

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**Дніпровський національний університет залізничного
транспорту імені академіка В. Лазаряна**

Кафедра «Автоматика та телекомунікації»

**«ДО ЗАХИСТУ»
Завідувач кафедри**

_____ Гаврилюк В.І.
(підпис) (ПІБ)
20 ____ р. _____ « ____ »

ДИПЛОМНА РОБОТА
на здобуття освітнього ступеня «магістр»

Галузь знань 15 «Автоматизація та приладобудування»

Спеціальність 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Спеціалізація «Автоматика та автоматизація на транспорті»

Тема Удосконалення системи інтервального регулювання руху поїздів
шляхом впровадження пристроїв цифрового радіозв'язку

Theme Improvement the train interlocking system by using the digital radio
devices

Керівник дипломної роботи доцент _____ Гончаров К.В.

Студент групи АТ1921 (967М) _____ Коваленко А.О.

Student АТ1921 (967М) _____ Kovalenko Anastasiia

**Дніпро
2020**

Дніпровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна
Факультет «Комп'ютерні технології і системи»
Кафедра «Автоматика та телекомунікації»
151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
Автоматика та автоматизація на транспорті

Спеціальність
Спеціалізація

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Завідувач кафедри АТ

Гаврилюк В.І.
« ____ » _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

до дипломної роботи на здобуття освітнього ступеню «магістр»

(прізвище, ім'я та по батькові)

1. Тема роботи

Затверджена наказом по університету № _____ від « ____ » _____ 20__ р.

2. Термін подання студентом закінченої роботи _____

3. Вихідні дані до роботи _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва розділу	Обсяг %	Кількість креслень
1.		
2.		
3.		
4.		
5.		
6.		
7.		

Студент
Науковий керівник

РЕФЕРАТ

Відомості про об'єм пояснювальної записки: 80 сторінок, 2 таблиці, 35 рисунки, 31 літературних джерел.

Ключові слова: система інтервального регулювання руху поїздів, цифровий радіозв'язок, пропускна спроможність залізничної лінії, швидкість передачі даних, базова станція.

Об'єкт проектування: система інтервального регулювання руху поїздів із застосуванням цифрового радіозв'язку

Мета магістерської роботи: удосконалення системи інтервального регулювання руху поїздів шляхом впровадження пристроїв цифрового радіозв'язку.

У першому розділі розглянуто існуючі вітчизняні та закордонні системи інтервального регулювання. Проаналізовано досвід створення та експлуатації європейських, китайських, російських систем, їх переваги та недоліки.

У другому розділі описується можливість впровадження новітньої системи інтервального регулювання руху поїздів із застосуванням цифрового радіозв'язку. Розроблена структурна схема та алгоритм роботи, наведено можливі рівні впровадження даної системи.

У третьому розділі проведено порівняльний аналіз традиційних та координатних систем, проаналізовано пропускну здатність при координатній системі інтервального регулювання.

У четвертому розділі проведено аналіз існуючих стандартів цифрового радіозв'язку. Обрано оптимальний варіант майбутнього стандарту радіозв'язку для системи СІРРП-Р. Проведено моделювання базових станцій та розрахована пропускна здатність при застосуванні LTE-R мережі.

Галузь застосування: системи керування рухом поїздів на залізничному транспорті.

Висновок. Впровадження системи інтервального регулювання руху поїздів із застосуванням цифрового радіозв'язку дозволить підвищити безпеку руху поїздів, розширити функціональні можливості СІРРП, підвищити пропускну спроможність залізничних ліній.

ЗМІСТ

Вступ.....	6
Розділ 1. Огляд існуючих систем інтервального регулювання на базі цифрового радіозв'язку	7
1.1. Призначення та різновиди систем інтервального регулювання руху поїздів	7
1.1.1. Класифікація систем інтервального регулювання руху поїздів на перегонах	7
1.1.2. Системи автоматичної локомотивної сигналізації	12
1.1.3. Локомотивні пристрої забезпечення безпеки руху поїзда	18
1.2. Європейська система управління залізничними перевезеннями ERTMS	20
1.2.1. Особливості системи ERTMS	20
1.2.2. Рівні ERTMS	22
1.3. Китайська система керування рухом поїздів CTCS	25
1.4. Система інтервального регулювання руху поїздів на базі радіозв'язку СИРДП-Е.....	28
1.5. Висновки по розділу 1	31
Розділ 2. Загальні принципи побудови системи інтервального регулювання руху поїздів із застосуванням цифрового радіозв'язку	32
2.1. Структура та принцип дії системи інтервального регулювання руху поїздів із застосуванням цифрового радіозв'язку	32
2.2. Експлуатаційні рівні системи СИРДП-Р	33
2.2.1. Рівень 1	33
2.2.2. Рівень 2	34
2.3. Принцип функціонування координатної системи інтервального регулювання	35
2.4. Висновки до розділу 2	37
Розділ 3. Визначення пропускної спроможності координатної системи інтервального регулювання руху поїздів	38
3.1. Пропускна спроможність перегону при автоблокуванні з 3-х та 4-х значною сигналізацією	38

3.2. Особливості координатних систем інтервального регулювання	41
3.3. Результати розрахунків	44
3.4. Висновки до розділу 3	46
Розділ 4. Дослідження та моделювання системи цифрового радіозв'язку з рухомими об'єктами	47
4.1. Аналіз існуючих стандартів цифрового радіозв'язку з рухомими об'єктами	47
4.1.1. Система мобільного зв'язку GSM	48
4.1.2. Система мобільного зв'язку GSM-R	52
4.1.3. Система мобільного зв'язку TETRA	55
4.1.4. Система мобільного зв'язку третього та четвертого поколінь	58
4.1.5. Система мобільного зв'язку 5G	61
4.2. Особливості інтерфейсу LTE мереж	62
4.3. Моделювання базової станції системи цифрового радіозв'язку LTE-R ..	65
4.4. Висновки до розділу 4	75
Загальні висновки	76
Список використаних джерел	77

ВСТУП

Якісна експлуатація залізничного транспорту залежить від систем інтервального регулювання руху поїздів. За останні роки швидкості руху залізничного транспорту у світі значно зросли, тому необхідно удосконалювати існуючі системи.

Поява нових технологій, таких як цифровий радіозв'язок, супутникова навігація, дає нові можливості щодо вдосконалення систем інтервального регулювання руху поїздів. Швидкість передачі, пропускна здатність радіоканалу у багато разів перевершує існуючий канал по рейковому колу. Це сприяє застосуванню радіоканалу в системах інтервального регулювання в якості альтернативи рейковому каналу зв'язку.

Робота систем управління по цифровому радіоканалу ґрунтується на передачі інформації між стаціонарним і бортовим обладнанням. Стаціонарне обладнання відправляє на поїзд дозвіл на рух із зазначенням точки, до якої дозволено проходження. Бортове обладнання на основі отриманого дозволу на рух будує криву гальмування для зупинки в цільовій точці. Для побудови кривої гальмування потрібно знати відстань від поточного місця розташування локомотива до цільової точки. Позиціонування поїзда проводиться за допомогою приймача сигналів супутникових навігаційних систем GPS або ГЛОНАСС.

Доповнення системи цифрового радіозв'язку до традиційних систем інтервального регулювання дозволить суттєво покращити характеристики останніх. В перспективі цифровий радіозв'язок може використовуватись як основний канал для передачі команд керування на локомотив. Це забезпечить можливість впровадження координатних систем інтервального регулювання.

Метою магістерської роботи є удосконалення системи інтервального регулювання руху поїздів шляхом впровадження пристроїв цифрового радіозв'язку, в майбутньому можливість впровадження систем без світлофорів із застосуванням супутникової навігації і цифрового радіоканалу.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ ІНТЕРВАЛЬНОГО РЕГУЛЮВАННЯ НА БАЗІ ЦИФРОВОГО РАДІОЗВ'ЯЗКУ

1.1. Призначення та різновиди систем інтервального регулювання руху поїздів

1.1.1. Класифікація систем інтервального регулювання руху поїздів на перегонах

З розвитком промисловості обсяг перевезень на залізничному транспорті безперервно підвищується. Це досягається збільшенням інтенсивності і швидкості руху, ваги поїздів, вдосконаленням планування і регулювання руху поїздів. Системи залізничної автоматики і телемеханіки (СЖАТ) відіграють важливу роль у забезпеченні безпеки руху поїздів і підвищенні ефективності перевізного процесу. Вони призначені для автоматичного і автоматизованого регулювання руху поїздів на перегонах, станціях, ділянках. Перегінні системи називають системами інтервального регулювання руху поїздів (ІРРП). Регулювання з метою забезпечення безпеки полягає у виявленні перешкод для руху та прийняття заходів для зменшення швидкості або зупинки поїзда. При цьому функції впливу на гальмівні пристрої можуть бути покладені на машиніста або на систему автоматики. Система автоматики в найпростішому випадку при порушенні умов безпеки здійснює екстрене гальмування до повної зупинки поїзда; в більш досконалому варіанті проводиться плавне управління гальмуванням і зниження швидкості до необхідної величини або зупинка в заданій точці шляху.

Залежно від місця застосування системи регулювання руху поділяють на перегінні і станційні.

Перегінні системи забезпечують інтервальне регулювання руху поїздів на перегонах. Дозволяють або забороняють відправлення поїзда на перегін, виключають можливість відправлення поїзда на зайнятий перегін або блок-ділянку, в тому числі під час руху в зустрічному напрямку.

До перегінних систем відносяться:

- напіваавтоматичне блокування (ПАБ), при якому сигнали, що дозволяють поїзду зайняти перегін, відкриваються при певних діях працівників, які керують рухом поїздів, а закриваються автоматично;
- автоматичне блокування (АБ), в якому управління показаннями світлофорів, що огорожують блок-ділянки, здійснюється рухомим поїздом (без участі людини);
- диспетчерський контроль за рухом поїздів, який допомагає поїзному диспетчеру оперативно керувати рухом поїздів на ділянці;
- автоматична локомотивна сигналізація (АЛС) і пристрої безпеки руху поїздів. За допомогою системи АЛС показання колійних світлофорів кодовими сигналами передаються в кабінку машиніста. Крім цього, АЛС доповнюється автостопом з пристроєм перевірки пильності машиніста і контролю швидкості руху поїзда;
- автоматична переїзна сигналізація, а також автоматичні шлагбауми, що застосовуються на залізничних переїздах для попередження водіїв транспортних засобів про наближення поїзда до переїзду і забороняють рух через переїзд [13].

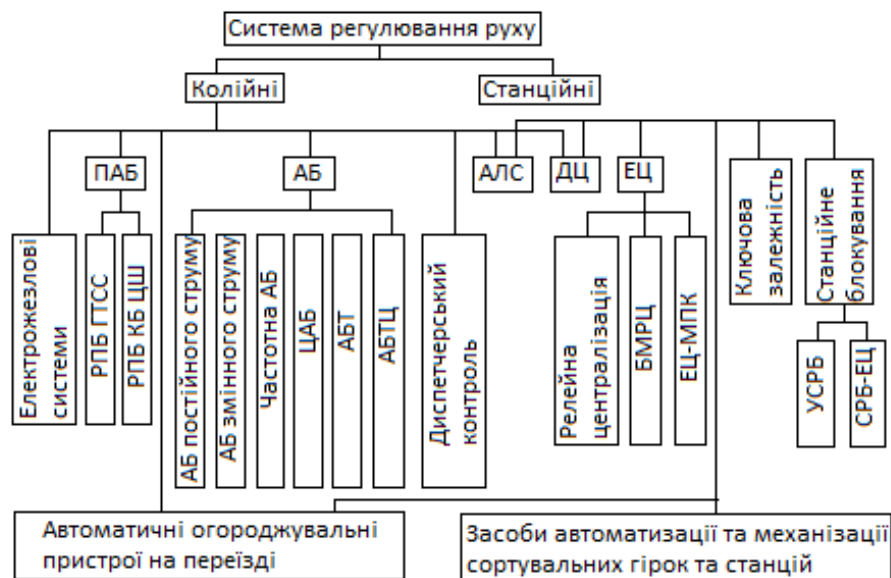


Рис. 1.1. Класифікація систем регулювання руху поїздів

Станційні системи забезпечують взаємну залежність стрілок і сигналів при прийманні та відправленні поїздів, контролюють положення стрілок, не допускають їх перевід при вже заданому маршруті, замикають їх в одному з

крайніх положень, при обладнанні колій і стрілочних ділянок рейковими колами, контролюють їх вільність або зайнятість рухомим складом.

