

**ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧИХ СИСТЕМ
ТА ТЕХНОЛОГІЙ**

Кафедра транспортного зв'язку

А. О. Єлізаренко

**ПЕРСПЕКТИВНІ НАПРЯМКИ РОЗВИТКУ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО
РАДІОЗВ'ЯЗКУ**

Конспект лекцій

Харків – 2019

Єлізаренко А. О. Перспективні напрямки розвитку залізничного технологічного радіозв'язку : Конспект лекцій.

– Харків: УкрДУЗТ, 2019. – 42 с.

Основним напрямом розвитку залізничного технологічного радіозв'язку на сучасному етапі є впровадження цифрових систем рухомого радіозв'язку з освоєнням нових діапазонів радіохвиль. Містить короткий виклад лекційних матеріалів з принципів побудови та основних техніко – експлуатаційних характеристик радіозасобів цифрових стандартів DMR, GSM-R та LTE-R та напрямки використання для технологічних абонентів залізничного транспорту.

Рекомендується для студентів факультету УПП, які вивчають дисципліну «Автоматика, телемеханіка та зв'язок на залізничному транспорті», та може бути корисним при вивченні відповідних розділів дисципліни «Радіотехнічні системи залізничного транспорту».

Іл. 12, табл. 3, бібліогр.: 24 назв.

Методичні вказівки розглянуто і рекомендовано до друку на засіданні кафедри транспортного зв'язку 12 березня 2019 р., протокол № 7.

Рецензент

доц. Н. А. Корольова

А. О. Єлізаренко

ПЕРСПЕКТИВНІ НАПРЯМКИ РОЗВИТКУ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО
РАДІОЗВ'ЯЗКУ

Конспект лекцій

Відповідальний за випуск Єлізаренко А. О.

Редактор Решетилова В. В.

Підписано до друку 25.03.19 р.

Формат паперу 60x84 1/16. Папір писальний.

Умовн.-друк.арк. 2,25. Тираж 100. Замовлення №

Видавець та виготовлювач Український державний університет
залізничного транспорту,
61050, Харків-50, майдан Фейєрбаха, 7.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6100 від 21.03.2018 р.

ЗМІСТ

Вступ.....	4
1 Основні напрямки модернізації та розвитку залізничного технологічного радіозв'язку на сучасному етапі.....	5
2 Мережі технологічного радіозв'язку стандарту DMR-R.....	12
3 Мережі стільникового радіозв'язку стандарту GSM-R.....	17
4 Широкопasmові системи стандарту LTE-R.....	26
5 Нормативно – технічне забезпечення модернізації мереж технологічного радіозв'язку.....	30
Контрольні питання.....	41
Список літератури.....	41

ВСТУП

Конспект лекцій призначений для самостійної роботи при вивченні дисципліни «Автоматика, телемеханіка та зв'язок на залізничному транспорті» і охоплює матеріал змістового модуля «Системи технологічного зв'язку».

Радіозв'язок з рухомими об'єктами широко застосовується у всіх технологічних ланках роботи залізничного транспорту. Для різних категорій абонентів організовуються окремі радіомережі. Періодично проводилися роботи з модернізації радіозасобів і вдосконалення мереж радіозв'язку. Остання системна модернізація проводилася на початку 80-х років при розробці комплексної уніфікованої системи технологічного радіозв'язку «Транспорт». Необхідність широкомасштабної модернізації технологічного радіозв'язку пов'язана, перш за все, з необхідністю зняття з експлуатації всього парку радіозасобів, які не відповідають вимогам діючих державних стандартів. Додатковими обставинами є те, що радіозасоби виробили свій ресурс і не відповідають сучасному рівню розвитку телекомунікаційних технологій.

Подальший розвиток технологічного радіозв'язку буде пов'язаний з впровадженням сучасних цифрових систем і додатковим освоєнням нових діапазонів радіохвиль згідно з міжнародними рекомендаціями. Необхідно передбачити організацію дуплексних радіоканалів і можливість передачі великих обсягів даних в системах управління.

В теперішній час розглядають три найбільш перспективні цифрові радіотехнології, які принципово різняться:

- радіозасоби цифрового відкритого стандарту мобільного радіозв'язку DMR;
- системи стільникового радіозв'язку GSM-R на основі найбільш поширеного стандарту цифрового мобільного зв'язку загального користування GSM;
- широкосмугові системи радіозв'язку стандарту LTE.

Процес впровадження нових радіозасобів є багатограним і стосується усіх сфер управління рухом поїздів. У зв'язку з цим актуальним є аналіз можливостей використання радіозасобів

різних технологій в різних сферах та на ділянках різних категорій.

Матеріали конспекту лекцій враховують досвід і практику викладання дисципліни на кафедрі «Транспортний зв'язок» і забезпечують підготовку до виконання лабораторних і практичних завдань та тестового контролю знань.

1 ОСНОВНІ НАПРЯМКИ МОДЕРНІЗАЦІЇ ТА РОЗВИТКУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО РАДІОЗВ'ЯЗКУ НА СУЧАСНОМУ ЕТАПІ

Технологічний радіозв'язок з рухомими об'єктами на залізничному транспорті відіграє виключно важливу роль в забезпеченні безпеки руху поїздів та в удосконаленні оперативного управління перевезеннями [1].

Впровадження радіозв'язку розпочалося в 1947 році і тривалий період використовувались виключно канали в гектометровому діапазоні радіохвиль, в тому числі з застосуванням направляючих ліній для передачі енергії радіохвиль безпосередньо в зоні проходження поїздів для збільшення дальності.

В наступні роки проводились роботи з удосконалення технічних засобів радіозв'язку та розширення сфер їх застосування. В даний час на залізничному транспорті України використовуються радіозасоби комплексної уніфікованої системи технологічного радіозв'язку «Транспорт», яка розроблювалась на початку 80-х років.

Системи рухомого залізничного радіозв'язку класифікують за технологічними ознаками і розрізняють станційний (СРЗ), поїзний (ПРЗ) і ремонтно-оперативний радіозв'язок (РОРЗ) [2] (рисунок 1).

Кожен з різновидів радіозв'язку містить окремі мережі, які відрізняються складом абонентів, принципами побудови і особливостями застосування.



- СРЗ-МГ – мережі маневрового і гіркового радіозв'язку
- СРЗ-Т – мережі технологічних абонентів
- СРЗ-У – мережі управління на великих залізничних станціях і вузлах
- ПРЗ-Л – лінійні мережі поїзного радіозв'язку
- ПРЗ-З – зонні мережі поїзного радіозв'язку
- ПРЗ-СП – мережі службового пасажирського радіозв'язку
- РОРЗ-В – внутрішні мережі в зоні виконання робіт
- РОРЗ-Л – лінійні мережі ремонтно – оперативного радіозв'язку
- РОРЗ-Т – мережі технологічного оперативного радіозв'язку

Рисунок 1 – Класифікація мереж технологічного радіозв'язку

Усі мережі залізничного технологічного радіозв'язку відносять до категорії відповідальних. Детальний аналіз характеристик радіомереж різного призначення розглянуто в роботах [2,3].

В системах рухомого радіозв'язку на залізничному транспорті розширюється сфера передачі різної нетелефонної інформації [4,5]. В теперішній час мережі передачі даних в повному обсязі не реалізовані, відомі лише приклади організації окремих фрагментів, але продовжуються пошуки шляхів удосконалення радіомереж і розширення їх функціональних можливостей.

Однією з пріоритетних задач вдосконалення технологічних процесів на сортувальній станції є розробка систем автоматизованого керування рухом маневрових локомотивів із застосуванням цифрового радіоканалу зв'язку.

Системи маневрової автоматичної локомотивної сигналізації призначені для підвищення безпеки виконання маневрових робіт на станціях і визначення оптимальних режимів переміщення маневрових локомотивів. Вихідною інформацією є дані про стан пристроїв електричної централізації станцій та оперативна інформація про переміщення рухомих об'єктів.

Станційні пристрої МАЛС на основі аналізу усіх даних формують команди на маневрові локомотиви, які передаються по цифровому радіоканалу. Локомотивна апаратура МАЛС здійснює прийом інформації, дешифрує дані і видає команди про заданий маршрут і допустимі параметри руху, а також контролює їх виконання.

Для гарантування безпеки маневрових робіт в системі МАЛС передбачена двокомплектна дубльована система побудови з використанням апаратури контролю працездатності на всіх рівнях. Встановлені високі вимоги до радіоканалу передачі даних – ймовірність прийому інформаційних повідомлень з невиявленою помилкою повинна бути не більше 10^{-13} . Застосування цієї системи дозволяє унеможливити зіткнення вагонів і локомотивів на станціях та запобігти виникненню аварій через помилки обслуговуючого персоналу.

Головними складниками локомотивної апаратури автоматичної локомотивної сигналізації є (дивись рисунок 2) бортовий контролер, блок перемикачів, блок управління, прийомопередавач.



Рисунок 2 – Склад локомотивної апаратури маневрової автоматичної сигналізації

Бортовий контролер отримує команди від станційної апаратури через прийомопередавач. Контролер опитує стан електрообладнання локомотива через блок перемикачів та зчитує інформацію з датчиків імпульсів. Інформація для машиніста віддзеркалюється на екрані монітора блока індикації, а команди машиніст уводить у бортовий контролер за допомогою функціональної клавіатури блока управління.

Як канал передачі інформації від стаціонарних пристроїв на локомотивні в системі використовується цифровий радіоканал, що може працювати в діапазоні 160 МГц. Цифровий радіоканал системи разом з високопотужним комп'ютером забезпечує оперативність керування локомотивами й відстеження їхнього місцеперебування.

З метою оптимізації управління поїзною роботою можливо впровадження навігаційної системи стеження за дислокацією рухомого складу в режимі реального часу з візуальним відображенням даних на електронній карті, що надасть можливість створити інформаційно – аналітичну систему контролю дислокації, технічного стану та використання рухомого складу. Система передачі даних дозволяє організувати інформаційну підтримку локомотивної бригади для вирішення завдань ведення локомотива за схемою енергооптимального режиму, підвищення безпеки руху та оптимізувати дії машиніста при отриманні аварійних та попереджувальних повідомлень, підвищити оперативність дій при нештатних ситуаціях.

Розглянуто основні перспективні напрями вдосконалення мереж ремонтно-оперативного радіозв'язку виходячи з експлуатаційно-технічних вимог і сучасних можливостей організації.

Практично мережі службового технологічного радіозв'язку РОРЗ-Т можуть бути організовані на базі створення віртуальної корпоративної мережі мобільного радіозв'язку в складі систем стільникового зв'язку загального користування.

Особливо важливо при проведенні аварійно-відновлювальних і відбудовних робіт організувати зв'язок з різними категоріями абонентів з використанням каналів супутникового зв'язку. Застосування засобів рухомого супутникового зв'язку і безпроводового доступу дозволить

організувати двосторонній голосовий зв'язок персоналу усередині фронту робіт з абонентами мережі оперативно-технологічного зв'язку, а також організувати передачу відеозображень в режимі реального часу з місця подій в дорожній центр управління.

З метою попередження наїздів рухомого складу необхідна організація систем оповіщення працюючих на шляхах. Для організації мереж оповіщення використані радіозасоби цифрового стандарту DMR.

