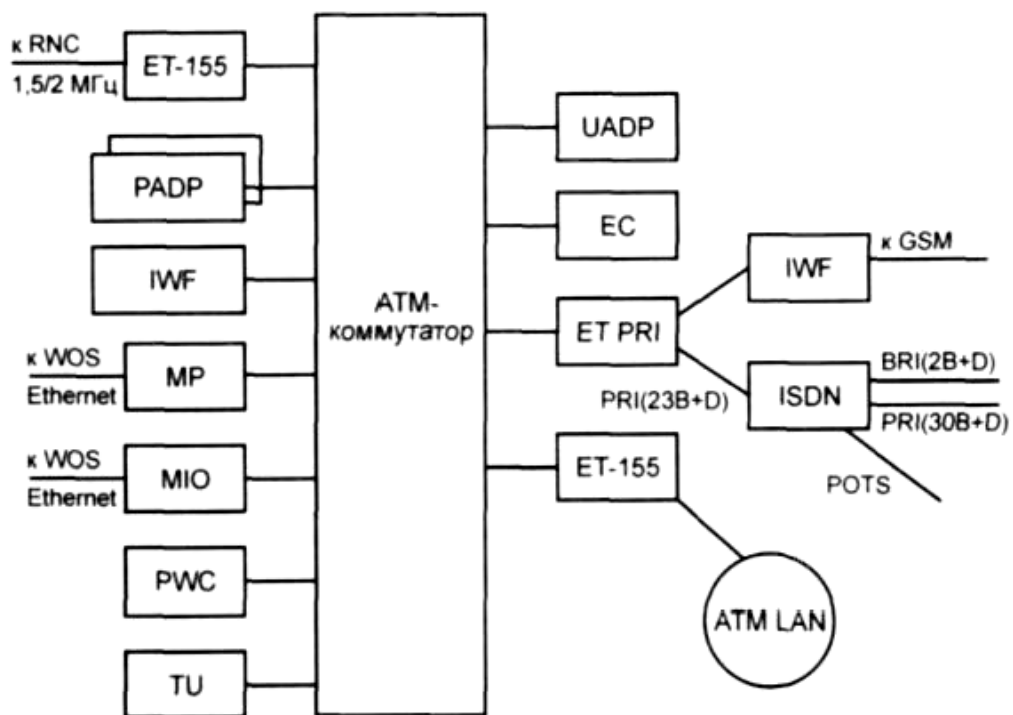


Рисунок 5 – Архітектура центру комунікації мобільного зв'язку:

BRI (Basic Rate Interface) - інтерфейс основної швидкості

EC (Echo Cancellor) - Ехокомпенсатор

ET-1,5 / 2, ET-155 (Exchange Terminal) - кінцевий термінал

IWF (Interworking Function) - функція взаємодії

MIO (Multiplexing Input / Output) - Багатоцільовий пристрій входу / виходу

MP (Main Processor) - основний процесор

MSC (Mobile Switching Center) - Центр комутації мобільного зв'язку  
PADP (Packet services Adaptation) - Адаптація пакетних послуг  
POTS (Plain Ordinary Telephone Services) - традиційний (аналоговий) телефонний сервіс  
PRI (Primary Rate Interface) - Інтерфейс первинної швидкості  
PWC (Power Connection) - Електроживлення  
RNC (Radio Network Controller) - контролер радіомережі  
TU (Timing Union) - тактовий генератор  
UADP (UDI services Adaptation) - Адаптація до послуг UDI  
WOS (WCDMA Operation System) - система функціонування WCDMA

Основною відмінністю MCS системи UMTS від аналогічного вузла системи GSM є те, що комутатор MSC повинен бути розрахований на високі швидкості, тому він зазвичай працює на базі АТМ-коммутатора.

Подібно RNC, MSC системи UMTS також розроблені на основі базової АТМ-інфраструктури і мають таку ж гнучкість, що і RNC. На практиці деякі функції можуть навіть перерозподілятися між RNC і MSC, які взаємодіють з RNC через інтерфейс Iub, а з мережами ISDN і локальними комп'ютерними мережами АТМ - через інтерфейси фіксованих мереж.

Основним завданням MSC є встановлення та руйнування з'єднань від мобільних станцій. Оскільки MSC може в одному і тому ж вузлі обробляти голос, здійснювати передачу пакетних даних і даних з комутацією каналів, то стає можливим обслуговування мультимедійних додатків. MSC виконує функції:

- Адаптивної обробки, як пакетних даних, так і даних для передачі мережею з комутаційними каналами;
- Взаємодії с мережами ISDN;
- Взаємодії з локальними комп'ютерними АТМ-мережами;
- Кодування / декодування мови відповідно до рекомендацій ІТУ-Т G.729 (за умовами реалізації кодеків у MSC);
- Подавлення сигналів ехо;
- ІР-маршрутизації.

Для адаптивної обробки абонентських даних з метою передачі аналоговими голосовими мережами, а також мережами з комутацією каналів і пакетів

використовується зовнішнє обладнання, наприклад, конвертор ISDN і АТМ-маршрутизатор.

Зовнішній інтерфейс основної швидкості (BRI) відповідає стандартам. Крім того, при підключенні зовнішнього конвертора ISDN також можуть бути реалізовані ISDN-інтерфейси (PRI і BRI), які відповідають рекомендаціям ІТУ-Т Q.931 (рівень 3), Q.921 (рівень 2) і I.430 / I. 431 (рівень 1).

Можливості сумісності центру комутації мобільного зв'язку (блок ІWF на рисунку 5) дають змогу підключатися до центру комутації мережі GSM.

Вбудований ІР-маршрутизатор забезпечує роботу потоків зі швидкістю до 10 Мбіт/с. Розподіл ресурсів між голосними, каналними даними і пакетними даними регулюється різними варіантами конфігурації ехопригнічувача, блоків адаптації послуг UDI (UADP), адаптації пакетних послуг (PADP), ІР-маршрутизатора (IPR) та інтерфейсу PRI.

### **1.3 Стандартний Wi-Fi (Wireless Fidelity)**

Технологія радіо-Ethernet була розроблена в середині 90-х, а в 1997 році отримала схвалення ІЕЕЕ - у вигляді стандарту Wireless LAN 802.11; для нього був обраний нерегульований діапазон 2,4 ГГц, а швидкість роботи тоді досягала 1 або 2 Мбіт / с. [13,15].

Поштовх до масового впровадження нової технології відбувся зі сторони компанії Apple (до 11 Мбіт / з ІЕЕЕ 802.11b) в 1999р. Чуть пізніше з'явився термін Wi-Fi (від Wireless Fidelity - «безпроводна точність»). Через кілька років виникла ініціатива Intel Centrino, яка додала процесові впровадження ІЕЕЕ 802.11 всесвітнього розмаху, в результаті чого в даний час з'являється більшість портативних ПК (ноутбуків, планшетів тощо) які продаються в світі оснащені радіокартами.

Головною перевагою обладнання ІЕЕЕ 802.11 можна отримати ефективну реалізацію фізичного рівня, а також те, що група абонентів має рівноправний доступ до загального каналу зв'язку, який, у свою чергу, може бути організований за будь-якою з наступних технологій:

- Світлова передача в інфрачервоному спектрі (за відомими причинами не надто «прижилась»);
- Широкополосний сигнал за методом прямої послідовності (DSSS - Direct Sequence Spread Spectrum)
- Широкополосний сигнал за методом частотних скачок (FHSS - Frequency Hopping Spread Spectrum).

У найчастіше використовуваному на практиці режимі DSSS при одночасному використанні трьох каналів можна отримати загальну швидкість передачі 6 Мбіт / с. У режимі FHSS загальна швидкість передачі статистично, за наявності кількох одночасно працюючих передавачів, не перевищує 4 Мбіт / с (за іншими оцінками - до 10 Мбіт / с), і дальність зв'язку менша.

Діапазон 2,4 ГГц використовується системами 802.11 як всередині споруд, так і ззовні. При зовнішньому використанні потужність передатчика не повинна перевищувати 100 мВт (цього вистачає, в середньому, на 100 - 300 м), а при внутрішньому розміщенні його не повинно бути "чутно" ззовні будівлі.

Метод доступу до загального каналу в IEEE 802.11 (CSMA / CA - Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance) - колізійний; але, на відміну від звичайного кабельного Ethernet`а, є фаза попереднього резервування каналу, так як колізії між абонентами допускаються тільки при резервуванні (в процесі "змагання" абонентських терміналів для зайняття каналу), а сама передача даних відбувається без колізій.

На основі стандарту 802.11 встановлена сотова архітектура, причому мережа може складатися як з одного, так і з кількох сот. Кожна сота керується базовою станцією, так званою точкою доступу (Access Point - AP), яка разом з перебуваючими в межах радіуса її дії робочими станціями користувачів формує базову зону обслуговування.

У стандарті IEEE 802.11 визначено один варіант рівня MAC (Medium Access Control - управління доступом до середовища) і три типи фізичних каналів. На MAC-рівні визначаються базові структури архітектури мережі та перелік послуг, які надаються цим рівнем. Передбачено два типових варіанти архітектури мереж:

- При незалежній конфігурації станції (термінали) можна зв'язуватися безпосередньо з іншою, створення будь-якої інфраструктури не потрібно. Конфігурація відрізняється простою зоною, але площа обслуговування і можливості такої мережі обмежені.

- При розширеній конфігурації станції зв'язуються через точку доступу. Точка доступу обслуговує станцію базової зони, сукупність яких утворює розширену зону обслуговування. Точки доступу з'єднуються між собою або за допомогою сегментів провідної / кабельної мережі, або за допомогою радіомостів.

Для забезпечення переходу мобільних робочих станцій із зон дії однієї точки доступу до іншої в багатосотових системах передбачені спеціальні процедури сканування (активного та пасивного прослуховування ефіру) і підключення. Рівень MAC 802.11 не несе відповідальності за те, яким чином клієнт підключається до точки доступу.

Для захисту мережі стандартом IEEE 802.11 передбачено цілий комплекс заходів безпеки передачі даних під загальною назвою Wired Equivalent Privacy (WEP, WEP-2 тощо), включно із засобами протидії несанкціонованому доступу (механізми та процедури аутентифікації), а також попередження перехоплення інформації (шифрування).

Базова станція Wi-Fi - компактний і недорогий апарат, а абонентський блок - це вставна або вбудована плата в портативний комп'ютер.

Слід зазначити, що більшість сучасних продуктів 802.11 сьогодні підтримує IP-телефонію, для чого понадобилися вдосконалення стандарту, щоб зменшити колізії, які здатні привести до значної затримки при передачі мови. На практиці вся затія з Radio-Ethernet «породила» цілу сім'ю стандартів 802.11 із доданими буквами «a, b, d, e, f, g, h, i, j».

Типова мережа Wi-Fi складається з однієї або кількох точок доступу («hot spot» - гаряча пляма), (тобто є одна точка доступу - це один об'єкт із мережею Wi-Fi), кожна з яких може включати до свого складу цілий набір точок доступу до бази протоколу 802.11b (2,4 - 2,4835 ГГц), підключених виділеними каналами доступу в Інтернет або до інших мереж (наприклад, до транспортної мережі будь-

якого оператора, що надає послуги високошвидкісного доступу в Інтернет і VoIP). Залежно від потреб на об'єктах точки доступу можуть масштабуватися шляхом підключення додаткових точок доступу.

Спрощена схема організації hotspot наведена на рис 6 .

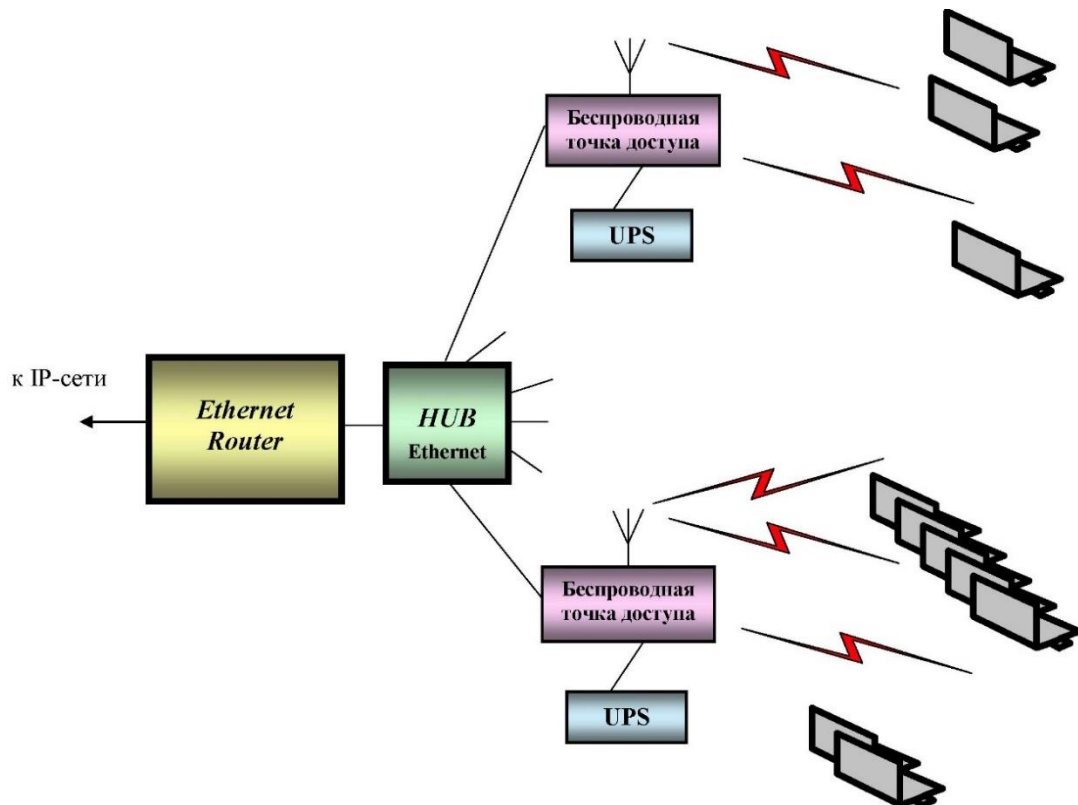


Рисунок 6 – Схема організації «хотспота»

Кількість одночасно працюючих користувачів, яку підтримує одна точка доступу, залежить, у першу чергу, від завантаженості трафіку. У мережі Wi-Fi смуга пропускання ділиться між користувачами так само, як і в кабельній мережі. Продуктивність залежить від характеру роботи користувачів. Їх кількість, підтримувана однією системою Wi-Fi, практично не обмежена, і їх можна збільшити, встановлюючи нові точки доступу. За допомогою точок доступу, налаштованих на різні частоти (канали), які перекриваються, можна розширити за рахунок збільшення кількості користувачів в одній зоні. Каналів, які перекриваються і які не будуть створювати взаємні завади, одночасно може бути встановлено не більше трьох, і вони втричі збільшать кількість користувачів.

## 1.4 Стандарт WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access)

WiMAX (англ. Worldwide Interoperability for Microwave Access) - телекомунікаційна технологія, розроблена з метою забезпечення універсального бездротового зв'язку на більших відстанях для пристроїв широкого спектру (від робочих станцій і портативних комп'ютерів до мобільних телефонів). Базується на стандарті IEEE 802.16, який також називають Wireless MAN (WiMAX слід вважати жаргонною назвою, оскільки це не технологія, а назва форуму, на якому технологія Wireless MAN і була погоджена) [15].

Назва «WiMAX» був створений WiMAX Forum - організацією, яка була заснована в червні 2001 року з метою просування і розвитку технології WiMAX. Форум описує WiMAX як «засновану на стандартній технологію, що забезпечує високошвидкісний бездротовий доступ до мережі, альтернативний виділеним лініям і DSL». Максимальна швидкість - до 1 Гбіт / с на комірку.

WiMAX підходить для вирішення наступних завдань:

- Об'єднання точок доступу Wi-Fi одна з одною та іншими сегментами Інтернету;
- Забезпечення бездротового широкополосного доступу як альтернативи виділеним лініям і DSL;
- Надання високошвидкісних сервісів передачі даних і телекомунікаційних послуг;
- Створення точок доступу, не прив'язаних до географічного положення;
- Створення системи віддаленого моніторингу.

WiMAX дозволяє здійснювати доступ в Інтернет на високих швидкостях, з набагато більшим покриттям, ніж у Wi-Fi мереж. Це дозволяє використовувати технологію в якості «магістральних каналів», продовженням яких виступають традиційні DSL- і виділені лінії, а також локальні мережі. У результаті подібний підхід дозволяє створити високошвидкісні мережі, масштабовані в рамках міст.

Набір переваг присутній у всьому сімействі WiMAX, однак його версії істотно відрізняється одна від іншої. Розробники стандарту шукали оптимальні рішення як для фіксованого, так і для мобільного застосування, але задовольнити

всі вимоги в рамках цього стандарту не вдалося. Хоча ряд базових вимог співпадає, націленість технологій на різні ринкові ніші спричинила створення двох окремих версій стандарту (вірніше, їх можна вважати двома різними стандартами). Кожна зі специфікацій WiMAX визначає свої робочі діапазони частот, ширину смуги пропускання, потужність випромінення, методи передачі та доступу, способи кодування та модуляції сигналу, принципи повторного використання радіочастот та інші показники. Тому WiMAX-системи, засновані на версіях стандарту IEEE 802.16 e та d, практично несумісні. Короткі характеристики кожної з версій наведені нижче.

802.16-2004 (відомий також як 802.16d і фіксований WiMAX). Специфікація затверджена в 2004 році. Використовується ортогональне частотне мультиплексування (OFDM), підтримується фіксований доступ у зонах з наявністю або відсутністю прямої видимості. Користувацькі пристрої є стаціонарними модемами для встановлення ззовні та всередині приміщень, а також PCMCIA-карти для ноутбуків. У більшості країн під цю технологію виведені діапазони 3,5 і 5 ГГц.

802.16-2005 (відомий також як 802.16e і мобільний WiMAX). Специфікація затверджена в 2005 році. Це - новий виток розвитку технології фіксованого доступу (802.16d). Оптимізована для підтримки мобільних користувачів версія підтримує ряд специфічних функцій, таких як хендовер і роумінг. Застосовується OFDM-доступ (SOFDMA), масштабований, можлива робота за наявності або відсутності прямої видимості. Плановані частотні діапазони для мережі Mobile WiMAX такі: 2,3-2,5; 2,5-2,7; 3,4-3,8 ГГц. Конкурентами 802.16e є всі мобільні технології третього покоління (наприклад, EV-DO, HSDPA) [16,19].

Основні відмінності двох технологій полягають в тому, що фіксований WiMAX дозволяє обслуговувати тільки «статичних абонентів», а мобільний орієнтований на роботу з користувачами, які переміщуються зі швидкістю до 120 км/год. Мобільність означає наявність функцій роумінга і «безшовного» перемикання між базовими станціями при переміщенні абонента (так як це

відбувається в мережах сотового зв'язку). У загальному випадку мобільний WiMAX може застосовуватися і для обслуговування фіксованих користувачів.

У загальному вигляді WiMAX мережі складаються з наступних основних частин: базові та абонентські мережі, а також обладнання, яке поєднує базові станції між собою, з постачальником сервісів і зв'язок з Інтернетом. Для підключення базової станції до абонента використовується високочастотний діапазон радіохвиль від 1,5 до 11 ГГц. В ідеальних умовах швидкість обміну даними може досягати 70 Мбіт / с, при цьому не потрібно забезпечувати пряму видимість між базовою станцією і приймачем.

WiMAX застосовується як для вирішення проблем «останньої милі», так і для надання доступу в офісних та районних мережах.

Між базовими станціями (БС) встановлюються з'єднання (прямої видимості), які використовують діапазон частот від 10 до 66 ГГц, швидкість обміну даними може досягати 140 Мбіт/с. При цьому, в крайньому випадку одна базова станція підключається до мережі провайдера з використанням класичних провідних з'єднань. Однак, чим більша кількість БС підключено до мереж провайдера, тим вища швидкість передачі даних і надійність мережі в цілому.

Структура мереж сімейства стандартів IEEE 802.16 схожа з традиційними мережами GSM (базові станції працюють на відстані до десятків кілометрів, для їх встановлення не обов'язково будувати щогли - допускається встановлення на дахах будинків при дотриманні умов прямої видимості між станціями).

MAC / канальний рівень. У мережах Wi-Fi всі користувачі станції, які хочуть передавати інформацію через точку доступу (AP), змагаються за «увагу» останньої. Такий підхід може викликати ситуацію, при якій зв'язок для більш віддалених станцій постійно обривається користувачами ближчих станцій. Подібний стан речей утруднює використання таких сервісів, як Voice over IP (VoIP), які дуже сильно залежать від безперервного з'єднання. Що стосується мереж 802.16, в них MAC використовує алгоритм планування. Будь-якій користувацькій станції достатньо лише під'єднатися до точки доступу, як для неї

буде створено виділений слот на точці доступу, який недосяжний для інших користувачів.

Архітектура. WiMAX Forum розробив архітектуру, яка визначає безліч аспектів роботи мережі WiMAX: взаємодія з іншими мережами, розподіл мережевих адрес, аутентифікація та багато іншого.

На рис 7 наведено умовну архітектуру мережі WiMAX.