До станційним пристроїв відносяться:

- ключова залежність, яка використовується на станціях, де збережено ручне управління стрілками для забезпечення взаємного замикання стрілок і сигналів за допомогою контрольних замків;
- станційне блокування, за допомогою якого здійснюється взаємне замикання стрілок і сигналів, що управляються з різних постів;
- електрична централізація стрілок і сигналів ЕЦ, забезпечує управління стрілками і сигналами з пульта, їх взаємозалежність, яка контролює взріз стрілки і виключає переведення стрілки під складом, а також відкриття світлофора на зайняту колію. Різновидами такої системи є релейний централізація проміжних станцій, блокова маршрутно-релейна централізація БМРЦ великих станцій і мікропроцесорна ЕЦ-МПЦ;
- диспетчерська централізація ДЦ, дозволяє управляти стрілками і сигналами ряду станцій з одного пункту і контролювати положення стрілок, стан зайнятості або вільності колій, стрілочних ділянок і прилеглих блок-ділянок, змінювати показання вхідних і вихідних сигналів в межах диспетчерського кола;
- засоби автоматизації і механізації сортувальних станцій і гірок, дозволяють управляти стрілками і гірковими сигналами, регулювати швидкості насування та розпуску складів.

Автоматична локомотивна сигналізація, диспетчерська централізація і автоматичні огорожувальні пристрої на переїздах можуть регулювати рух поїздів як на перегонах, так і по станціях, тому ці системи віднесені до перегінних і до станційних. З систем напівавтоматичного блокування найбільшого поширення набуло релейне блокування, в якому всі маршрутні залежності здійснюються електричним способом, що підвищує її надійність. Серед станційних систем найбільш ефективною з точки зору скорочення часу на приготування маршруту є ЕЦ стрілок і сигналів, яка в порівнянні з ключовою залежністю збільшує пропускну здатність станції на 50 ... 70% [13].

Найбільш поширеними системами інтервального регулювання руху поїздів на перегонах є напівавтоматичне блокування (ПАБ), автоблокування (АБ), автоматична локомотивна сигналізація (АЛС). При напівавтоматичному блокуванні на міжстанційний перегін може бути відправлений тільки один поїзд, міжпоїзний інтервал визначається часом ходу поїзда по перегону. Розмежування поїздів цілим міжстанційним перегonom призводить до збільшення інтервалу і обумовлює невелику пропускну здатність ділянок доріг. Напівавтоматичне блокування застосовується на малодіяльних ділянках, де в найближчі 7-10 років не очікується значного збільшення обсягу перевезень. В якості основної системи інтервального регулювання руху поїздів застосовують автоблокування [1].

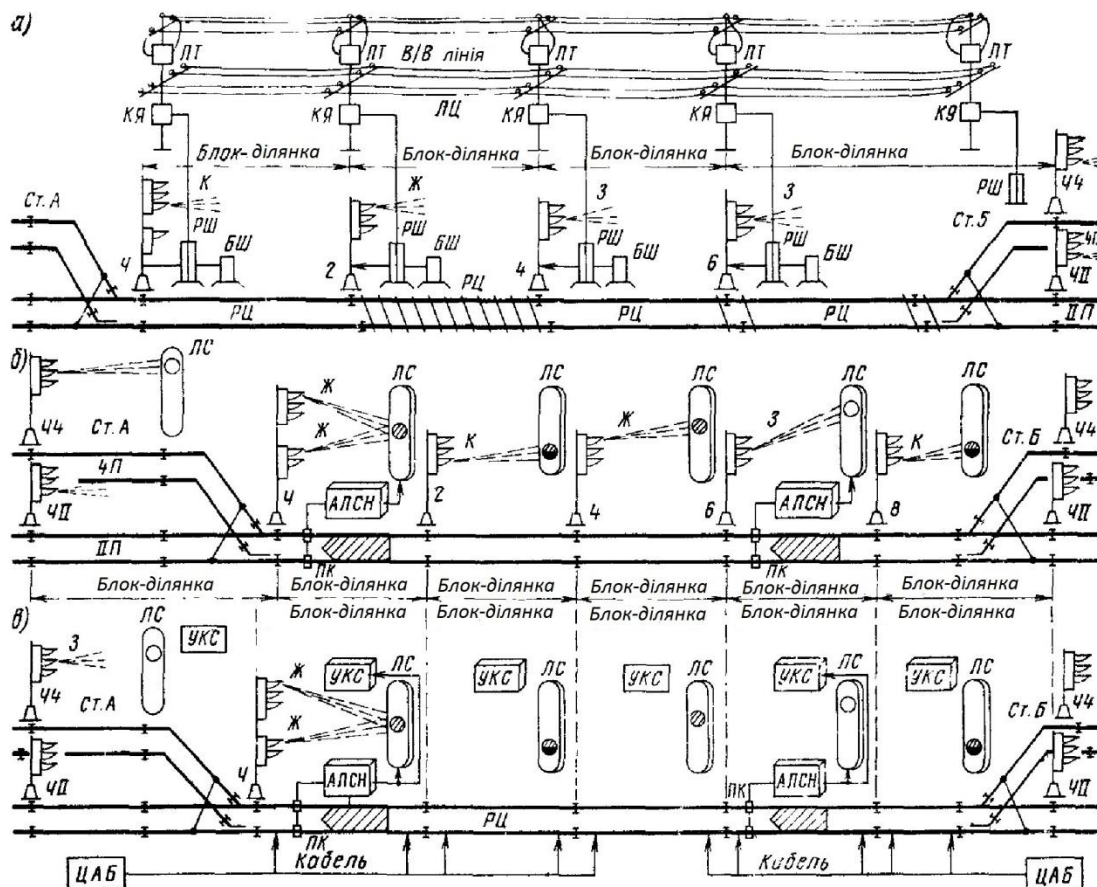


Рис. 1.2. Схематичне зображення побудови систем інтервального регулювання руху поїздів

При цій системі (рис. 1.2, а) міжстанційних перегін ділять на блок-ділянки і на границях ділянок встановлюють прохідні автоматично діючі світлофори. У межах кожної блок-ділянки влаштовують електричне рейкове коло РК, яке використовується як датчик стану блок-ділянки (вільний - зайнятий) і

одночасно контролю цілості рейкових ниток колії. У кожного прохідного світлофора в релейному шафі РШ встановлена апаратура автоблокування для управління вогнями світлофора, а в батарейному шафі БШ - джерела живлення для живлення релейної апаратури і рейкових кіл. Світлофори пов'язані між собою по повітряних або кабельних лінійних ланцюгах ЛЦ. Для підключення апаратури до ЛЦ на силових опорах встановлюють кабельні ящики КЯ, пов'язані з РШ. Пристрої автоблокування отримують живлення від трифазної високовольтної лінії через понижуючі лінійні трансформатори ЛТ (типу ОМ), встановлені на силових опорах і пов'язані кабелем з РШ.

Апаратура автоблокування здійснює автоматичне перемикання вогнів дорожніх світлофорів під дією рухомого складу. Сигнальні показання кожного колійного світлофора вказують машиністу поїзда, що наближається до даного світлофора, координати поїзда, що йде попереду. Червоний вогонь світлофора означає, що перша за світлофором блок-ділянка зайнята і потрібно зупинити поїзд перед даним світлофором; жовтий вогонь - перша блок-ділянка вільна, а наступна за ним зайнята, після проїзду світлофора з жовтим вогнем потрібно знизити швидкість, щоб зупинити поїзд у наступного світлофора з червоним вогнем; зелений вогонь - попереду вільні не менше двох блок-ділянок, дозволяється рух із повною встановленою швидкістю. Пристрої автоблокування контролюють цілість рейкової колії. У разі пошкодження шляху (лопнула або вилучена рейка) на колійному світлофорі, що огорожує блок-ділянку з пошкодженою рейкою, включається червоний вогонь, що вимагає зупинки поїзда. При поганій видимості сигналів колійних світлофорів на ділянках з автоблокуванням можливі проїзди закритих колійних світлофорів і порушення безпеки руху поїздів. З метою підвищення безпеки спільно з автоблокуванням використовують автоматичну локомотивну сигналізацію (АЛС) числового або частотного коду. Спільна робота пристроїв автоблокування і АЛС з чотиризначною сигналізацією показана на рис. 1.2, б.

Пристроями АЛС показання колійного світлофора, до якого наближається поїзд, автоматично через рейкове коло передається в кабінку машиніста і на локомотивному світлофорі ЛС загоряється сигнальний вогонь, що повторює

показання колійного світлофора, до якого наближається поїзд. Пристрої АЛС працюють не тільки на перегонах, а й при проходженні поїзда по головному і по бічних шляхах станції. В системі ЦАБ (рис. 1.2, в) колійні світлофори не встановлюють, міжпоїзний інтервал регулюється тільки засобами АЛС. Вся релейна апаратура ЦАБ, за допомогою якої визначається місцезнаходження поїзда на блок-ділянках перегону, розміщена на станціях, що обмежують перегін. Рейкові кола пов'язані з апаратурою ЦАБ кабельними лініями. При обмежених рейкових колах, як це показано на малюнку, межами блок-ділянок є ізолюючі стики і місця підключення колійних трансформаторів і колійних реле до рейкових кіл.[11]

1.1.2. Системи автоматичної локомотивної сигналізації

На сьогоднішній день в Україні застосовуються дві системи автоматичної локомотивної сигналізації: чотиризначна АЛСН числового коду і багатозначна АЛСНМ (АЛСМ) частотного коду (рис.1.3, 1.4). На рисунках використовуються наступні позначення: ЛС — локомотивний світлофор; ДШ — дешифратор; Г — генератор; У — підсилювач; Ф — фільтр; СВ — свисток; РБ — рукоятка пильності; ЕПК — електропневматичний клапан; ТМ — гальмівна магістраль; ПК — приймальні котушки.

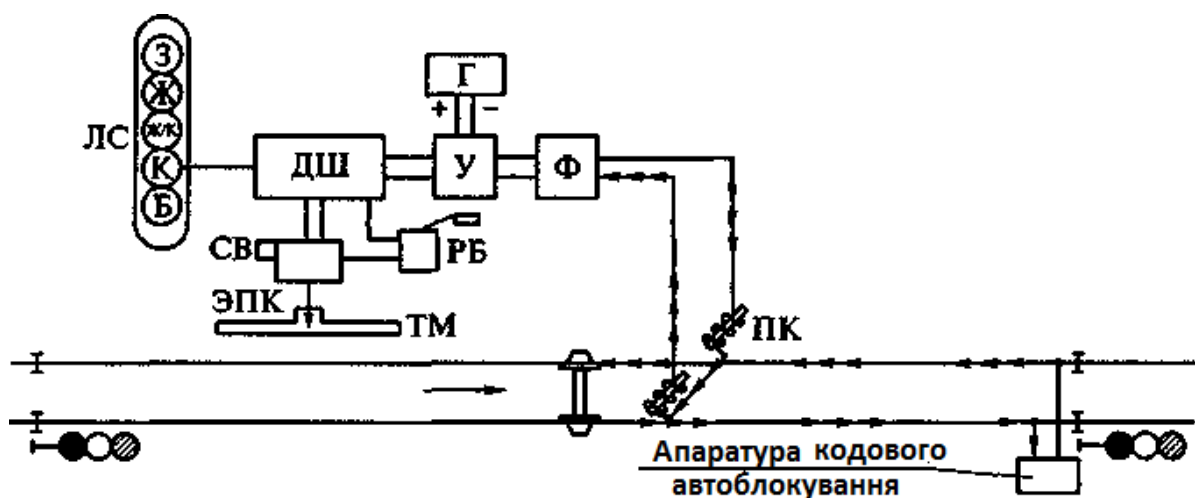


Рис. 1.3. Автоматична локомотивна сигналізація числового коду АЛСН

виконується швидкісний режим руху поїзда до повної зупинки на кордоні зайнятої блок-ділянки [9].

В системі ЦАБ, крім автоматичного, можливо і ручне включення кодування з пульта управління чергового по станції. У разі виникнення перешкод на шляху, несправності рухомого складу черговий може вимкнути кодові сигнали АЛС в будь-якому рейковому колі або замінити більш дозволяючий код на менш дозволяючий, цим виключається можливість виникнення аварійних ситуацій і підвищується безпека руху поїздів. На магістральних лініях з високошвидкісним рухом інтервальне регулювання проводиться засобами автоблокування з чотиризначною сигналізацією спільно з пристроями АЛСМ з частотним кодуванням і багатозначною сигналізацією на ЛС. Високошвидкісні поїзди, що розвивають швидкості до 200 км / год, мають великі гальмівні шляхи, тому автоблокування і АЛС з чотиризначною сигналізацією не забезпечують необхідне інтервальне регулювання поїздів даної категорії. В даному випадку використовують систему АЛСМ з багатозначною сигналізацією, яка діятиме з автоблокуванням (рис.1.4.). Кожне сигнальне показання на ЛС кольором вогню і цифрою на тлі цього вогню вказує допустиму швидкість руху при проходженні колійного світлофора, до якого наближається поїзд. Якщо фактична швидкість руху перевищує допустиму, то включається службове гальмування і фактична швидкість знижується до допустимої. По мірі наближення поїзда до колійного світлофора із заборонним сигнальним показанням на ЛС з'являється сигнал, який вказує машиністу на необхідність зниження швидкості до повної зупинки поїзда перед світлофором із заборонним показанням [17].