Існуючі аналогові мережі не повною мірою задовольняють сучасні вимоги, а технічні засоби не відповідають сучасному стану розвитку телекомунікаційних технологій. Перспективним напрямком в галузі розвитку радіозв'язку в цей час вважають впровадження сучасних цифрових систем радіозв'язку.

Цифровий сигнал являє собою послідовність імпульсів, які відображають параметри повідомлення. Оскільки відома форма сигналу, то для правильного прийому переданої інформації достатньо вирішити: одиниця або нуль відповідають данному часовому інтервалу. Тому можлива повна регенерація сигналів при прийомі.

Цифровий радіозв'язок забезпечує: більш високу завадостійкість, єдину форму передачі повідомлень різного виду, більш широкі можливості шифрування.

При впровадженні цифрових систем виникли певні складнощі. Основний стандартний канал тональної частоти (ТЧ) для передачі мовних сигналів в аналогових системах займає смугу частот 0,3-3,4 кГц. В той час відповідний йому основний цифровий канал (ОЦК) повинен забезпечувати для якісної передачі швидкість 64 кбіт/с, що вимагає більш широкої смуги частот. З метою економії частотного ресурсу радіолінії системи зв'язку були розроблені вокодерні методи передачі мовної інформації. У вокодерах (voice coder – кодувач голосу) вимірюються параметри мовного сигналу, за якими на приймальній стороні синтезується звуковий сигнал. Зменшення смуги частот при передачі досягається за рахунок того, що замість мовного сигналу передаються тільки значення його окремих параметрів. Завдяки цьому швидкість передачі цифрового сигналу в каналі радіозв'язку можна зменшити до 2,4-9,6 кбіт/с.

В теперішній час розглядають три найбільш перспективні цифрові радіотехнології, які принципово різняться:

- радіозасоби цифрового відкритого стандарту мобільного радіозв'язку DMR;

- системи стільникового радіозв'язку GSM-R, на основі найбільш поширеного стандарту цифрового мобільного зв'язку загального користування GSM;

- широкосмугові системи радіозв'язку стандарту LTE.

Цікаві рішення можливі на основі використання цифрових систем стандарту DMR. Робота радіостанцій можлива на частотах метрового діапазону 150 МГц, які вже виділені для залізничного транспорту. Завдяки частотному розподілу каналів в системі можливий плавний перехід від аналогового до цифрового обладнання [5].

Адміністрації залізниць в країнах Європи зробили вибір перспективної технології технологічного радіозв'язку на користь стандарту GSM-R, створеного на основі найбільш випробуваного і поширеного у світі стандарту стільникового мобільного зв'язку GSM, який розраховано на роботу в спільній смузі частот 900 МГц.

Україна приєдналась до цього рішення, яке є, безумовно, виправданим для залізничних ліній зі швидкісним рухом поїздів (орієнтовно понад 2,5 тис. км) та ліній I категорії, які призначені для концентрації основних обсягів міжнародних і внутрішніх перевезень. Такі лінії складають понад 6 тис. км з 22 тис. км загальної експлуатаційної довжини залізниць України.

Серйозну конкуренцію системам GSM-R складають цифрові транкінгові системи TETRA, які працюють в діапазоні частот 450 МГц. Перевагою системи TETRA є більш широкі додаткові функціональні можливості в частині забезпечення режиму прямого зв'язку мобільних абонентів, ретрансляції сигналів мобільними радіостанціями, меншого часу встановлення з'єднання та ін.

Отже, вибір системи GSM-R не є безальтернативним, особливо для ліній II-IV категорій. Для ліній таких категорій необхідний пошук рішень, ефективних за економічними показниками [5].

Таким чином, на теперішній час визначені лише загальні напрями застосування перспективних систем рухомого радіозв'язку для залізниць без конкретизації технологій, обладнання і його виробників. Але вже прийняті рішення щодо частотного забезпечення радіомереж в найближчій перспективі, що є обов'язковим першим етапом впровадження нових систем радіозв'язку.

Відповідно до чинного частотного плану технологічного радіозв'язку залізничного транспорту УКХ діапазону канали в смугах частот 150 МГц використовуються для організації всього комплексу мереж станційного, поїзного та ремонтно – оперативного радіозв'язку. Очевидна недостатня кількість каналів метрового діапазону для потреб технологічного радіозв'язку і складність забезпечення умов електромагнітної сумісності радіозасобів, особливо на великих залізничних станціях і вузлах. З метою підвищення ефективності використання смуг частот метрового діапазону передбачається перехід на радіозасоби з кроком сітки частот 12,5 кГц, а в перспективі 6,25 кГц. [6,7].

З метою розширення функціональних можливостей і підвищення надійності передбачається додаткове впровадження сучасних мереж рухомого радіозв'язку в діапазоні 450 або 900 МГц (дивись рисунок 3).

Цифрові системи DMR і GSM-R не повною мірою задовольняють зростаючі вимоги до обсягів і швидкостей передачі інформації в перспективних автоматизованих системах керування рухом поїздів, що пов'язано з вузькосмуговістю стандартів.

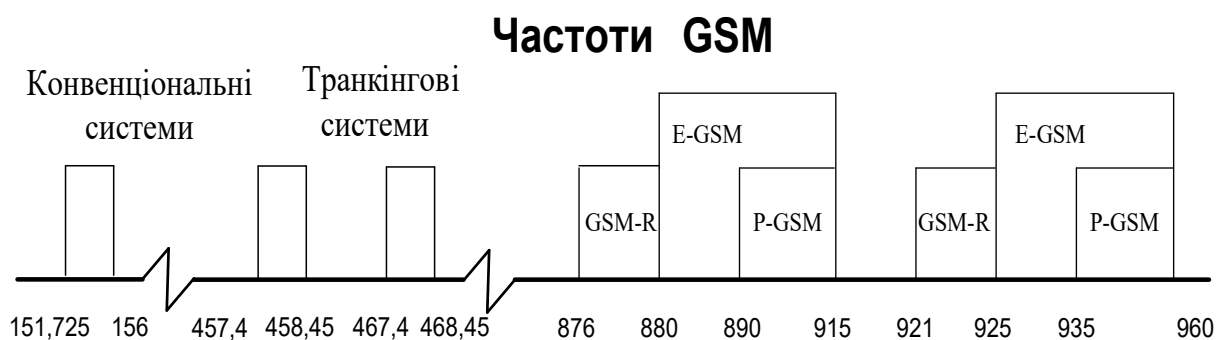


Рисунок 3 – Смуги частот рухомого радіозв'язку

Як перспективний стандарт розглядається технологія LTE (Long-Term Evolution), як основа для універсальної системи широкосмугового зв'язку.

Для систем LTE в Україні передбачається використовувати смуги частот 1800 і 2600 МГц.

В наступних розділах роботи більш детально розглянуто принципи побудови цифрових систем та особливості їх використання для організації мереж технологічного радіозв'язку на залізничному транспорті.

2 МЕРЕЖІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО РАДІОЗВ'ЯЗКУ СТАНДАРТУ DMR-R

У 2005 р. Європейським інститутом телекомунікаційних стандартів (ETSI) був розроблений стандарт DMR (Digital Mobile Radio – цифрове мобільне радіо) як єдиний відкритий загальноєвропейський стандарт цифрового мобільного радіозв'язку [8]. Він забезпечує задачі «цифровізації» систем конвенціонального радіозв'язку і дозволяє модернізувати вже існуючі аналогові мережі шляхом поступової заміни аналогового обладнання на цифрове без порушення діючих систем технологічного радіозв'язку з частковим використанням існуючої інфраструктури.

Радіозасоби стандарту DMR розраховані на роботу в стандартних смугах частот рухомого радіозв'язку, в тому числі на частотах метрового діапазону 146-174 МГц. Для мереж аналогового залізничного технологічного радіозв'язку виділені смуги частот 151,725-156,000 МГц. Саме ці смуги частот передбачається використовувати для цифрових мереж стандарту DMR, без виділення додаткових частот.

Технологія стандарту DMR побудована на частотному розподілі каналів з розносом 12,5 кГц. З метою підвищення ефективності використання частотного ресурсу передбачено організацію часового поділу каналу, що дозволяє створити два незалежних канали на одній несучій, це дає змогу збільшити кількість каналів в тій же смузі частот в порівнянні з діючими аналоговими системами радіозв'язку в діапазоні 160 МГц. На рисунку 4 подано структуру радіоінтерфейсу стандарту DMR.

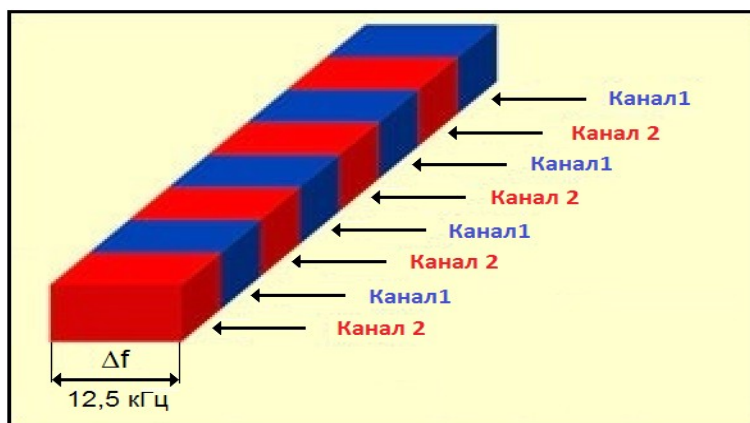


Рисунок 4 — Структура радіоінтерфейсу стандарту DMR

Цифрові мережі технологічного радіозв'язку в стандарті DMR, окрім одночастотного симплексного режиму, можуть працювати в режимі двочастотного симплексу або дуплексу. При цьому рознос частот прийому і передачі повинен бути більше 1 МГц.

В основу роботи цифрових радіостанцій покладено принцип передачі цифрових пакетів. Загальну функціональну схему радіостанції подано на рисунку 5.

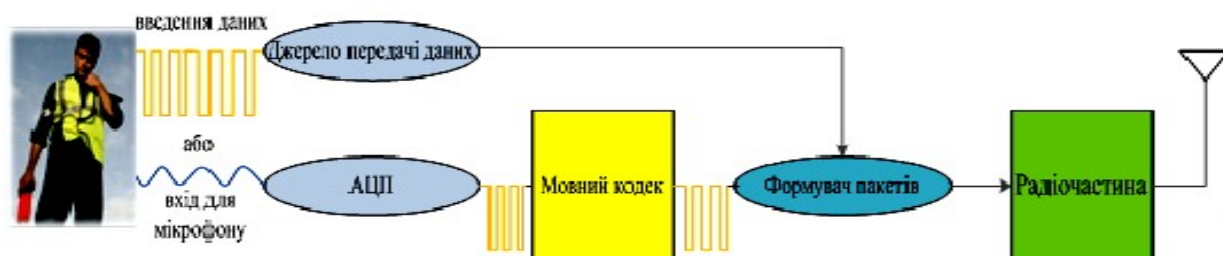


Рисунок 5 – Функціональна схема цифрової радіостанції DMR

Від абонента (джерела інформації) може надходити два види сигналів – дані або мова. При передачі цифрових сигналів дані безпосередньо надходять в блок формування пакетів.