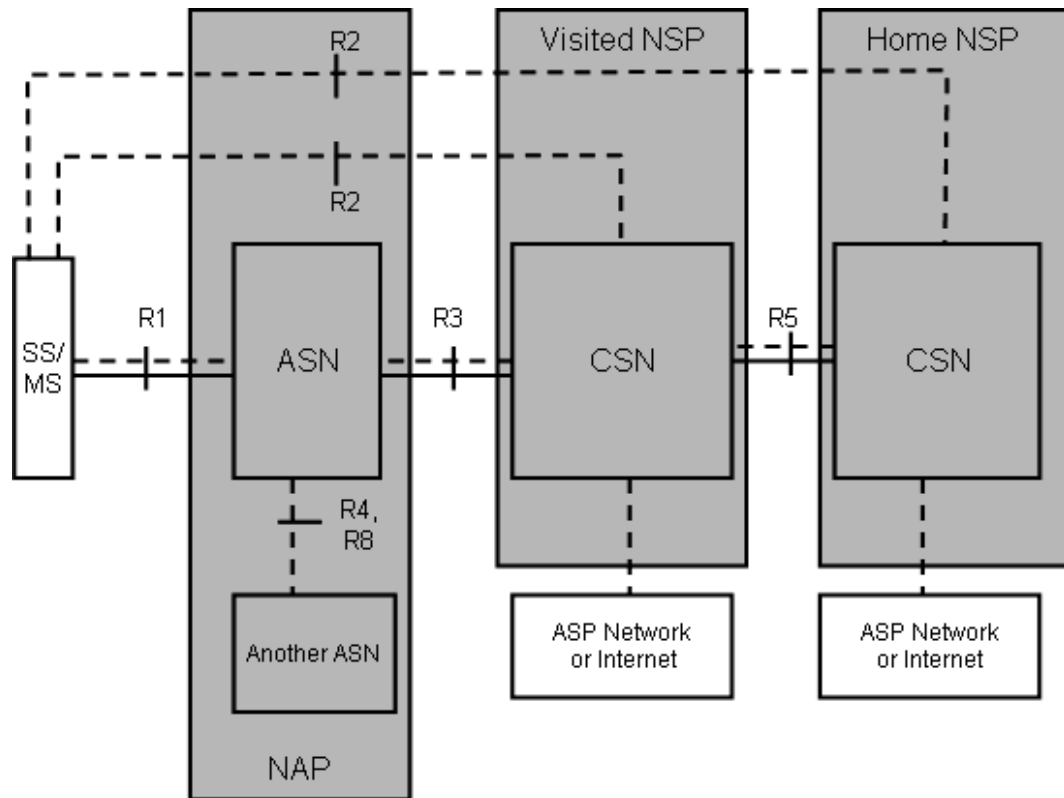


Рисунок 7 – Архітектура мережі WiMAX:

- ASN (Access Service Network) - мережа доступу
- SS/MS (the Subscriber Station / Mobile Station) - Абонентська / мобільна станція
- ASN (the Access Service Network) - Мережа обслуговування доступу
- BS (Base station) - базова станція, частина ASN;
- ASN-GW (the ASN Gateway) - шлюз, частина ASN;
- CSN (the Connectivity Service Network) - мережа служби підключення
- HA (Home Agent) - домашній агент, частина CSN
- NAP (a Network Access Provider) - провайдер доступу до мережі
- NSP (a Network Service Provider) - постачальник мережевих послуг

ASN Gateway - призначений для об'єднання трафіку і повідомлень сигналізації від базових станцій і подальшої їх передачі в набір CSN.

BS (Base Station) - базова станція. Основною задачею є встановлення, підтримка і роз'єднання радіоз'єднання. Крім того, здійснює обробку сигналізації, а також розподіл ресурсів серед абонентів.

НА (Home Agent) - елемент мережі, який відповідає за можливість роумінгу. Крім того, забезпечується обмін даними між мережами різних операторів.

Далі відзначимо, що архітектура мережі WiMax не прив'язана до будь-якої певної конфігурації, володіє високою гнучкістю і масштабованістю.

### **1.5 Принципи побудови зональних мереж**

На рис 8 наведена узагальнена структурна схема однозонової зональної системи зв'язку.

До складу БС, крім радіочастотного обладнання (ретранслятори, пристрій об'єднання радіосигналів антени), входять також комутатор, пристрій управління (УУ) та інтерфейси із різними зовнішніми мережами.

Ретранслятор (РТ) – набір приймальнопередавального обладнання, що обслуговує одну пару несучих частот. У більшості зональних систем зв'язку одна пара несущих означає один канал трафіку (КТ). З появою цифрових стандартів, передбачене часове ущільнення одного РТ, може забезпечити два або чотири КТ [22, 26].

Антени БС, як правило, мають кругову діаграму направленості. При розміщенні БС на краю зони застосовують спрямовані антени. БС може розміщувати як єдину прийомопередаючу антенну, так і роздільні антени для прийому та передачі. У деяких випадках на одній щоглі може бути розміщено кілька приймальних антен для боротьби із завмираннями, спричиненими багатопроменевим поширенням.

Пристрій об'єднання радіосигналів дозволяє використовувати одне і те ж антенне обладнання для одночасної роботи приймачів і передавачів на кількох частотних каналах.

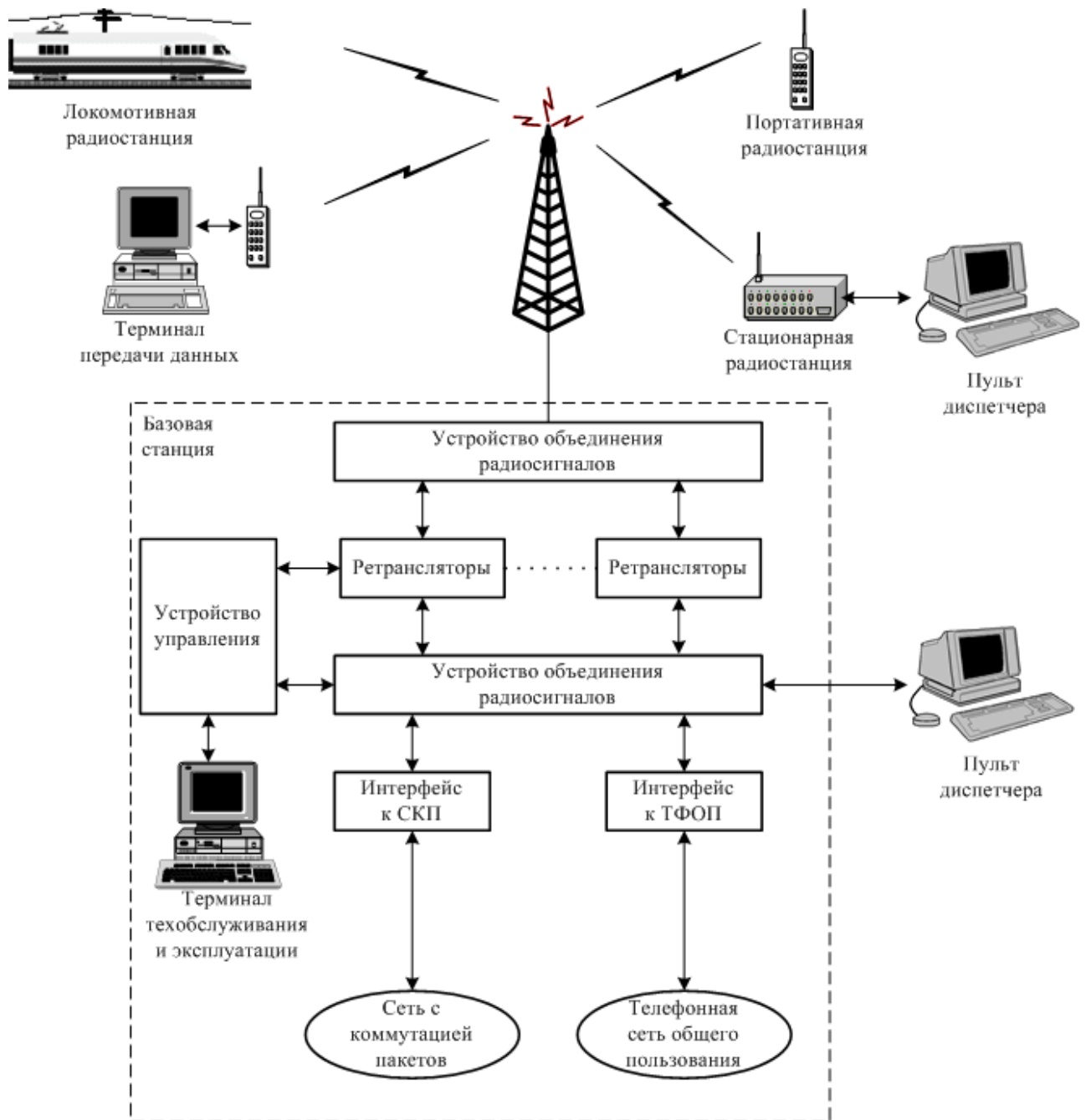


Рисунок 8 Структурна схема зональної системи

Комутатор в однозонній зональній системі зв'язку обслуговує весь її трафік, включаючи з'єднання мобільних абонентів (МА) з телефонною мережею загального користування (ТФОП) і всі виклики, пов'язані з передачею даних.

Пристрій управління (УУ) забезпечує взаємодію всіх вузлів БС. Він також обробляє виклики, здійснює аутентифікацію викликів абонентів, ведення чергових викликів, внесення записів у блок даних (БД) погодинної оплати. У деяких системах УУ регулює максимально допустиму тривалість з'єднання з

телефонною мережею. Як правило, використовуються два варіанти регулювання: зменшення тривалості з'єднань у заздалегідь задані години з більшим навантаженням, або адаптивна зміна залежно від поточного навантаження.

Інтерфейс до ТФОП реалізується в зональних системах зв'язку різними способами. У деяких системах (наприклад, SMARTRUNK II) підключення здійснюється дво- провідними комутаційними лініями. Більше сучасних зональних систем зв'язку мають у складі інтерфейсу до апаратури ТФОП пристрої прямого набору номерів (DID), що забезпечує доступ до абонентів зональної мережі з використанням стандартної нумерації АТС.

Зб'єднання з ТФОП є традиційним для зональних систем зв'язку, але в останній час все більше зростає кількість додатків, які передбачають передачу даних, у зв'язку з чим наявність інтерфейсу до мереж з комутаційними пакетами (СКП) також стає обов'язковою.

Термінал технічного обслуговування та експлуатації (ТОЕ) розташований, як правило, на БС. Термінал призначений для контролю за станом системи, проведення діагностики несправностей, тарифікації, внесення змін в базу даних (БД) абонентів. Обов'язковими елементами зональних систем зв'язку є диспетчерські пульти (ДП). Транзінкові системи зв'язку використовуються, в першу чергу, користувачами служб і управлінь залізниць, робота яких вимагає наявності диспетчера ПЧ, ЕЧ, ТЧ, ШЧ, а також служби охорони, швидкої медичної допомоги, пожежної охорони, муніципальні служби. ДП можуть включатися в систему засобами абонентських радіоканалів, або підключитися засобами виділених каналів безпосередньо до комутатора БС. В рамках однієї зональної системи зв'язку може бути організовано кілька незалежних мереж зв'язку. Користувачі кожної з таких мереж не заважатимуть роботі сусідів і не зможуть вмішуватися в роботу інших мереж. Тому в одній зональній системі зв'язку можуть працювати кілька ДП, які підключені до неї різними способами.

Абонентское обладнання тракінгових систем зв'язку включає в себе широкий набір пристроїв. Як правило, найчисельнішими є напівдуплексні РС, оскільки вони в найбільшій мірі підходять для роботи в замкнених групах. В

основному, це функціонально обмежені пристрої, які не мають цифрової клавіатури. Їх користувачі мають можливість лише зв'язуватися з абонентами всередині своєї робочої групи, а також надсилати зовнішні виклики диспетчеру. Як правило, цього цілком достатньо для більшості користувачів послуг зв'язку зональних систем радіозв'язку. Існують і напівдуплексні РС з широким набором функцій і цифровою клавіатурою, але вони, будучи істотно дорожчими, призначені для більш вузького кола абонентів.

У зональних системах зв'язку поступово починає застосовуватись новий клас абонентських пристроїв – дуплексні РС, які нагадують сотові телефони, але володіють значно більшою функціональністю в порівнянні з дуплексними РС. Дуплексні радіостанції зональних систем зв'язку користувача забезпечують не тільки з'єднання з ТФОП, але і можливість групової роботи в напівдуплексному режимі.

Як напівдуплексні, так і дуплексні зональні РС випускаються не тільки в портативному, але і в мобільному виконанні. Вихідна потужність передавачів мобільних РС вища.

Відносно новим класом пристроїв для зональних систем зв'язку є термінали передачі даних (ПД). В аналогових тракінгових системах зв'язку термінали ПД – це спеціалізовані радіомодеми, які підтримують відповідний протокол радіоінтерфейсу. Для цифрових систем характернішим є вбудовування інтерфейсу ПД в АР різних класів. До складу мобільного терміналу ПД часто входить супутниковий навігаційний приймач системи Global Position System (GPS), призначений для визначення поточних координат і подальшої передачі їх диспетчеру на пульт.

У зональних системах зв'язку використовуються також стаціонарні РС, переважно для підключення ДП. Вихідна потужність передавачів стаціонарних РС приблизно така ж, як у мобільних РС.

Архітектура багатозонових зональних систем зв'язку може бути побудована за двома принципами. Якщо визначальним фактором є вартість обладнання, використовується міжзональна комутація (рис 9).

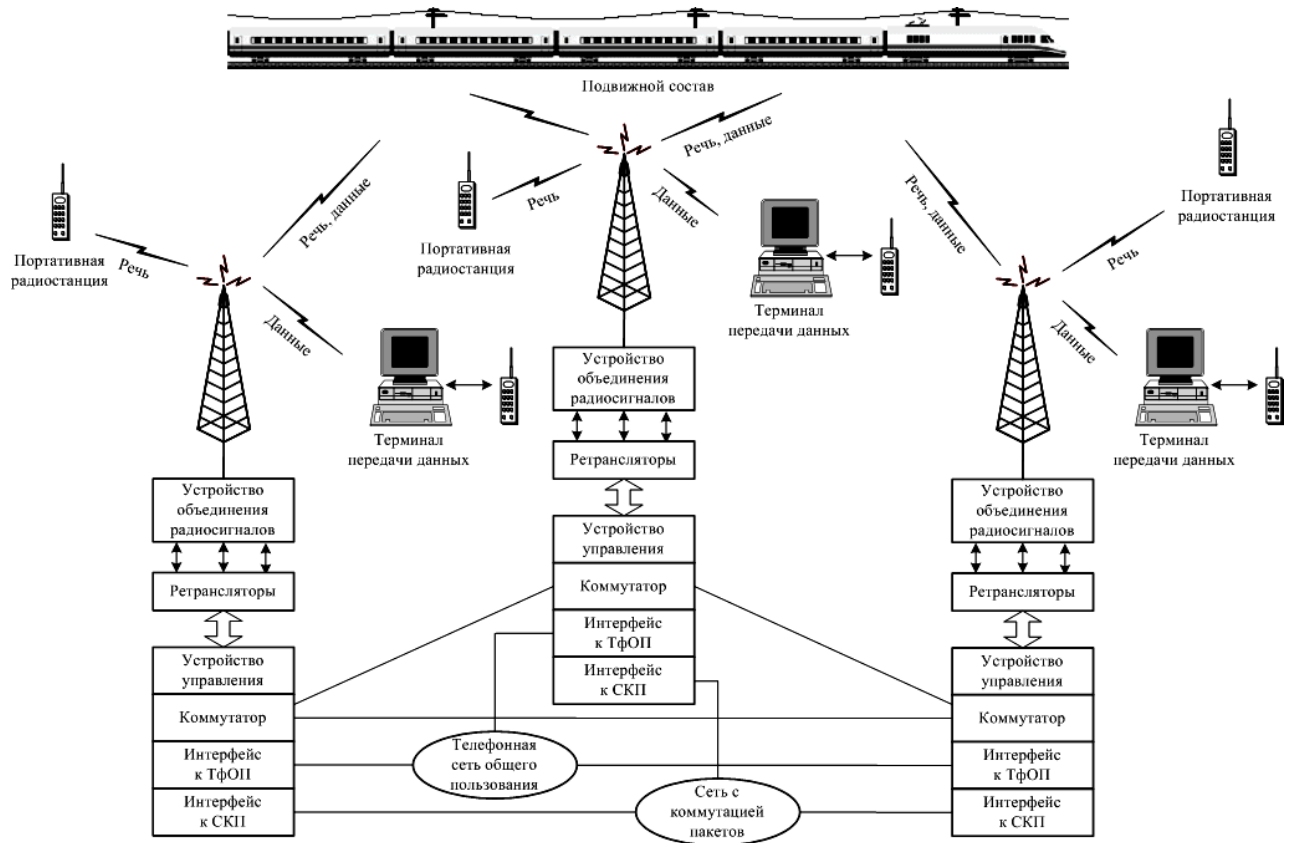


Рисунок 9 – Структурна схема зональної мережі з розподіленою міжзональною комутацією

Кожна БС в такій системі має своє власне підключення до ТФОП. При потребі у виклику з однієї зони в іншу він здійснюється через інтерфейс ТФОП, включаючи процедуру телефонного номера. Крім того, БС можуть безпосередньо підключатися за допомогою фізичних виділених ліній зв'язку.

Використання розподіленої міжзональної комутації доцільне тільки для системи з невеликою кількістю зон і з невисокими вимогами до оперативності міжзональних викликів (особливо у разі підключення через комутовані канали ТФОП). В системах з високою якістю обслуговування використовується архітектура з центральним комутатором (ЦК). Структура багатозонавої зональної системи зв'язку з ЦК зображена на рис 10 .

Основний елемент цієї схеми – міжзональний комутатор. Він обробляє види міжзональних викликів, тобто весь міжзональний трафік проходить через один комутатор, підключений до БС виділеними лініями. Це забезпечує швидку обробку викликів, можливість підключення централізованих ДП. Інформація про

розміщення абонентів системи з ЦК зберігається в єдиному місці, тому її легше захистити. Крім того, міжзональний комутатор виконує також функції централізованого інтерфейсу до ТФОП і СКП, що дозволяє за потреби повноцінно контролювати як реквізит трафіку телефонної мережі, так і трафік усіх додатків ПД, пов'язаних із зовнішніми СКП, наприклад Інтернет. Таким чином, система з ЦК володіє більш високою керованістю.

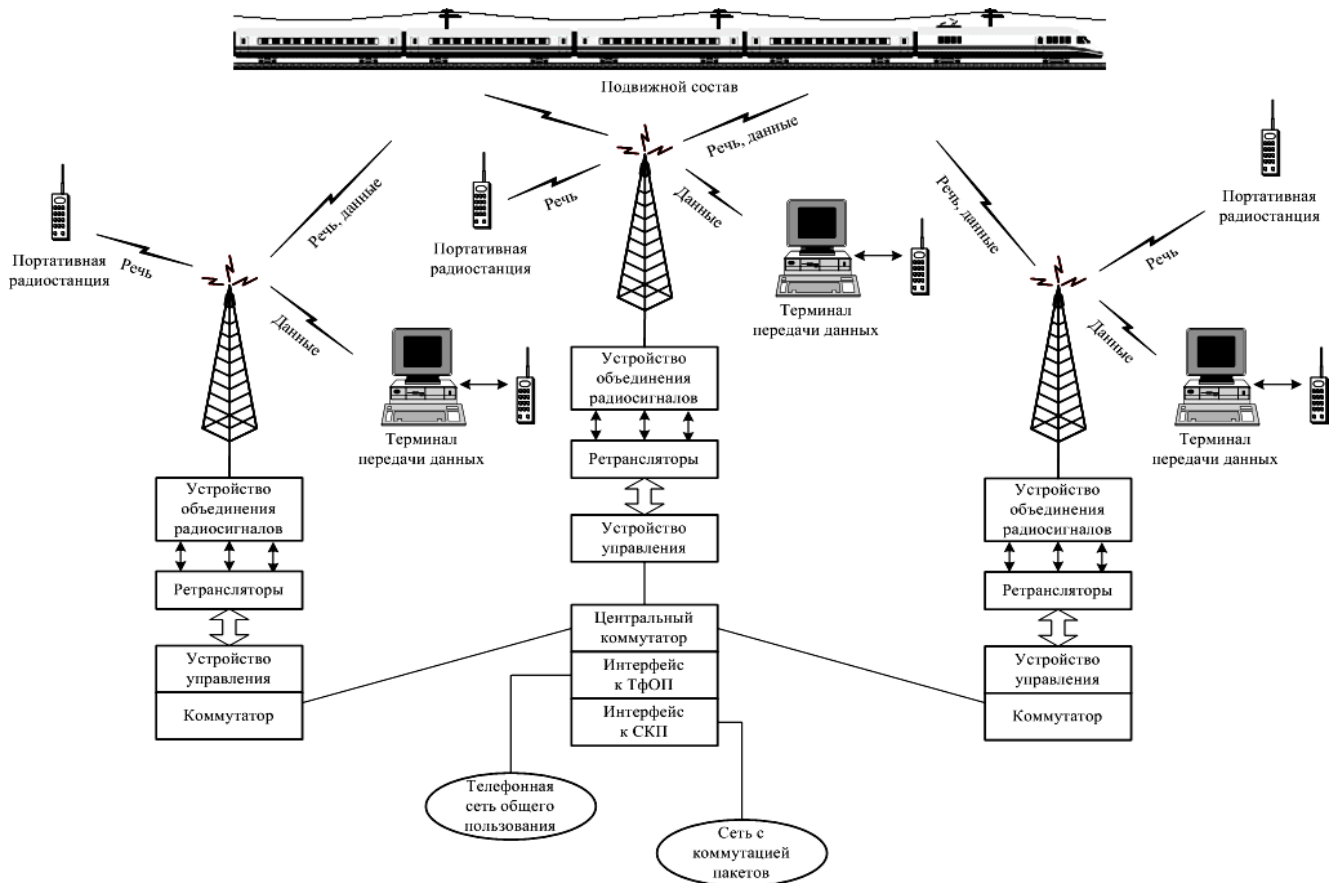


Рисунок 10 – Структурна схема зональної мережі з централізованою міжзональною комутацією

## 1.6 Цифрові стандарти зонального зв'язку

На залізниці в даний час використовують різні аналогові системи для реалізації послуг поїздного та маневрового радіозв'язку, радіозв'язку в тунелях, пейджингового зв'язку, технологічного та ремонтного радіозв'язку, передачі даних між колійними пристроями і поїздами в систему локомотивної сигналізації. Такі системи характеризуються, як правило, неекономним використанням частот

в різних діапазонах, високими експлуатаційними витратами та витратами на технічне обслуговування, а також гранично низьким рівнем експлуатаційної сумісності. Для усунення цих недоліків розроблена нова концепція, яка передбачає створення цифрових систем радіозв'язку (ЦСР), які здатні задовольнити потреби залізниць в обміні інформацією з рухомими об'єктами та створити передумови для реалізації перспективних послуг і додатків. ЦСР повинен охоплювати перш за все послуги залізничного радіозв'язку з передачею мови і даних, обмінюватися інформацією в системі управління рухом поїздів, маневрового, станційного радіозв'язку, радіозв'язку з депо та інших видів технологічного зв'язку [3, 8].