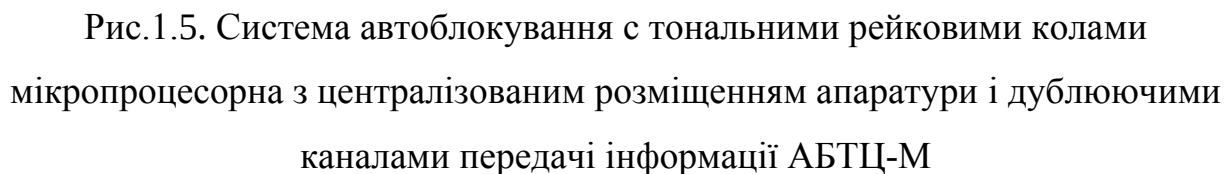
Крім системи АЛС з рейковим колом, розробляється координатна система інтервального регулювання руху поїздів, в якій відсутні електричні рейкові кола і колійні світлофори. Для визначення місцезнаходження поїзда на перегоні (координати поїзда) уздовж шляху по поверхні шпал або в землю укладають шлейф у вигляді ізолюваного проводу, який утворює індуктивний канал зв'язку. Шляхом перехресного укладання шлейфу влаштовують елементарні ділянки для відліку координати місцезнаходження кожного поїзда на перегоні.

Укладений шлейф використовують як індуктивний канал зв'язку для передачі з локомотивів інформації про координати знаходження поїздів на перегоні в стаціонарні пристрої і для передачі назад від стаціонарних пристроїв на локомотиви команд для включення на ЛС швидкісної сигналізації. На кожному локомотиві встановлена апаратура АЛСМ, за допомогою якої передаються і приймаються кодові сигнали.

У пристроях інтервального регулювання (ІР) координатної системи прийнята з різних локомотивів інформація про координати поїздів на перегоні обробляється та аналізується. Шляхом обчислення різниці координат визначається відстань (міжпоїзний інтервал) між першим і другим попутно слідуючими поїздами. В залежності від значення обчисленої відстані (інтервалу) виробляється команда допустимої швидкості руху другого поїзда. Ця команда шифрується в частотний кодовий сигнал і по індуктивному каналу зв'язку передається на локомотив. Зі шлейфа через антену частотний сигнал сприймають пристрої АЛСМ на локомотиві. Після дешифрування прийнятої команди на локомотивному світлофорі включаються вогонь і цифра, що показують допустиму швидкість руху поїзда. По мірі зближення поїздів та зменшення відстані (інтервалу) між ними пристрої ІР виробляють команду на зниження допустимої швидкості. При появі на ЛС сигналу, що дозволяє рух зі швидкістю, меншою за фактичну, - автоматично включається службове гальмування і фактична швидкість поїзда знижується до допустимої. Подальше зближення поїздів призводить до плавного гальмування до повної зупинки поїзда перед перешкодою. Координатна система інтервального регулювання може бути доповнена електричними рейковими колами для контролю цілості шляху і забезпечення безпеки руху поїздів на рівні ділянок, обладнаних автоблокуванням і АЛСН [11].

Пріоритетом впровадження системи інтервального регулювання руху поїздів є впровадження системи мікропроцесорного автоблокування, яка в даний час модернізовано в систему АБТЦ-М (рис.1.5.) з рухомими блокувальними ділянками, що забезпечує мінімальний інтервал попутного прямування до двох з половиною хвилин, що порівняно з роботою метрополітену, а також в її

Засобом передачі інформації між станційними і локомотивними пристроями є обладнання цифрового радіоканалу, розташоване на станціях і перегонах відповідно до розрахунків зон радіо покриття, а також безпосередньо на рухомому складі [19].



16

В даний час в системах ІРДП на залізницях світу використовуються стандарти цифрового радіозв'язку TETRA, GSM, GSM-R, DMR. Аббревіатура **TETRA** розшифровується «Наземне транкінгового радіо» (Terrestrial Trunked Radio). **GSM** - глобальний стандарт цифрового мобільного стільникового зв'язку з розділенням каналів за часом (TDMA) і частоті (FDMA). На базі цього стандарту було розроблено стандарт мобільного зв'язку для залізничних перевезень **GSM-R** (GSM-Railway), який забезпечує захищений голосовий зв'язок і передачу даних між залізничними службами і поїздами. Стандарт **DMR** (Digital Mobile Radio) забезпечує рівний перехід від аналогових систем радіозв'язку до цифрових, використовується в даний час при забезпеченні безпеки руху поїздів на базі радіоканалу [26].

Робота систем управління по цифровому радіоканалу ґрунтується на передачі інформації між стаціонарним і бортовим обладнанням. Стаціонарне обладнання відправляє на поїзд дозвіл на рух із зазначенням точки, до якої дозволено проходження. Бортове обладнання на основі отриманого дозволу на рух будує криву гальмування для зупинки в цільовій точці. Для побудови кривої гальмування потрібно знати відстань від поточного місця розташування локомотива до цільової точки. Це завдання вирішується за допомогою системи визначення місця розташування локомотива і електронної карти. [21] Позиціонування поїзда проводиться за допомогою приймача сигналів супутникових навігаційних систем GPS або ГЛОНАСС. Географічні координати, отримані від приймача супутникової навігації за допомогою електронної карти ділянки, перетворюються в лінійні залізничні координати. В електронній карті також запрограмовані координати світлофорів, станцій, місць обмежень швидкості і багато іншого [10].

Поняття «електронна карта». Це програма, в якій кілометрові стовпи прив'язані до координат супутника. Відстань між цими стовпами автоматично розділено електронною картою на метри. За цією карткою весь шлях локомотива відстежується через супутник і його місцезнаходження автоматично визначається в будь-якій точці зони дії карти після включення пристроїв локомотивної автоматики [12].

1.1.3. Локомотивні пристрої забезпечення безпеки руху поїзда

Різнноманітні бортові системи, що забезпечують безпеку руху об'єднують в Комплексний локомотивний пристрій безпеки **КЛУБ** (рис.1.6.). КЛУБ-У призначений для контролю безпечного прямування поїзда за допомогою електронної карти ділянки і супутникової навігації. В КЛУБ-У передбачено визначення координат поїзда за допомогою супутникової навігаційної системи. Є також точковий канал зв'язку і цифровий радіозв'язок з диспетчером і черговим по станції. Пристрої КЛУБ-У мають модульну структуру, в якій незалежні модулі взаємодіють один з одним за допомогою системної шини. Мовою програмування для КЛУБ-У вибрана мова С. Програмне забезпечення системи являє собою сукупність незалежних програмних модулів, які обмінюються інформацією по послідовному інтерфейсу типу CAN. В КЛУБ-У передбачена взаємодія з локальної мережі з системами автоматичного управління гальмами (САУТ) і телемеханічною системою контролю неспання машиніста (ТСКБМ) [12].

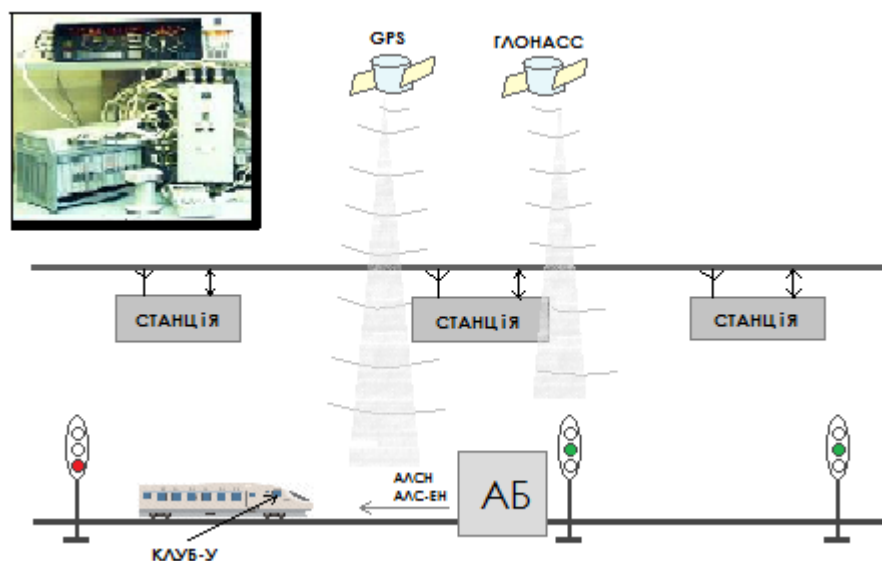


Рис.1.6. Взаємодія системи КЛУБ-У з автоматичною локомотивною сигналізацією, супутниковою навігаційною системою і станційним блокуванням по радіоканалу

Апаратура КЛУБ-У забезпечує: прийом і дешифрування сигналів АЛС; індикацію машиністу кількості вільних блок-ділянок при прийомі сигналів АЛС; індикацію фактичної швидкості руху з точністю до 1 км / год при

швидкості руху до 80 км / год і до 2 км / год при швидкостях руху до 250 км / год; регулярний контроль пильності машиніста за допомогою індикації та сигналізації; індикацію машиністу допустимої на даній ділянці шляху швидкості руху; виключення самовільного руху локомотива; автоматичний облік категорії поїзда, типу тяги, довжини блок-ділянок; безперервний контроль стану гальмівної системи; автоматичне включення екстреного гальмування при появі ситуацій, що ведуть до небезпечних і катастрофічних наслідків; реєстрацію параметрів руху в електронній пам'яті касети реєстрації; неможливість проїзду ділянки зі світлофором із заборонним сигналом без дозволу чергового по станції [5].

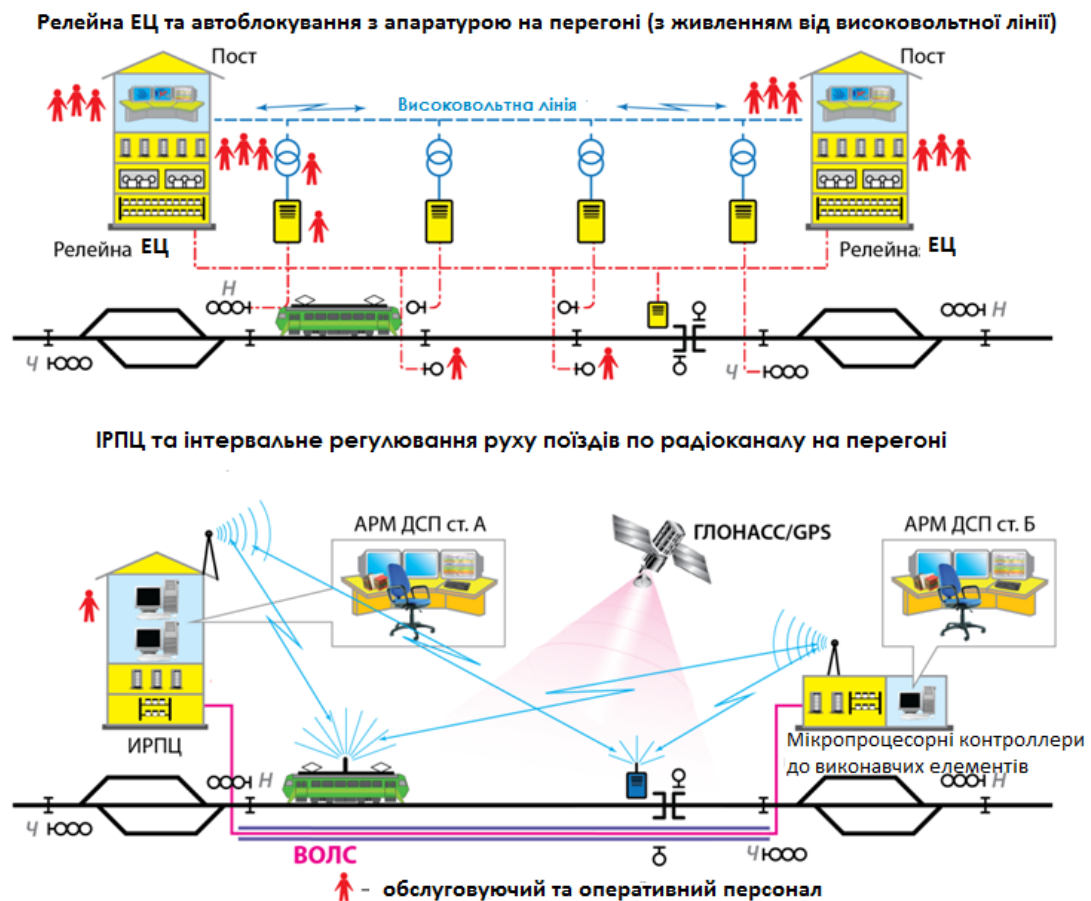


Рис.1.7. Розвиток систем інтервального регулювання руху поїздів з переходом до безсвітлофornoї сигналізації

У багатьох країнах світу успішно застосовуються системи інтервального регулювання руху поїздів на основі радіоканалу (рис.1.6.).