При передачі мовних сигналів через мікрофонний вхід звук надходить в звичайний аналого-цифровий перетворювач. На його виході формується цифровий потік зі швидкістю передачі 128 кбіт/с. Цифровий потік з такою швидкістю передавати по радіоканалу з шириною 12,5 кГц неможливо. Тому для передачі мовної інформації в радіоканалі використовується кодування

сигналу. Технологія кодування AMBE+2 основана на поділі мовних сигналів на короткі сегменти тривалістю 30 мс, із яких виділяються найбільш важливі параметри мови. Далі сигнал зі швидкістю 3,6 кбіт/с подається в пристрій формування пакетів, і далі на радіопередавач.

Стандарт DMR передбачає різні методи корекції помилок в каналі з використанням завадозахищених методів кодування. В залежності від вибраного методу корекції помилок в каналі швидкість передачі даних можлива від 1,6 до 6,4 кбіт/с.

Впровадження радіозасобів стандарту DMR на мережах технологічного радіозв'язку залізниць забезпечує:

- використання існуючої сітки частот, що дозволяє спростити завдання перехідного періоду і забезпечити перехід на рознос частот сусідніх каналів 12,5 кГц;

- ідентичність параметрів радіостанцій за основними характеристиками радіоінтерфейсу дозволяє зберегти умови дальності зв'язку та ЕМС;

- збереження сформованих алгоритмів роботи мереж і прийнятої сигналізації;

- можливість одночасної передачі голосу і даних за рахунок використання часового поділу каналів.

Перехід на сітку частот з розносом каналів 12,5 кГц дозволяє збільшити кількість робочих каналів в тій же смузі частот в порівнянні з діючими аналоговими системами радіозв'язку. Це дозволить в подальшому більш широко використовувати радіоканали метрового діапазону у відведених для залізничного транспорту смугах частот 151,725-154,000 МГц і 155,000-156,000 МГц для організації мереж станційного радіозв'язку, зонних мереж поїзного радіозв'язку, окремих мереж ремонтно-оперативного зв'язку та мереж передачі даних для систем управління.

Основні характеристики радіозасобів стандарту цифрового мобільного радіозв'язку наведено в таблиці 1.

Використання радіозасобів стандарту DMR при побудові мереж СРЗ або РОРЗ не має суттєвих особливостей. На станціях організується система СРС-Ц аналогічно діючій системі СРС УКХ діапазону.

Таблиця 1 – Основні характеристики радіозасобів стандарту DMR

Найменування	Базові станції	Абонентські станції
Параметри радіоінтерфейсу:		
рознос частот між сусідніми каналами, кГц	12,5	
тип модуляції несучої	4FSK (чотирирівнева частотна маніпуляція)	
передача інформації в радіоканалі	Цифрова	
метод ущільнення каналів на одній несучій	TDMA (багатостанційний доступ з часовим поділом каналів)	
число часових каналів на одній несучій (число слотів в кадрі)	2	
швидкість цифрового потоку в радіоканалі, кбіт / с	9,6	
спосіб поділу каналів	частотно-часовий	
Потужність несучої передавача (на еквіваленті антени), Вт	40	10 (що возять)
		2 (що носять)
приймач:		
чутливість, дБ мкВ, відповідна BER, при нормальних умовах (НУ) не гірше значення електрорушійної сили (ЕРС)	3	
вибірковість по сусідніх каналах, дБ, що відповідає BER при НУ не менш	60	
вибірковість по побічних каналах прийому, дБ, при НУ, відповідна BER, не менше (для будь-якої частоти, яка відступає від номінальної частоти приймача, більш ніж на величину двох розносів частот між сусідніми каналами)	70	
інтермодуляційна вибірковість,	70	70

дБ, відповідно ВЕР при НУ, не менше (для сигналів завади на частотах $f+50$ кГц і $f+100$ кГц або $f-50$ кГц і $f-100$ кГц)

Схему організації лінійної мережі поїзного радіозв'язку на ділянці залізниці з використанням радіозасобів стандарту DMR подано на рисунку 6.

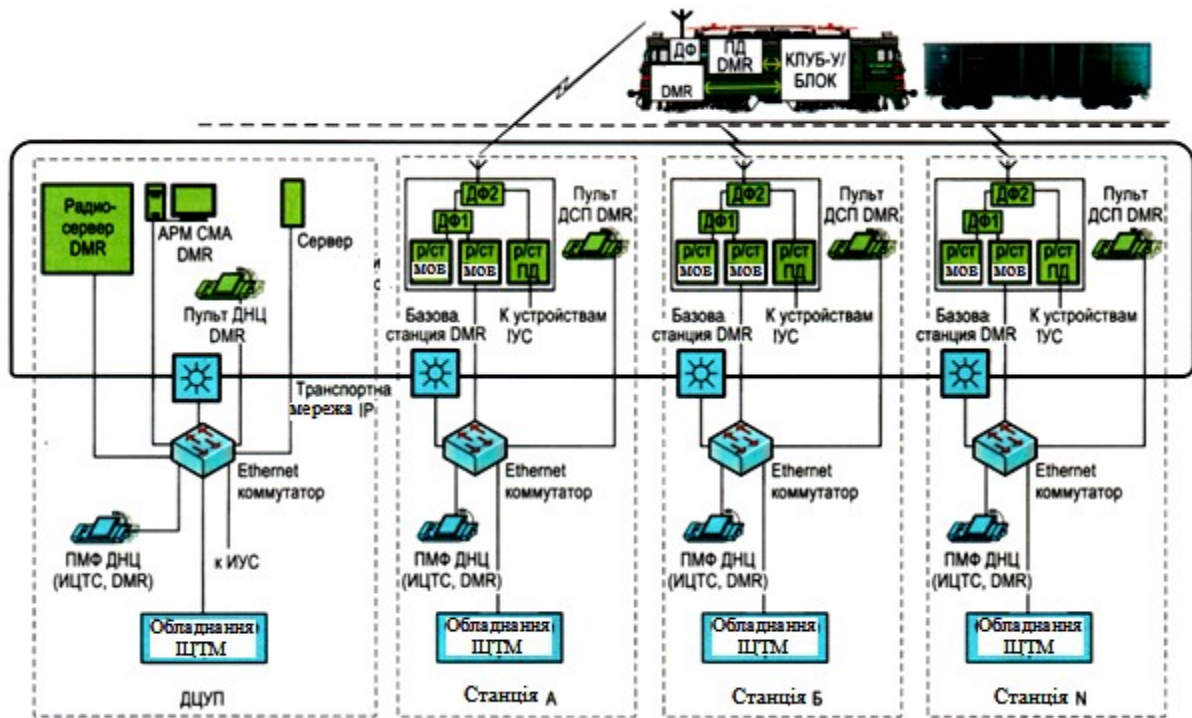


Рисунок 6 – Схема організації комплексу мереж поїзного радіозв'язку

Для організації системи поїзного радіозв'язку на проміжних станціях ділянки встановлені стаціонарні радіостанції, які працюють з дуплексним розносом частот. Для здійснення одночасної роботи на прийом і передачу підключення ретрансляторів до антен відбувається через дуплексні фільтри.

В диспетчерському центрі управління маршрутизацію викликів здійснює сервер управління, який виконує роль контролера для всіх цифрових стаціонарних радіостанцій в системі. Для передачі IP-пакетів даних управління організується лінійний канал на основі виділених ресурсів каналу Е1 зі швидкістю передачі 2048 кбіт/с в наявній мережі синхронної цифрової ієрархії в потоці STM-1.

Передавачі базових станцій працюють на частотах, які передуються. При перемещенні локомотивів між зонами базових станцій здійснюється автоматичне перемикавання радіостанцій, що возять, на частотні канали базових станцій уздовж ділянки прямування. Критерієм перереєстрації є якість сигналу. Кожна базова станція періодично транслює для абонентської радіостанції коротку послідовність ідентифікаційних даних. Кожна абонентська радіостанція використовує трансльовані дані для визначення рівня сигналу і прийняття рішення про преключення на дану базову станцію. Абонентська радіостанція автоматично вибирає найближчий відповідний за якістю сигнал від базової станції і реєструється в новій зоні. При встановленні зв'язку між абонентами в системі використовуються індивідуальний, груповий, аварійний і загальний виклики.

Використовуючи можливості цифрового стандарту DMR і IP-протоколу, реалізованого в цифрових радіостанціях, можна реалізувати значну кількість додаткових функцій: створення систем моніторингу, контролю місцезнаходження рухомих об'єктів, передача текстових повідомлень аварійного виклику, передача цифрових даних, запис переговорів та ін. [5].

Впровадження сучасних цифрових радіотехнологій дозволить забезпечити розвиток інформаційно-керуючих систем та підвищити ефективність управління перевізним процесом.

Найбільш доцільний варіант впровадження цифрових систем технологічного радіозв'язку на сучасному етапі – це використання радіозасобів стандарту DMR. Завдяки використанню чинного частотного ресурсу та існуючої інфраструктури радіозасоби систем DMR можуть використовуватись в аналогових і цифрових мережах і не мають обмежень при впровадженні на мережах технологічного радіозв'язку і передачі даних для всіх категорій дільниць, окрім високошвидкісних.

3 МЕРЕЖІ СТІЛЬНИКОВОГО РАДІОЗВ'ЯЗКУ СТАНДАРТУ GSM-R

Стільникові системи рухомого радіозв'язку належать до категорії систем з малими зонами обслуговування з багаторазовим повторним використанням робочих частот. Система будується у вигляді сукупності окремих чарунок (ячеек), які покривають визначену територію. Зазвичай чарунки на схемах частотно-територіального планування зображують у вигляді правильних шестикутників, які нагадують бджолині стільники (соти). Це дало відповідну назву мережі.

В кожній чарунці знаходиться базова станція, яка обслуговує всі рухомі станції в межах чарунки. Усі базові станції з'єднані з центром комутації і управління мережею по провідних або радіорелейних каналах зв'язку. Зв'язок між абонентами одного стільника здійснюється за рахунок ретрансляції (переприйому) сигналів базовою станцією цієї зони. Радіозв'язок між абонентами різних стільників здійснюється з використанням з'єднувальних ліній між базовими станціями цих стільників через центр комутації та управління. При переміщенні абонента із одного стільника в інший здійснюється передача його обслуговування від однієї базової станції до іншої без перерви зв'язку. Така процедура, що забезпечує безперервність зв'язку під час переміщення, називається передаванням управління за викликом або естафетним передаванням (handover). Надання послуг зв'язку з використанням ресурсів іншої мережі називають роумінгом (roaming).

За рахунок обмеження потужності передавачів базових станцій і розмірів окремих робочих зон забезпечується можливість повторного використання частот. Це дозволяє ефективно використовувати радіочастотний ресурс для організації радіозв'язку на значних територіях при обмеженій кількості робочих частот.

Використання стільникових систем для організації мереж рухомого радіозв'язку загального користування розпочалося з 1983 р. Системи стільникового рухомого радіозв'язку пройшли певні етапи розвитку. До першого покоління (1-st Generation, 1G) відносять системи стільникового рухомого зв'язку, які базуються на застосуванні аналогових сигналів. Друге покоління (2G) систем стільникового зв'язку застосовує цифрові методи формування, приймання та оброблення сигналів. Найпоширенішим

стандартом для систем загального користування став цифровий стандарт GSM-900 (Global System for Mobile communication) – глобальна система мобільного зв'язку.