Цифрові системи радіозв'язку забезпечують кращу якість зв'язку, що ілюструється рис 11 .

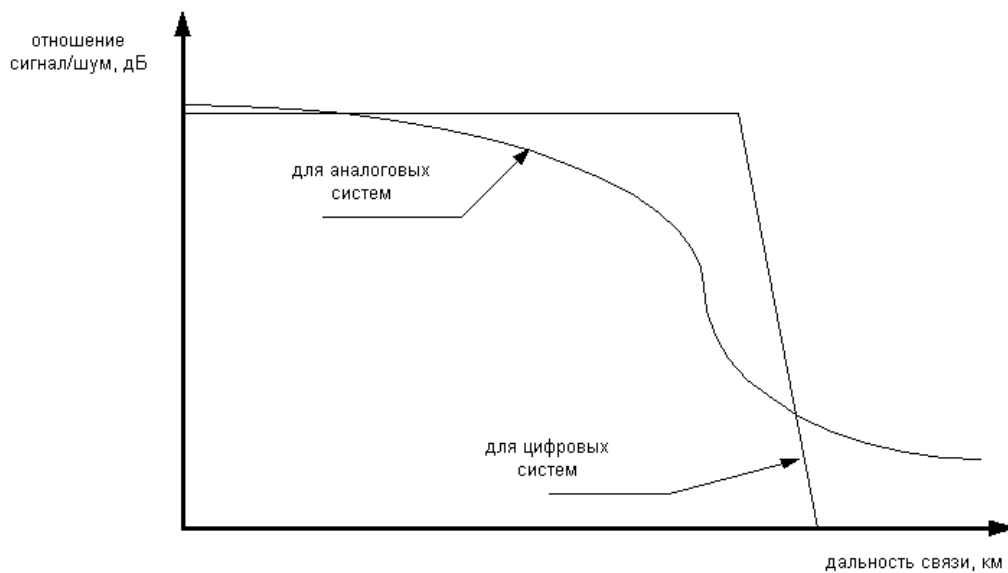


Рисунок 11 – Якість передачі мови в аналогових і цифрових системах радіозв'язку

Крім того, цифрові стандарти зв'язку, використовуючи оптоволоконні системи передачі даних та інші технології цифрових мереж інтегрального обслуговування ISDN (ЦСІО), починають широко поширюватися на залізницях всьомго світу. Було б недоцільно поєднувати сучасні цифрові стандарти і

технології кабельного зв'язку зі старими аналоговими стандартами і технологіями радіозв'язку.

Таким чином, процес розвитку системи зв'язку в напрямку цифровізації також є важливим фактором, значення якого не можна недооцінювати при виборі зональних систем.

### **1.7 Зональна система цифрового стандарту GSM - R**

Стандартизацією GSM-R займається в рамках МСЖД проектна група EIRENE (European Integrated Railway Radio Enhanced Network), створенням прототипів (мережі та кінцеві пристрої) – консорціум MORANE, в який входять залізниці, промислові фірми та дослідницькі інститути. Результати цих робіт використовуються в проекті ERTMS, орієнтованому на підвищення конкурентоспроможності залізничних доріг у порівнянні з іншими видами транспорту за рахунок наступних цілей [1, 2, 11]:

- забезпечення експлуатаційної сумісності в національних і міжнародних системах залізничного зв'язку;
- підвищення ефективності, безпеки та надійності залізниць;
- удосконалення технологічних операцій;
- підвищення рівня обслуговування пасажирів;
- введення додаткових послуг для клієнтури;
- створення нових джерел доходів для залізничних компаній.

Запровадження системи GSM-R дозволить задовольнити потреби залізничних служб за допомогою єдиної системи радіозв'язку. Додаткові по відношенню до вихідного стандарту GSM властивості ASCII (стандартний код для обміну інформацією), необхідні для реалізації функцій автоматичного управління рухом поїздів. Він включає в себе розширені багатоуровневі пріоритети та резервування, послуги широкого сповіщення та мовного групового виклику. Для задоволення вимог залізниць до послуг поїздного та маневрового радіозв'язку, передачі даних для управління рухом поїздів, телеуправління тощо. Поряд з властивостями ASCII повинні бути реалізовані: функціональна адреса, подання

функціональних номерів, адреса залежно від поточного розташування і обробка викликів з високим пріоритетом.

Висунуті вимоги спрямовані не тільки на оптимізацію системи зв'язку. Реалізація деяких із них є обов'язковою умовою для використання GSM-R у якості середовища передачі в системі автоматичного управління рухом поїздів, де з одного боку тракту передачі генеруються дані, а з іншого - проводиться їх оцінка. Стимування уніфікованих систем сигналізації привело започаткування робіт в рамках МСЖД над проектом створення європейської системи управління рухом поїздів ETCS, рівні 3 і 4, які передбачають використання мережі радіозв'язку на основі системи GSM-R.

Цифровий стандарт GSM-R – з частотно-часовим розподілом каналів, має 8 часових каналів у смузі 200кГц. Для системи виділена смуга шириною 4 МГц в діапазоні (876-880) МГц для передачі від рухомої до базової станції та (921-925) МГц для передачі від базової станції до рухомої станції.

В інфраструктуру мережі GSM-R входять наступні елементи (рисунок 12 ).

Базова приймально-передавальна станція БПС (BTS) - забезпечує радіозв'язок у визначеній зоні.

Контроллер базової станції КБС (BSC) - виконує наступні функції:

- управління розподілом каналів;
- контроль з'єднань і регулювання їх черговості;
- модуляція і демодуляція сигналів;
- кодування та декодування повідомлень;
- кодування мови;
- адаптація швидкості передачі мови, даних і сигналів виклику;
- управління черговістю передачі повідомлень персонального виклику.

Центральний комутатор рухомого зв'язку ЦКП (MSC) – обслуговує групу зон і забезпечує всі види з'єднань з мобільними станціями. Він становить інтерфейс між мережею рухомого зв'язку та зовнішніми мережами ЦСІО (ISDN) – цифрова мережа інтегрального обслуговування, ТФОП (PSTN) – телефонна мережа загального користування, СКП (PDN) – мережа з комутаційними

пакетами, УАТС (РАВХ) – упорядкована АТС, яка забезпечує маршрутизацію викликів і функцію управління викликами. Крім цього, MSC виконує функції:

- комутації радіоканалів, які стосуються естафетної передачі, що забезпечує безперервність зв'язку при переміщенні мобільних станцій із зони в зону;
- перемикання робочих каналів в зоні при виявленні завад і несправностей;
- формує дані для тарифікації розмов;
- складає статистичні дані;
- підтримує процедури забезпечення безпеки при доступі до радіоканалу.

MSC здійснює постійне слідування за мобільними станціями, використовуючи реєстри.

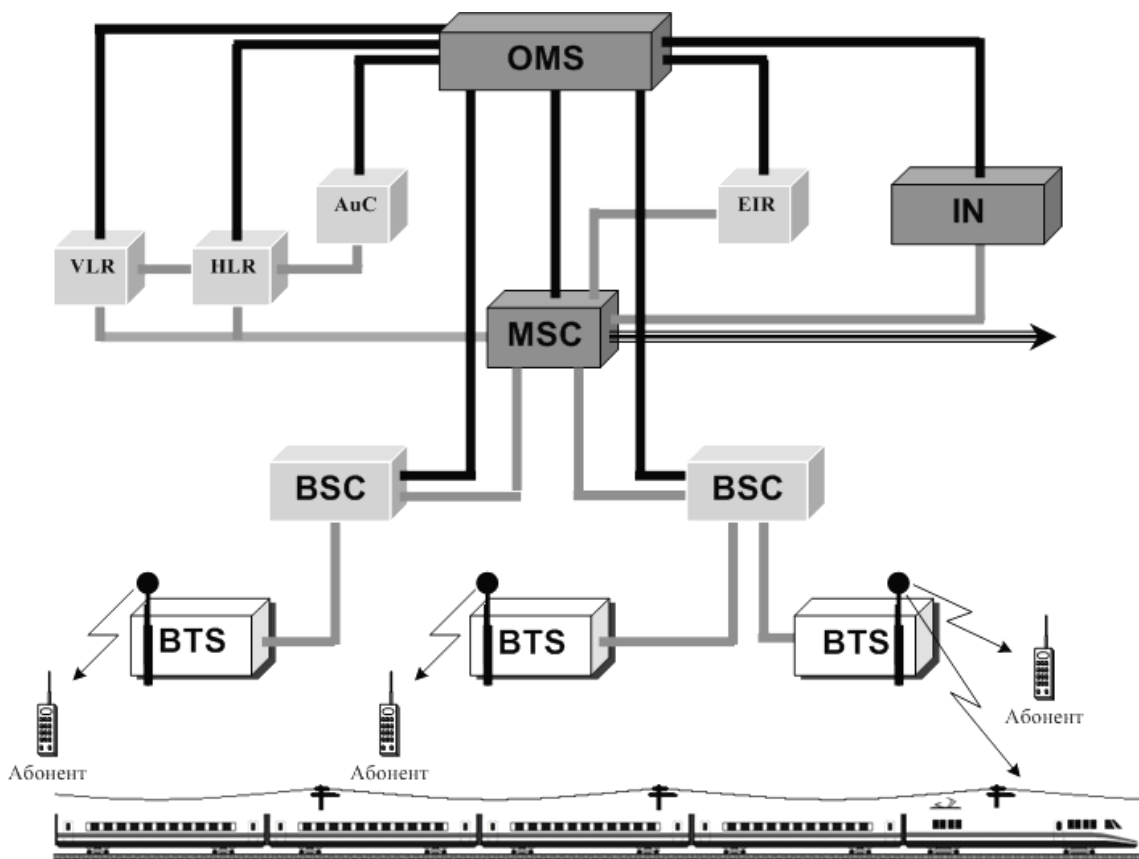


Рисунок 12 – Структурна схема цифрового стандарту GSM-R

Регістр положення РМП (HLR), в якому зберігається та частина інформації про будь-яку мобільну станцію, яка дозволяє центральному комутатору отримати виклик. Фактично HLR є довідковою базовою станцією про постійно зареєстрованих в мережі абонентів. У ньому містяться ідентифікаційні адреси та

номери, а також параметри повноважень абонентів, склад послуг зв'язку, інформація про маршрутизацію, дані про роумінг абонента.

Регістр переміщення РП (VLR) – це другий основний пристрій, що забезпечує контроль переміщення мобільних станцій із зони в зону. З його допомогою забезпечується функціонування мобільних станцій за межами контрольованої регістром положення зони. Коли в процесі переміщення мобільна станція переходить із зони одного контролера базової станції в зону дії другої, вона реєструється і в регістр переміщення заноситься нова інформація. З метою уникнення несанкціонованого використання ресурсів у систему введено механізм аутентифікації.

Центр аутентифікації ЦА (AUC) складається з кількох блоків і формує ключі та алгоритми аутентифікації. З його допомогою перевіряються повноваження абонента і забезпечується його доступ до мережі. AUC приймає рішення про параметри процесу аутентифікації та визначає ключі шифрування на основі баз даних, що знаходяться в реєстрі ідентифікації обладнання (EIR).

Реєстр ідентифікації обладнання (EIR) містить централізовану базу даних для підтвердження довжини міжнародного ідентифікаційного номера обладнання мобільної станції.

Реєстр ідентифікації мережі РІС (ІН) містить ідентифікатори всіх мереж, з якими забезпечується переміщення в цю систему.

Центр управління та обслуговування ЦУО (ОМС) забезпечує управління елементами мережі та якість його роботи. У функції ОМС входить:

- реєстрація та обробка аварійних сигналів;
- усунення несправностей (автоматично або за допомогою обслуговуючого персоналу);
- перевірка стану обладнання мережі та проходження виклику мобільної станції; управління трафіком;
- збір статистичних даних;
- управління передачами обслуговування і базою даних.

## 1.8 Реалізація основних функцій радіозв'язку стандарту GSM - R

Основні вимоги до залізничного радіозв'язку наведені в додатку 1. Розглянемо можливості стандарту GSM-R в їх реалізації:

Індивідуальний виклик. Двохточкове з'єднання між мобільними та/або стаціонарними абонентами. Забезпечує дуплексний зв'язок між машиністами локомотивів одного поїзда, між машиністом і диспетчером, між будь-яким абонентом і ТФОП або УАТС і в інших випадках. Одночасно з передачею мовлення можлива передача тільки коротких повідомлень – до 160 байт.

Груповий виклик. Виклик членів групи (наприклад, учасників маневрової роботи) для двостороннього напівдуплексного зв'язку за груповим номером з автоматичним підтвердженням або без нього [15, 18]. Виклик може бути з автоматичним підтвердженням або без нього; неможливо пізніше підключення абонента, який на момент виклику був зайнятий; можлива передача коротких повідомлень – до 160 байт.

Широкомовний виклик. Виклик членів широкомовної групи для одностороннього зв'язку за широкомовним номером з автоматичним підтвердженням або без нього. Можлива передача коротких повідомлень – до 160 байт.

Передача даних з комутацією каналів зв'язку. Передача комп'ютерних файлів великих розмірів, зображень, відеопотоків від ТВ-камери в реальному часі на швидкості 2,4; 4,8 та 6 кбіт/с.

Час встановлення з'єднання. Час, впродовж якого система повідомляє абоненту, якого викликають про надходження виклику – не більше 1,5с. Порівняно великий час встановлення визначає потребу у синхронізації всіх компонентів цифрового каналу зв'язку, що пов'язано з підвищеними часовими витратами в системах такої складної ієрархії, до яких відноситься GSM-R.

Час з'єднання передачі. Час, впродовж якого з'єднання передається іншій базовій станції або частотному каналу при переміщенні мобільного абонента.

При синхронізації прийомопередавачів базових станцій можливе зниження часу передачі з'єднань до 0,15с, це додаткова можливість, яку може вибрати адміністратор мережі.

Ймовірність успішної передачі з'єднання. Ймовірність того, що при переході мобільного абонента, що знаходиться на зв'язку, з однієї базової станції в зону іншої його зв'язок збережеться.

Ймовірність успішної передачі з'єднання не нижче 0,995 забезпечується при з'єднанні не частіше ніж 1 раз в 10 с.

Завадозахищеність зв'язку. Завади зв'язку характеризуються інтенсивністю потоків помилкових бітів. Завадозахист забезпечує кодування мови і даних та рознесеним прийомом і становить  $10^{-2} - 10^{-3}$  за відсутності завадозахисту та зони, де втрати поширення не перевищують 3 дБ на 95 % площі цієї зони.

Захист інформації. Захист інформації, яка передається забезпечується мірами, спрямованими на запобігання несанкціонованого доступу до каналів систем зв'язку. Забезпечується шифруванням (кілька десятків криптоключів), аутентифікацією обладнання, приганням по частоті.

Роумінг. Забезпечення адресації мобільних абонентів при переході з однієї мережі зв'язку в національну або міжнародну мережу.

Передача з'єднання. З'єднання з мобільним абонентом при його передачі з однієї базової станції в зону іншої базової станції або з одного частотного каналу в інший і становить менше ніж 0,5с.

Інтеграція з системами визначення місця розташування. Необхідно для диспетчерського управління мобільними об'єктами, наприклад, локомотивним, вагонним або контейнерним парком.

Інтеграція з мережами ISDN. ISDN – ЦСІО, Цифрові Мережі з Інтеграцією Обслуговування.

Інтеграція з ТФОП. ТФОП – телефонні мережі загального користування.

Інтеграція з УАТС. УАТС – АТС установ.

Виключний пріоритет. Виключний пріоритет дозволяє диспетчеру терміново перервати будь-яке з'єднання та викликати будь-якого абонента.

Пріоритетний доступ. Виділення каналу зв'язку відповідно до схеми пріоритетів абонентів.

Дистанційне присвоєння індивідуальних і групових абонентських ідентифікаційних номерів. Функція, яка дозволяє, наприклад, диспетчеру адресуватися до абонентів поїзда (машинистів, поїздної бригади) з використанням номера поїзда в розкладі, цей номер зберігається при заміні локомотива або локомотивної бригади.

Виклик, санкціонований диспетчером. Ця функція дозволяє диспетчеру дозволити або заборонити встановлення зв'язку між деякими абонентами (наприклад, між учасниками маневрової роботи – машиністом поїзда, черговим по станції, складачем, з одного боку та викликами з ТФОП з іншої).

Запобігання вхідним викликам. Блокування системою визначених категорій викликів, які здійснює цей абонент.

Швидкий набір номерів. Присвоєння певним абонентам коротких номерів для швидкої адресації в даній мережі зв'язку.

Ідентифікація абонента, який здійснює виклик. Ця функція дає змогу абонентові, якого викликають визначати номер абонента, який здійснює виклик.

Обмеження на видачу ідентифікаційної інформації. Дана функція дозволяє викликаному абоненту блокувати ідентифікаційний номер викликаного абонента, а викликаному – блокувати ідентифікаційний номер абонента, якого він викликає.

Ідентифікація абонента, якого викликають. Ця функція дає змогу абоненту який здійснює виклик визначати номер і зону знаходження абонента, якого викликають, а також абонента, через який здійснюється переадресація виклику (якщо він був переадресований).

Виклик зайнятого абонента. Виклик зайнятого абонента після завершення ним поточного сеансу, весь цей час утримується.

Повідомлення про виклик. Функція, яка дозволяє абонентові, який здійснює виклик інформувати абонента, якого він викликає про свій виклик і залишити йому свій номер зв'язку. При цьому на дисплеї зайнятого абонента відображається тип виклику та ідентифікаційний номер абонента, який викликає.

Повідомлення зайнятого абонента про надходження виклику. На дисплеї зайнятого абонента відображається повідомлення про вихідний виклик.

Інформація про оплату. Дана функція дозволяє вивести на дисплей абонента дані про вартість поточного з'єднання

У таблиці III наведені основні TSI, які визначають функції, структуру та систему безпеки зв'язку, які є обов'язковими в країнах Євросоюзу. Крім цього, розроблені нормативні документи, які носять інформаційний чи рекомендаційний характер.