1.2. Європейська система управління залізничними перевезеннями ERTMS

ERTMS – комплекс єдиних стандартів, розроблених в рамках міжнародного співробітництва для залізничної автоматики, телемеханіки, зв'язку і диспетчерського контролю. ERTMS покликана ліквідувати відмінності в несумісних один з одним системах сигналізації, централізації, блокування (СЦБ) європейських країн, забезпечивши тим самим безперешкодне і безпечне залізничне сполучення на європейському континенті. [8]

ERTMS складається з:

- ETCS (Європейська система управління поїздом), стандарт управління поїздом, заснований на обладнанні в кабіні, бортовий пристрій, здатний контролювати рух поїздів і зупиняти його відповідно до дозволеної швидкості на кожній ділянці лінії, поряд з розрахунками і постійний контроль максимальної швидкості поїзда. Інформація надходить від обладнання ETCS поруч з трасою. Реакція машиніста постійно контролюється, і в разі необхідності аварійні гальма будуть взяті під контроль.
- GSM-R (Глобальна система мобільного зв'язку - залізниці) - це друга компонента системи ERTMS, європейський стандарт радіозв'язку для залізничних перевезень. Заснована на технології радіозв'язку GSM, GSM-R використовує ексклюзивні смуги частот для зв'язку поїзда з центрами управління рухом і пристроями, розташованими поруч з рейкою. [24]

1.2.1. Особливості системи ERTMS

При використанні традиційних систем забезпечення руху поїздів на кожній блок-ділянці, на які поділяються перегони, може перебувати не більше одного складу. В основу роботи ETCS покладена ідея безперервного контролю перевізного процесу за допомогою сукупності різних технічних засобів, завдяки чому досягається безпечне зменшення інтервалу попутного прямування, а значить збільшення пропускної здатності. Дія ETCS заснована на визначенні місцезнаходження поїзда, обчисленні відстані між складами, контроль

максимально дозволеної швидкості на ділянці, розрахунку кривої гальмування (залежність швидкості від пройденого шляху), зіставленні даних про маршрут з технічними характеристиками поїзда. Прийом, обробка та передача всієї необхідної інформації здійснюється комплексом колійних і бортових пристроїв і систем ETCS (рис.1.8.). Безперервний контроль руху, пристосований до постійної зміни дорожньої обстановки, дозволяє оптимізувати трафік і знизити енерговитрати. [8]

Залежно від застосовуваного рівня ERTMS / ETCS, підсистема колійного та лінійного обладнання може складатися з:

- Євробаліз (Eurobalise);
- лінійних електронних пристроїв (LEU);
- радіо комунікаційної мережі;
- радіо блок-центрів (RBC);
- шлейфу Euroloop;
- пристроїв радіо заповнення (Radio In-fill Unit);

Баліз (Balise) - пасивний транспондер (передавач), що розміщується на шляху і здатний спілкуватися з поїздом, що проходить над ним.

Євробаліза (Eurobalise) - баліза відповідного виконання, розроблена для застосування в системі ERTMS / ETCS. Євробаліза є основним колійним пристроєм системи ERTMS. Конструктивно євробаліза виконана в плоскому корпусі, який розміщується в міжрейковому просторі (рис. 1.7). При проходженні поїзда над євробалізою бортове обладнання локомотива випромінює високочастотний сигнал, за допомогою якого забезпечується електроживлення євробалізи.

LEU використовується як інтерфейс між євробалізою, що перемикається і лінійними пристроями, наприклад, системою автоблокування. LEU отримує дані з управління рухом поїздів і перетворює їх в повідомлення, що передаються відповідним групам баліз для подальшої ретрансляції на поїзд.

Шлейф Euroloop (європетля, Євроконтур) - підсистема ERTMS / ETCS, використовувана для безперервної передачі даних зі шляху на поїзд в період пауз між проходом євробаліз (заповнення пауз).

Пристрій радіо заповнення (Radio In-fill Unit) являє собою підсистему, яка використовується для безперервної передачі даних зі шляху на поїзд.

Єврорадіо представляє собою інтероперабельну систему 1-го класу для обміну повідомленнями між бортовим та лінійним колійним обладнанням для забезпечення безпечного руху поїздів в автоматичних системах управління.

Радіо комунікаційна мережа (GSM-R) використовується для двонаправленого обміну даними між бортовими підсистемами поїзда і радіо блок центром (RBC) або пристроями радіо заповнення.

Радіо блок центр (RBC) - це централізована підсистема, що відповідає за безпеку, яка отримує інформацію від колійних датчиків, систем автоблокування і на цій основі, з урахуванням загальної поїзної обстановки, графіка руху, профілю колії та ін. Формує команди про допустиму швидкість та інтервали попутного прямування між поїздами, які передає на поїзд. [8]

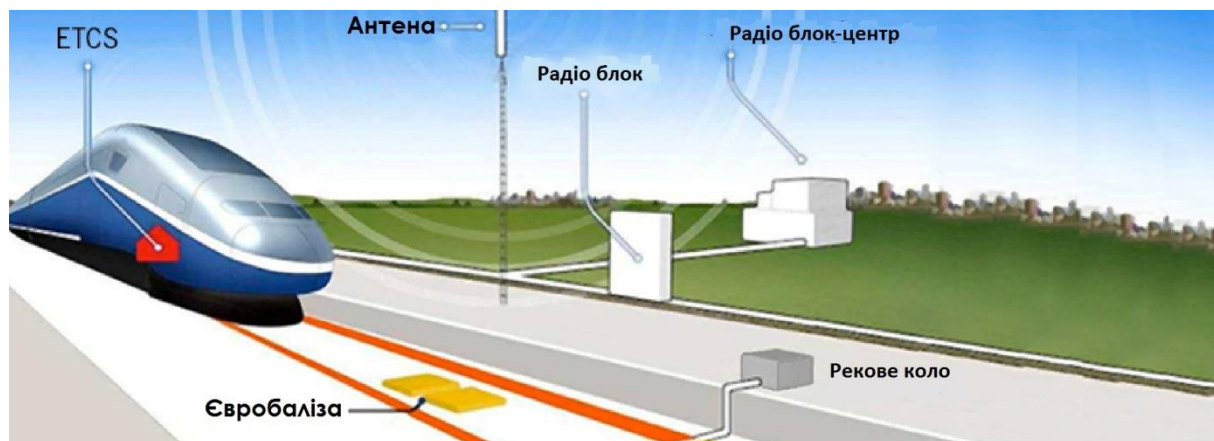


Рис.1.8. Схема взаємодії пристроїв

1.2.2. Рівні ERTMS

В системі ERTMS / ETCS передбачені три рівні, що дозволяють реалізувати різні експлуатаційні програми в залежності від ступеня оснащення лінії колійним обладнанням. Рівні ERTMS розрізняються підсистемами передачі інформації, необхідної для управління рухом, зі шляху на поїзд.

Нульовий рівень

При нульовому рівні наявні колійні пристрої СЦБ не включені в ETCS. Машиніст уважно стежить за сигналами і знаками. Бортова система здійснює контроль тільки дотримання швидкісного режиму для даного типу рухомого складу на пройденій ним ділянці. Даний рівень реалізації не застосуємо на міжнародних маршрутах, оскільки через те, що видимі сигнали в різних країнах відрізняються, при проходженні кордону обов'язкова зміна машиністів.

Рівень 1

ETCS Level 1 може бути легко накладено на існуючу національну сигналізацію і забезпечує сигналізацію кабіни. Органи керування можуть бути надані через фіксовані і перемикаючі євробалізи. Вони також відправляють дані маршруту на бортовий пристрій. З отриманими даними максимальна швидкість, а також криві розлому обчислюються в будь-який час. В додаток до Eurobalises можливо реалізувати EuroLoop (петля) або радіокероване рішення (радіоінформація), яке безперервно передає дані на більшу відстань.

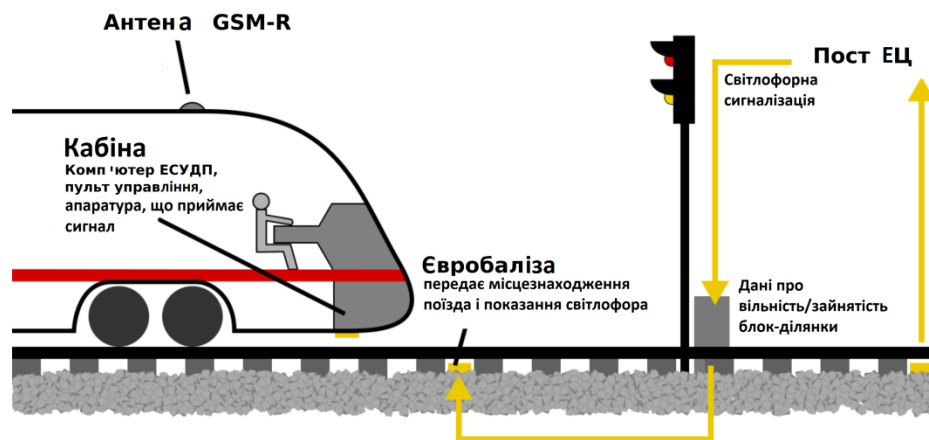


Рис.1.9. Рівень 1 ETCS

Рівень 2

ETCS Level 2 - це радіосистема, яка відображає сигнали сигналізації і руху в кабіні. Поїзд безперервно відправляє дані в Центр радіоблокування (RBC), щоб повідомити про його точне положення і напрямок. Eurobalises використовуються в якості пасивних маяків позиціонування. Поїзди визначають своє місцезнаходження за допомогою додаткових датчиків, таких як акселерометри, одометри або радар.

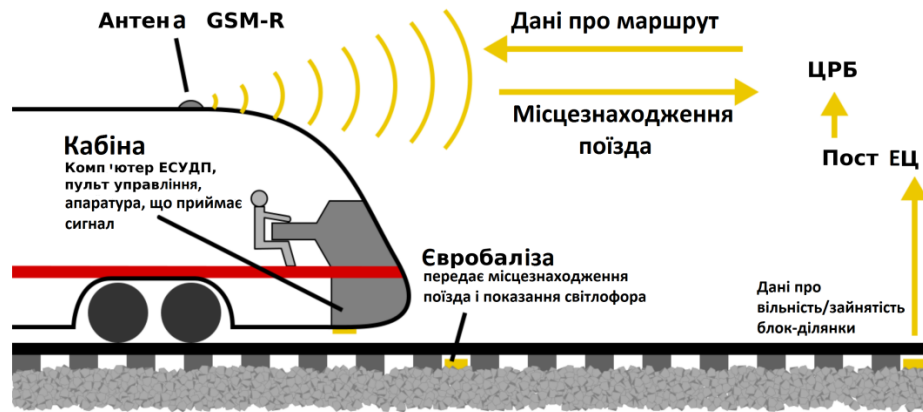


Рис.1.10. Рівень 2 ETCS

Рівень 3

ETCS Level 3 - повністю радіокерована система без будь-якого обладнання для стеження. Центр радіоблокування (РБК) у безперервний спосіб позиціонує кожен поїзд і розраховує мінімально можливі відстані між поїздами в будь-який час. Тому більше не поділяється фіксованими блоками, а розбивається на «рухомі блоки». У той же час життєво важливо, щоб поїзди гарантували їх цілісність, оскільки для надання цієї інформації немає обладнання для стеження. ETCS L3 в даний час все ще знаходиться на стадії стандартизації.