Перспективні системи рухомого залізничного технологічного радіозв'язку доцільно будувати на основі стільникових технологій. Ці системи повинні відповідати таким вимогам:

- бути загальноєвропейським міжнародним цифровим стандартом, що передбачає мінімальну ступінь модифікації для застосування на залізницях ;
- забезпечувати надійність в роботі, яка перевірена в мережах рухомого зв'язку загального користування;
- забезпечувати інтеграцію всіх служб і послуг зв'язку залізничного призначення в одній мережі;
- забезпечувати високу надійність і безперервність зв'язку, високу якість передачі при швидкості руху поїзда до 350 км / год;
- підтримувати спеціалізовані послуги зв'язку для залізниць існуючи на сьогоднішній день;
- передбачати можливість плавного введення нових служб і послуг, організованих в майбутньому;
- бути економічно ефективним при впровадженні і експлуатації.

Залізничні адміністрації країн Європи 1997 р. зробили вибір перспективної технології технологічного радіозв'язку на користь стандарту GSM-R (GSM for Railway), створеного на основі найбільш випробуваного і поширеного у світі стандарту стільникового мобільного зв'язку GSM. Україна теж приєдналась до рішення про впровадження систем GSM-R на залізничному транспорті. Питання організації і проектування таких радіомереж потребують розгляду. Стандарт GSM-R створений для залізниць в рамках програм EIRENE (European Integrated Railway Radio Enhanced Network) і MORANE (Mobile Radio for Railways Networks in Europe).

Зараз в більшості країн Європи системи GSM-R знаходяться в стадії впровадження, що дозволить суттєво розширити функціональні можливості радіомереж, підвищити надійність та якість зв'язку [9].

З точки зору реалізації апаратної частини, система GSM-R потребує мінімального доопрацювання і розрахована на роботу в спільній смузі частот 900 МГц, що забезпечить експлуатаційну сумісність транс'європейської мережі залізничного радіозв'язку. Програмними засобами реалізуються специфічні вимоги залізниць щодо функціональної адресації абонентів, групового виклику, запровадження системи пріоритетів, термінового виклику та ін.

На рисунку 7 подано структурну схему мережі стільникового зв'язку GSM-R. Мережу GSM-R складають:

- підсистема базових станцій;
- підсистема мобільних абонентських радіостанцій;
- мережева та комутаційна підсистема.

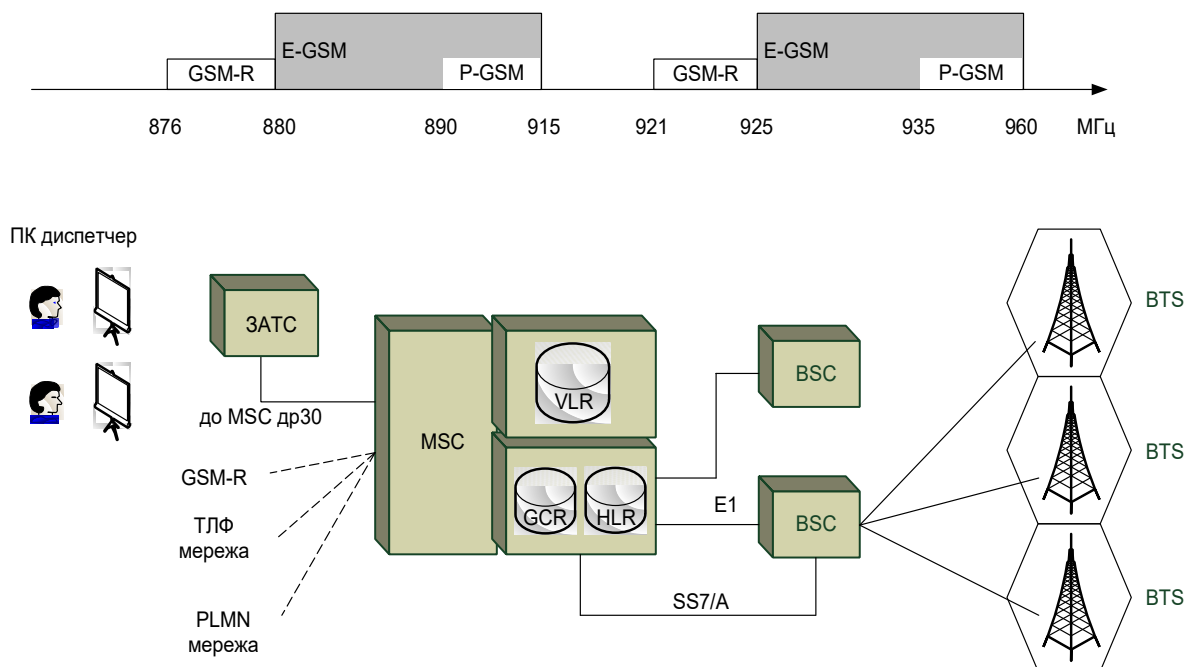


Рисунок 7 – Структурна схема мережі стільникового зв'язку GSM-R

Обладнання підсистеми базових станцій BSS (Base Station Sub-system) включає один контролер базових станцій BSC (Base Station Controller) і декілька базових приймально-передавальних станцій BTS (Base Transceiver Station). До складу базових станцій входять радіопередавальні, радіоприймальні пристрої і дві рознесені антени. Наявність в базовій станції декількох прийомо-передавачів дозволяє вести одночасну передачу інформації по створених на різних частотах каналах. Контролер базових станцій

здійснює керування і контроль працездатності усіх блоків базових станцій. Контролери базових станцій з'єднуються з центром комутації мобільного зв'язку за допомогою первинного цифрового потоку зі швидкістю 2048 кбіт/с (дивись рисунок 7).

Доступ рухомих абонентів до ресурсів мережі GSM-R здійснюється через підсистему мобільних станцій MS (Mobile Station). Мобільна станція містить приймально-передавальний блок з малогабаритною антеною та модуль ідентифікації абонента-SIM картку (Subscriber Identity Module). За допомогою записаної в SIM інформації в результаті взаємного обміну даними між мобільною станцією і мережею здійснюється повний цикл аутентифікації і дозволяється доступ абонента до мережі.

Передбачено виробництво абонентських станцій у вигляді мікротелефонної трубки та мобільних радіостанцій, які встановлюються на рухомі об'єкти. При передачі повідомлень здійснюється автоматичне регулювання потужності передавача для забезпечення необхідної якості зв'язку. З огляду апаратної частини відмінності від GSM-900 є мінімальні. Вони полягають у застосуванні відповідного термінального устаткування мобільних станцій, розроблених з урахуванням потреб залізничників. Ці пристрої розміщені в протиударному корпусі, оснащені кнопкою екстреного виклику й підтримують всі частотні діапазони GSM.

Центр комутації мобільного зв'язку MSC (Mobile Switching Center) забезпечує маршрутизацію викликів і функції управління викликами. Крім того, центр комутації MSC забезпечує постійне стеження за рухомими об'єктами, використовуючи реєстри місцезнаходження HLR (Home Location Register) і переміщення VLR (Visited Location Register). У реєстрі HLR зберігається та частина інформації про місцезнаходження будь-якої мобільної станції, яка дозволяє центру комутації доставити виклик, тобто реєстр місцезнаходження фактично являє собою довідкову базу абонентів, які зареєстровані в даній мережі. Реєстр HLR містить міжнародний ідентифікаційний номер рухомого абонента IMSI. Він використовується для впізнання рухомої станції в центрі аутентифікації AUC. Практично HLR має довідкову базу даних про постійно прописаних в мережі абонентів. У ній містяться розпізнавальні номери та адреси, а також параметри аутентичності абонентів, склад послуг зв'язку, спеціальна інформація про

маршрутизацію. Основний пристрій, що забезпечує контроль за пересуванням рухомої станції із зони в зону, – реєстр переміщення VLR. З його допомогою досягається функціонування мобільної станції за межами зони, контрольованої HLR. Коли в процесі переміщення рухома станція переходить із зони дії одного контролера базової станції BSC, що об'єднує групу базових станцій, в зону дії іншого BSC, вона реєструється новим BSC, і в VLR заноситься інформація про номер області зв'язку, яка забезпечить доставку викликів мобільної станції. Для збереження даних, що знаходяться в HLR і VLR, в разі збоїв передбачений захист пристроїв пам'яті цих реєстрів. VLR містить такі ж дані, як і HLR, проте ці дані містяться в VLR тільки до тих пір, поки абонент знаходиться в зоні, контрольованій VLR.

У мережі рухомого зв'язку GSM стільники групуються в географічні зони LA, яким присвоюється свій ідентифікаційний номер LAC. Кожен VLR містить дані про абонентів в декількох LA. Коли рухомий абонент переміщається з однієї LA в іншу, дані про його місцезнаходження автоматично оновлюються в VLR. Якщо стара і нова LA перебувають під управлінням різних VLR, то дані на старому VLR стираються після їх копіювання в новий VLR. Поточна адреса VLR абонента, що міститься в HLR, також оновлюється. VLR також розподіляє номери передачі управління при передачі з'єднань від одного MSC до іншого.

Для виключення несанкціонованого використання ресурсів системи зв'язку вводяться механізми аутентифікації – посвідчення дійсності абонента. AUC приймає рішення про параметри процесу аутентифікації і визначає ключі шифрування абонентських станцій на основі бази даних, зосередженої в реєстрі ідентифікації устаткування EIR.

В мережну структуру GSM-R входить диспетчерська підсистема, що складається з відомчої АТС для підключення диспетчерських пультів управління і диспетчерського сервера. Встановлення з'єднань між диспетчером та машиністом локомотива здійснюється набором на пульті диспетчера (при вихідному від нього з'єднанні) чи на пульті машиніста (при вхідному з'єднанні до диспетчера) відповідного відомого номера радіостанції локомотива чи відомого номера диспетчера. Пульт управління диспетчера побудований на базі персонального

комп'ютера РС з сенсорним монітором (виконаним за технологією Touch-Screen) з використанням для кожного виду зв'язку окремої екранної форми (сторінки). Екранні форми відповідних видів зв'язку зображені у вигляді кнопочових інформаційно-керуючих панелей з зазначенням типів абонентів (об'єктів). На кожній сторінці передбачене вікно з постійною для відповідного робочого місця інформацією про всі види зв'язку, що організовуються за допомогою пульта. Зокрема, для пульта диспетчера повинна бути сформована екранна форма організації поїзного радіозв'язку та зв'язку з бригадами пасажирських поїздів. На кожній сторінці повинно бути передбачене вікно зі всіма необхідними для даного виду зв'язку функціональними клавішами (посилка викличного сигналу, постановка абонента на виклик, відбій та ін.).

В MSC мережі GSM-R передбачені спеціалізовані сервіси: групові і циркулярні виклики, система пріоритетів, функціональна адресація та адресація в залежності від місцезнаходження, які необхідні в мережах залізничного технологічного радіозв'язку. Ці функції реалізуються новим функціональним елементом – реєстром групових викликів (GCR), у якому міститься інформація про пріоритетність абонентів, а також різні параметри групових викликів. Регістр GCR відповідає за обслуговування групових викликів.