Таблиця III – Перелік обов'язкових для виконання TSI, які визначають функції, структуру, систему безпеки управління рухом поїздів

| Посилання                          | Назва документа  | Версія |
|------------------------------------|--|--------|
| UNISIG SUBSET-023                  | Глосарій термінів і скорочень  | 2.0.0  |
| UNISIG SUBSET-037                  | Єврорадіо FIS  | 2.3.0  |
| UNISIG SUBSET-038                  | Автономне керування ключами FIS  | 2.3.0  |
| UNISIG SUBSET-039                  | FIS для передачі RBC/RBC   | 2.3.0  |
| UNISIG SUBSET-046                  | Радіо In-fill FFFS   | 2.0.0  |
| UNISIG SUBSET-048                  | Trainborne FFFIS для Radio In-Fill                                     | 2.0.0  |
| UNISIG SUBSET-049                  | Радіо In-fill FIS з LEU/блокуванням                                    | 2.0.0  |
| EIRENE FRS                         | Специфікація функціональних вимог GSM-R                                | 8.0.0  |
| EIRENE SRS                         | Специфікація системних вимог GSM-R                                     | 16.0.0 |
| A11T6001                           | (MORANE) Радіопередача FFFIS для Єврорадіо                             | 13.0.0 |
| UNISIG SUBSET-074-2                | Документ тестових випадків FFFIS STM                                   | 1.0.0  |
| UNISIG SUBSET-076- 5-2             | Тестові випадки, пов'язані з функціями                                 | 2.3.3  |
| UNISIG SUBSET-076-6-3              | Тестові послідовності  | 2.3.3  |
| UNISIG SUBSET-076-7                | Обсяг специфікацій тесту   | 1.0.2  |
| UNISIG SUBSET-092-1                | Вимоги щодо відповідності ERTMS EuroRadio                              | 2.3.0  |
| UNISIG SUBSET-092-2                | Тестові випадки ERTMS EuroRadio Рівень безпеки                         | 2.3.0  |
| UNISIG SUBSET-100                  | Специфікація інтерфейсу «G».   | 1.0.1  |
| Зарезервовано                      | Технічне завдання для мобільного обладнання GSM-R                      |        |
| Зарезервовано<br>UNISIG SUBSET-099 | Тестова специфікація RBC-RBC для безпечного комунікаційного інтерфейсу |        |

| Посилання            | Назва документа  | Версія |
|----------------------|--|--------|
| UNISIG SUBSET-098    | RBC-RBC безпечний комунікаційний інтерфейс   | 1.0.0  |
| EN 301 515           | Глобальна система мобільного зв'язку; Вимоги до роботи GSM на залізниці            | 2.3.0  |
| TS 102 281           | Детальні вимоги до роботи GSM на залізниці   | 3.0.0  |
| TS 103 169           | Параметри ASCII для сумісності   | 1.1.1  |
| (MORANE) P 38 T 9001 | FFFIS для SIM-карт GSM-R   | 5.0    |
| ETSI TS 102 610      | Залізничний електрозв'язок; GSM; Використання UUIE для роботи GSM на залізниці     | 1.3.0  |
| (MORANE) F 10 T 6002 | FFFS для підтвердження викликів з високим пріоритетом                              | 5.0    |
| (MORANE) F 12 T 6002 | FIS для підтвердження дзвінків з високим пріоритетом                               | 5.0    |
| (MORANE) E 10 T 6001 | FFFS для функціональної адресації  | 4.1    |
| (MORANE) E 12 T 6001 | FIS для функціональної адресації   | 5.1    |
| (MORANE) F 10 T 6001 | FFFS для адресації, що залежить від розташування                                   | 4      |
| (MORANE) F 12 T 6001 | FIS для адресації, що залежить від розташування                                    | 3      |
| (MORANE) F 10 T 6003 | FFFS для представлення функціональних номерів абонентам і сторонам, що телефонують | 4      |
| (MORANE) F 12 T 6003 | FIS для представлення функціональних номерів абонентам і абонентам, що телефонують | 4      |
| ERA/ERTMS/033281     | Інтерфейси між колійними CCS та іншими підсистемами                                | 3.0    |

## 2 ОГЛЯД І ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕХНОЛОГІЇ LTE ТА ОСОБЛИВОСТІ РАДІОІНТЕРФЕЙСУ МЕРЕЖІ E-UTRAN

### 2.1 Технологія LTE (Long Term Evolution)

Технологія LTE (Long-Term Evolution) - це логічне продовження розвитку мережі 3G. Зараз вона вже визначає розвиток систем сотового зв'язку в світі. Ця технологія дозволяє забезпечити скачкоподібне (теоретично до 90 разів) збільшення швидкості передачі даних у мережах мобільного зв'язку [13, 19].

GSM відноситься до мереж зв'язку другого покоління (2G). Вони забезпечують передачу даних зі швидкістю 5,6-13 Кбіт/с. Цей стандарт в першу чергу призначений для передачі голосового трафіку. Технологія GPRS (швидкість передачі даних 56-114 Кбіт/с) відноситься до покоління 2,5G, а EDGE (швидкість до 473,6 Кбіт/с) - до покоління 2,75G. Мережі третього покоління (3G) забезпечують швидкість передачі даних до 3,6 Мбіт/с.

Запровадження LTE дозволило забезпечити швидкість передачі даних до 326,4 Мбіт/с від базової станції до користувача і до 80 Мбіт/с у зворотному напрямку.

У січні 2008 р. Міжнародне партнерське об'єднання Third Generation Partnership Project (3GPP), що розробляє перспективні стандарти мобільного зв'язку (GSM, GPRS, EDGE, UMTS (WCDMA) та ін.), Затвердило LTE у якості наступного після UMTS стандарту широкополосної мережі мобільного зв'язку.

При передачі сигналу стандарт LTE використовує технологію ортогонального багаточастотного мультиплексування (OFDMA), замість CDMA, дозволяє надавати доступ до системних ресурсів більшій кількості людей і, тим самим, оптимізує використання спектра. Крім того, система комутації каналів була замінена на систему комутації пакетів (IP р2р). Ще однією особливістю LTE є використання MIMO-системи для збільшення пропускної здатності мережі та досягнення високих швидкостей при передачі даних. Швидкості в стандарті доходять до 100 Мбіт / с по низхідному каналу і 50 Мбіт / с по висхідному. Радіус дії базової станції LTE може бути різним, залежно від потужності та частоти, що використовується. В оптимальному випадку це приблизно 5 км, але за потреби

дальність дії може становити 30 км або навіть 100 км (при достатньому піднятті антени).

Сеанс передачі даних, ініційований в зоні покриття LTE, технічно може бути переданий без розриву в мережі 3G (W-CDMA, CDMA2000) або в GSM / GPRS / EDGE. Таким чином, розвиток мереж LTE можливе на вже існуючих мережах як операторів GSM так і операторів CDMA, що помітно знижує вартість розгортання мережі (на відміну від мереж WiMax).

LTE побудований на базі архітектури SAE. SAE (англ. System Architecture Evolution - еволюція системної архітектури) - це архітектура ядра мережі, розроблена консорціумом 3GPP для стандарту бездротового зв'язку LTE.

Інтерес операторів зв'язку до технології LTE пов'язаний, зокрема, з тим, що розвертання LTE-мереж - значно більш вигідний проект, ніж мережі третього покоління. LTE краще використовує частотний спектр (відрізняється підвищеною ємністю і меншою затримкою сигналу - для невеликих пакетів цей показник може залишатися практично незамітним у 5 мс).

Внутрішня технологія LTE дозволяє операторам знизити капітальні та операційні витрати, знизити загальну вартість володіння мережею, розширити спектр послуг, пов'язаних з передачею даних високошвидкісними каналами. З точки зору абонента, різке збільшення швидкості передачі даних суттєво покращує якість наданих послуг, що, у свою чергу, буде сприяє поширенню нових платних мультимедійних сервісів (багатокористувацьких ігор, соціальних мереж, відеоконференцій, систем моніторингу, інтерактивних онлайн-додатків тощо).

## **2. 2 Архітектура технології LTE**

Мережа LTE складається з двох компонентів: мережі радіодоступу E-UTRAN і базової мережі SAE (System Architecture Evolution) (рис 13).

Основними вимогами проекту 3GPP до мережі SAE були: максимально можливе покращення структури мережі та виключення дублювання функцій мережевих протоколів, характерних для системи UMTS.

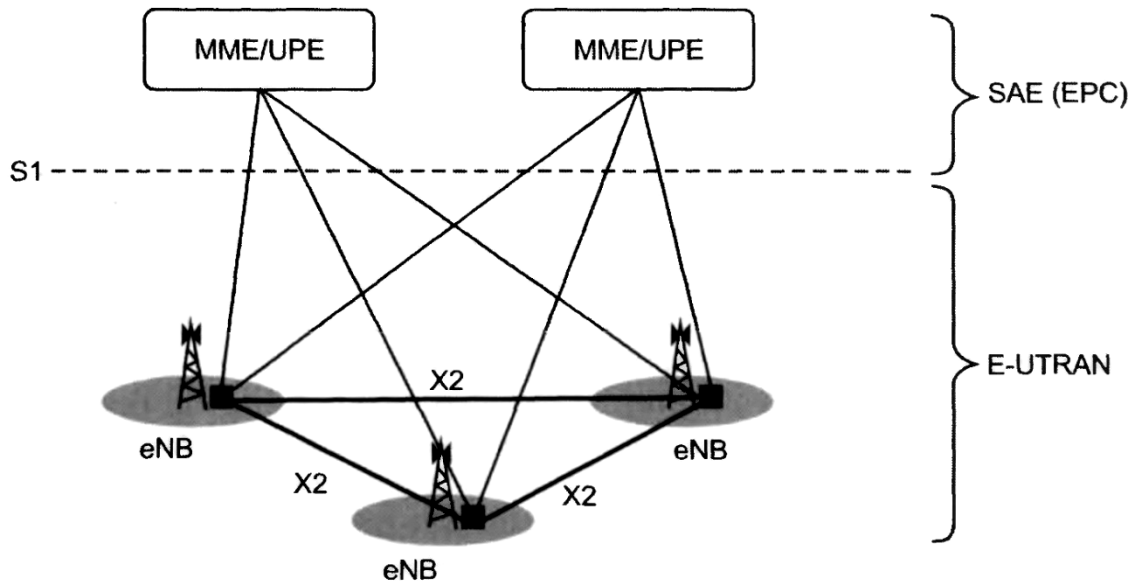


Рисунок 13 – Взаємодія мережі радіодоступу E-UTRAN і базової мережі SAE

Набір радіодоступів E-UTRAN розглянуто в ряді технічних характеристик, згідно з якими він складається тільки з базових станцій eNB (evolved Node B). Базові станції eNB є елементами повнозв'язкової мережі E-UTRAN і з'єднані між собою за принципом "кожен з кожним" за допомогою інтерфейсу X2. Інтерфейс X2 підтримує хендовер мобільного терміналу в стані LTE\_ACTIVE. Кожна базова станція має інтерфейс S1 з базовою мережею SAE, побудованою за принципом комутації пакетів.

Базовий набір SAE, який іноді називається мережею EDS (Evolved Packet Core), містить вузли MME / UPE, які складаються з логічних елементів MME і UPE. Логічний елемент MME (Mobility Management Entity) відповідає за вирішення завдань управління мобільністю абонентського терміналу і взаємодіє з базовими станціями eNB мережі E-UTRAN за допомогою протоколів площини управління C-plane (інтерфейс S1-S). Логічний елемент UPE (User Plane Entity) відповідає за передачу даних користувачів відповідно до протоколів площини користувача U-plane і взаємодіє з eNB за допомогою інтерфейсу S1-U.

Завдяки інтерфейсу S1 базові станції під'єднані до кількох вузлів MME / UPE, що дозволяє більш легко використовувати мережевий ресурс. Такий інтерфейс називають S1-flex.

Архітектура базової мережі SAE становить PS-домен системи LTE, який забезпечує як голосові, так і всю сукупність IP-послуг на основі технологій пакетної комутації даних. На основі побудови базової мережі SAE закладена концепція "все через IP" (all-IP або AIPN - All over IP Network) і тому, що доступ до базової мережі SAE може здійснюватися як через мережевий радіодоступ другого та третього поколінь (наприклад, мережі UTRAN , GERAN), так і через мережі радіодоступу неєвропейських технологій, не стандартизовані проектом 3GPP (мережі He-3GPP), наприклад, мережі IEEE: Wi-Fi, WiMAX, а також через мережі, що використовують провідні IP-технології (наприклад, мережі ADSL + , FttH тощо).

Еталонна архітектура базової мережі SAE з інтерфейсами взаємодії із зовнішніми мережами наведена на рис. 14 . Згідно з цією архітектурою функції протоколів площини управління вузла мережі SGSN UMTS стають функціями елемента управління мобільністю MME. Функції контролера RNC, не виконує базова станція eNB мережі E-UTRAN, і функції протоколів площини користувача вузлів SGSN і GGSN реалізуються модулем UPE і шлюзовим вузлом "прив'язки" 3GPP Anchor мережі SAE. Цей пристрій призначений для підключення мереж 2G / 3G до мережі LTE. У склад SAE входить також шлюзовий вузол прив'язки SAE Anchor, який служить для підключення до мережі SAE мереж стандартів 3GPP (GSM / UMTS) і стандартів He-3GPP (Wi-Fi і WiMAX). Вузли зв'язку 3GPP Anchor і SAE Anchor утворюють єдиний вузол зв'язку IASA (Inter Access System Anchor) для під'єднання зовнішніх IP-мереж.

Сукупність логічних елементів мереж MME / UPE, IASA, що складається з вузлів SAE Anchor і 3GPP Anchor, утворює базовий пакетний набір (Evolved Packet Core - EPC). Дані логічні елементи розглядалися в основному на початкових стадіях розробки стандартів мережі LTE. Докладніші дослідження, спрямовані на практичну реалізацію архітектури EPC, визначили нові елементи: обслуговуючий шлюз S-GW (Serving GW) і шлюз взаємодії з пакетними мережами P-GW (PDN GW), а також логічний елемент MME, який функціонує окремо від елемента UPE. Шлюзи S-GW і P-GW фізично можуть бути реалізовані у складі одного мережевого елемента aGW (Access GW).

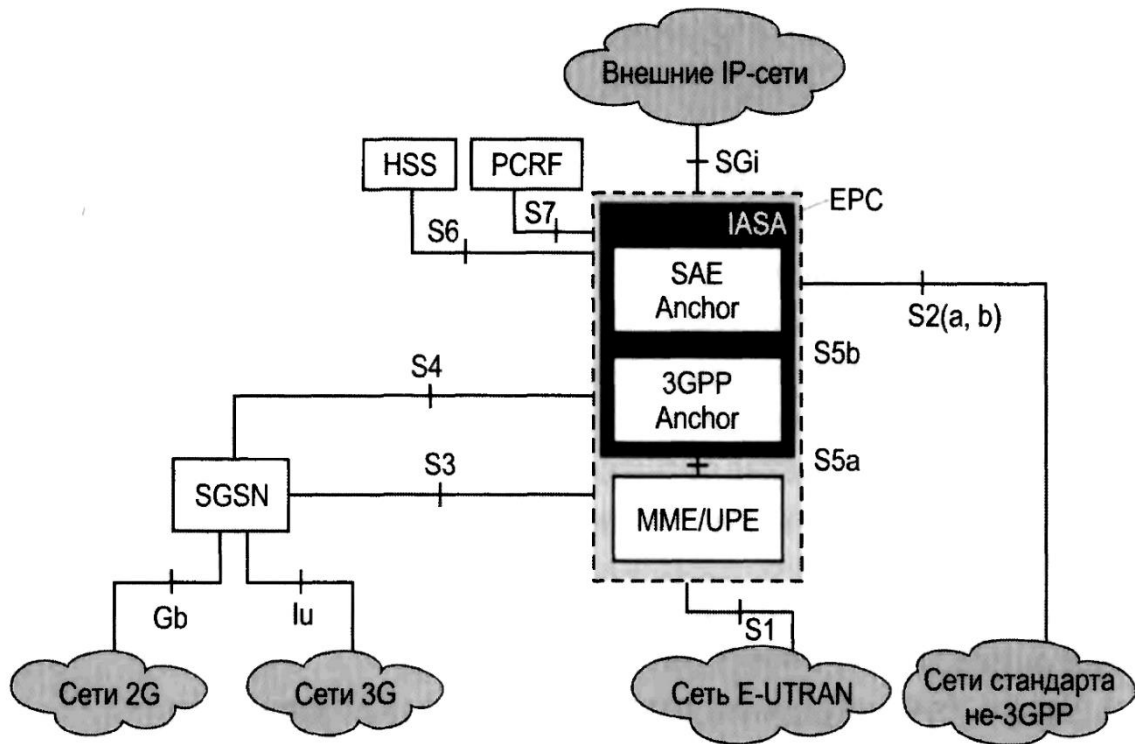


Рисунок 14 - Еталонна архітектура базової мережі SAE

Короткий опис основних інтерфейсів мережі SAE наведено в таблиці IV .

Серед переліку функціональних можливостей базової мережі SAE можна виділити кілька основних функцій:

- Управління доступом до мережі
- Маршрутизація та транспортування пакетів даних;
- Управління мобільністю абонентського терміналу;
- Забезпечення безпеки;
- Управління радіресурсами мережі;
- Управління мережею;
- Вибір функціональних елементів мережі;
- Функції, пов'язані з використанням мережі IP-протоколу.

Кожна з цих функцій може включати у себе кілька окремих функцій.

Таблиця IV - Основні інтерфейси мережі SAE

| Інтерфейс | Опис інтерфейсу   |
|-----------|---|
| S1        | Інтерфейс, який забезпечує доступ до мережевого радіодоступу E-UTRAN для передачі даних протоколів систем користувача та управління. Дозволяє мати розділову і комбіновану апаратну реалізацію елементів MME і UPE  |
| S2a       | Інтерфейс між вузлом IASA і фіксованими IP-сетями стандарту не-3GPP. Забезпечує передачу даних протоколів плоскості користувача та підтримку функцій управління та мобільності. Включає в себе інтерфейси S2a, S2b і S2c.   |
| S3        | Інтерфейс між елементами MME/UPE і вузлом SGSN. Забезпечує управління міжсетевим хендовером абонентських терміналів в сетях E-UTRAN і UTRAN.  |
| S4        | Інтерфейс між вузлом 3GPP Anchor і вузлом SGSN. Забезпечує передачу даних протоколів плоскості користувача та підтримку функцій управління та мобільності. Базується на інтерфейсі Gn між вузлами SGSN і GGSN мережі UMTS.  |
| S5a       | Інтерфейс між елементом MME/UPE і вузлом 3GPP Anchor. Забезпечує передачу даних протоколів плоскості користувача та підтримку функцій управління та мобільності.  |
| S5b       | Інтерфейс між вузлами 3GPP Anchor і SAE Anchor. Забезпечує передачу даних протоколів плоскості користувача і підтримує функції управління і мобільності.  |
| S6        | Інтерфейс, який забезпечує доступ до домашньої бази даних користувачів (HSS) для аутентифікації та авторизації користувачів (інтерфейс AAA).  |
| S7        | Інтерфейс, який забезпечує керування встановленими сполуками із заданими параметрами Qos на основі політики мережі та тарифікації (функція правил політики та тарифікації – PCRF).  |
| Sgi       | Інтерфейс між вузлом IASA і зовнішніми сетями з пакетною передачею даних. Ці мережі можуть належати як різним операторам, так і одному оператору сотового зв'язку для надання, наприклад, послуг підсистеми IMS. Цей інтерфейс заснований на інтерфейсі Gi між вузлами GGSN і зовнішніми IP-сетями. |

### 2.3 Частотні діапазони для FDD і TDD і вимоги до технології LTE

Нові технології IMT-2000 пов'язані з виділенням парних смуг частот для систем, що працюють з частотним дуплексним розносом (FDD), і непарним - для систем з часовим дуплексним розносом (TDD). Комбіноване використання цих двох режимів робить систему гнучкою, що дозволяє змінювати пропускну здатність і засоби організації зв'язку. Режим FDD більш ефективний при великих розмірах сот і високій швидкості переміщення абонентів, а TDD, навпаки, призначений для роботи в піко- і мікросотах, тобто там, де абонент пересувається з невисокою швидкістю [16].

LTE може використовуватися як у парних (FDD), так і в непарних (TDD) ділянках спектра. Релізи продукту від провідних постачальників забезпечують підтримку обох дуплексних схем.

До цього часу 3GPP було виділено 10 різних частотних діапазонів для створення системи LTE-FDD і чотири частотних діапазону для LTE-TDD, як це показано в таблиці V .

Таблиця V - FDD і TDD - частотні діапазони, затверджені рішеннями 3GPP

| FDD функції |                              | Функції TDD |                      |
|-------------|------------------------------|-------------|----------------------|
| Діапазон    | Частоти, МГц                 | Діапазон    | Частоти, МГц         |
| I           | 1920-1980, 2110-2170         | a           | 1900-1920, 2010-2025 |
| II          | 1850-1910, 1930-1990         | b           | 1850-1910, 1930-1990 |
| III         | 1710-1785, 1805-1880         | c           | 1910-1930            |
| IV          | 1710-1755, 2110-2155         | d           | 2570-2620            |
| V           | 824-849, 869-894             |             |                      |
| VI          | 830-840, 875-885             |             |                      |
| VII         | 2500-2570, 2620-2690         |             |                      |
| VIII        | 880-915, 925-960             |             |                      |
| IX          | 1749,9-1784,9, 1844,9-1879,9 |             |                      |
| X           | 1710-1770, 2110-2170         |             |                      |

## 2.4 Діапазони частот, які підтримуються технологією LTE

Важливою перевагою технології LTE є можливість використовувати різні частотні діапазони. Системи LTE сьогодні працюють в низькочастотному (700-800 МГц), середньочастотному (1800-2100 МГц) і у високочастотному (2500-5000 МГц) діапазонах (таблиця VI ).

Розгортання мереж у низькочастотній області спектра більш привабливе для операторів з точки зору витрат і оптимально підходить для покриття районів з низькою густиною населення (пригород і сільські райони). У густонаселених

районах використання високої частоти для LTE вимагає додаткових заходів для покращення покриття всередині приміщень.