[16]

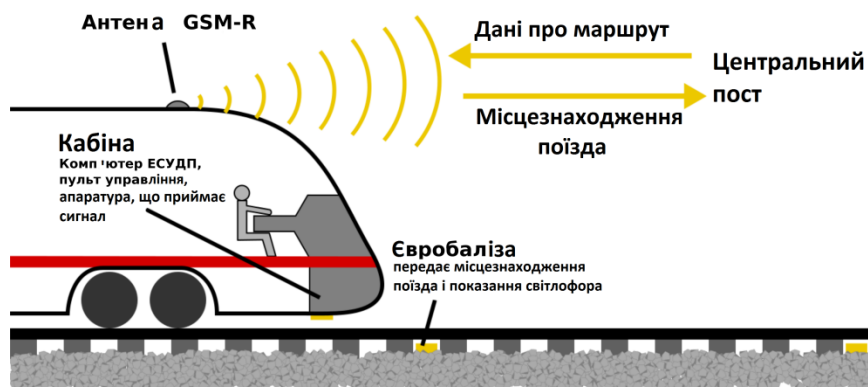


Рис.1.11. Рівень 3 ETCS

1.3. Китайська система керування рухом поїздів CTCS

Історія цифрової залізниці Китаю почалася з прийняття принципів Європейської цифрової сигналізації. У Китаї їх національна система цифрової сигналізації називається CTCS.

Chinese Train Control System (CTCS) - система центру управління рухом поїздів, використовувана на залізничних лініях в Китайській Народній Республіці. CTCS подібний European Train Control System (ETCS). [27]

Як в європейській системі управління рухом поїздів ETCS, в системі CTCS передбачено кілька рівнів, які розрізняються по функціональності і використовуваних технічних засобів:

- CTCS рівня 0 передбачає використання існуючих рейкових кіл і бортової системи сигналізації в кабіні машиніста і контролю за рухом поїзда. При цьому машиніст керується показаннями колійних сигналів; сигналізація в кабіні управління локомотива є допоміжним засобом. Для впровадження CTCS рівня 0 вносити зміни в наявне колійне обладнання не потрібно. Всі необхідні функції виконує бортова мікропроцесорна система LKJ-2000. CTCS рівня 0 забезпечує безпечний рух поїздів зі швидкістю до 120 км / год;
- CTCS рівня 1 включає в себе існуючі рейкові кола (для визначення місця розташування поїзда), колійні прийомовідповідачі і бортову систему CTCS з функцією контролю швидкості. Вона розрахована на максимально допустиму швидкість руху від 120 до 160 км / год. Колійні прохідні сигнали блокування не потрібні, машиніст керується показаннями на пульті управління.
- CTCS рівня 2 включає в себе рейкові кола тональної частоти (цифрові та аналогові), колійні прийомовідповідачі і бортову систему з безпечним комп'ютером. При цьому цифрові рейкові кола здатні передавати на локомотив більший обсяг інформації. Колійні світлофори на перегонах не передбачені. Інтервальний рух поїздів регулюють центри блокування, які взаємодіють з системами централізації. CTCS рівня 2 забезпечує безпечний рух поїздів зі швидкістю більше 160 км / год (до 250 км / год),

контролює відстань до перешкоди і відноситься до систем з точковою і безперервною передачею інформації. Вона може використовуватися в якості резервної системи для CTCS рівня 3;

- CTCS рівня 3 в значній мірі ідентична ETCS рівня 2. В ній використовуються рейкові кола для контролю вільності колії, колійні прийомовідповідачі і бортовий пристрій з безпечним комп'ютером, а також зв'язку з центром радіоблокування;
- CTCS рівня 4. На цьому рівні реалізується принцип рухливих блок-ділянок. Обмін інформацією здійснюється по радіоканалу GSM-R, а для визначення місця розташування поїздів використовуються бортові засоби в поєднанні з супутниковою навігацією або колійними прийомовідповідачами. Бортовий пристрій контролює також повний склад поїзда. Рейкові кола влаштовані тільки на станціях. Таким чином, колійне обладнання зведено до мінімуму, що дозволяє скоротити витрати на технічне обслуговування інфраструктури. Диспетчерське управління дозволяє гнучко регулювати міжпоїзні інтервали в залежності від щільності руху лінії. В даний час CTCS рівня 4 на практиці не реалізована.

Концепція CTCS є достатньо гнучкою та змінюється по мірі розвитку системи.

CTCS рівня 2

Особливістю CTCS рівня 2 є застосування центрів блокування і комбінованої (безперервна і точкова) передачі інформації з колії на поїзд (рис.1.11). Система розрахована на швидкість руху поїздів до 250 км / год (це приблизно половина мережі високошвидкісних ліній в Китаї). Рейкові кола слугують для контролю вільності колії і передають на поїзд інформацію про кількість вільних блок-ділянок перед ним. Активні прийомовідповідачі слугують для передачі на поїзди інформації про тимчасові обмеження швидкості і даних про встановлений маршрут, а пасивні - відомостей про ділянку, постійне обмеження швидкості і довжинах 10 блок-ділянок попереду. Основним завданням бортового пристрою є обробка даних від рейкових кіл і колійних прийомовідповідачів з урахуванням параметрів поїзда для

формування кривої безперервного контролю швидкості і моніторингу безпечного руху поїзда в реальному часі.

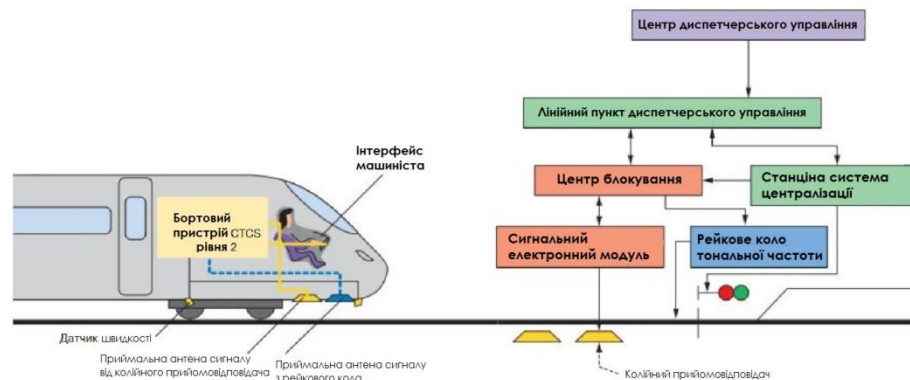


Рис.1.12. Структура системи CTCS рівня 2

Принцип управління рухом поїздів з використанням CTCS рівня 2 передбачає передачу заданих параметрів руху з центру системи диспетчерського управління в її лінійний пункт, з якого в систему централізації надходить команда на установку маршруту, а в центр блокування (Train Control Center, TCC) - інформація про тимчасові обмеження швидкості. Система централізації збирає від рейкових кіл і перевіряє інформацію про стан окремих ізольованих ділянок і положенні стрілок, після чого відповідно до командного центру диспетчерського управління встановлює маршрут і перевіряє стан стрілок і сигналів. Інформацію про маршрут система централізації передає в TCC, який генерує коди для рейкових кіл і повідомлення про маршрут і тимчасові обмеження швидкості для дорожніх прийомовідповідачів. Бортовий пристрій приймає коди з рейкових кіл і повідомлення від колійних прийомовідповідачів, після чого генерує контрольну криву швидкості. CTCS рівня 2 може використовуватися в якості резервної системи на лініях, обладнаних CTCS рівня 3.

CTCS рівня 3

Система CTCS рівня 3 заснована на використанні мережі радіозв'язку GSM-R для обміну інформацією між поїздом і центром радіоблокування, який генерує дозвіл на рух і передає його в бортовий комп'ютер (рис.1.12). Для контролю вільності колії служать рейкові кола. Як і в CTCS рівня 2, пасивні

коліїні приємовідповідачі дозволяють коригувати показання бортових датчиків визначення місця розташування поїзда.

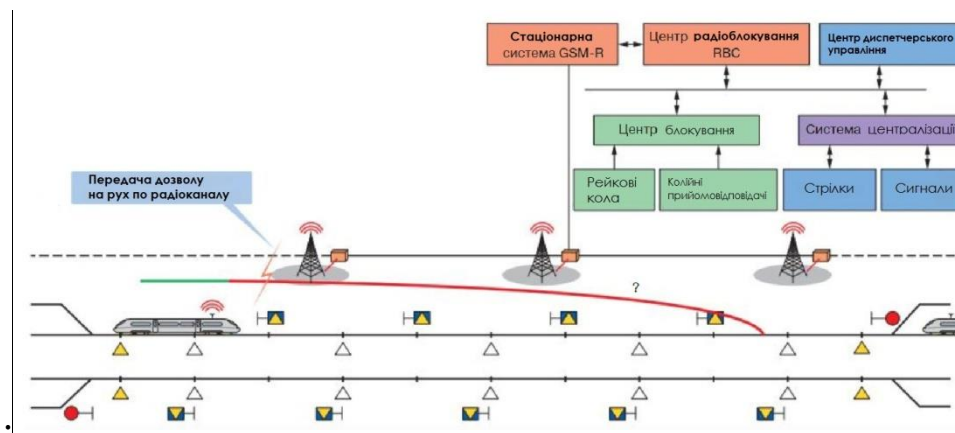


Рис.1.13. Структура системи СТCS рівня 3

Дозвіл на рух формується в центрі радіоблокування на основі команди з центру диспетчерського управління, який збирає з систем централізації інформацію про вільність ділянок шляху і встановлених маршрутах, а також тимчасові обмеження швидкості. Двосторонній обмін інформацією дозволяє контролювати в центрі диспетчерського управління фактичну швидкість поїздів, їх місце розташування, а також технічний стан в реальному часі. Базові станції мережі GSM-R розміщують уздовж лінії таким чином, щоб при виході з ладу однієї базової станції зберігався стійкий радіозв'язок з поїздом. Система дозволяє гнучко призначати тимчасові обмеження швидкості для ділянок довільної довжини. CTCС рівня 3 має дев'ять режимів роботи, в тому числі режими часткового контролю і сигналізації в кабіні машиніста, використовувані для реалізації функцій CTCС рівня 2 [22].

1.4. Система інтервального регулювання руху поїздів на базі радіозв'язку СИРДП-Е

Організація громадського об'єднання «Бомбардье Транспортешн (сигнал)» (спільне підприємство ВАТ «РЖД» і компанії Бомбардье) в 2012 році ввело в експлуатацію систему інтервального регулювання руху поїздів на базі радіоканалу (СІРДП-Е).

Управління рухом поїздів здійснюється по радіоканалу, а безпека руху локомотива знаходиться під повним контролем бортової системи СІРДП-Е.

Система реалізує функції ETCS рівня 3, включаючи контроль повного складу поїзда бортовими засобами і розмежування поїздів рухливими блок-ділянками, а обмін даними з центром радіоблокування здійснюється через систему радіозв'язку стандарту TETRA. При цьому СІРДП-Е може працювати і з іншими стандартами радіозв'язку (GSM-R, DMR).

На першому етапі лінія була обладнана МПЦ з інтегрованим напівавтоматичним блокуванням (ПАБ) зі світлодіодними світлофорами на станціях. Для контролю вільності колії на станціях встановлено системи рахунку осей компанії Бомбард'є. На другому етапі поверх МПЦ з ПАБ було накладено радіоблокування з рухомими блок-ділянками.

Система СІРДП-Е складається зі стаціонарної частини і комплексу бортових систем на локомотиві, контролю і управління рухом, обміну даними по радіоканалу, визначення місця розташування поїзда, вимірювання швидкості і пройденого шляху, розрахунку параметрів руху і кривих швидкості при гальмуванні, контролю цілісності поїзда і інші. Криві швидкості при гальмуванні і мінімальну безпечну відстань між поїздами представлено на рис.1.13.

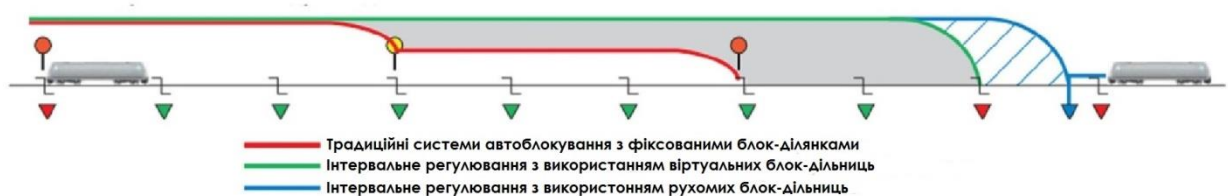


Рис.1.14. Криві швидкості при гальмуванні и мінімальна безпечна відстань між поїздами

Ключовими особливостями системи СІРДП-Е є використання принципу рухомих блок-ділянок для підвищення пропускної здатності ліній. Інтервал попутного прямування між поїздами регулюється виходячи з фактичної швидкості кожного з них і швидкості один щодо одного. На відміну від традиційної системи автоблокування принцип рухливих блок-ділянок передбачає регулювання в розрахунку на координату хвоста поїзда, що попереду, з врахуванням мінімально необхідної захисної ділянки. Архітектура системи СІРДП-Е представлена на рис.1.14.