За допомогою групових і циркулярних викликів реалізується можливість встановлювати зв'язок одночасно з декількома абонентами в певній зоні, наприклад, з усіма машиністами локомотивів у зоні керування даного диспетчера, і передавати інформацію кожному з них.

Система пріоритетів дозволяє в необхідних умовах навіть при зайнятих мережевих ресурсах здійснити з'єднання, яке має більш високий пріоритет. Різним видам викликів присвоюють різні класи пріоритетів відповідно до рекомендацій Міжнародного союзу залізниць. Виклики з більш високим пріоритетом виконуються першочергово, а при відсутності вільних каналів вимикають виклики з більш низьким пріоритетом. Послуга дозволяє організацію різних рівнів пріоритетності самих абонентів. Кожному абоненту в мережі GSM-R призначається визначена група пріоритетності.

В мережах GSM-R нормується оперативність встановлення з'єднань. В 95 % випадків час встановлення з'єднань не повинен перевищувати норм, наведених в таблиці 2.

Таблиця 2 – Визначенний стандартом час встановлення викликів

Тип виклику	Час встановлення виклику
Аварійний залізничний виклик	<2с
Групові виклики між машиністами однієї зони	<5с
Всі оперативні виклики з мобільного телефону на стаціонарний, які не відносяться до вищевказаних	<5с
Всі оперативні виклики зі стаціонарного телефону на мобільний, що не відносяться до вищевказаних	<7с
Всі оперативні виклики з мобільного телефону на мобільний, що не відносяться до вищевказаних	<10с
Всі виклики з низьким пріоритетом	<10с

До числа інших важливих властивостей мереж GSM-R відносяться послуги функціональної адресації FA і адресація в залежності від місця знаходження абонента LDA, що викликає.

За допомогою функціональної адресації машиніст або абоненти в поїзді, відповідальні за певні функції, можуть бути викликані за рахунок введення змінного номера поїзда й функціонального номера FN, а не фізичного абонентського номера. Окрім звичайного абонентського номера, кожному абоненту мережі GSM-R надається один або декілька функціональних номерів – FN. Завдяки функції LDA машиністу не потрібно дізнаватися, в якій зоні обслуговування диспетчера він знаходиться в даний час, і який номер йому потрібно набирати, щоб встановити зв'язок з потрібним диспетчером. Незалежно від місця чи зони знаходження машиніст може набирати один і той самий уніфікований скорочений номер, одразу автоматично з'єднуючись з потрібним диспетчером, відповідальним за дану ділянку шляху слідування поїзда [9].

Відомі пропозиції і певний досвід використання інфраструктури існуючих систем стільникового радіозв'язку стандарту GSM загального користування для створення відомчих віртуальних мереж технологічного радіозв'язку. Це технічно можливо при розташуванні базових станцій в зоні проходження залізничних ліній і технологічно допустимо для організації мереж залізничного технологічного радіозв'язку не пов'язаних безпосередньо з управлінням рухом поїздів, а таких, що використовуються для переговорів при експлуатації і технічному обслуговуванні інфраструктури залізниць, наприклад в мережі РОРЗ-Т.

Впровадження на залізничному транспорті цифрових стільникових мереж стандарту GSM-R суттєво поліпшує техніко-економічний ефект від застосування технологічного радіозв'язку. Організація різних мереж на єдиній апаратній основі дозволяє суттєво спростити експлуатацію. Підвищення якості зв'язку, надійності обладнання та розширення функціональних можливостей радіомереж дозволяє поліпшити управління перевізним процесом.

Систему GSM-R на другому етапі впровадження передбачається використовувати для створення загальноєвропейської системи автоматичного контролю руху поїздів (ETCS), що дозволяє відмовитися від візуальної сигналізації поїзної ситуації, коли необхідна інформація про стан колій, і рекомендована швидкість буде передаватися через канали GSM-R із центра автоматизованого управління рухом поїздів (RBC) на комп'ютер машиніста.

В умовах суміщеного руху поїздів різних категорій зберігаються існуючі аналогові системи відповідно до вимог ПТЕ і додатково впроваджується цифрова система, наприклад GSM-R, методом накладеної мережі [4]. На рисунку 8 наведена схема організації комплексу мереж поїзного радіозв'язку на ділянці залізниці зі швидкісним рухом пасажирських поїздів. Мережі працюють в трьох діапазонах радіохвиль: допоміжна лінійна аналогова мережа гектометрового діапазону, зонні мережі метрового діапазону на частоті 160 МГц і цифрова мережа GSM-R. Робота радіомереж в двох частотних діапазонах УКХ дозволяє забезпечити резервування каналів і підвищити

надійність зв'язку, особливо при використанні радіоканалів в системах інтервального регулювання руху поїздів. При використанні одиночного каналу радіозв'язку важко забезпечити коефіцієнт готовності більше 0,9 [9].

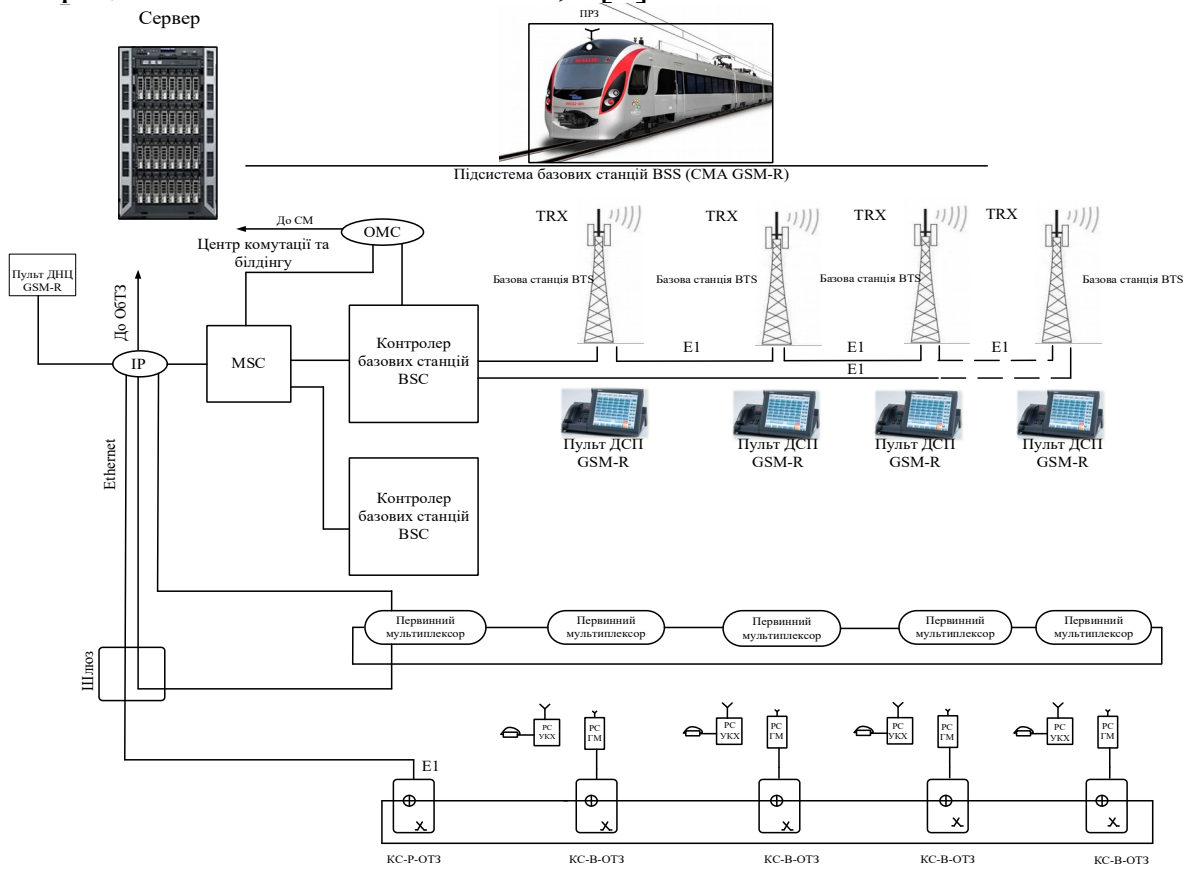


Рисунок 8 – Схема організації комплексу мереж поїзного радіозв'язку

Системи GSM-R доцільно використовувати для залізничних ліній зі швидкісним рухом поїздів та ліній I категорії, які призначені для концентрації основних обсягів міжнародних і внутрішніх перевезень.

4 ШИРОКОСМУГОВІ СИСТЕМИ СТАНДАРТУ LTE-R

В перспективних системах технологічного радіозв'язку передбачається:

- розширення функціональних можливостей радіомереж, насамперед для передачі даних та задач управління рухомими об'єктами та поїздами;

- освоєння нових діапазонів радіохвиль УКХ діапазонів для збільшення робочих частот при впровадженні стільникових систем;

- підвищення ефективності використання виділених смуг частот за рахунок зменшення кроку сітки робочих частот та розробка нового частотного плану.

Розглянуті системи цифрового радіозв'язку DMR-R та GSM-R мають недоліки, пов'язані з «вузькосмуговістю» стандартів. Цифрові системи DMR і GSM-R не повною мірою задовольняють зростаючі вимоги до обсягів і швидкостей передачі інформації в перспективних автоматизованих системах керування рухом поїздів. Як перспективний напрямок розглядається технологія LTE (Long-Term Evolution – еволюція у довгостроковій перспективі) як основа для універсальної системи широкопasmового зв'язку.

Стандарт LTE розроблено в рамках проекту співпраці у створенні мереж третього покоління 3GPP (3G Partnership Project) в 2008 р. Стандарт LTE – це результат розвитку технологій (систем) мобільного зв'язку загального користування. Це основна радіотехнологія 4 покоління (4G-generations) для систем мобільного радіозв'язку та безпроводового доступу. Головна відмінність стандарту LTE від інших технологій мобільного зв'язку полягає в повній побудові мережі на базі IP-технологій.

Виробниками обладнання на сьогоднішній день є такі провідні компанії, як Nokia Siemens Networks, Huawei, Alcatel-Lucent і ін.

Стандартом LTE передбачається реалізація системи в діапазонах від 400 МГц до 6 ГГц. Ширина радіоканалу може бути різною: від 1,4 до 20 МГц. В залежності від ширини смуги частот, що використовується, швидкість передачі даних від базової станції до рухомого абонента може складати 7,8 Мбіт/с при ширині смуги 1,4 МГц та може досягати 100 Мбіт/с при максимальній ширині смуги частот та невеликій дальності радіозв'язку з затримкою передачі даних до 5 – 10 мс. В системах LTE використовують новітні технічні рішення. При передачі від базової станції для забезпечення множинного доступу в системі використовується технологія OFDM (Orthogonal frequency-division multiplexing – мультиплексування з ортогональним

частотним розподілом каналів). Технологія OFDM передбачає передачу широкосмугового сигналу за допомогою незалежної модуляції вузькосмугових піднесучих, розташованих з певним кроком по частоті. У висхідному каналі використовують технологію SC-FDMA (Single-carrier frequency-division multiple access). В мережі стандарту використовується технологія багатоантенних систем (MIMO) [8].