Таблиця VI - Можливі частотні діапазони для LTE у світі

| Регіон                | 2009-2010 р.р.          | 2011-2012 р.р.   | 2013 р. і далі                 |
|-----------------------|-------------------------|--|--------------------------------|
| Північна Америка      | 1,7 та 2,1 ГГц          | 850 МГц; 1,9 ГГц                                       | -                              |
| Європа                | 2,1 та 2,6 ГГц          | 900 МГц; 1,8 ГГц;<br>790-862 МГц<br>2,1 ГГц (Японія);  | -                              |
| Розвинуті країни Азії | 1,5 та 2,6 ГГц (Японія) | 2,3-2,4 ГГц (Китай);<br>1,7 та 1,8 ГГц;<br>790-862 МГц | 850 МГц                        |
| Південна Америка      | -                       | 850 МГц; 1,9 ГГц                                       | -                              |
| Україна               | -                       | -  | 1,8 ГГц та 2,6 ГГц;<br>900 МГц |
| Світ загалом          | -                       | -  | 450-470 МГц                    |

## 2.5 Ортогонально-частотне мультиплексування OFDM і багатократна технологія доступу OFDMA

OFDM (англ. Orthogonal frequency-division multiplexing) – мультиплексування з ортогональним розподілом каналів є частотною цифровою схемою модуляції, яка використовує велику кількість близькорозташованих ортогональних піднесучих. Кожна піднесуча модулюється за звичайною схемою модуляції (наприклад, квадратурна амплітудна модуляція) на низькій символній швидкості, зберігаючи загальну швидкість передачі даних, як і в звичайних схемах модуляції одного несущого в тій же смузі пропускання. На практиці сигнали OFDM отримують шляхом використання БПФ (швидке перетворення Фур'є).

OFDM дозволяє досягти високої швидкості передачі даних і спектральної ефективності, так як використовується безліч несучих зі спектрами, які

перекриваються, замість одного. Усі технології для 4G базуються на застосуванні технології OFDM.

Багатофункціональний доступ з ортогональним частотним розподілом (OFDMA) становить вдосконалену технологію OFDM і застосовується в Mobile WiMAX і стандарті IEEE 802.16e-2005, а також є основою для системи мобільного широкополосного доступу наступних поколінь. Також цю технологію можна назвати багатокористувацькою версією OFDM. Відмінність полягає в тому, що OFDMA записує набори піднесучих окремим користувачам, тим самим дозволяє одночасну передачу даних на низькій швидкості для кількох абонентів.

Основною перевагою OFDM у порівнянні зі схемою з однією несучою є її здатність протистояти складним умовам у каналі. Наприклад, боротися з затуханням в області ВЧ в довгих мідних провідниках, вузькополосними завадами та частотно-вибірковим затуханням, викликаним багатопроменевим характером поширення, без використання складних фільтрів-еквалайзерів. Канальна еквалізація спрощується внаслідок того, що сигнал OFDM може розглядатися як безліч повільно модульованих вузькополосних сигналів, а не як один швидко модульований широкополосний сигнал. Низька символна швидкість робить можливим використання захисного інтервалу між символами, дозволяє справлятися з часовим розсіюванням і втрачати міжсимвольні індикатори (MCS). У технології LTE використовуються два типи радіоканалів: низхідний і висхідний.

## **2.6 Механізм диспетчеризації**

Під диспетчеризацією розуміється процес розподілу мережевих ресурсів між користувачами, які передають дані. В технології LTE передбачена динамічна диспетчеризація у висхідних і низхідних каналах.

Метою диспетчеризації є збалансованість між якістю зв'язку та загальною продуктивністю системи. У радіоінтерфейсі LTE реалізована функція диспетчеризації залежно від стану каналу зв'язку. Вона забезпечує передачу даних на підвищених швидкостях (за рахунок використання модуляції більш високого рівня, зменшення ступенів кодування каналів, передачу додаткових потоків даних

і меншої кількості повторних передач), задіявши частотні ресурси з відносно хорошими умовами зв'язку. Таким чином, для передачі будь-якого конкретного обсягу інформації потрібно менше часу. Частотно-часова сітка OFDM допомагає вибрати ресурси одночасно в частотній і часовій області.

Для забезпечення трафіку сервісів, які пересилають пакети з невеликим корисним завантаженням і через однакові проміжки часу, обсяг трафіку сигналізації, необхідний для динамічної диспетчеризації, може перевищувати обсяг переданої користувачем інформації. Тому в LTE також є функція статичної диспетчеризації (поряд із динамічною). Під статичною диспетчеризацією розуміється надання користувачеві радіочастотного ресурсу для передачі певної кількості субкадрів.

Механізми адаптації каналу потрібні для того, щоб максимально використовувати можливості каналу з якістю зв'язку, яка постійно змінюється. Такий механізм «обирає» схеми модуляції і каналного кодування відповідно до умов зв'язку. Від його роботи залежить швидкість передачі даних та ймовірність появи помилок в каналі.

## **2.7 Мультиантенні системи**

Схеми, в яких використовується багато антен, незалежно від того, ідеться про формування діаграми спрямованості, чи про багаторівневу передачу, відіграють значну роль у збільшенні швидкості передачі даних, розмірів покриття та ємності. Достатньо великий потенціал, який забезпечує можливість використання просторового домену. Багаторівнева передача, відома як багатократний вхід - багатократний вихід (MIMO - Multiple Input, Multiple Output), може використовуватися для збільшення швидкості передачі. В цьому випадку окремому користувачеві направляються паралельні потоки даних. Такі методи, які, в основному, застосовуються в сценаріях з високим співвідношенням сигнал/завада (SNR - Signal to Noise Ratio), і там, де радіоканал містить високі розсіювання (наприклад, малі комірки або системи всередині споруд), в першу чергу використовуються в низхідному каналі зв'язку. Термінал розділяє потоки

даних, використовуючи для цього характеристики каналів, а також інформацію про кодову схему, яку використовувала базова станція. Багаторівневі схеми передачі в разі LTE повинні бути стандартизовані. Одним із перспективних підходів є вибірковий контроль швидкості по антенні (S-PARC - Selective Per-Antenna RateControl), який адаптує кількість рівнів і швидкість передачі за окремим рівнем відповідно до поточних умов радіоканалу [26, 1].

Використання багатоантенної передачі інформації в системах мобільного зв'язку покращує технічні характеристики останніх і розширює їх можливості в плані обслуговування абонентів. У технології LTE передбачені два методи багатоантенної передачі: рознесена (SDMA) і багатопоточна (MIMO), частковим випадком якої є формування вузького радіопроменю (Beamforming).

В LTE рознесена передача базується на методі просторово-частотного блочного кодування (SFBC), доповненого рознесенням за часом зі зміною частоти (FSTD) при використанні чотирьох антен. Рознесена передача застосовується, в основному, на загальних низхідних каналах, в яких неможливо використовувати функцію диспетчеризації залежно від стану каналу зв'язку.

При багатопоточній передачі для одночасного пересилання кількох потоків даних одним і тим ж радіоканалом використовують передавальні та приймальні антени (на базовій станції мережі та в термінальному пристрої відповідно). Це значно підвищує максимальну швидкість передачі даних. Наприклад, при установці чотирьох антен на базовій станції і такої ж кількості антен в термінальному пристрої (на приймальній стороні) можна одночасно пересилати до чотирьох потоків даних одним і тим ж радіоканалом, фактично збільшуючи його пропускну здатність в чотири рази.

У мережах з невеликими робочими навантаженнями або невеликими сотами багатопоточна передача дозволяє досягти дуже високої пропускну здатності каналів і більш ефективно використовувати радіоресурси. У разі же з великими сотами і досить інтенсивним навантаженням якість каналу не дає можливості використовувати багатопоточну передачу. Тоді, з метою підвищення якості

сигналу кількох передавальних антен, доцільно застосовувати формування вузького променя (beamforming) при передачі одного потоку даних.

Для досягнення високої якості роботи мережі у різних режимах експлуатації в технології LTE реалізована адаптивна багатопоточна передача, при якій потоки даних, які одночасно пересилаються можна постійно регулювати відповідно до зміни стану каналу зв'язку. Якщо стан каналу дуже хороший, одночасно можна пересилати до чотирьох потоків даних, досягається максимальна швидкість передачі їх до 100 Мбіт / с при ширині смуги частот 20 МГц. При не дуже хорошому стані каналом передається менша кількість потоків. У цій ситуації антени частково використовуються для формування вузької діаграми спрямованості, що підвищує загальну якість прийому і, як наслідок, збільшує пропускну здатність системи і розширює зону обслуговування (до 100 - 120 км). Для забезпечення великої зони радіопокриття або високої швидкості передачі даних на межах сот можна передавати один потік даних в вузькому промені.

## **2.8 Особливості радіоінтерфейсу мережі E-UTRAN низхідного каналу**

Радіоінтерфейс мережі E-UTRAN підтримує метод дуплексного розподілу каналів: частотний FDD і часовий TDD. Особливістю радіоінтерфейсу низхідно каналу мережі E-UTRAN є використання технології множинного доступу OFDMA, що дозволяє отримати високу гнучкість розподілу та масштабність радіоресурсів для каналів передачі даних з різною смугою пропускання. Інтервал часу передачі TTІ в низхідному каналі мережі E-UTRAN відповідає тривалості підкадрів і рівна 0,5 мс. При цьому забезпечується невеликий час очікування і висока ефективність планування передачі пакетів даних на радіоінтерфейси.

У низхідному каналі застосовуються наступні види модуляції: QPSK, 16QAM і 64QAM. Крім того, в цьому каналі передбачається використовувати технологію MIMO. Основна конфігурація технології MIMO - це до двох передавальних і двох приймальних антен відповідно базової станції і мобільного терміналу. Максимально можливо використовувати чотири передавальні антени базових станцій і дві-чотири приймальні антени абонентських терміналів.

Технологія MIMO забезпечує передачу даних як багатьох користувачів (MU-MIMO), так і єдиного користувача (SU-MIMO). Для низхідного каналу мережі E-UTRAN визначено три фізичних канали:

- PDSCH (Physical Downlink Shared Channel) - загальний транспортний фізичний канал;

- PDCCH (Physical Downlink Control Channel) - фізичний канал управління;

- CCPCH (Common Control Physical Channels) - загальний фізичний канал управління;

і чотири транспортних канали:

- BCH (Broadcast Channel) - трансляційний канал;

- PCH (Paging Channel) - канал виклику (пейджінгу)

- DL-SCH (Downlink Shared Channel) - загальний канал;

- MCH (Multicast Channel) - Багатоадресний канал.

Зв'язок транспортних і фізичних каналів аведено на рис. 15 .

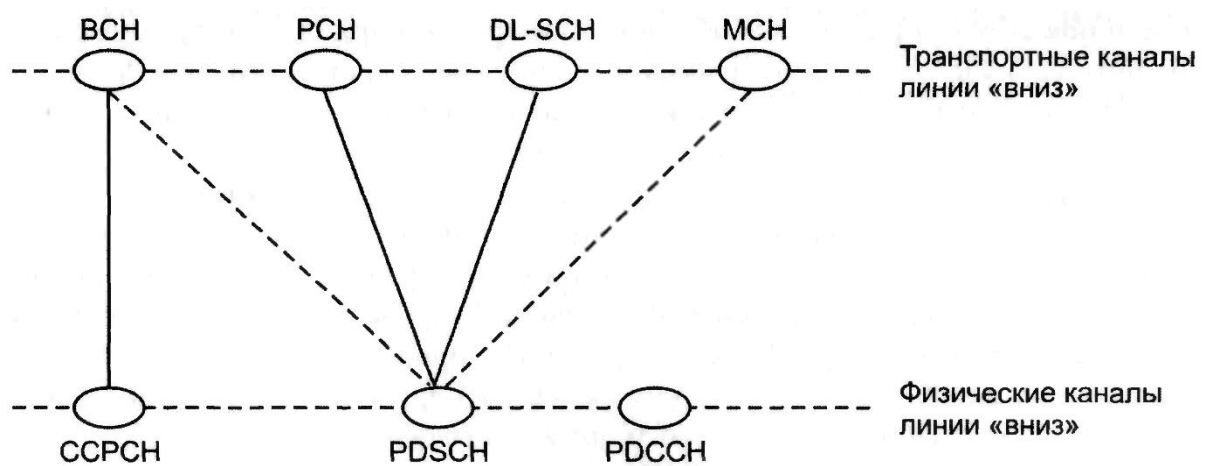


Рисунок 15 – Зв'язок транспортних і фізичних каналів в низхідному каналі мережі E-UTRAN

Канал PDSCH призначений для передачі даних і мультимедіа з високою швидкістю. В цьому каналі використовуються наступні види модуляції: QPSK, QAM-16, QAM-64 і просторове мультиплексування сигналів. Канал PDCCH передає специфічну інформацію про управління абонентськими терміналами і використовує тільки модуляцію QPSK. Цей канал займає перші три OFDM-

символи в першому слоті кожного підкадру. Канал СРСН передає службову мовну інформацію. Використовує тільки модуляцію QPSK.

Технологія ортогонального частотного мультиплексування OFDM базується на формуванні багаточастотного сигналу, що складається з безлічі піднесучих частот, що відрізняються на величину, вибрану з умов ортогональності сигналів на сусідніх піднесучих частотах.

При формуванні OFDM-сигналу потік послідовних інформаційних символів тривалістю  $T_i / N$  розбивається на блоки, які містять  $N$  символів ( $T_i$  - тривалість одного символу). Далі блок послідовних інформаційних символів перетворюється в блок паралельних символів, у якому кожен інформаційний символ відповідає певній піднесучій частоті багаточастотного сигналу. При цьому тривалість символу збільшується  $N$  раз. Таким чином, сумарна ширина спектру багаточастотного сигналу відповідає ширині спектру вихідного сигналу з послідовними символами. Метою такого перетворення є захист сигналу від вузькосмугових завад (або від часткових виявлених спектрів у результаті відбиття та багатопроменевого поширення). Захист досягається завдяки тому, що паралельні символи багаточастотного сигналу становлять кодове слово завадостійкого коду (наприклад, код Ріда-Соломона), який дозволяє відновити символи в разі їх помилкового прийому внаслідок спотворення спектру. Частотно-часове подання OFDM-сигналу наведено на рис. 16. Перетворення сигналу з часової області в частотну відбувається за допомогою швидкого перетворення Фур'є (БПФ).

Крім того, перевага OFDM-сигналу полягає у зменшенні необхідної кількості часових захисних інтервалів. При сигналі з послідовними символами (одночастотний сигнал) захисні інтервали додаються між кожними символами, а при сигналі з паралельними символами (багаточастотному сигналі) - між групами символів (OFDM-символами) [4, 20, 17].

Особливості OFDM-сигналів полягають в наступному:

- Мультиплексування сигналів на піднесучих частотах, модульованих інформаційними символами за вибраним законом (QPSK, QAM-16, QAM-64)

- Ортогональність сигналів на несучих частотах (взаємна кореляційна функція рівна нулю) або, по крайній мірі, їх квазіортогональність (на практиці)
- Кожен OFDM-символ має захисний часовий інтервал для міжсимвольної завади, який вибирається з урахуванням імпульсних характеристик лінії зв'язку (фізичне середовище поширення сигналу).

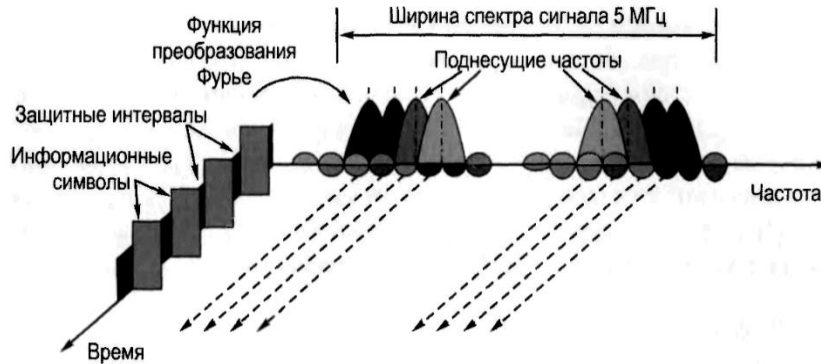


Рисунок 16 – Частотно-часове подання OFDM-сигналу при ширині спектру 5 МГц

Схема формування OFDM-сигналу показана на рис 17 .

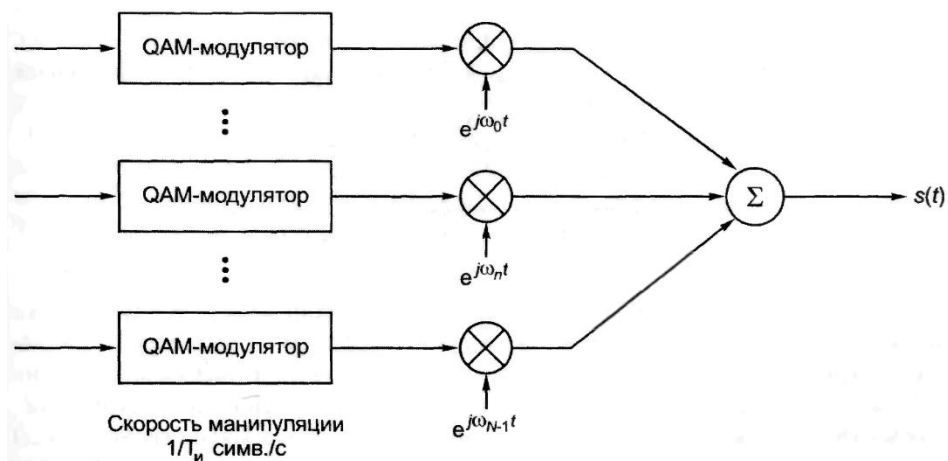


Рисунок 17 - Схема формування OFDM / QAM-сигналу

На практиці при формуванні OFDM / QAM-сигналу використовується дискретне зворотне швидке перетворення Фур'є (ЗШПФ) на N точок (рис. 18 ).

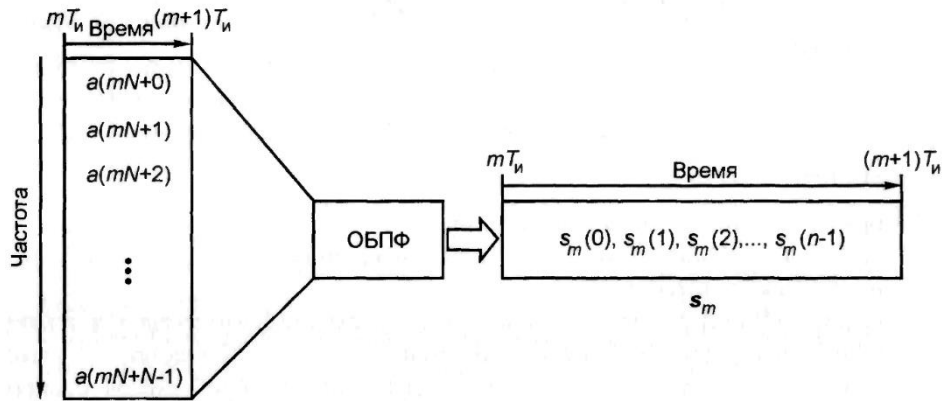


Рисунок 18 – Схема формування OFDM / QAM-сигналу при використанні ЗШПФ

Це значно підвищує практичну реалізацію приймально-передавального пристрою з модуляцією OFDM / QAM. На рисунку 3.4  $a(mN + n)$  - модульований символ  $n$ -ї піднесучої частоти тривалості  $T_u$  в інтервалі часу  $mT_u < t < (m + 1) T_u$ . Вектор  $s_m$  на вихідному блоці ЗШПФ становить OFDM-символ. Схема формування OFDM / QAM-сигналу в передвачі базової станції мережі E-UTRAN наведена на рис 19 .

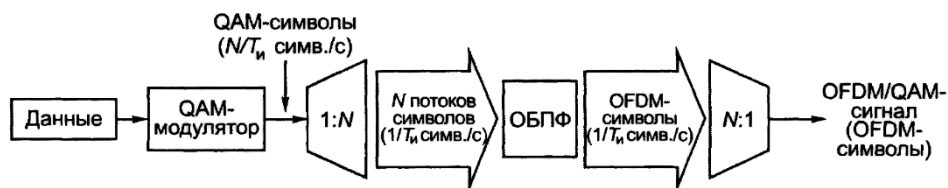


Рисунок 19 – Схема формування OFDM / QAM-сигналу в передавачі базової станції мережі E-UTRAN

При формуванні сигналів OFDM / QAM в низхідному каналі в режимі часового дуплексу використовуються циклічні префікси CP для боротьби з міжсимвольними завадами. При цьому тривалість коротких CP (TCP) рівна 4,7 мкс, тривалість довгих CP - 16,7 мкс при рознесенні піднесущих частот 15 кГц. Часові відрізки (кадри тривалості 10 мс) складаються з 20 підкадрів однакової тривалості:  $t_{пк} = 0,5$  мс.

## 2.9 Моделювання завад, які впливають на лінійний сигнал у мережі E-UTRAN

### Моделювання АБГШ

У радіотехніці білим шумом (white noise) називають стаціонарний випадковий процес, спектральна щільність потужностей якого однакова на всіх частотах, як показано на рис. 20, а, і записується в наступному виді:

$$G_n(f) = \frac{N_0}{2}, \text{Вт/Гц.} \quad (1)$$

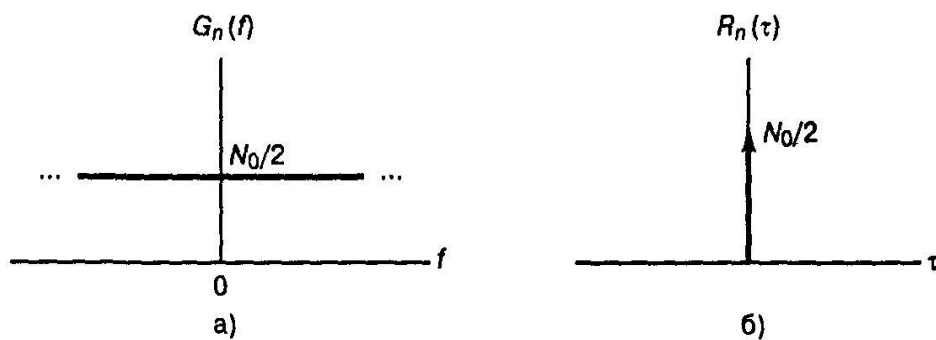


Рисунок 20 – Білий шум

а) спектральна щільність потужності; б) кореляційна функція

Коефіцієнт 2 включений для того, щоб показати, що це двостороння спектральна щільність потужності. Прикладне "білий" використовується в тому ж значенні, що і для білого світла, що містить рівні долі всіх частот видимого діапазону електромагнітного випромінювання.