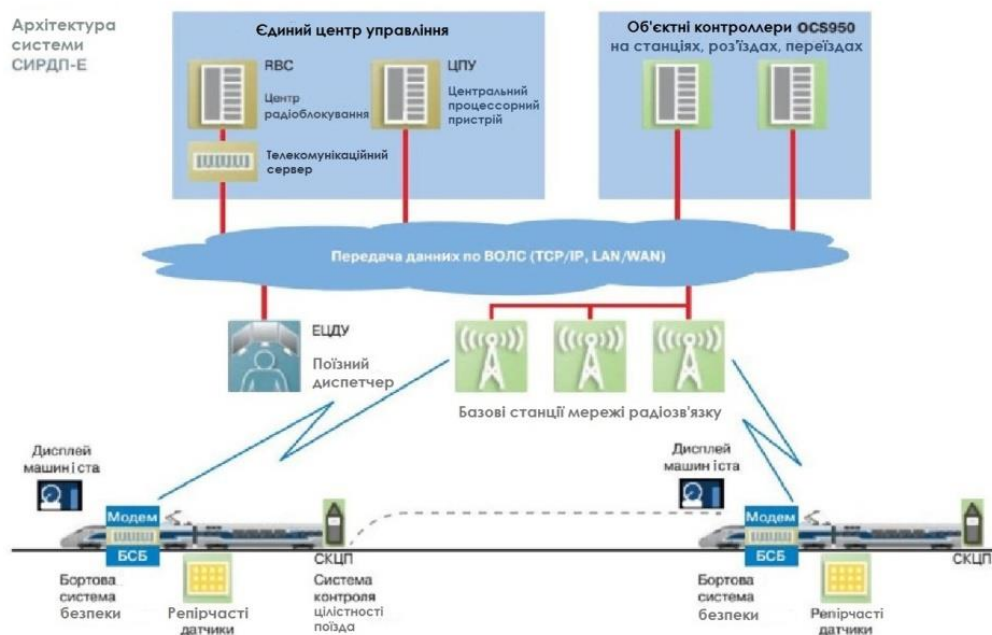


Рис.1.15. Архітектура системи СІРДП-Е

При переході до такої технології ключову роль відіграє система контролю цілісності поїзда (СКЦП), що входить у склад СІРДП-Е, яка дозволяє здійснювати безперервний контроль і передачу інформації про цілісність гальмівної магістралі поїзда в процесі його руху і на стоянках. Для передачі інформації про параметри руху на рухомі одиниці використовується радіоканал. Система дозволяє використовувати радіоканали різних стандартів, що підтримують цифрову передачу даних. Визначення місцезнаходження рухомих одиниць здійснюється за допомогою бортових пристроїв одометра, що входять до складу бортової системи безпеки.

Серед найбільш важливих результатів впровадження системи СІРДП-Е, які безпосередньо стосуються безпеки і ефективності управління рухом поїздів, можна відзначити наступні: 1) істотне підвищення пропускної спроможності, яке досягається за рахунок застосування рухливих блок-ділянок, що дозволяють скоротити інтервал попутного слідування на перегоні до 1,5 хвилини; 2) підвищення безпеки руху поїздів шляхом зниження помилок з боку обслуговуючого персоналу при виконанні маневрових робіт; 3) скорочення чергових по станціях в експлуатаційному штаті за рахунок впровадження диспетчерського управління всією лінією; 4) збільшення надійності і коефіцієнта готовності системи, виражене в гарячому резервуванні

основних елементів системи, в разі виходу з ладу основних засобів управління системи - переходить в захисний стан з безпечним контролем заняття і звільнення поїздом перегону; 5) зниження часу пошуку та усунення несправностей за рахунок широкого набору засобів діагностики і контролю стану системи. Однак, виявити сторонні об'єкти на небезпечних ділянках залізничних колій (переїздах; швидкісних ділянках зі складним рельєфом, з підвищеною імовірністю каменепадів, зсувів і т.д.) і запобігти аварії СІРДП-Е не має можливості. Щоб «побачити» і оцінити ступінь небезпеки описаних вище ситуацій необхідно впроваджувати системи інтелектуального відеоспостереження, які функціонували б спільно з СІРДП-Е [1].

1.5.Висновки по розділу 1

Проведено аналіз існуючих та перспективних систем інтервального регулювання руху поїздів. Розглянуто особливості застосовування в таких системах пристроїв цифрового радіозв'язку. Показано перспективи координатних СІРРП, в яких точка гальмування розраховується з орієнтацією на «хвіст» поїзда, що йде попереду. Це дозволяє суттєво підвищити пропускну спроможність залізничних ліній. Всі контрольні та керуючі функції в таких системах виконуються спеціальними бортовими безпечними програмно-апаратними комплексами.

Розглянуто також стандарти цифрового радіозв'язку, які використовуються в системах інтервального регулювання руху поїздів з цифровими радіоканалами. Проаналізовано їх особливості, переваги та недоліки.

РОЗДІЛ 2. ЗАГАЛЬНІ ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ СИСТЕМИ ІНТЕРВАЛЬНОГО РЕГУЛЮВАННЯ РУХУ ПОЇЗДІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ЦИФРОВОГО РАДІОЗВ'ЯЗКУ

2.1. Структура та принцип дії системи інтервального регулювання руху поїздів із застосуванням цифрового радіозв'язку (СІРРП-Р)

В рамках даної роботи пропонується доповнити традиційні системи залізничної автоматики (автоблокування та електричну централізацію) пристроями цифрового радіозв'язку (рис. 2.1).

Вздовж залізничної лінії розташовується мережа базових станцій цифрового радіозв'язку, які підключаються через волоконно-оптичну лінію зв'язку до центру радіоблокування (RBC). Кожна базова станція забезпечує надійний радіозв'язок з усіма мобільними абонентами в межах своєї «комірки».

Центр радіоблокування керує роботою базових станцій, виконує розподілення їх ресурсів, маршрутизацію викликів, забезпечує виконання процедури «хендовер» та інше. Центр радіоблокування з'єднаний з системами автоблокування, електричної централізації та диспетчерської централізації.

Бортова система безпеки аналізує інформацію, яка надходить з рейкової лінії (код АЛС), інформацію з цифрового радіоканалу, визначає поточне місцезнаходження та швидкість поїзда (за допомогою супутникової навігаційної системи (СНС), а також пристроїв одометрії) та визначає безпечні параметри руху поїзда. Дана інформація відображається на блоці індикації (БІЛ)

Система цифрового радіозв'язку дозволяє виконувати наступні функції:

- 1) Забезпечення додаткового каналу зв'язку для передачі команд АЛС
- 2) Забезпечення основного каналу зв'язку для передачі команд керування рухом поїзда (в координатних системах інтервального регулювання)
- 3) Передача на локомотив відповідальних команд (наприклад, «зупинка поїзда», «дозвіл проїзду червоного сигналу» та ін.)
- 4) Передача на локомотив інформації про тимчасові обмеження швидкості

- 5) Передача в центр блокування інформації про місцезнаходження та швидкість руху поїзда
- 6) Організація службового голосового радіозв'язку (поїзного, станційного, ремонтно-оперативного)
- 7) Надання пасажиром телекомунікаційних послуг протягом поїздки.

2.2. Експлуатаційні рівні системи СІРПП-Р

В залежності від функціональності та використання технічних засобів ми пропонуємо два основних рівні впровадження СІРПП-Р.

2.2.1. Рівень 1

На першому рівні зберігаються традиційні колійні пристрої СЦБ. Довжина кожної блок-ділянки повинна бути не менше гальмівного шляху поїзда. Машиніст керується показаннями колійних сигналів; сигналізація в кабіні управління локомотива є допоміжним засобом. Бортова система безпеки контролює дотримання швидкісного режиму для даного типу рухомого складу на ділянці, яку він прослідує. Як додатковий канал зв'язку використовується радіозв'язок. Для впровадження СІРПП-Р рівня 1 вносити зміни в наявне колійне обладнання майже не потрібно. Структуру СІРПП-Р рівня 1 зображено на рис.2.1.

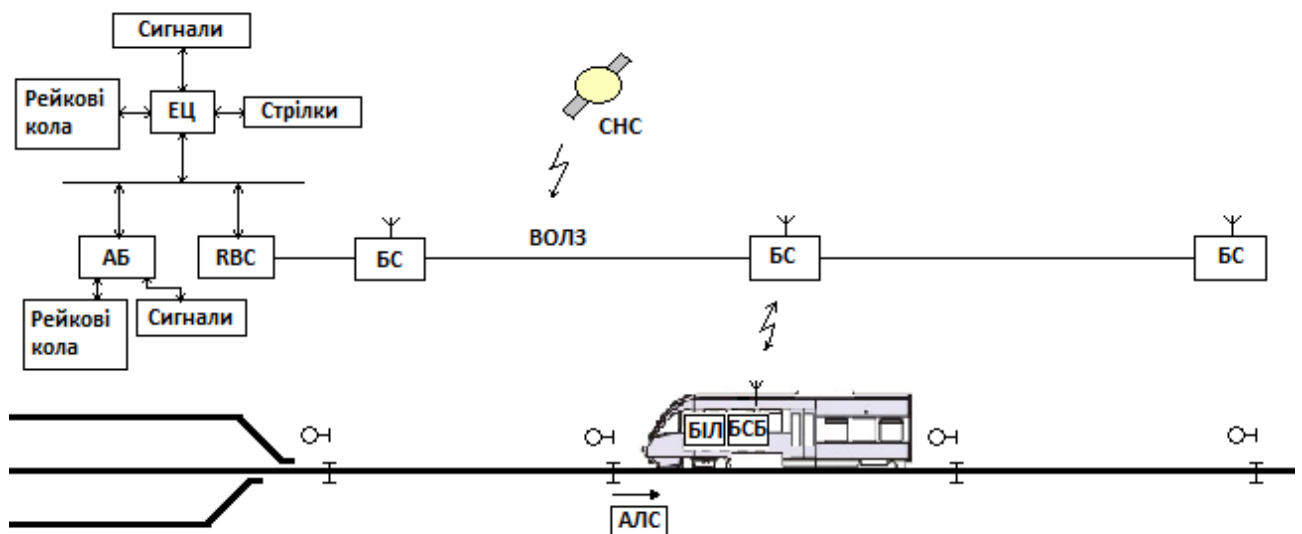


Рис.2.1. Структура СІРПП-Р першого рівня

На рис. 2.1 застосовані наступні позначення:

ВОЛЗ - волоконно-оптична лінія зв'язку

БС – базові станції системи цифрового радіозв'язку

RBC – центр радіоблокування

СНС – супутникова навігаційна система

БСБ – бортова система безпеки (наприклад КЛУ-Б, Improtrain або інші)

БІЛ – блок індикації локомотивний .

2.2.2 Рівень 2

На цьому рівні реалізується принцип рухливих блок-ділянок. Обмін інформацією здійснюється по радіоканалу LTE-R, а для визначення місця розташування поїздів використовуються бортові засоби в поєднанні з супутниковою навігацією. Колійне обладнання зведено до мінімуму, що дозволяє скоротити витрати на технічне обслуговування інфраструктури. Диспетчерське управління дозволяє гнучко регулювати міжпоїзні інтервали в залежності від щільності руху лінії. Центр радіоблокування (RBC) безперервно позиціонує кожен поїзд та розраховує мінімально можливу відстань поїзда в будь-який час. Тому шлях більше не розділяється фіксованими блоками, а розбивається на «блоки, що рухаються».