Основні характеристики радіоінтерфейсу LTE подано в таблиці 3.

Таблиця 3 – Основні характеристики радіо інтерфейсу LTE

Основні характеристики	Параметри
Робочий діапазон частот	450, 700, 800, 1800, 2100, 2500, 2600 МГц
Швидкість передавання	- прямий канал MIMO 2TX*2RX: 100 Мбіт/с; - зворотній канал MIMO 2TX*2RX: 50 Мбіт/с
Ширина смуги радіоканалу	1,4 – 20 МГц
Ємність чарунки (кількість абонентів, що можуть бути обслужені)	-200 користувачів, при ширині смуги 5 МГц; 400 користувачів, при ширині смуги більше 5 МГц
Мобільність абонентів (максимальна швидкість переміщення)	до 250 км/год
Значення затримки	5 мс
Параметри MIMO	- прямий канал MIMO 2TX*2RX, 4TX*4RX прямий канал MIMO 2TX*2RX, 4TX*4RX
Технологія множинного доступу	-прямий канал – OFDMA; -зворотній канал – SC-FDMA
Види модуляції, що підтримуються в радіозасобах	Багаторівнева модуляція 64 QAM, QPSK, 16 QAM
Спектральна ефективність	5 біт/с/Гц

Дзвінок або сеанс передачі даних, що ініційований у зоні покриття LTE, технічно може бути переданий без розриву в мережу 3G (W-CDMA, CDMA2000) або в GSM / GPRS / EDGE. Для передачі мови в мережах LTE розроблено стандарт VoLTE (Voice over LTE).

Детальний аналіз особливостей технології LTE виходить за межі дисципліни, що вивчається, і не розглядається в роботі.

В більшості міст України вже впроваджені мережі широкосмугового безпроводового доступу 4G-LTE. При роботі в смузі частот 1800 МГц не потрібно установа додаткових базових станцій, а лише їх модернізація, що суттєво спрощує розгортання мереж 4G.

Міжнародний союз залізниць UIC (Union Internationale des Chemins de fer), Європейська залізнична організація (European Railway Agency), Європейський інститут зі стандартизації в галузі телекомунікацій ETSI (European Telecommunications Standards Institute) і провідні виробники радіотехнологій беруть участь в розробці глобального стандарту LTE-R для залізниць і розробці відповідних специфікацій.

Вимоги до мережі технологічного радіозв'язку на базі стандарту LTE значно відрізняються від пропонованих до систем загального користування. Система повинна задовольняти жорсткі критерії якості зв'язку, забезпечувати задані часові інтервали затримок і встановлення викликів, підтримувати можливості півдуплексного зв'язку РТТ (Push to talk).

В даний час в світі вже реалізовано кілька дослідних проектів з технологічних систем LTE-R для залізниць. Перший з них був розгорнутий 2013 р. в Китаї в частотному діапазоні 1800 МГц з шириною смуги 20 МГц на залізничній ділянці протяжністю 40 км, призначений для превезення вугілля. На цій ділянці технологічним абонентам стали доступні голосовий зв'язок по IP технології в режимі РТТ, відеоспостереження, інтелектуальне управління локомотивами, визначення місця розташування об'єктів.

Вимоги до систем LTE-R, що використовуються для побудови інтегрованої системи керування рухом поїздів планують розробити до 2020 р. Варіант схеми організації систем

технологічного радіозв'язку з використанням радіозасобів стандарту LTE-R подано на рисунку 9.

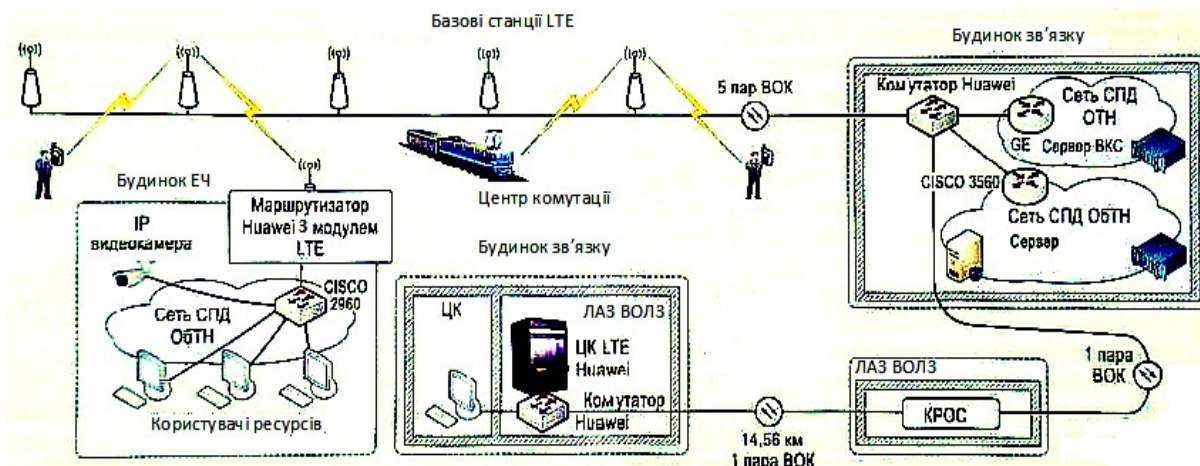


Рисунок 9 – Організація зв'язку з використанням цифрової системи стандарту LTE-R

Побудова на основі LTE-R інформаційно-керуючих систем дозволить підвищити швидкість обміну даними, знизити до мінімальних значень затримки при обміні інформацією з рухомими об'єктами, розширити склад систем управління рухом поїздів та підвищити безпеку руху.

Радіозасоби LTE-R орієнтовані на застосування на ділянках високошвидкісного руху пасажирських поїздів з використанням автоматизованих систем керування, які вимагають великих обсягів та швидкостей передачі інформації.

5 НОРМАТИВНО-ТЕХНІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МОДЕРНІЗАЦІЇ МЕРЕЖ ТЕХНОЛОГІЧНОГО РАДІОЗВ'ЯЗКУ

В роботі визначені основні напрямки розвитку технологічного радіозв'язку – перехід на цифрові технології і освоєння нових діапазонів радіочастот. Окрім вже виділених смуг частот 150 МГц метрового діапазону додатково будуть використовуватись радіоканали дециметрового діапазону у смугах частот 450 та 900 МГц. На теперішній час визначені лише

загальні напрями застосування перспективних систем стільникового радіозв'язку GSM-R, цифрових транкінгових систем TETRA, конвенціональних систем цифрового мобільного радіозв'язку DMR без конкретизації обладнання і його виробників.

Процес впровадження нових радіозасобів стосується технології роботи значної кількості експлуатаційного штату залізниць, в тому числі безпосередньо пов'язаного з організацією і управлінням рухом поїздів. В зв'язку з цим необхідна розробка концепції організації цифрових мереж технологічного радіозв'язку, яка включає пропозиції щодо способів побудови таких систем в залежності від поставлених задач та їх впровадження. Вирішення наведеного комплексу питань вимагає проведення науково-дослідних робіт і розробки програми модернізації мереж радіозв'язку на залізничних лініях різних категорій та відповідних нормативно-технічних документів галузі.

Важливим завданням є розробка нового частотного плану мереж технологічного радіозв'язку в смугах частот метрового діапазону 160 МГц. В плані необхідно визначити загальні принципи розподілу частотного ресурсу між різними службами, підрозділами і видами радіозв'язку. При плануванні цифрових мереж радіозв'язку і передачі даних крок сітки частот повинен складати 12,5 кГц, а в перспективі – 6,25 кГц. В цифрових мережах необхідно забезпечити роботу в режимі двочастотного симплексу або дуплексу.

У перспективі при впровадженні принципово нових систем технологічного радіозв'язку на основі систем стільникового радіозв'язку стандарту GSM та широкосмугових систем радіозв'язку стандарту LTE виникають завдання розробки методів розрахунку каналів в нових діапазонах частот і розробки рекомендацій з організації та проектування радіомереж.

Актуальним завданням є розробка уніфікованої методики, яка б передбачала розрахунок каналів в усіх діапазонах частот та забезпечувала більш високу точність прогнозування зон обслуговування і автоматизацію процедур розрахунку.

Чинні нормативні документи [4, 11] забезпечують вирішення основних питань організації і розрахунку каналів

залізничного технологічного радіозв'язку різного призначення в метровому діапазоні радіохвиль на частотах 151,725-156,000 МГц. Але з точки зору завдань широкої модернізації засобів технологічного радіозв'язку, ці нормативні документи мають суттєві недоліки. Правила організації і розрахунку мереж СРЗ, ПРЗ, РОРЗ не передбачають розрахунок каналів в перспективних для залізниць діапазонах.

В усіх чинних нормативних документах передбачене використання графоаналітичних методів розрахунку. В основу розрахунків каналів покладені графічні залежності зміни напруженості електричного поля сигналів від відстані $E_2 = \varphi(r)$, які побудовані при певних параметрах радіомереж. Застосування графоаналітичних методів ускладнює автоматизацію розрахунків і проектування радіомереж.

Недоцільна диференціація методик за технологічними ознаками, але необхідно врахувати особливості поширення радіохвиль при організації радіомереж різного призначення на станціях і перегонах залізниць, на електрифікованих і неелектрифікованих ділянках.

Необхідна уніфікація методів розрахунку, яка б забезпечувала єдиний підхід до розрахунку каналів радіозв'язку на основі загальних методологічних принципів, єдиної термінології і позначень та забезпечувала діапазонну і технологічну універсальність, передбачаючи розрахунок каналів в усіх полосах частот, що використовуються. Основою точного прогнозування характеристик радіомереж при проектуванні є застосування адекватної моделі поширення радіохвиль в умовах організації мереж рухомого радіозв'язку на залізницях.

Проведені на кафедрі транспортного зв'язку УкрДУЗТ дослідження створили передумови для розробки відомчої уніфікованої методики технологічного радіозв'язку в усіх смугах частот, що використовуються [11,12].

За результатами статистичних досліджень визначені експериментальні характеристики згасання сигналів для умов залізничних станцій $L_{осн.ст}$ і перегонів $L_{осн.пер}$ на неелектрифікованих ділянках залізниць, дБ:

$$L_{осн.ст} = 52,35 + 27,22 \cdot \lg f - 13,82 \cdot \lg(h_1) - (1,1 \cdot \lg(f) - 0,7) \cdot h_2 + (44,9 - 6,55 \cdot \lg h_1) \cdot \lg R^{1,15} - 2 \cdot \left(\lg\left(\frac{f}{28}\right)\right)^2, \quad (1)$$

$$L_{осн.пер} = 30,11 + 46,05 \cdot \lg f - 13,82 \cdot \lg(h_1) - (1,1 \cdot \lg(f) - 0,7) \cdot h_2 + (44,9 - 6,55 \cdot \lg(h_1)) \cdot \lg R^{1,15} - 4,78(\lg R), \quad (2)$$

де h_1 – висота установлення антени стаціонарної радіостанції, м;
 f – робоча частота радіомережі, МГц;
 h_2 – висота установлення антени мобільної радіостанції, м;
 R – відстань від передавача до точки оцінювання втрат, км.