Введемо поняття кореляційної функції (КФ) і взаємної кореляційної функції (ВКФ). КФ детермінованого сигналу становить інтеграл від добутку двох копій сигналу, які зсунуті один відносно іншого на час  $\tau$ :

$$R_s(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)s(t-\tau)dt. \quad (2)$$

КФ показує ступінь сподібностіходства між сигналом і його зсунутою копією - чим більше значення КФ, тим це подібність сильніша. Значення КФ коливається в межах від -1 до +1.

ПКФ дозволяє визначити ступінь подібності двох різних сигналів, зсунутих один відносно другого. Загальний вид формули КФ зберігається, але під інтегралом знаходиться добуток двох різних сигналів, один із яких затриманий на час  $\tau$

$$R_{12}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} s_1(t)s_2(t-\tau)dt . \quad (3)$$

Очевидно, що АКФ є частковим випадком ПКФ, коли обидва сигнали однакові:

$$s_1(t) = s_2(t) = s(t). \quad (4)$$

КФ білого шуму отримують шляхом зворотного перетворення Фур'є спектральної потужності шуму і записується таким чином:

$$R_n(\tau) = \frac{N_0}{2} \cdot \delta(\tau). \quad (5)$$

Таким чином, КФ білого шуму - це дельта-функція з вагою  $N_0 / 2$ , що знаходиться в точці, як показано на рис. 20, б, яка рівна нулю, то є дві різні вибірки білого шуму не корелюють, незалежно від того, наскільки близько вони знаходяться. Дисперсія білого шуму незкінчено велика.

Модель адитивного білого гаусівського шуму (АБГШ) в середовищі «MATLAB» наведено на рис 21 .

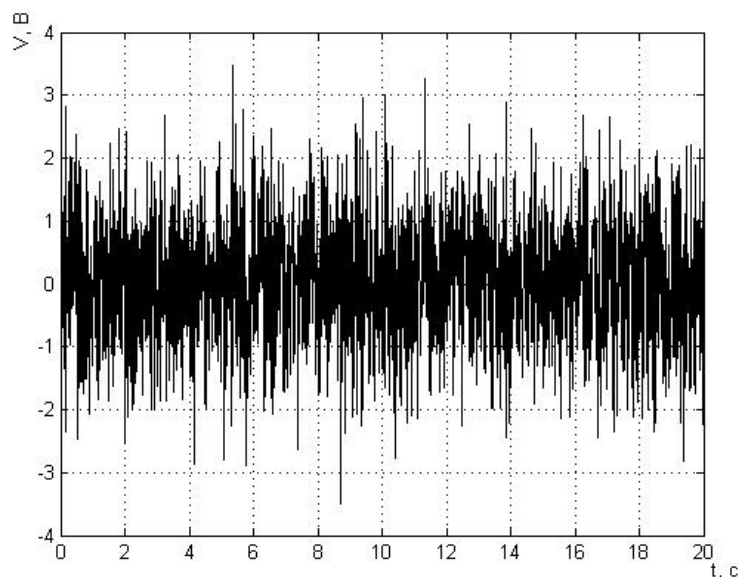


Рисунок 21 – Процес АБГШ із дискретним часом  $T_s = 0,01с$

Термін «аддитивний» (в аббревіатурі АБГШ) означає, що шум просто накладається на сигнал або додається до нього - ніяких мультиплікативних механізмів не існує.

### Моделювання імпульсної завади

За імпульсну заваду використовують послідовність імпульсів Гауса. Один імпульс послідовності описується першою похідною від функції розподілу Гауса:

$$V(t) = A \frac{\sqrt{2e}}{\tau} t \cdot e^{-(t/\tau)^2}, \quad (5)$$

де  $A$  - амплітуда імпульсу;  $\tau$  - часова константа, яка характеризує затухання (довжина імпульсу -  $2\pi\tau$ ).

Послідовність імпульсів Гауса з центральною частотою  $f_c = 2$  ГГц, змодельована в середовищі "MATLAB" наведена на рис 22.

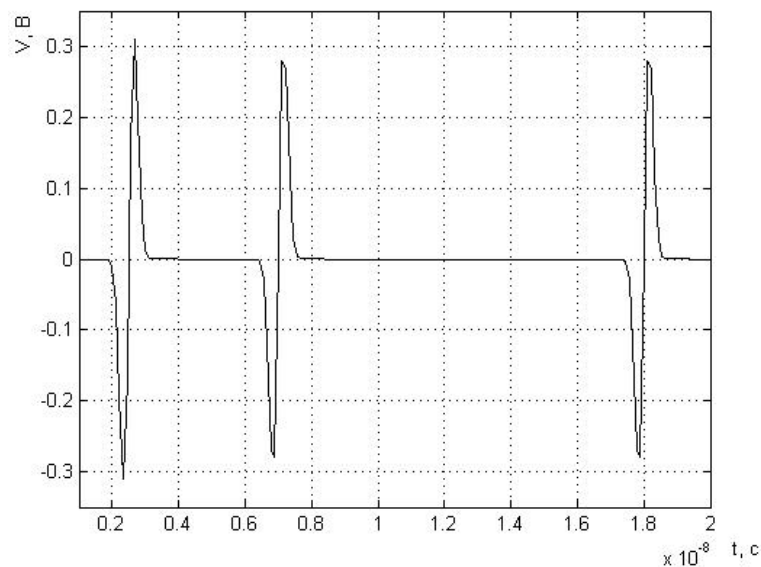


Рисунок 22 – Послідовність імпульсів Гауса

У низхідному каналі застосовуються наступні види модулів: QPSK, QAM-16 і QAM-64, залежно від стану каналу. Розглянемо по чергову ці модуляції.

### Квадратурно-фазова маніпуляція (QPSK)

При квадратурній фазовій маніпуляції (англ. QPSK - Quadrature Phase Shift Keying або 4-PSK) використовується зв'язок із чотирьох точок, розташованих на

рівних віддальх на кругах. Фаза несущого коливання змінюється скачкоподібно залежно від інформаційного повідомлення.

Фазоманіпуляційний сигнал має наступний вид:

$$s_m(t) = g(t) \cdot \cos[2\pi f_c t + \varphi_m(t)], \quad (6)$$

де  $g(t)$  - визначає огибающую сигналу;  $\varphi_m(t)$  - модулюючий сигнал  $\varphi_m(t)$ , який може приймати  $M$  дискретних значень.

Якщо  $M = 2$ , то фазова маніпуляція називається двійковою фазовою маніпуляцією ((BPSK, B-Binary - 1 біт на 1 зміну фази), якщо  $M = 4$  - квадратурною фазовою маніпуляцією (QPSK, Q-Quadro - 2 біти на 1 зміну фази),  $M = 8$  (8-PSK - 3 біти на 1 зміну фази). Таким чином, кількість бітів  $n$ , переданих одним перескоком фази, є степінь, до якої підноситься двійка при визначенні кількості фаз, необхідних для передачі  $n$ -порядкового двійкового числа.

### **Квадратурно-амплітудна маніпуляція (QAM)**

Квадратурно-амплітудною маніпуляцією (англ. Quadrature Amplitude-Shift Keying (QASK)) називається маніпуляція, при якій змінюється як фаза, так і амплітуда сигналу, що дозволяє збільшити кількість переданої інформації одним станом (відліком) сигналу. В англійській літературі такий тип маніпуляції часто називають QAM, позначення QASK застосовується рідко.

QAM-маніпульований дискретний сигнал може бути поданий співвідношенням:

$$Z_m(t) = I_m(t) \cdot \cos(2\pi f_0 t) + Q_m(t) \cdot \sin(2\pi f_0 t) \quad (7)$$

де  $f_0$  - несуча частота;

$t$  - змінюється в діапазоні:

$$\{(m-1) \cdot \Delta t \dots m \cdot \Delta t\}; \quad (8)$$

$m$  - порядковий номер дискрет часу;

$\Delta t$  - крок квантування вхідного сигналу за часом;

$r$  - крок квантування вхідного сигналу за амплітудою;

$I_m(t)$  та  $Q_m(t)$  - модулюючі сигнали;

$$(I_m(t) = \alpha_m \cdot p, Q_m(t) = \beta_m \cdot p); \quad (9)$$

$\alpha_m, \beta_m$  - модуляційні коефіцієнти.

Таким чином, при використанні квадратурної амплітудної модуляції передана інформація кодується шляхом одночасної зміни амплітуди і фази несучого коливання.

## **3 ВИЗНАЧЕННЯ РОЗТАШУВАННЯ ТА РОЗРАХУНОК ПОКРИТТЯ БАЗОВИХ СТАНЦІЙ**

### **3.1 Критерії вибору майданчика для розташування БС**

У проекті розглядаються питання про проектування транспортної мережі зв'язку стандарту GSM -R уздовж лінії залізниці між станціями Рава-Руська та Львів.

Для всіх майданчиків БС (базових станцій) пропонується використання антен із Х-поляризацією. Застосування цього типу антен дає змогу зменшити кількість антен на сектор. Антена містить два набори елементів розташованих під кутами 45 градусів до горизонту. Це забезпечує поляризаційну різницю в 90 градусів. Замість просторового рознесення використовується поляризаційне. Окрім меншої кількості антен спрощується конструкція щоглового господарства за рахунок меншої ваги та зниження вітрового навантаження. Також, зовнішня антена системи БС стає менш помітною.

Коефіцієнт підсилення від рознесеного прийому рівня 3,5 дБ (для просторового рознесення і для поляризаційного рознесення).

Використання антени з Х-поляризацією ширини ДН (діаграми спрямованості) в горизонтальній площині 90°, 65°, або 30° розташованих одна відносно другої в протилежних напрямках забезпечує бажану зону покриття. Для максимальної зони покриття можна використовувати вузькоспрямовану антену з шириною ДН у 30°. Коефіцієнт підсилення такої антени близько 20 дБ.

Довжина фідерів на щоглах РТПЦ і змонтованого обладнання становить приблизно 40 – 50 метрів, використання високочастотного кабелю типу LCF 7/8 буде оптимальним при таких довжинах, втрати даного кабелю становлять 0,04 дБ/м для діапазону 900 МГц і 0,065 дБ/м. для 1800 МГц.

### **3.2 Перевірочний розрахунок покриття**

#### **Основні положення**

Рівень вхідного сигналу MS визначається наступним чином:

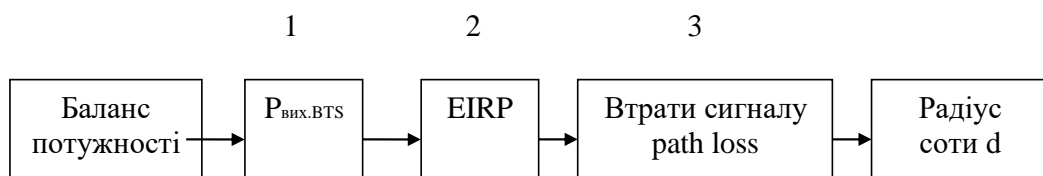
$$SS_{MS} = EIRP - (L_{\text{поляр}}) - L_{PPB.Downlink} \quad (10)$$

З іншого боку, втрати на PPB можуть бути отримані з наступного виразу:

$$L_{PPB.Downlink} = EIRP - (L_{\text{поляр}}) - SS_{\text{проект}} \quad (11)$$

де  $SS_{\text{проект}}$  - проектований рівень сигналу (мінімальний рівень прийнятого сигналу MS забезпечує задовільну якість зв'язку з урахуванням впливу різних середовищ PPB). Значення  $SS_{\text{проект}}$  визначається на етапах сотового планування.

На рис 23 наведено процес розрахунку покриття.



Рисунк 23 – Процес розрахунку покриття

1. Результатом розрахунку балансу потужності є  $P_{\text{вих. BTS}}$  необхідна вихідна потужність BTS.

2. На основі  $P_{\text{вих. BTS}}$  визначається EIRP - ефективна ізотропна випромінювана потужність.

3. На основі EIRP визначаються максимально допустимі властивості сигналу при поширенні останнього через радіоэфір.

Критерії оцінки покриття мережі / Визначення необхідного прийнятого рівня сигналу. У процесі проектування мережі сотового зв'язку, для оцінки покриття використовується оціночний критерій – розрахунковий рівень прийнятого сигналу (проекований)  $SS_{\text{проект}}$ . Розрахунковий рівень прийнятого сигналу базується на визначенні необхідного рівня прийнятого сигналу  $SS_{\text{треб}}$ :

$$SS_{\text{треб}} = MS_{\text{чувств.}} + IF_{\text{замирання}} + FF_{\text{замирання}} + BL \quad (12)$$

де  $SS_{\text{треб.}}$  - необхідний рівень прийнятого сигналу, [дБм];  $MS_{\text{чувств}}$  - чутливість телефону, [дБм]. Відповідно до рекомендацій ETSI 05.05, чутливість телефонів повинна бути не менше -102 дБм;  $IF_{\text{замирання}}$  - запас на інтерференційні замирання сигналу, [дБ]. Типове значення запасу на замирання становить 2 дБ;  $FF_{\text{замирання}}$  - запас на швидкі (Релеєвські) замирання сигналу, [дБ]. Типове значення запасу на замирання становить 3 дБ, 0 дБ - з використанням перескоків по частоті; VL - показники за рахунок людського тіла, [дБ]. Типове значення потужності становить 5 дБ - 900 МГц, 3 дБ - 1800 МГц.

Визначення діючого рівня прийнятого сигналу. Рівень прийнятого сигналу пов'язаний із затребуваним рівнем прийнятого сигналу через наступне співвідношення:

$$SS_{\text{проект}} = SS_{\text{треб}} + LNF_{\text{замирання}} \quad (13)$$

$$SS_{\text{проект}} = SS_{\text{треб}} + LNF_{\text{замирання}} + CPL \quad (14)$$

$$SS_{\text{проект.}} = SS_{\text{треб.}} + LNF_{\text{замирання}} + CPL \quad (15)$$

де  $LNF_{\text{замирання}}$  - запас на логорифмічно-нормальне замирання прийнятого сигналу, [дБ]. Типове значення запасу логорифмічно-нормального замирання для міських районів становить 4,5 дБ, для передмістя у 3 дБ (поза приміщеннями); CPL - втрати в автомобілі, [дБ]. Типове значення потужності в автомобілі становить 6 дБ; VPL - середнє значення ослаблення сигналу в будівлях, [дБ]. Наприклад, для 900-го діапазону, типове значення ослаблення сигналу в будівлях для міських районів становить 18 дБ, для міста 12 дБ. Значення замирань і втрат сигналу наведено в таблиці VII.

### **Вимоги до покриття.**

У таблиці VIII наводяться основні вимоги до покриття мережі на момент закінченого етапу будівництва мережі. Дані вимоги ґрунтуються на порогових значеннях прийнятого рівня сигналу (downlink), для різних умов поширення радіохвиль (РРВ).

Таблиця VII – Значення замирань і втрат сигналу.

| Назва                        | 900 МГц                           | 1800 МГц                          |
|------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| $SS_{\text{треб}}$ , дБм     | -104                              | -104                              |
| $IF_{\text{замирання}}$ , дБ | 2                                 | 2                                 |
| $FF_{\text{замирання}}$ , дБ | 3<br>0 - з перескоками по частоті | 3<br>0 - з перескоками по частоті |
| BL, дБ                       | 5                                 | 3                                 |
| замирання і                  | 4.5 місто<br>3 передмістя         | 4.5 місто<br>3 передмістя         |
| CPL, дБ                      | 6                                 | 6                                 |
| BPL, дБ                      | 12 передмістя<br>18 місто         | 20 передмістя<br>40 місто         |

Таблиця VIII – Вимоги до значень прийнятого рівня сигналу для різних умов РРВ.

| Критерій   | Вимоги до покриття   |
|--|--|
| Рівень прийнятого сигналу (DL). Умова РРВ: міська забудова, поза приміщеннями                      | Рівень сигналу RXLEV = - 95 дБм або вище в 95% всіх вимірювань |
| Рівень прийнятого сигналу (DL). Умова РРВ: приміська зона/відкритий простір, всередині автомобіля. | Рівень сигналу RXLEV = - 88 дБм або вище в 95% всіх вимірювань |
| Рівень прийнятого сигналу (DL). Умова РРВ: міська забудова, всередині приміщень                    | Рівень сигналу RXLEV = - 76 дБм або вище в 95% всіх вимірювань |

### 3.3 Методи розрахунку покриття

Зараз існує багато розроблених моделей розрахунку потенціалу сигналу на трасі між MS і BTS. Частина моделей становлять аналітичні моделі, частина емпіричні моделі. Деякі моделі, такі як моделі Окамури, становлять набір експериментальних кривих ослаблень сигналу, отриманих у результаті значної кількості вимірних рівнів отриманого сигналу.

Останнім часом застосовуються також моделі у наближенні геометричної оптики. Основною ідеєю цих моделей є оцінка рівня сигналу за допомогою трасування променів від BS до MS. Але слід відзначити, що ці моделі в даний момент застосовуються тільки для розрахунку всередині приміщень, оскільки потребують більшої кількості обчислених і вхідних даних на об'єктах, що впливають на ослаблення сигналу. У зв'язку з цим перевага віддається аналітичним і частіше всього емпіричним моделям [24, 12].

Класичний метод розрахунку зон обслуговування. У класичній теорії поширення радіохвиль, при розрахунках рівня прийнятого сигналу на трасі між передаючим приймальним пунктом, використовується квадратична формула Введенського:

$$E_d = \frac{2.18 \cdot \sqrt{P_1 \cdot D_1 \cdot h_1 \cdot h_2}}{r^2 \cdot \lambda}, \text{ мВ/м} \quad (16)$$

де  $r$  - відстань між передавальною і приймальною антенами, км.;  $h_1$  - висота передавальної антени, м.;  $h_2$  - висота приймальної антени, м.;  $P_1$  - потужність передавача, кВт.;  $\lambda$  - довжина хвилі, м.;  $E_d$  - діюче значення напруженості поля;  $D_1$  - коефіцієнт спрямованої дії передавальної антени.

Формула Введенського має фундаментальне значення для розрахунків ультракоротких ліній зв'язку і дуже наглядно характеризує залежність рівня прийнятого сигналу від відстані, довжини хвилі і висоти антени.

Емпірична модель Окамура – Хата. Сучасне місто для частот 900-го і 1800-го діапазону становить складний комплекс неоднорідностей, де просторовий розподіл рівня прийнятого сигналу має дуже складний характер. Тим не менше, можна виділити характерні умови, при яких поширення радіохвиль для частоти 900-го і 1800-го діапазонів буде різним. виявляється, що з точки зору законів поширення радіохвиль необхідно розрізняти випадки, коли:

- Приймальна антена (MS) розташована поза будівлею, нижче рівня дахів. Тоді можливі наступні характерні випадки:

- Радіальні вулиці. Приймальні антени (MS) розташовані на вулицях, напрямком яких співпадає з напрямком поширення радіохвиль.

- Поперечні вулиці. Прийом здійснюється на вулицях, які перпендикулярні напрямку радіохвиль.
- Довільно орієнтовані вулиці.
- Приймальна антена розташована всередині будівлі.
- Приймальна антена розташована на даху будівлі вище рівня дахів оточуючих споруд.

У кожному з наведених випадків, механізм поширення радіохвиль у місті надзвичайно складний, оскільки при цьому в точку прийому потрапляє кілька відбитих хвиль, амплітуди та фази яких врахувати практично неможливо. Тому при розрахунку рівня прийнятого сигналу в умовах міста зазвичай використовуються емпіричні формули, отримані експериментальним шляхом.

Сумарні втрати на трасі поширення сигналу BTS і MS складаються з:

$$L_p = L_{откр.обл.} + L_{дифр} + L_{сфер.земли} + L_{средаРРВ} + k_1 + \dots + k_n \quad (17)$$

де  $L_{откр.обл.}$  - втрати на відкритій області. Втрати визначаються на основі моделі Окамура-Хата;  $L_{дифр.}$  - дифракційні втрати, які виникають за рахунок дифракції радіохвиль на краях будівель;  $L_{сфера.земли}$  - втрати за рахунок сферичності землі;  $L_{среда.РРВ}$  - втрати у різних середовищах РРВ;  $k_1 \dots k_n$  - коефіцієнти поправки, отримані у результаті експериментальних досліджень проведення натурних вимірювань рівня прийнятого сигналу.

Дифракційні втрати за рахунок сферичності землі. Дифракція радіохвиль у діапазоні 900, 1800 МГц, спричинена відмінністю форми землі від плоскої, призводить до того, що тільки частина енергії радіохвиль поширюється за горизонт (рис. 24 ).