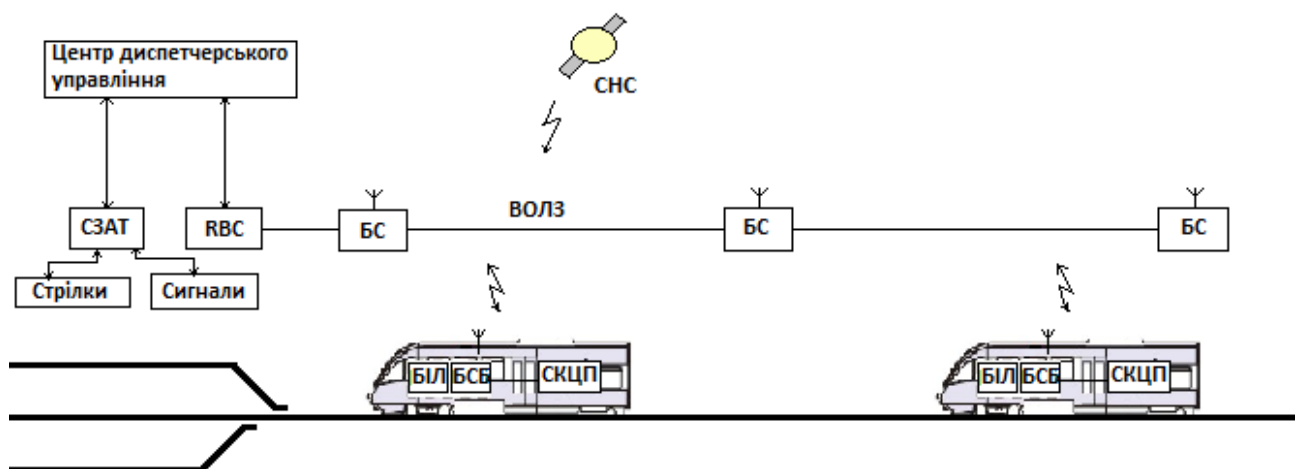


Рис.2.2.Структура CIRPP-R другого рівня

2.3. Принципи функціонування координатної системи інтервального регулювання

Відповідно до теорії автоматичних систем інтервального регулювання, розробленої В.М.Лисенкова, істотною відмінністю координатних систем інтервального регулювання руху поїздів (КСІР) є те, що регулювання руху (швидкості) поїзда здійснюється не на границю блок-ділянки, а на координату «хвоста» поїзда, що йде попереду, з мінімально допустимим міжпоїзним інтервалом, який розраховується з урахуванням реальних гальмівних характеристик обох поїздів. Поява супутникових навігаційних систем, цифрового радіоканалу передачі даних і високоточних мікропроцесорних обчислювальних комплексів, дозволяє реалізувати КСІР на більш високому технічному рівні [18].

Перехід до КСІР з розширеними функціональними можливостями локомотивного пристрою дозволяє, при мінімальних витратах на обладнання залізничних ліній, пристроями КСІР поліпшити показники пропускної спроможності за рахунок скорочення міжпоїзного інтервалу, скоротити кількість колійного обладнання за рахунок розширення функціональних можливостей стаціонарного і бортового обладнання та демонтажу застарілого обладнання, що виконує дублюючі функції, підвищити показники безпеки руху за рахунок застосування безпечних апаратно-програмних комплексів.

Для здійснення координатного інтервального регулювання існуючі бортові і стаціонарні пристрої управління і забезпечення безпеки руху поїздів доповнюються уніфікованим обчислювальним комплексом системи інтервального регулювання (НВК СІР) з блоком контролю і реєстрації параметрів (БКРП), пристроєм визначення довжини поїзда (УОДП), а також сервером пакетного зв'язку (СПС), блоком пакетного зв'язку (БПС) і мобільним пристроєм оповіщення (МОУ) для оповіщення працюючих на шляхах

Система включає в себе уніфікований комплексний локомотивний пристрій безпеки (КЛУБ-У) з розширеними функціональними можливостями, який взаємодіє по цифровому радіоканалу з УВК СІР і пристроями автоматичної переїзної сигналізації з радіоканалом (АПС РК). КЛУБ-У, також

за допомогою БПС здійснює обмін даними з СПС. Локомотивний пристрій включає в себе також пристрій контролю повного складу (УКП). УКП може бути відсутнім в складі локомотивного обладнання, але тоді інтервальне регулювання здійснюється не на «хвіст» поїзда, що йде попереду, а на найближчий по ходу руху поїзда світлофор із заборонним сигналом. Система включає в себе УВК СИР, який взаємодіє по цифровому радіоканалу з КЛУБ-У, а також по міжмодульним інтерфейсам з УОДП, з системою електричної централізації через БРКП і АРМ ДНЦ через систему передачі даних (СПД). Пристрої автоблокування використовуються для інтервального регулювання на перегоні при несправності КСИР або при відсутності зв'язку між попутно рухомими локомотивами. Апаратура системи розташовується також в диспетчерському центрі керування рухом поїздів (ДЦ-УДП) і складається з: автоматизованого робочого місця поїзного диспетчера (АРМ ДНЦ), що підключений до системи передачі даних (СПД). СПС приймає інформацію від БПС локомотивного пристрою безпеки, через GSM сервер, а також інформацію від мобільного пристрою оповіщення (МОУ).

Для визначення координати «хвоста» поїзда на локомотивному пристрої КСИР при відомій координаті голови поїзда необхідно визначити довжину поїзда, тому розроблена методика визначення довжини поїзда засобами стаціонарної апаратури, оснащеної радіоканалом, для визначення координати «хвоста» поїзда. Принцип роботи пристрою визначення довжини поїзда, який реалізує методику, полягає в тому, що момент часу перетину місця установки точкового датчика автозчеплення голови поїзда і момент перетину місця установки точкового датчика автозчеплення замикаючого вагона фіксується точковим датчиком і визначається НВК СИР. Далі ця інформація за допомогою радіозв'язку передається на борт локомотива. А на локомотивному пристрої проводиться розрахунок довжини поїзда, з використанням проміжних значень фактичної швидкості, виміряної між моментами часу. Принцип функціонування координатної системи інтервального регулювання приведено на рис.2.3.

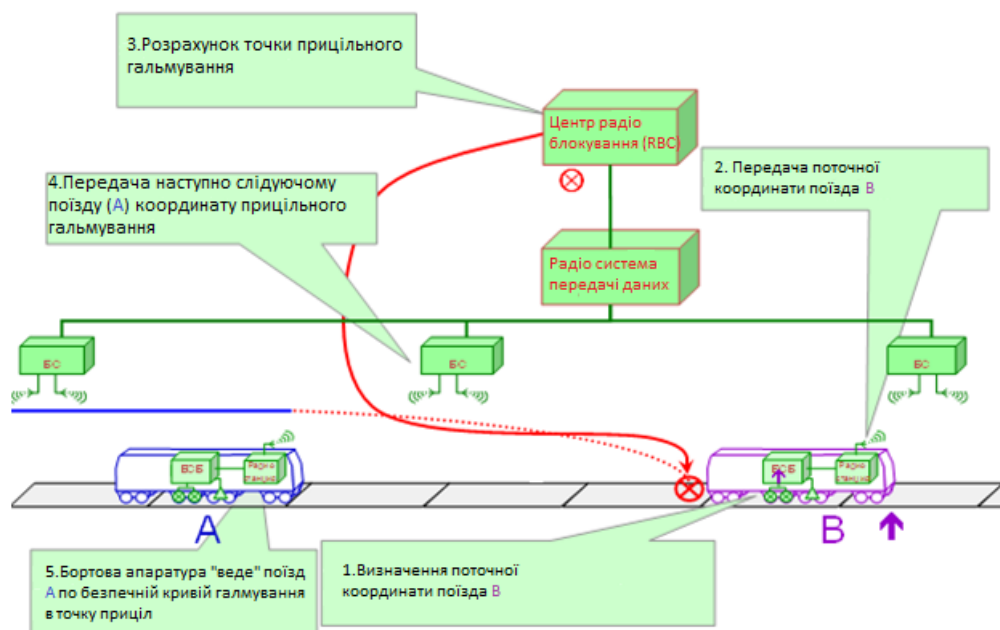


Рис.2.3. Принцип функціонування координатної системи інтервального регулювання

2.4. Висновки по розділу 2

Впровадження системи інтервального регулювання рухом поїздів із застосуванням цифрового радіозв'язку СІРПП-Р (з рухомими блок-ділянками) істотно збільшує пропускну спроможність ділянки в порівнянні з діючими система інтервального регулювання руху поїздів. Перший рівень системи істотно підвищить надійність та зменшить імовірність небезпечної відмови за рахунок застосування супутникової навігаційної системи і цифрового радіоканалу передачі даних в поєднанні з діючою системою автоблокування. За рахунок другого рівня системи здійснюється плавний перехід до координатних систем із застосуванням цифрового радіозв'язку та зменшуються витрати на колійне обладнання. Також потрібно відзначити, що подальше підвищення надійності складових елементів і пристроїв радіоблокування, безпосередньо вплине на поліпшення показників процесу перевезень залізничного транспорту.

РОЗДІЛ 3. ВИЗНАЧЕННЯ ПРОПУСКНОЇ СПРОМОЖНОСТІ КООРДИНАТНОЇ СИСТЕМИ ІНТЕРВАЛЬНОГО РЕГУЛЮВАННЯ РУХУ ПОЇЗДІВ

3.1. Пропускна спроможність перегону при автоблокуванні з 3-х та 4-х значною сигналізацією

Визначимо пропускну спроможність перегону при використанні автоблокування з різною значністю сигналізації. Найбільшого поширення набула тризначна сигналізація, при якій у світлофорів є три сигнальних показання. Сигнал кожного світлофора тризначного блокування є попереджувальним по відношенню до сигналу наступного світлофора (рис.3.1). Тому довжина блок-ділянки при тризначній сигналізації $l_{БЗ}$ визначається відношенням $l_{БЗ} \geq S_{Tmax}$, тобто в даному випадку не потрібно додаткового часу на сприйняття сигналів [15].

Впевнене і плавне ведення поїзда досягається при трьохблочному розмежуванні, коли рух здійснюється за правилом «під зелений на зелений» сигнал. В цьому випадку мінімальна міжпоїзна відстань дорівнює:

$$L_3 = 3l_{БЗ} + l_{п} \quad (3.1)$$

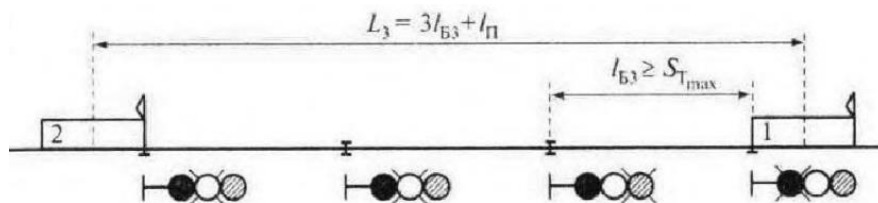


Рис.3.1. Огорожа поїздів при трьохзначній сигналізації

L_3 – мінімальна міжпоїзна відстань при 3-х значній АБ

$l_{БЗ}$ - довжина блок-ділянки при 3-х значній АБ

S_{Tmax} – максимальний гальмівний шлях

$l_{п}$ – довжина поїзда

Час мінімального міжпоїзного інтервалу при 3-х значній АБ визначається наступним виразом [3, 4]:

$$I_3 = F_{min} + 0,06 \frac{3l_{БЗ} + l_{п}}{V_{CP}}, \text{ хвилини} \quad (3.2)$$

$F_{\min}$ - мінімальний додатковий час між відправленнями поїздів

V_{cp} - середня швидкість поїзда [км/год]

0,06 – коефіцієнт переводу 1 км/год в 1 м/хв

При 3-значній АБ міні довжина блок-ділянки обирається по гальмівному шляху вантажного поїзда (але не менше 1000 м). Мінімальний розрахунковий часовий інтервал визначається по найбільшому фактичному інтервалу, що визначається на ділянці найбільш несприятливими умовами для руху. Це обумовлює величину міжпоїзного інтервалу не менше 6 хв.

Разом з тим, при русі поїздів з різними швидкостями, довжинами і гальмівними характеристиками, бажано забезпечити максимальну пропускну спроможність. Такими ділянками є приміські зони великих міст. Для досягнення максимальної пропускну спроможності таких ділянок застосовують чотиризначну сигналізацію, при якій червоний і жовтий вогні світлофорів передають машиністам поїздів ту ж інформацію, що і при тризначній сигналізації; вогні жовтий із зеленим означають вільність за ними двох блок-ділянок та цілісність рейкової лінії в їх межах, а зелений вогонь світлофора означає вільність не менше трьох блок-ділянок та цілісність рейкової лінії в їх межах (рис. 3.2).

Таким чином, при чотиризначній сигналізації вводиться одне додаткове сигнальне показання у вигляді двох одночасно палаючих вогнів - жовтого і зеленого.

Довжина однієї блок-ділянки при чотиризначній сигналізації визначається з умови: $2l_{Б4} \geq S_{Tmax}$.

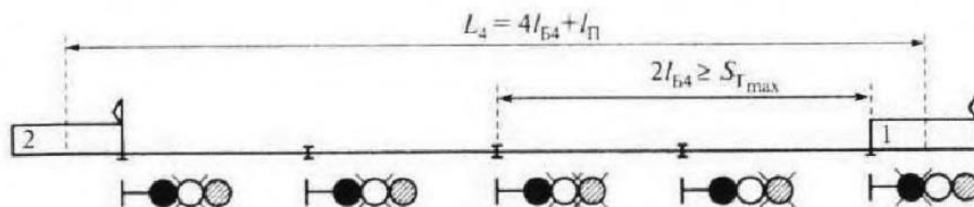


Рис.3.2. Огорожа поїздів при чотиризначній сигналізації

Крім того, довжина кожної блок-ділянки повинна бути не менше максимальної довжини гальмівного шляху тієї категорії поїздів, для яких вона є мінімальною. До таких поїздів відносяться приміські електропоїзди.