Згасання сигналів в конкретних умовах організації радіомереж $L_{мережі}$ визначають за формулою з урахуванням відповідних поправкових коефіцієнтів, дБ,

$$L_{мережі} = L_{осн}(f, h_1, h_2) + B_{трас} + B_{мов}, \quad (3)$$

Суму поправкових коефіцієнтів, які залежать від особливостей траси поширення радіохвиль у різних мережах радіозв'язку, визначають за формулою, дБ,

$$B_{трас} = B_{рел} + B_{км} + B_{л} + B_{рн}, \quad (4)$$

де $B_{рел}$ – коефіцієнт, що залежить від рельєфу місцевості, по якій проходить траса радіозв'язку, дБ;

$B_{км}$ – коефіцієнт, що враховує додаткове ослаблення напруженості поля контактною мережею на електрифікованих ділянках залізниць, дБ;

$B_{л}$ – коефіцієнт, що враховує зменшення потужності сигналу на вході приймача локомотивної радіостанції внаслідок впливу на умови прийому корпусу рухомого об'єкта, дБ;

$B_{рн}$ – коефіцієнт, що враховує погіршення умов прийому сигналів при організації зв'язку з радіостанціями, що носяться, дБ.

Напруженість поля сигналів в мережах рухомого радіозв'язку є випадковою величиною за місцем і часом. Поряд з характеристиками медіанних значень напруженості поля важливе значення для забезпечення необхідної надійності відіграють

флуктуаційні процеси при поширенні радіохвиль, які викликані одночасною дією багатьох факторів. При аналізі просторових флуктуацій напруженості поля в каналах рухомого радіозв'язку розрізняють швидкі і повільні завмирання сигналів. Швидкі завмирання є наслідком інтерференційних флуктуацій напруженості поля в результаті багатопроменевого поширення радіохвиль. Повільні флуктуації виникають внаслідок зміни загального рельєфу місцевості і варіантів забудови у містах. Повільні завмирання практично є коливаннями середнього рівня сигналу при переміщенні мобільної станції на значні відстані.

Просторова і часова неоднорідність діелектричної проникності тропосфери призводить до зміни умов рефракції радіохвиль, що в свою чергу викликає випадкові часові зміни рівнів сигналів на наземних трасах.

Флуктуації призводять до утворення областей простору, в межах яких рівень прийнятого сигналу може бути недостатнім для забезпечення впевненою радіозв'язку.

Значення напруженості поля, які перевищуються з імовірністю 50 % за місцем і часом $E_{0,5}$, визначають за базовими формулами, які характеризують процеси поширення радіохвиль для певних умов. При цьому надійність радіоканалу по полю складає лише 50 %. Для більшої надійності необхідно вести розрахунки каналів за значеннями напруженості поля, які перевищуються з необхідною імовірністю.

Відсоток пунктів на місцевості, в яких забезпечується прийом сигналів передавача на заданій відстані з заданою вірогідністю називають імовірністю зв'язку за місцеположенням або надійністю радіозв'язку по полю.

Суму поправкових коефіцієнтів, що враховують просторові і часові флуктуації напруженості поля сигналів, визначають виходячи з необхідної надійності зв'язку по полю за формулою, дБ,

$$B_{\text{імов}} = B_i + B_{\text{місц}} + B_{\text{час}}, \quad (5)$$

де B_i – коефіцієнт, що враховує інтерференційні флуктуації напруженості поля внаслідок багатопроменевого поширення радіохвиль, викликаного впливом інфраструктури, дБ;

$B_{місц}$ – коефіцієнт, що враховує повільні коливання напруженості поля внаслідок зміни загального рельєфу місцевості і типів забудови, дБ;

$B_{час}$ – коефіцієнт, що враховує часові коливання напруженості поля, обумовлені змінами рефракції радіохвилі в атмосфері, дБ.

Максимально допустимий рівень втрат $L_{дон}$, дБ на трасі поширення радіохвилі, при якому забезпечується необхідна якість і надійність каналів радіозв'язку на межі зони обслуговування, дБ,

$$L_{дон} = P_{прд} - P_{прм} + B_{пар}, \quad (6)$$

де $P_{прд}$ – потужність передавача, дБм;

$P_{прм}$ – мінімально допустима потужність сигналу на вході приймача, дБм.

Суму поправкових коефіцієнтів, що залежать від параметрів антенно-фідерних пристроїв передавача й приймача, визначають за формулою у вигляді єдиної поправки, дБ,

$$B_{парам} = G_1 - \alpha_1 \cdot l_1 + G_2 - \alpha_2 \cdot l_2 - B_{АФТпрд} - B_{АФТпрм}, \quad (7)$$

де G_1, G_2 – коефіцієнти підсилення передавальної і приймальної антен (відносно напівхвильового вібратора), дБ;

$\alpha_1 l_1$ і $\alpha_2 l_2$ – згасання, внесені фідерами передавальної і приймальної радіостанцій, дБ;

α – погонне згасання фідера, дБ/м;

l – довжина фідера, м;

$B_{АФП_{прд}}$, $B_{АФП_{прм}}$ – додаткове згасання, яке можуть створювати в антенно-фідерних трактах багатоканальних базових станцій пристрої об'єднання сигналів передавачів і розподільні панелі приймачів, дБ.

Значення поправок в формулі (7) визначають за технічними характеристиками радіозасобів. При цьому необхідну потужність передавача і приймача подають у децибелах (дБм) по відношенню до 1 мВт. Параметри в формулах (4) і (5), які враховують особливості умов організації радіомереж $B_{трас}$ та імовірнісні характеристики радіосигналів $B_{імов}$, визначають з

урахуванням відповідних рекомендацій [4,9,13, 14], а в необхідних випадках використовують результати експериментальних досліджень.

Наведемо приклади розрахунків дальності дії мережі поїзного радіозв'язку метрового діапазону на перегоні залізниць та мережі GSM-R 900 МГц, організованої на території великої залізничної станції.

Двоколійна ділянка залізниці з електричною тягою постійного струму проходить по горбкуватій місцевості. Визначимо дальність дії радіозв'язку між стаціонарною і локомотивною радіостанціями в діапазоні частот 150 МГц.

Параметри стаціонарної радіостанції: потужність передавача $P = 10 \text{ Вт}$; або $P_{\text{прд}} = 40 \text{ дБм}$; висота установлення антени $h_1 = 20 \text{ м}$; антена АС-4/2, $G_1 = 4 \text{ дБ}$; погонне згасання фідера $\alpha_{\phi 1} = 0,1 \text{ дБ/м}$; $l_1 = 20 \text{ м}$. Параметри радіостанції, що возять: висота установлення антени $h_2 = 5 \text{ м}$; антена АЛ-2, $G_2 = 0 \text{ дБ}$; погонне згасання фідера $\alpha_{\phi 2} = 0,1 \text{ дБ/м}$; $l_2 = 5 \text{ м}$.

Мінімально допустимий рівень корисного сигналу $U_{2\text{мін}} = 8 \text{ дБмкВ}$ або мінімальна необхідна потужність корисного сигналу $P_{\text{прм}} = -99 \text{ дБм}$.

Визначаємо значення поправкових коефіцієнтів у формулі (7), дБ,

$$B_{\text{парам}} = G_1 - \alpha_1 l_1 + G_2 - \alpha_2 l_2 = 4 - 0,1 \cdot 20 + 0 - 0,1 \cdot 5 = 1,5 .$$

Тоді максимально допустимий рівень втрат на межі зони обслуговування, дБ,

$$L_{\text{дон}} = P_{\text{прд}} - P_{\text{прм}} + B_{\text{парам}} = 40 - (-99) + 1,5 = 140,5 .$$

Визначимо значення поправкових коефіцієнтів у формулі (4) виходячи з рекомендацій «Правил ...» [4], дБ,

$$B_{\text{трас}} = B_{\text{рел}} + B_{\text{км}} + B_{\text{л}} = 0 + 2 + 8 = 10 ,$$

де $B_{\text{рел}} = 0 \text{ дБ}$ для траси типу 2; $B_{\text{км}} = 2 \text{ дБ}$ (для двоколійних електрифікованих ділянок); $B_{\text{л}} = 8 \text{ дБ}$.

Визначаємо значення імовірнісних коефіцієнтів відповідно до [12, 13, 14], виходячи з надійності радіозв'язку по полю 95 %, за формулою (5), дБ,

$$B_{\text{імов}} = B_{\text{місц}} + B_i + B_{\text{час}} = 3 + 5 + 1,8 = 9,8,$$

де $B_{\text{місц}} = 3$ дБ для траси типу 2;

$$B_i = 5 \text{ дБ};$$

$$B_{\text{час}} = 1,8 \text{ дБ}.$$

Дальність радіозв'язку, за умови $L_{\text{мережі}} = L_{\text{доп}}$, можна визначити шляхом безпосереднього розрахунку в ітераційному циклі або подати у вигляді графічного рішення (рисунок 10), де дальність зв'язку визначається за точкою перетину кривих $L_{\text{трас}}$ і $L_{\text{доп}}$ і складає 12,1 км.

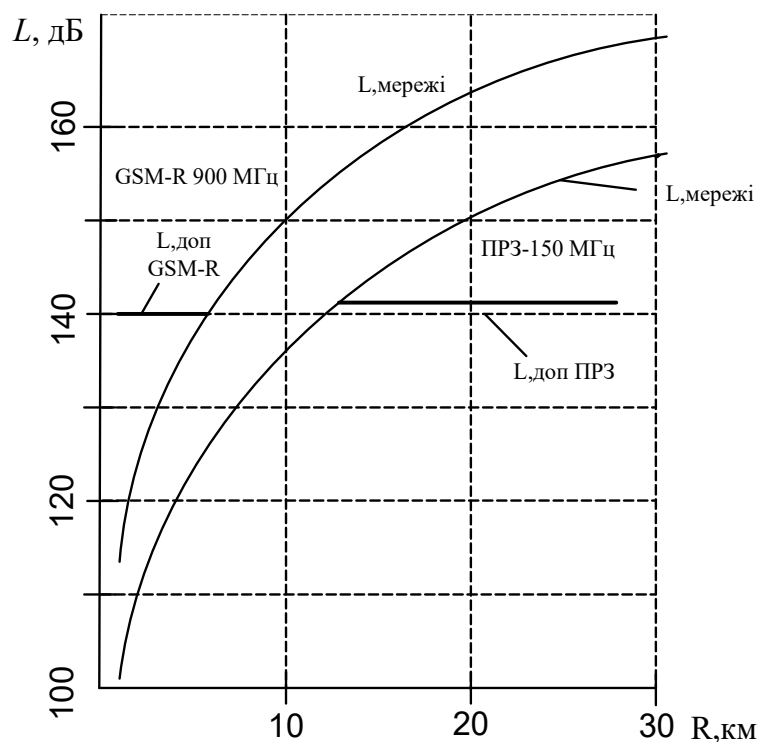


Рисунок 10 – Результати розрахунку дальності радіозв'язку

Наведені результати розрахунку дальності дії поїзного радіозв'язку на частоті 150 МГц збігаються зі значеннями дальності дії радіозв'язку, визначеними за правилами [4], що

свідчить про адекватність прийнятої моделі поширення радіохвиль в умовах залізничних перегонів (дивись формулу (2)).