### **Відсутність прямої видимості.**

Для визначення дифракційних втрат за рахунок сферичності землі  $L_{сфер.земли}$  можна скористатися номограмою, яка отримана на основі використання наближених виразів Біллінгтона [19] і забезпечує точність визначення величини затухання +/-2 дБ.

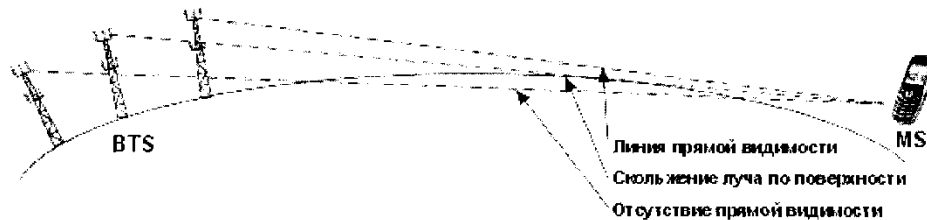


Рисунок 24 – Сферичність землі

На практиці, для систем сотового зв'язку діапазону 1800 МГц, дифракційні втрати  $L_{\text{сфер.земли}}$  можна не визначати, оскільки згасання сигналу у даному діапазоні частот у межах міст і приміських районах досить значні. При цьому за межу горизонту хвилі поширюються тільки у тому випадку, коли антени BTS діапазону 1800 МГц знаходяться на великій висоті і BTS обслуговує відкриті простори (місцевості).

Для визначення дифракційних втрат необхідно визначити найбільші перешкоди на шляхах поширення радіосигналу, які спричиняють найбільші дифракційні втрати.

Дифракційні втрати залежать від дифракційного параметру  $U$  - відношення параметрів  $C_s$  та  $R_s$ . Параметр  $C_s$  - висота над лінією прямої видимості між BTS і MS, рис 25 а  $R_s$  - радіус зони Френеля на краю об'єкта [20].

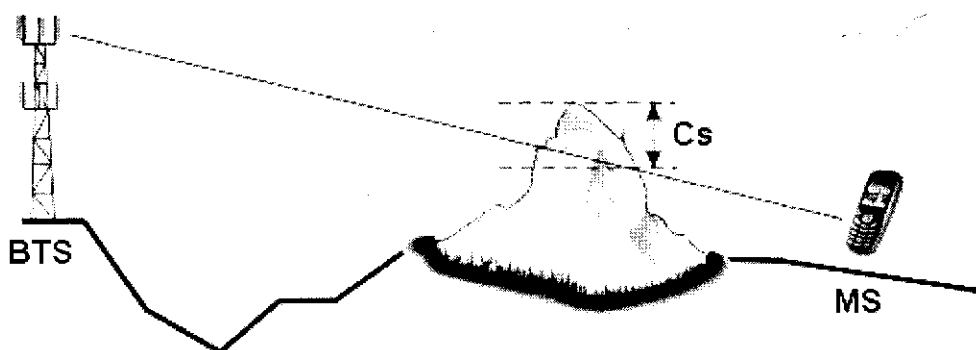


Рисунок 25 – Висота над лінією прямої видимості між BTS і MS

Як показують розрахунки, вклад дифракційних потерь рівен 0, коли співвідношення (дифракційний параметр  $U$ )  $< - 0,49$ . Коли ж  $U$  значно збільшується, то, відповідно, і значно збільшуються дифракційні втрати.

Для визначення дифракційних втрат необхідно визначити радіус зони Френеля, який може бути вирахований за наступною формулою:

$$r_S = \sqrt{\frac{\lambda \cdot d_1 \cdot d_2}{d_1 + d_2}}, \quad (18)$$

де  $d_1$  - відстань від BTS до перешкоди, яка спричиняє виникнення дифракції, [м];  
 $d_2$  - відстань від перешкоди до MS, [м];  $\lambda$  - довжина хвилі, [м] (рисунки 26 та 27 ).

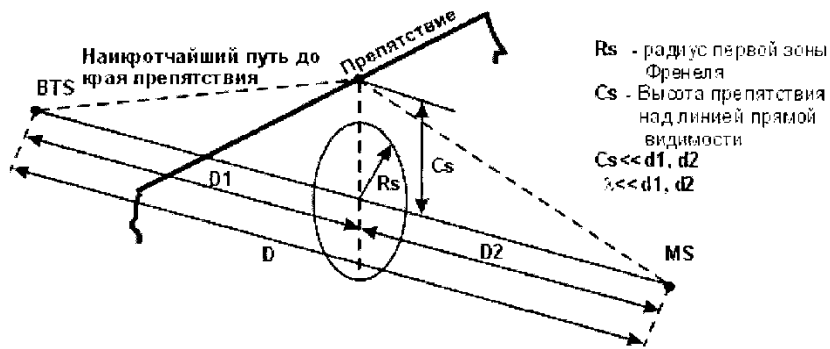


Рисунок 26 – Визначення радіусу зони Френеля

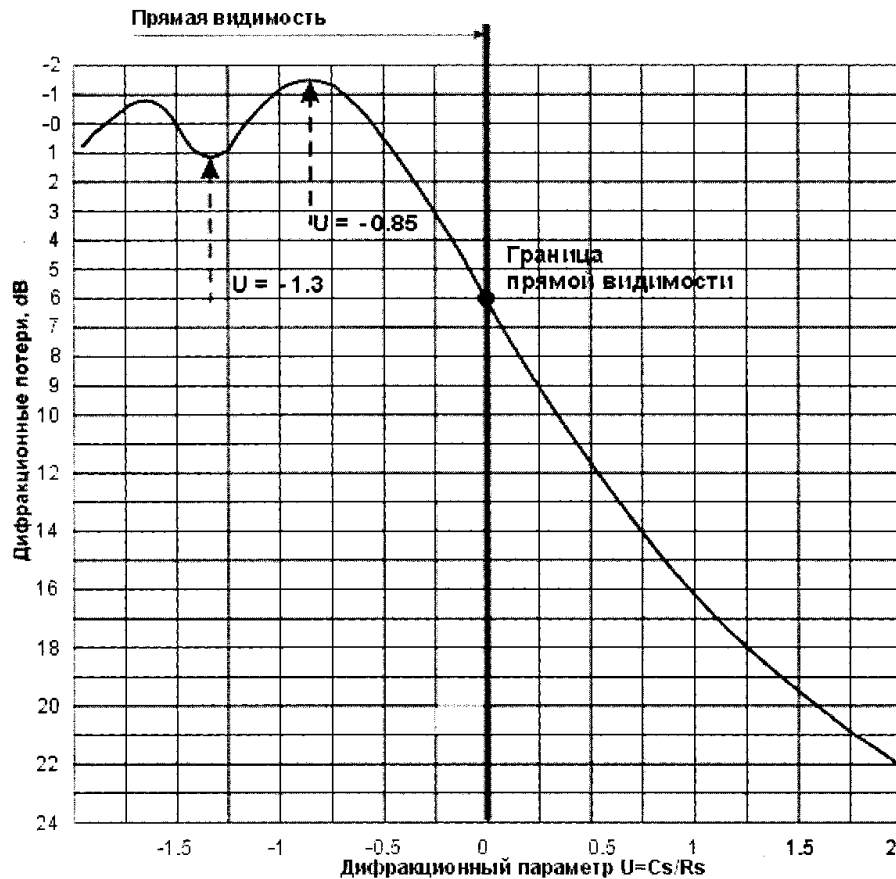


Рисунок 27 – Визначення дифракційних втрат

**Залежність втрат від типу місцевості.** Як зазначається вище, втрати при поширенні сигналу, між BTS і MS, сильно залежать від того, в якому середовищі цей сигнал поширюється. У зв'язку з цим необхідно визначити значення додаткових втрат для різних типів середовищ поширення радіосигналу та для різних частотних діапазонів, оскільки втрати сигналу сильно залежать від його частоти (таблиця IX).

Таблиця IX - Втрати сигналу для різних типів середовищ РРВ.

| Тип району          | Втрати, дБ для діапазону частот |               |
|---------------------|---------------------------------|---------------|
|                     | 900 МГц                         | 1800/1900 МГц |
| Міська забудова     | 22.6                            | 25.1 - 28.1   |
| Передмістя          | 17.6                            | 20.1 - 23.1   |
| Ліс                 | 11.6                            | 16.9          |
| Водойми             | 0,1                             | 2.9           |
| Болото              | 12.6                            | 13.8          |
| Сільська місцевість | 12.6                            | 15.2          |

Опираючись на проведені обчислення запишемо результуючі втрати у виді:

$$L_p = L_{откр.обл.} + \sqrt{(\alpha \cdot L_{дифр.})^2 + (L_{сфер.земли})^2} + L_{сретаРРВ} \quad (19)$$

де  $L_{откр.обл.}$  - втрати на відкритій області (модель Окамура - Хата);  $\alpha$  - добавочний коефіцієнт, який враховує дифракційні втрати;  $L_{дифр.}$  - дифракційні втрати, що виникають за рахунок дифракції радіохвиль на краях будівель;  $L_{сфер.земли}$  - втрати за рахунок сферичності землі;  $L_{сретаРРВ}$  - втрати у різних середовищах РРВ.

Поправочні коефіцієнти  $k_1 \dots k_n$  також уведені до складу доданку  $L_{откр.обл.}$  втрат, яка визначається, використовуючи емпіричну модель Окамура – Хата.

**Модель Окамура-Хата.** У 1968 г, японський інженер Окамура провів безліч натурних вимірювань щодо розподілу рівня сигналу для різних типів міської забудови в м. Токіо і, за їх результатами, побудував кілька експериментальних кривих.

На базі цих даних, у 1980 р. японський учений Хата, вивів кілька емпіричних формул. У результаті чого, на даний момент, модель Окамура-Хата є найпопулярнішою і найзастосовуванішою для розрахунку ослаблення сигналу для різних типів областей.

Основні обмеження для використання моделі Окамура-Хата:

- Частотний діапазон  $f$ : 150-1000 МГц.
- Відстані  $d$ : 1- 20 km.
- Висота підвішування антени BTS  $h_{BTS}$  : 30-200 м.
- Висота антени MS  $h_{MS}$  : 1-10 м.

**Модель Окамура-Хата для міської забудови.** Вираз для розрахунку ослаблення сигналу в межах міської забудови:

$$L_{город} [dB] = 69.55 + 26.16 \log(f) - 13.82 \log(h_{BTS}) - a(h_{MS}) + [44.9 - 6.55 \log(h_{BTS})] \log(d), \quad (20)$$

де  $a(h_{MS})$  - фактор висоти підсилення для РС.

- Для середнього і маленького міста фактор висоти підсилення визначається за формулою:

$$a(h_{MS}) = [1.1 \log(f) - 0.7] H_{MS} - [1.56 \log(f) - 0.8]. \quad (21)$$

- Для великого міста фактор висоти підсилення визначається за формулою:

$$a(h_{MS}) = \begin{cases} 8.29 [\log(1.54 \cdot h_{MS})]^2 - 1.1 & \text{для } f \leq 200 \text{ МГц} \\ 3.2 [\log(11.75 \cdot h_{MS})]^2 - 4.97 & \text{для } f \geq 400 \text{ МГц} \end{cases}. \quad (22)$$

- Для відкритого простору, втрати сигналу визначаються за наступною формулою:

$$L_{откр.обл.} [dB] = L_{город} - 4.78 (\log f)^2 + 18.33 \log f - 40.94. \quad (23)$$

**Модель Окамура-Хата для передмістя.** Для передмістя, втрати сигналу визначаються за наступною формулою:

$$L_{пригород} [dB] = L_{город} - 2 [\log(f / 28)]^2 - 5.4. \quad (24)$$

## Модель Окамура-Хата для сільської місцевості, квазівідкритої області.

Для сільської місцевості втрати сигналу визначаються за наступною формулою:

$$L_{\text{квазіоткр.обл}} [dB] = L_{\text{город}} - 4.78[\log(f)]^2 + 18.33\log(f) - 35.94. \quad (25)$$

**Спрощена модель Окамура-Хата.** Для полегшення здійснення розрахунку втрат на трасі між BS і MS використовується спрощена модель Окамура - Хата:

$$L_{\text{Окамура-Хата}} = A - 13.82 \cdot \log(h_{\text{BTS}}) + [44.9 - 6.55 \log(h_{\text{BTS}})] \log(d) - a(h_{\text{MS}}), \quad (26)$$

де: A = (для частоти 900 МГц) 146,8 [дБ] - міська забудова; 136,9 [дБ] - передмістя; 118,3 [дБ] - відкритий простір;

A = (для частоти 1800 МГц) 153,8 [дБ] - міська забудова; 146,2 [дБ] - передмістя; 124,3 [дБ] - відкритий простір;

$h_{\text{BTS}}$  - висота підвішування антени BTS, м.;

$h_{\text{MS}}$  - висота підвішування антени MS, м.

Розв'язавши рівняння (26) відносно d, отримуємо формулу для визначення радіусу соти:

$$d = 10^\beta, \text{ where } \beta = \frac{L_{\text{Окамура-Хата}} - A + 13.82 \cdot \log(h_{\text{BTS}}) + a(h_{\text{MS}})}{44.9 - 6.55 \log(h_{\text{BTS}})} \quad (27)$$

Визначимо радіус зони обслуговування сот для наступних умов:

- вихідна потужність BTS згідно з розрахунком балансу потужності:

$$P_{\text{вых. BTS}} = 44 \text{ dBm};$$

- коефіцієнт підсилення антени BTS:  $G_{\text{ант. BTS}_{900, 1800}} = 16 \text{ dBi}$ ;

- втрати на дуплексорі:  $L_{\text{дуплексор}} = 0.5 \text{ dB}$ ;

- втрати в кабелі:  $L_{\text{кабель. BTS}_{900}} = 4 \text{ dB}$ ,  $L_{\text{кабель. BTS}_{1800}} = 6.5 \text{ dB}$ ;

- чутливість телефону:  $MS_{\text{чувств}} = -104 \text{ dBm}$ ;

- запас на інтерференційні замирання:  $IF_{\text{замирання}_{900, 1800}} = 2 \text{ dB}$ ;

- запас на частотні замирання:  $FF_{\text{замирання}_{900, 1800}} = 3 \text{ dB}$ ;

- втрати за рахунок людського тіла:  $BL_{900} = 5 \text{ dB}$ ,  $BL_{1800} = 3 \text{ dB}$

В якості перевірного розрахунку здійсимо розрахунок покриття за наступною послідовністю:

1. Визначимо значення ефективно випромінюваної потужності;
2. Визначимо значення необхідного рівня сигналу, який приймається;
3. Визначимо значення проектного рівня прийнятого сигналу для впевненого прийому у межах міста на вулиці;
4. Визначимо втрати сигналу при РРБ в умовах міста;
5. За формулою 27 визначимо радіус соти.

Результати такого розрахунку наведено у вигляді таблиці X .

Таблиця X - Результати перевірного розрахунку покриття

| Назва                          | Значення | Назва                           | Значення |
|--------------------------------|----------|---------------------------------|----------|
| Для частоти 900 МГц            |          | Для частоти 1800 МГц            |          |
| $EIRP_{900}, dBm$              | 55,5     | $EIRP_{1800}, dBm$              | 53       |
| $SS_{\text{треб.}_900}, dBm$   | - 94     | $SS_{\text{треб.}_1800}, dBm$   | - 96     |
| $SS_{\text{проект.}_900}, dBm$ | - 89,5   | $SS_{\text{проект.}_1800}, dBm$ | - 91,5   |
| $L_{PPB\_Downlink\_900}, dB$   | - 143,5  | $L_{PPB\_Downlink\_900}, dB$    | - 143    |
| $d_{900}, км$                  | 3        | $d_{900}, км$                   | 1,87     |

### Методика розрахунку поля шляхом трасування променів.

Фізичні моделі поширення в місті, на яких базуються методики розрахунку, різні для різних діапазонів частот. У діапазоні УКВ вважається, що основний вклад в рівень прийнятого сигналу на вулицях міста вносять хвилі, дифраговані на дахах будівель.

Розрахунок поля (покриття) із застосуванням методики трасування променів, базується на використанні бази даних про місцевості, де він проводиться. Для УКВ діапазону базу даних становлять координати, довжини та висоти будівель, розташованих вздовж вулиці, на якій розраховується рівень прийнятого сигналу.

Спочатку в пам'яті ЕОМ створюється база даних, яка містить координати, висоти, розміри та орієнтацію будівель конкретного району міста. До складу цієї бази даних також вноситься інформація щодо властивостей відбиття та поглинання споруд. Процедура розрахунку полягає в наступному. В ЕОМ вводяться координати передавального та приймального пунктів. Із передавального пункту ЕОМ послідовно моделює формування променів із заданими приростами за азимутом та кутом місця. Моделюється перетин кожного променя із спорудою, потім визначаються координати точки перетину. Після цього перевіряються умови прямої видимості пункту прийому з точки перетину.

За наявності прямої видимості визначаються: відстань до приймального пункту, кут, під яким видно приймальний пункт відносно нормалі до стіни з точки перетину, азимут і кут місця променя на пункті прийому. Далі, з точки перетину проводиться промінь, дзеркально відбитий від стіни, і продовжується до перетину з наступною спорудою (будівлею). Після чого повторюється процедура визначення прямої видимості. Кількість послідовних перевідбивань для кожного випадку визначає величину ефективного коефіцієнта відбиття поверхнею стін та чутливістю прийача. У результаті в пам'яті ЕОМ міститься перелік споруд, освітлених із пункту передачі прямими та перевідбитими хвилями і видимих із пункту прийому, а також усі геометричні характеристики, необхідні для розрахунку інтенсивності та затримок хвиль на приймачі, відбитих та розсіяних кожним будинком. Інтенсивність відбитих і розсіяних хвиль визначається умовою на поверхні стіни. Включити до складу бази даних опис поверхні кожної окремої будівлі практично неможливо, тому при розрахунках доцільно опиратися на кілька типів поверхонь споруд, розсіюючі характеристики яких відомі заздалегідь.

### **3.4 Розрахунок зони покриття радіозв'язку стандарту GSM-R**

Планування мереж радіозв'язку залежить головним чином від географічних і морфологічних даних. Так базова зона покриття може бути завжди розрахована за існуючими моделями за допомогою цифрових карт відповідної області. Ці

моделі повинні бути «налаштовані» оточення залізниць і володіти високою ймовірністю відповідності місцю.

Особливу увагу звертають на неохоплені «плями» і завади (суміщенні або сусідні канали). На неохоплених ділянках можуть бути розміщені або оптимізовані майданчики для BTS та/або антени. Там, де це не допомогло вирішити проблему, можна використовувати додаткові ретранслятори.

Виходячи з проведеного дослідження можна визначити вихідні дані для проведення розрахунку при плануванні мережі радіозв'язку (табл. XI ).

Таблиця XI – Вихідні дані для розрахунку покриття

|                                       |  |
|---------------------------------------|--|
| Мінімальний рівень прийому            | – 90 дБм для 95%-ної ймовірності відповідності місця/часу 100 м (ETCS 97%, маневрова робота 99%), для задоволення вимог ETCS |
| Вихідна потужність мобільної станції  | 2 Вт (33 дБм) / 8 Вт (39 дБм)  |
| Чутливість приймача мобільної станції | 102 дБм  |
| Завади суміщених каналів C/IS         | 20 дБ  |
| Завади сусідніх каналів C/IA          | 5 дБ   |
| Коефіцієнт підсилення антени          | 15 дБ  |
| Висота антени над поверхнею землі     | 30 м   |
| Допустиме завмирання радіосигналу     | (повільне)   |

Зазвичай мережа проектується для збалансованого зв'язку абонента з центральним вузлом / центрального вузла з абонентом.

Ієрархічна сотова структура трансформує сотовий набір у багаторівневу систему, де специфічні види трафіку підтримуються певними сотовими рівнями:

1. макросоти – забезпечують широке покриття та обслуговують абонентів з високими швидкостями руху;
2. мікросоти – забезпечують ємність на необхідних територіях, обслуговуючи абонентів з низькими швидкостями переміщення;
3. пікосоти – забезпечують роботу всередині будівель і споруд.

## Розрахунок радіусу соти

Дані, які необхідно забезпечити при проектуванні мережі GSM вказані в додатку 1.

Потрібно вирахувати радіус впевненого покриття соти, що необхідно для проектування мережі у визначеній місцевості.

Для початку визначається кількість каналів мережі мобільного зв'язку, використовуючи наступну формулу:

$$n_k = \text{int}\left(\frac{F}{F_k}\right); \quad (28)$$

$$n_k = \text{int}\left(\frac{25 \cdot 10^6 \text{ Hz}}{2 \cdot 10^5 \text{ Hz}}\right) = \text{int}(125) = 125.; \quad (29)$$

Потім вибирається розмір кластера  $K=7$  і антени базової станції ширини діаграми направленості  $d_e 120^\circ$  ( $M=3$ ). У той же час відносна відстань повторного використання частотних каналів рівна:

$$q = D / R \quad (30)$$

Визначаються коефіцієнти  $\beta_i$ , які визначають середнє значення затухання радіохвиль у напрямку  $-i$  передачі завад.