Виконаємо розрахунки зони обслуговування мережі GSM-R на території великої залізничної станції на ділянці з електротягою. Мінімально допустимий рівень корисного сигналу визначаємо з урахуванням параметрів, наведених в рекомендаціях Міжнародного союзу залізниць по впровадженню мереж GSM-R [9, 13].

Параметри базової станції: потужність передавача $P_{nnp} = 20 \text{ Вт}$ або $P_{nnp} = 43 \text{ дБм}$; висота установлення антени $h_1 = 20 \text{ м}$; коефіцієнт підсилення антени $G_1 = 8 \text{ дБ}$; згасання фідера $a_{\phi 1} = 3 \text{ дБ}$ і додаткове згасання в елементах антенно-фідерних пристроїв (дуплексер, комбайнер, фільтри) $B_{\text{АФП}_{\text{прд}}} = 5 \text{ дБ}$. Параметри радіостанції, що возять: висота установлення антени $h_2 = 5 \text{ м}$; коефіцієнт підсилення антени $G_2 = 0 \text{ дБ}$; згасання фідера $a_{\phi 2} = 1 \text{ дБ}$.

Тоді значення поправкового коефіцієнта $B_{\text{парам}}$ складе, дБ,

$$B_{\text{парам}} = G_1 - a_{\phi 1} + G_2 - a_{\phi 2} - B_{\text{АФП}_{\text{прд}}} = 8 - 3 + 0 - 1 - 5 = -1.$$

Максимально допустимий рівень втрат на межі зони обслуговування, дБ,

$$L_{\text{дон}} = P_{\text{прд}} - P_{\text{прм}} + B_{\text{парам}} = 43 - (-99) - 2 = 140.$$

При розрахунках зони обслуговування в мережі GSM-R використаємо запропоновану удосконалену модель поширення радіохвиль та додаткові поправкові коефіцієнти, які визначені за результатами експериментальних досліджень, дБ,

$$B_{\text{трас}} = B_{\text{рел}} + B_{\text{км}} + B_{\text{л}} = -1,7 + 8 + 2 = 8,3.$$

Станції розташовують на рівнинній місцевості і втрати на трасі категорії 1,5 будуть меншими порівняно з горбкуватою місцевістю $B_{\text{рел}} = -1,7 \text{ дБ}$. В умовах станції суттєво зростає вплив контактної мережі і $B_{\text{км}} = 8 \text{ дБ}$. Погіршення умов прийому сигналів в антені, встановленій на даху електровоза, складає $B_{\text{л}} = 2 \text{ дБ}$.

Поправка для забезпечення надійності по полю 95 % складає $B_{\text{ймов}} = 7$ дБ.

Реальна крива згасання сигналів $L_{\text{мережі}}$ GSM-R 900 МГц наведена на рисунку 11, а дальність дії складає 5,8 км.

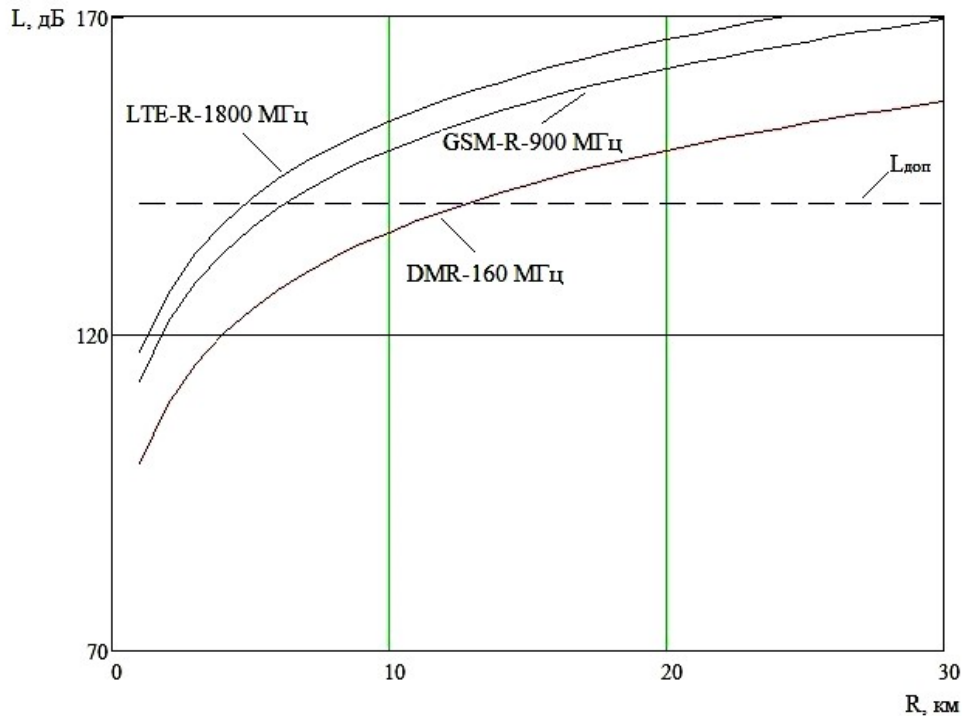


Рисунок 11 – Результати розрахунку дальності радіоз’язку

При впровадженні технічних засобів сучасних радіотехнологій необхідно приймати до уваги наведене нижче.

При впровадженні сучасних цифрових радіотехнологій DMR, GSM-R та LTE-R важливо порівняти можливі розміри зон обслуговування в системах радіозв’язку, які впливають на вартість інфраструктури мережі. При розрахунках дальності радіозв’язку за різними радіотехнологіями використовуємо однакові параметри радіомереж, які не залежать від особливостей радіозасобів різних стандартів.

Для спрощення розрахунків в умовах невизначеності типів і виробників радіотехнічних засобів мінімальний рівень корисного сигналу приймаємо з урахуванням рекомендацій [9] для систем GSM-R $P_{\text{прм}} = -99$ дБм.

Розрахунки виконані для умов залізничних станцій неелектрифікованих ділянок залізниць для робочих частот 160,

900 і 1800 МГц при висоті антен $h_1 = 20$ м; для локомотивної антени $h_2 = 5$ м; Потужність передавача прийнята $P_{\text{прд}} = 40$ дБм ($P_{\text{прд}} = 10$ Вт). Прийнята сумарна поправка $B_{\text{трає}} = 10$ дБ враховує вплив пристроїв електрифікації і корпусу локомотива на умови прийому в локомотивній антені. Сумарна поправка, яка враховує надійність радіозв'язку по полю $B_{\text{моє}} = 9,8$ дБ, прийнята з урахуванням інтерференційних і часових флуктуацій однаковою для всіх трьох випадків. Загальні втрати в антенно-фідерних пристроях прийняті $B_{\text{парап}} = 1,5$ дБ. Поправка прийнята виходячи з наявного досвіду проектування радіомереж [7,10]

Розрахунки загасання для різних радіотехнологій на робочих частотах радіомереж 160, 900, 1800 МГц наведені на рисунку 11.

Дальність складає для радіозасобів стандарту DMR – 12 км, для систем стільникового радіозв'язку GSM-R – 6 км та для широкосмугових систем LTE-R – 4 км.

Використання широкосмугових систем істотно збільшує витрати на організацію мереж за рахунок зниження дальності радіозв'язку. Тому при виборі систем радіозв'язку необхідно орієнтуватись на економічно виправдані витрати на розміщення базових станцій, які визначаються розмірами зон обслуговування.

Таким чином, використання удосконаленого методу розрахунку енергетичних характеристик каналів в умовах впливу інфраструктури залізниць підвищує точність розрахунку ослаблення радіосигналів і визначення зон обслуговування і дозволяє оптимізувати проектні рішення для забезпечення високої якості та необхідної надійності радіоканалів.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1 Принципи класифікації та склад мереж технологічного радіозв'язку.

- 2 Які смуги частот УКХ діапазонів виділені для організації технологічного радіозв'язку на залізницях?
- 3 Основні техніко – експлуатаційні характеристики радіозасобів стандарту DMR.
- 4 Основні техніко – експлуатаційні характеристики радіозасобів стандарту GSM-R.
- 5 Основні техніко – експлуатаційні характеристики радіозасобів стандарту LTE-R
- 6 Особливості поширення радіохвиль УКХ діапазонів в умовах впливу інфраструктури залізниць.
- 7 Методи розрахунку енергетичних характеристик.
- 8 Інтерференційні просторові флуктуації напруженості поля сигналів.
- 9 Причини повільних флуктуацій електромагнітного поля.
- 10 Розрахунок енергетичних характеристик в каналах рухомого радіозв'язку.
- 11 Причини просторових флуктуацій в каналах рухомого радіозв'язку.
- 12 Що таке надійність радіоканала по полю?

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- 1 Правила технічної експлуатації залізниць України. Міністерство транспорту України. ЦРБ 0004. Київ, 2007. 132 с.
- 2 Єлізаренко А. О., Єлізаренко О. В. Мережі технологічного радіозв'язку на залізничному транспорті: конспект лекцій. Харків: УкрДАЗТ, 2006. 47 с.
- 3 Єлізаренко О. В., Єлізаренко А. О., Поляков В. П., Трубчанінова К. А. Транкінгові мережі залізничного технологічного радіозв'язку: навч. посібник. Харків, УкрДАЗТ, 2006. – 93 с.
- 4 Правила організації та розрахунку мереж поїзного радіозв'язку ЦШ-0058; Державна адміністрація залізничного транспорту України, Укрзалізниця. Київ, 2009. 123 с.
- 5 Єлізаренко А. О., Єлізаренко І. О. Особливості впровадження сучасних цифрових радіотехнологій на мережах зв'язку залізниць. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2018. № 1. С. 10-16.

6 Слободянюк П. В., Благодарний В.Г., Ступак В.С. Довідник з радіомоніторингу. Ніжин : ТОВ «Видавництво «Аспект – Поліграф», 2008. 588 с.

7 Єлізаренко А. О. Забезпечення необхідної надійності функціонування каналів залізничного технологічного зв'язку. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2016. № 1. С. 41-46.

8 Standard ETSI 102361-1 v1.4.5. Elektromagnetik compatibility and Radio spectrum Matters. Digital Mobile Radio (DMR) Systems. Part1. DMR AIR Interfase hrotocol. France. ETSI, 2007.

9 GSM-R. Procurement & Implementation Guide. *International Union of Railways-Paris*, 2009. 246 p.

10 ITU-R IMT-Advanced 4G standards to usher new era of mobile broadband communications. *International Telecommunication Union*, 2010. URL: <http://www.itu.int/net/hressoffice/press>.

11 Єлізаренко А. О. Удосконалена статистична модель для розрахунків енергетичних характеристик каналів залізничного технологічного радіозв'язку. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2015. № 2, С. 37-42.

12 Єлізаренко А.О. Розробка методології розрахунку дальності дії каналів рухомого радіозв'язку в умовах впливу інфра-структури залізниць. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2014. № 2. С. 61-65.

13 Gorobets N. N., Yelizarenko A. A. Analysis of power characteristics of mobile radio communication channels. *Telecommunications and Radio Engineering*. Begell House Inc. USA, 2018. Volume 77, Number 4, P. 283-295.

14 Єлізаренко А.О. Моделі поширення радіохвиль в каналах рухомого радіозв'язку : конспект лекцій. Харків : УкрДУЗТ, 2017. 59 с.