У цьому випадку:

$$\beta_1 = (q + 0.7)^{-4}, \quad (31)$$

$$\beta_2 = q^{-4}. \quad (32)$$

Визначаються значення  $\alpha_c^2$ ,  $\beta_c$  та  $\alpha_p$  згідно (9)

$$\alpha_c^2 = \frac{1}{\gamma^2} \ln \left\{ 1 + \left[ \exp(\gamma^2 \alpha^2) - 1 \right] \frac{\beta_1^2}{\beta_1} \right\} \quad (33)$$

$$\beta_c = \beta_1 \exp \frac{\gamma^2 (\alpha^2 - \alpha_c^2)}{2} \quad (34)$$

$$\alpha_p^2 = \alpha^2 + \alpha_c^2 \quad (35)$$

$$\alpha_p = 7.91 \quad (36)$$

Визначається середнє значення відношення сигнал/шум при піднятті трубки:

$$\bar{\rho} = 10 \lg(1 / \beta_c) \quad (37)$$

$$X_1 = \frac{\bar{\rho} - \rho_0}{\alpha_\rho} \quad (38)$$

Використовуючи таблиці Додатку 1 визначається процент часу, впродовж якого відношення сигнал/шум при піднятті трубки MS буде меншим, аніж захисне відношення  $\rho_0 = 9 \text{ dB}$  при значенні кластера рівним К:

$$P(7) = Q(x_1) \cdot 100. \quad (39)$$

Відповідно до формули визначається кількість каналів, необхідних для обслуговування абонентів в зоні кожної соти:

$$n_s = \text{int} \left( \frac{n_k}{KM} \right); \quad (40)$$

$$n_s = \text{int} \left( \frac{125}{7 * 3} \right) = \text{int}(5,95) = 5.$$

Маючи параметри  $n$  та  $n_s$ , визначаємо загальну кількість каналів:

$$n_0 = n_s n_a; \quad (41)$$

$$n_0 = 5 * 8 = 40;$$

Перевіряємо виконання умов:

$$P_B \leq \sqrt{\frac{2}{\pi n_0}} \text{ або } P_B > \sqrt{\frac{2}{\pi n_0}} \quad (42)$$

$$A_1 = 0,015 P_B \leq \sqrt{\frac{2}{3,14 * 40}} = 0,126; \quad (43)$$

$$A_2 = 0,015 P_B > \sqrt{\frac{2}{3,14 * 40}} = 0,126;$$

тоді для визначення допустимого навантаження в зоні соти використовуються відповідні формули, залежно від отриманого значення  $P_B$ :

$$A = n_0 \left[ 1 - \sqrt{1 - \left( P_B \sqrt{\pi \frac{n_0}{2}} \right)^{1/n_0}} \right] \quad (44)$$

або

$$A = n_0 + \sqrt{\frac{\pi}{2} + 2n_0 \ln \left( P_B \sqrt{\pi \frac{n_0}{2}} \right)} - \sqrt{\frac{\pi}{2}} \quad (45)$$

$$A_1 = n_0 \left[ 1 - \sqrt{1 - \left( P_B \sqrt{\frac{3,14 * 40}{2}} \right)^{1/40}} \right] = 30,89; \quad (46)$$

Враховується кількість абонентів, які обслуговуються базовою станцією:

$$N_{BTS} = M \operatorname{int} \left( \frac{A}{\beta} \right);$$
$$N_{BTS} = 3 \operatorname{int} \left( \frac{30,89}{0,02} \right) = 4633;$$
(47)

Тоді кількість базових станцій сотової мережі, становить:

$$K_{BTS} = \operatorname{int} \left( \frac{N_a}{N_{BTS}} \right); K_{BTS} = \operatorname{int} \left( \frac{175000}{4632} \right) = 37;$$
(48)

Враховується радіус однієї соти з урахуванням перекриття 75% сотової мережі:

$$R = \sqrt{\frac{S_0}{\pi K_{BTS}}}; R = \sqrt{\frac{67 \cdot 2 \text{Km}^2}{3,14 * 37}} = 1,7 \text{Km}$$
(49)

Оскільки радіус соти співмірний із шириною зони покриття вздовж залізниці, будемо використовувати за шириною тільки одну соту. Тому кількість базових станцій, розташованих уздовж полотна залізниці становитиме:

$$N = \frac{68}{1,7} = 40 \text{ станцій.}$$
(50)

Ця кількість станцій враховує використання трьох розподільчих станцій на узлових залізничних станціях.

Схематичне розміщення сотової системи GSM-R вздовж експериментальної ділянки залізниці наведено у Додатку 2 , а параметри радіопокриття наведено в Додатку 3.

## ВИСНОВКИ

Цифрові мережі зонального зв'язку передбачають об'єднання кількох каналів в системі. Зональні системи призначені для збільшення пропускної здатності каналів радіозв'язку. При цьому абоненту, який бажає здійснити виклик, надається будь-який із наявних каналів, які вільні в даний момент часу. Таким чином досягається набагато вище завантаження системи і, відповідно, значне збільшення кількості абонентів на кожен канал. Такі системи роблять процедуру зв'язку гранично простою (практично, як користування телефонним апаратом). Спеціальне обладнання автоматично розподіляє наявні не зайняті радіоканали в інтересах усіх абонентів, що виходять на зв'язок (динамічний розподіл вільних каналів).

Системи зонального зв'язку забезпечують набагато більше функціональних можливостей, ніж звичайні системи радіозв'язку, і, у порівнянні з ними, володіють наступними перевагами:

- в радіоканалі може розміщуватися більше користувачів, зазвичай ця перевага зростає при розширенні системи, так, наприклад, система зонального радіозв'язку з однією десятиканальною базовою станцією може забезпечити обсяг трафіку приблизно на 50% більший на одному каналі, ніж звичайна система;

- з точки зору користувача працювати в системі надзвичайно просто, оскільки розміщення каналу автоматично управляється контролером;

- обслуговування зональною системою надійніше, оскільки короткострокова втрата каналу, спричинена завадами чи іншими причинами, впливає тільки на якість обслуговування, але не спричиняє загальної втрати зв'язку;

- динамічний розподіл каналів забезпечує можливість зберігання інформації щодо розташування, статусу, безпеки та роботи службовців, які користуються мобільними радіостанціями;

- розширення конфігурації можливе завдяки розширенню зони покриття, що дозволяє ввести майже необмежену кількість користувачів. Зона покриття

дозволяє забезпечувати зв'язок, як з одиничною базовою станцією, так і в межах мережі зв'язку регіонального масштабу.

У роботі виконано аналіз існуючих TSI країн Європейської співдружності, які застосовуються до систем зонального радіозв'язку на залізничному транспорті (GSM-R), з них обрані вихідні дані для здійснення подальших розрахунків, виконаний розрахунок радіусу покриття соти розподільчої станції мережі, розрахунок кількості розподільчих станцій на ділянці організації зв'язку, здійснено розміщення розподільчих станцій на цій ділянці та розроблена схематична топографічна діаграма розміщення розподільчих станцій на ділянці залізниці Рава-Руська – Львів.

## БІБЛІОГРАФІЯ

1. Карташевский В.Г., Семенов С.Н., Фирстова Т.В. Сети подвижной связи. – М.: Еко-Трендз, 2001.
2. Бабков В.Ю., Вознюк М.А., Дмитриев В.И. Системы мобильного зв'язку. Санкт-Петербург, 1999.
3. Воробьев С.В., Овчинников А.М., Сергеев С.И. Перспективные стандарты зональной радиосвязи. Москва, 1999.
4. IEC 61508: 1-6. Функціональна безпека електричної/електронної/програмованої електронної системи безпеки. 1998-2000 роки. Функціональна безпека електричних /електронних/ програмируемых электронных систем безопасности.
5. CENELEC EN 50126: Залізничне застосування – Специфікація та демонстрація надійності, доступності, ремонтпридатності та безпеки (RAMS). 1998. Применения на железнодорожном транспорте – Специфікація і демонстрація надійності, доступності.
6. CENELEC EN 50126-2: Залізничне застосування – Надійність керованих транспортних систем/ Частина 2: Безпека. 1999. Применения на железнодорожном транспорте – Согласованность для управляющих транспортных систем – часть 2. Безпека.
7. CENELEC EN 50128: Залізничне застосування – Системи зв'язку, сигналізації та обробки – Програмне забезпечення для систем управління та захисту залізниці. 2000. Применения на железнодорожном транспорте – Програмне забезпечення систем управління та забезпечення безпеки на залізничному транспорті.
8. CENELEC EN 50129: Залізничне застосування – Електронні системи сигналізації, пов'язані з безпекою. 2000. Применения на железнодорожном транспорте – Електронні системи залізничного управління та захисту, пов'язані з безпекою.
9. Транскордонне співробітництво – стратегічний ресурс розвитку прикордонних територій України / За заг. ред. к.е.н. В. Борщевського. –

- Львів: Інститут міжнародних економічних досліджень – Регіональний філіял Національного інституту стратегічних досліджень м. Київ. Львів, 2008. – 180 с.
10. Железные дороги. Общий курс: Учебник для вузов. / М.М. Філіппов і др. Під ред. М.М. Уздина. – 4-е изд., перераб.и доп. – М.: Транспорт, 1991.- 225 с.
  11. Берлин А . Н. Цифрові сотові системи зв'язку. – М.: Еко-Трендз, 2007.
  12. 3GPP, широкополосний множинний доступ з кодовим розподілом каналів для універсальної системи рухомого зв'язку. Системи радіодоступу для третього покоління рухомої зв'язку.: Пер. з англ. – М.: Горячая линия – Телеком, 2004.
  13. Шахнович И. В. Современные технологии бездротового зв'язку. Издание второе, исправленное и дополнено. — М.: Техносфера, 2006.
  14. Педжман Рошан, Джонатан Ліері. Основи побудови бездротових локальних мереж стандарту 802.11: Пер. з англ. – М.: Видавничий дім «Вільямс», 2004. — 304 с.
  15. Олег Василик. Широкополосная мобильность. // Ціти і телекомунікації. – 2007. №1-2.
  16. Шахнович І.В. Стандарт широкополосного доступу IEEE 802.16-2004 для діапазону нижче 11 ГГц. // Електроніка: Наука, Техніка, Бізнес – 2005. №1.
  17. Бакланов И.Г. NGN: принципи побудови та організації. – М.: Еко-Трендз, 2008. – 399 с.
  18. I EEE Std 802.20.4™-2008 IEEE Standard for Information technology — Телекомунікації та обмін інформацією між системами — локальні та міські мережі — Спеціальні вимоги. Частина 15.4: Специфікації керування доступом до бездротового середовища (MAC) і фізичного рівня (PHY) для низькошвидкісних бездротових персональних мереж (WPANS).
  19. Екстрем Х., Фурускар А., Карлссон Дж. Технічні рішення для довгострокової еволюції 3G. // IEEE Communications Magazine. – 2006, с.38–45.

20. Вишне夫斯基 В.М. Технологія сотового зв'язку LTE – майже 4G. // Зв'язок і телекомунікації – 2009. №1
21. Вишне夫斯基 В.М., Ляхов А.І., Портной С.Л., Шахнович І.В. Широкополосные бездротові мережі передачі інформації. – М.: Техносфера, 2005.
22. Сергієнко А . Б. Цифровая обробка сигналів.– М.: Питер, 2002. – 608с.
23. Столінгс В . Беспроводные линии связи и сети: Пер. з англ. – М.: Издательский дом “Вильямс”, 2003. – 640с.
24. Семюел К. Інженерія радіочастотної системи CDMA. Дім Артех, 1998
25. Марков Г.Т., Петров Б.М., Грудинская Г.П. Електродинаміка і поширення радіоволн. – М.: Сов.радіо, 1979.
26. Хата М. Емпірична формула для втрат при розповсюдженні в наземних мобільних службах. – IEEE Trans. Автомобільна техніка, 1980 – № 3.

## ДОДАТКИ

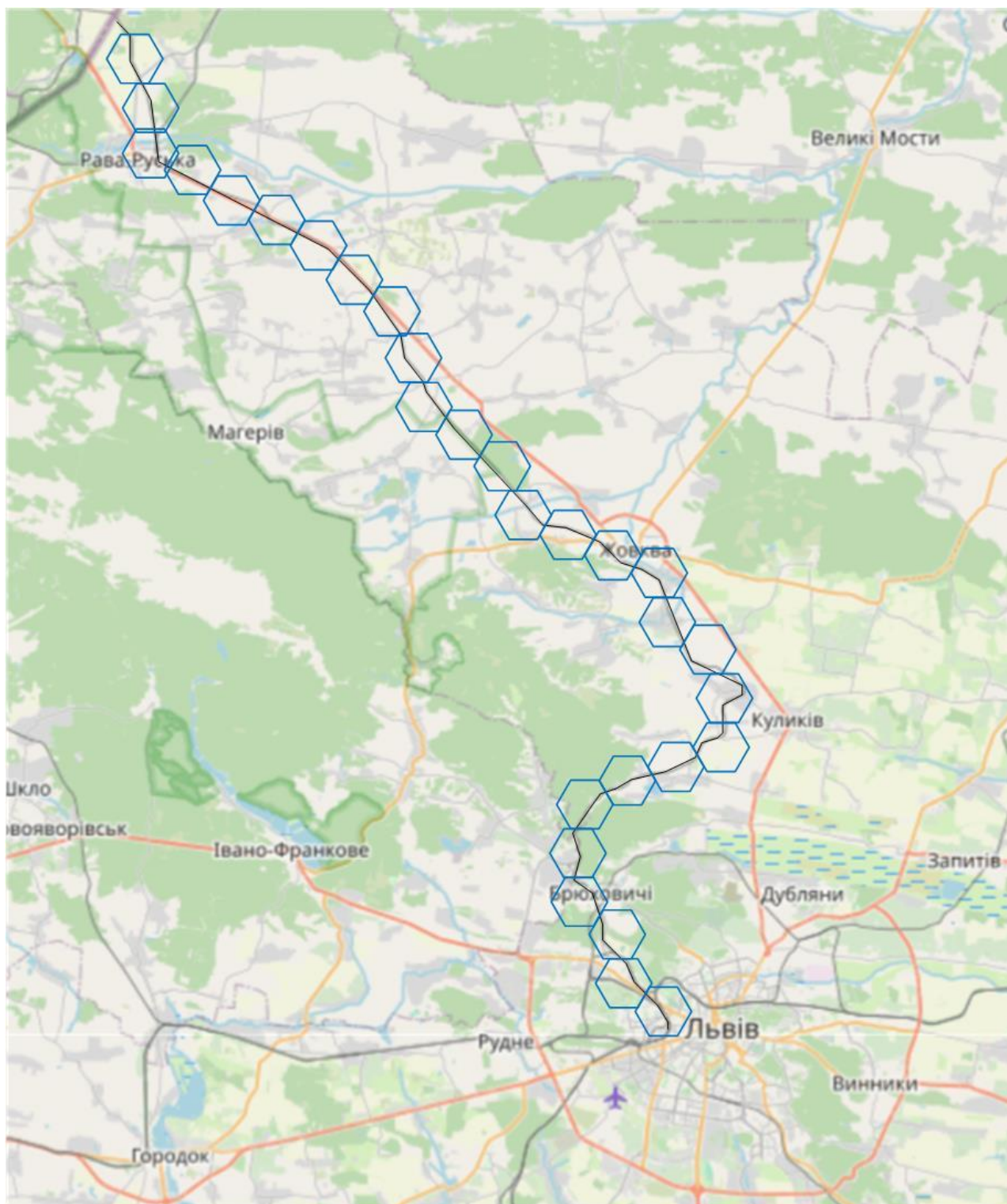
## Основні вимоги до залізничного радіозв'язку

| Назва   | Абоненти системи радіозв'язку              |                          |   |                                  |                                |  |                                |              |                        |   |
|---|--|--------------------------|---|----------------------------------|--------------------------------|--|--------------------------------|--------------|------------------------|---|
|   | Поїзний                                    |                          |   | Станційний                       |                                | Ремонтно-оперативний                       |                                |              | Паса-<br>жир-<br>ський |   |
|   | Звич-<br>ний                               | Пов'язаний з<br>безпекою |   | Маневровий                       | Інші види<br>зв'язку           | РОРС-<br>В                                 | РОРС-Л                         | РОРС-ВЛ      |                        |   |
|   |  | Опера-<br>тивний         | Телеуп-<br>равління                       |                                  |                                |  |                                |              |                        |   |
| ДНЦ<br>ДСП<br>ТЧМ<br>ТНЦ<br>ТМ<br>ЕНЦ                     | ДНЦ<br>ДСП<br>ТЧМ<br>ТНЦ<br>ТМ<br>ЕНЦ<br>Щ | АДЦУ<br>АЛС              | ДСЦ<br>ДСП<br>ДСПП<br>ДСПО<br>ДСПГ<br>ТЧМ | ТМ,<br>ВОХР<br>ДСП<br>ПТО<br>ПКО | ПЧ<br>ЕЧ<br>Щ                  | Учасник<br>и<br>технолог<br>ічних<br>робіт | Учасники<br>аварійних<br>робіт | Пасажир<br>и |                        |   |
| 1   | 2  | 3                        | 4   | 5                                | 6                              | 7  | 8                              | 9            | 10                     |   |
| <b>Функції передачі мови</b>                              |  |                          |   |                                  |                                |  |                                |              |                        |   |
| Індивідуал<br>ьний<br>виклик                              | +  | +                        | -   | +                                | +                              | +  | +                              | +            | +                      |   |
| Груповий<br>вклик   | +  | +                        | -   | +                                | +                              | +  | +                              | +            | -                      |   |
| Широмовн<br>ий виклик                                     | +  | +                        | -   | +                                | +                              | +  | +                              | +            | -                      |   |
| <b>Функції передачі даних</b>                             |  |                          |   |                                  |                                |  |                                |              |                        |   |
| 1   | 2  | 3                        | 4   | 5                                | 6                              | 7  | 8                              | 9            | 10                     |   |
| Передача<br>даних з<br>комутаціє<br>ю каналів             | +  | +                        | +   | +                                | (крім<br>маневрових<br>бригад) | +  | +                              | -            | +                      | + |
| Передача<br>пакетів<br>даних з<br>комутаціє<br>ю каналів  | +  | +                        | +   | +                                | (крім<br>маневрових<br>бригад) | +  | +                              | -            | +                      | + |
| Передача<br>пакетів<br>даних з<br>коммутаці<br>єю пакетів | +  | +                        | +   | +                                | (крім<br>маневрових<br>бригад) | +  | +                              | -            | +                      | + |

| 1  | 2              | 3             | 4              | 5     | 6       | 7     | 8    | 9    | 10   |
|--|----------------|---------------|----------------|-------|---------|-------|------|------|------|
| <b>Показники виконання основних функцій</b>          |                |               |                |       |         |       |      |      |      |
| Час встановлення з'єднання                           | Не більше 5с.  | Не більше 1с. | Не більше 0.5с | 1-2с. | 0,5-5с. | 2-5с. | 2-5с | 2-3с | 5-7с |
| Час передачі з'єднання                               | 0,3 с          |               |                |       |         |       |      |      |      |
| Ймовірність успішної передачі з'єднання              | Не менше 0,995 |               |                |       |         |       |      |      |      |
| Завадозахист зв'язку                                 | +              | +             | +              | +     | +       | +     | +    | +    | +    |
| Захист інформації                                    | +              | +             | +              | +     | +       | +     | +    | +    | +    |
| <b>Організація зв'язку</b>                           |                |               |                |       |         |       |      |      |      |
| Передача з'єднання                                   | +              | +             | +              | +     | +       | +     | +    | +    | +    |
| Інтеграція з системами визначення місця розташування | +              | +             | +              | +     | +       | +     | +    | +    | -    |
| Інтеграція з ТФОП                                    | +              | -             | -              | -     | +       | +     | -    | +    | +    |
| Інтеграція з УАТС                                    | +              | -             | -              | -     | +       | +     | -    | +    | -    |
| Прямий режим   | +              | +             | +              | +     | +       | +     | +    | +    | -    |
| Виключний пріоритет                                  | -              | +             | -              | -     | -       | -     | -    | -    | -    |
| Пріоритетний доступ                                  | -              | +             | +              | +     | -       | -     | -    | +    | -    |

| 1  | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|--|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
| Вибір зон для зв'язку                    | + | + | + | + | + | + | + | + | -  |
| Виклик, санкціонований диспетчером       | + | + | - | + | + | + | + | + | +  |
| Ідентифікація сторони виклику            | + | + | + | + | + | + | + | + | -  |
| Прослуховування розмови в каналі зв'язку | + | + | - | + | + | + | + | + | -  |
| Прослуховування звукового фону           | + | + | - | + | + | + | + | + | -  |
| Завадозахист зв'язку                     | + | + | + | + | + | + | + | + | +  |
| Захист інформації                        | + | + | + | + | + | + | + | + | +  |
| Швидкий набір номерів                    | + | + | + | + | + | + | + | + | -  |
| Ідентифікація абонента, що викликає      | + | + | + | + | + | + | + | + | -  |
| Ідентифікація абонента якого викликають  | + | + | - | + | + | + | + | + | -  |

Розміщення сотової системи GSM-R вздовж  
експериментальної ділянки залізниці



Параметри радіопокриття системи GSM-R  
уздовж експериментальної ділянки залізниці

$$F_k^{\text{gsm}} (\text{кГц}) = 200;$$

$$N_a (\text{mii ab}) = 100;$$

$$P_b = 0,02;$$

$$P_t (\%) = 10;$$

$$\alpha (\text{дБ}) = 7;$$

$$\beta (\text{Erl}) = 0,03;$$

$$n_a = 8;$$

$$K = 7;$$

$$M = 3;$$

$$L_a = 68 \text{ км};$$

$$R = 1,7 \text{ км};$$