Сума довжин кожної пари суміжних блок-ділянок при чотиризначній сигналізації повинна бути не менше максимальної довжини гальмівного шляху тієї категорії поїздів, які мають максимальну довжиною гальмівного шляху. До таких поїздів відносяться, наприклад, швидкісні потяги або деякі види вантажних поїздів.

Довжина кожної блок-ділянки повинна бути еквівалентна половині максимальної довжини гальмівного шляху швидкісного поїзда.

Жовтий вогонь при чотиризначній сигналізації розцінюється як команда машиністу приміського електропоїзда почати зниження швидкості поїзда з метою його зупинки перед світлофором з червоним вогнем. Для машиніста швидкісного поїзда командою на зниження швидкості є сигнал у вигляді комбінації зеленого і жовтого вогнів світлофора.

Рух приміських електропоїздів здійснюється «під зелений вогонь на жовтий вогонь з зеленим»; швидкісні поїзди при чотириблочному розмежуванні рухаються «під зелений вогонь на зелений».

Мінімальна відстань зближення при чотириблочному розмежуванні дорівнює:

$$L_4 = 4l_{Б4} + l_{II} \quad (3.3)$$

L_4 - мінімальна міжпоїзна відстань при 4-х значній АБ

$l_{Б4}$ - довжина блок-ділянки при 4-х значній АБ

Порівнюючи величини L_3 і L_4 , можна встановити, що

$$L_3 - L_4 = 2l_{Б4} = l_{Б3} \quad (3.4)$$

Таким чином, чотиризначна сигналізація дозволяє скоротити мінімальну відстань зближення на величину $l_{Б3}$.

Мінімальний розрахунковий часовий інтервал визначається за найбільшим фактичним інтервалом, що визначається на ділянці з найбільш несприятливими умовами для руху.

Час мінімального міжпоїзного інтервалу при 4-х значній АБ [3, 4]:

$$I_4 = F_{\min} + 0,06 \frac{4l_{Б4} + l_{II}}{V_{CP}}, \text{ хвилини} \quad (3.5)$$

Зі збільшенням значності АБ мінімально допустимі інтервали між попутними поїздами зменшуються і, як наслідок, збільшується пропускна здатність ділянок, дільнична швидкість поїздів.

Розглянуті вище результати оцінок ефективності систем АБ в повній мірі відносяться до систем, в яких використані рейкові кола з ізолюючими стиками. Ефективність систем АБ з рейковими лініями необмеженої довжини буде трохи нижче через явища «додаткового шунтування». Це явище обумовлює збільшення розрахункового міжпоїзного інтервалу на 2-4%, що практично не впливає на пропускну здатність ділянок.

3.2. Особливості координатних систем інтервального регулювання

Істотними відмінностями координатних систем інтервального регулювання (ІР-К) від традиційних систем автоблокування є:

- регулювання руху (швидкості) поїзда на координату хвоста поїзда, що йде попереду, а не на границю блок-ділянки;
- розрахунок мінімально допустимого по умовам безпеки руху міжпоїзного інтервалу з урахуванням реальних гальмівних характеристик обох поїздів.

Дослідження методів розширення функціональних можливостей бортових і стаціонарних пристроїв забезпечення безпеки руху, що використовують супутникові навігаційні системи та цифровий радіоканал передачі даних, є актуальним завданням науково-технічного розвитку.

Розвиток в Європі КСІР зумовило те, що система ERTMS рівня 2 з фіксованими блок-ділянками впроваджується і функціонує на лініях європейських залізниць. Система ERTMS рівня 3 з рухомими блок-ділянками ще не реалізована і знаходиться на стадії теоретичних досліджень, в тому числі через те, що методи вдосконалення і розширення функціональних можливостей локомотивних пристроїв не досить глибоко досліджені стосовно їх реалізації на базі конкретних програмно-апаратних коштів, мало опрацьовані питання контролю довжини складу.

Регулювання руху виконується на координату хвоста поїзда, що йде попереду, а не на границю блок-ділянки

Час мінімального міжпоїзного інтервалу при координатній СІРДП розраховується згідно із наступним виразом [3, 4]:

$$I_{\text{коорд}} = F_{\text{min}} + 0,0046 \frac{V}{2a} + 0,06 \frac{L_{\text{вирт}}^{\text{загр}} + l_{\text{п}} + \Delta l_{\text{п}} + 2 \cdot \Delta l_{\text{СП}}}{V}, \text{ хвилини} \quad (3.6)$$

0,0046 – коефіцієнт перевodu 1 (км*с²)/(год*м) в 1 хв

0,06 - коефіцієнт перевodu 1 км/год в 1 м/хв

$L_{\text{вирт}}^{\text{загр}}$ - віртуальна загороджувальна ділянка [м]

$l_{\text{п}}$ - довжина поїзда [м]

$\Delta l_{\text{п}}$ - помилка визначення довжини поїзда [м]

$\Delta l_{\text{СП}}$ - помилка визначення координати голови поїзда

V - розрахункова швидкість

a - прискорення гальмування [м/с²]

Пропускна спроможність ділянки визначається наступним чином:

$$N = \frac{1440}{I} \quad (3.7)$$

I - міжпоїзний інтервал

1440 – число хвилин на добу

В ряді систем ІР-К при розрахунку мінімального міжпоїзного інтервалу передбачається, що швидкість першого поїзда не може прийняти в будь-який момент часу значення, рівне нулю. Тоді мінімальна відстань між поїздами стає рівна довжині гальмівного шляху другого поїзда, тобто довжині однієї блок-ділянки, як в системі тризначного автоблокування. Тому такі системи називаються ще системами з рухомими блок-ділянками, так як положення безпечної ділянки між поїздами переміщається разом з їх рухом.

Системи інтервального регулювання з віртуальними блок-ділянками (ІР-В) відрізняються тим, що інтервальне регулювання при їх застосуванні ґрунтується на використанні блок-ділянок, як і в системах АБ, але не на реальних, а на тих, що існують лише в математичних моделях перегонів.

Алгоритми функціонування систем ІР-К і ІР-В різні, але вони відрізняються від систем інтервального регулювання на базі АБ, АЛС і САУТ тим, що всі функції кожної з цих систем виконує єдиний апаратно-програмний комплекс. Ця загальна відмітна ознака дозволяє розглядати їх спільно - як новий клас перспективних систем інтервального регулювання.

Розробка ІР-К і ІР-В в різних країнах обґрунтовується необхідністю врахування різних експлуатаційних факторів. Так, наприклад, в Японії застосування ІР-К обґрунтовується необхідністю забезпечення високої інтенсивності руху на ділянках, де швидкість руху вантажних і пасажирських поїздів істотно розрізняються, а застосування традиційних систем не дає необхідного позитивного ефекту.

У Європі в рамках створення Загальноєвропейської системи управління рухом поїздів (ETSC) первісною причиною створення ІР-К було прагнення застосування уніфікованої системи, яка дозволяла б без затримок перетинати кордони різних країн Європи.

Пізніше придбав значимість і інший фактор, а саме економічна доцільність максимального скорочення колійного обладнання.

У США доцільність застосування систем ІР-В обґрунтовується можливістю збільшення середньої технічної швидкості руху поїздів за рахунок переходу від східчастих кривих гальмування до плавним.

Актуальність застосування ІР-К на залізницях України обумовлена необхідністю збільшення:

- пропускної спроможності на ділянках зі змішаним рухом, де швидкість руху приміських, вантажних і пасажирських поїздів істотно відрізняється
- пропускної спроможності тимчасово одноколійних ділянок в період надання «вікон» для будівельно-монтажних і ремонтних колійних робіт;
- пропускної спроможності окремої ділянки, що лімітує результативну пропускну спроможність цілого напрямку перевезень;
- пропускної спроможності транспортних коридорів;

— пропускної спроможності одноколійних ділянок.

Крім того, впровадження IP-К на залізницях України доцільно і з міркувань необхідності гармонізації руху високошвидкісних і звичайних поїздів, як в Японії, а також скорочення обсягу колійного обладнання систем управління рухом, як у Європі.

Системи IP-К і IP-В в залежності від місця розташування ФКУ підрозділяються:

- на централізовані;
- децентралізовані;
- комбіновані.

З огляду на те що найважливішим елементом систем IP-К і IP-В є система зв'язку для обміну інформацією між станційними і локомотивними пристроями цих систем, вони поділяються на системи:

- з індукованим зв'язком;
- з радіозв'язком;
- з супутниковим радіозв'язком.

Залежно від видів джерел інформації, що використовуються, про параметри руху поїзда системи IP-К і IP-В підрозділяються на системи:

- з осьовими датчиками інформації;
- радіолокаційними локомотивними датчиками інформації;
- радіонавігаційними супутниковими датчиками інформації;
- лініями індуктивного зв'язку.

3.3. Результати розрахунків

За допомогою математичного пакета Matlab були проведені розрахунки пропускної спроможності перегону. На першому етапі була розглянута система трьохзначного автоблокування при різних значеннях довжини блок-ділянки: 1000 м, 1300 м, 2000 м та 2600 м. Отримана залежність пропускної спроможності від розрахункової швидкості руху поїзда представлена на рис. 3.3 (залежності 1, 2, 3, 4).

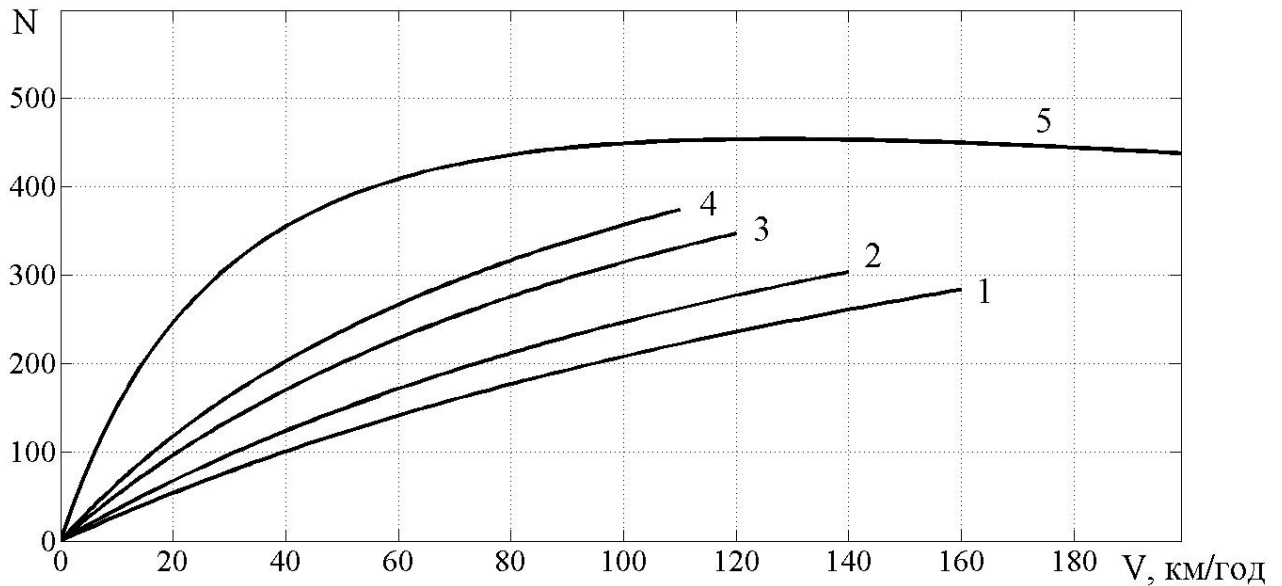


Рис. 3.3. Залежність пропускної спроможності перегону від розрахункової швидкості поїзда: 1 – $l_{63} = 2600$ м; 2 – $l_{63} = 2000$ м; 3 – $l_{63} = 1300$ м; 4 – $l_{63} = 1000$ м; 5 – координатна СІРРП

На другому етапі згідно із виразами (3.6), (3.7) була розрахована пропускна спроможність перегону при застосуванні координатної системи інтервального регулювання. Розрахунки проводились для наступних параметрів: $F_{\min} = 1$ хв, $l_{\Pi} = 400$ м, $L_{\text{вирт}} = 1000$ м, $a = 0,5$ м/с², $\Delta l_{\Pi} = 20$ м, $\Delta l_{\text{сп}} = 15$ м. Результати представлені на рис. 3.3 (залежність 5).

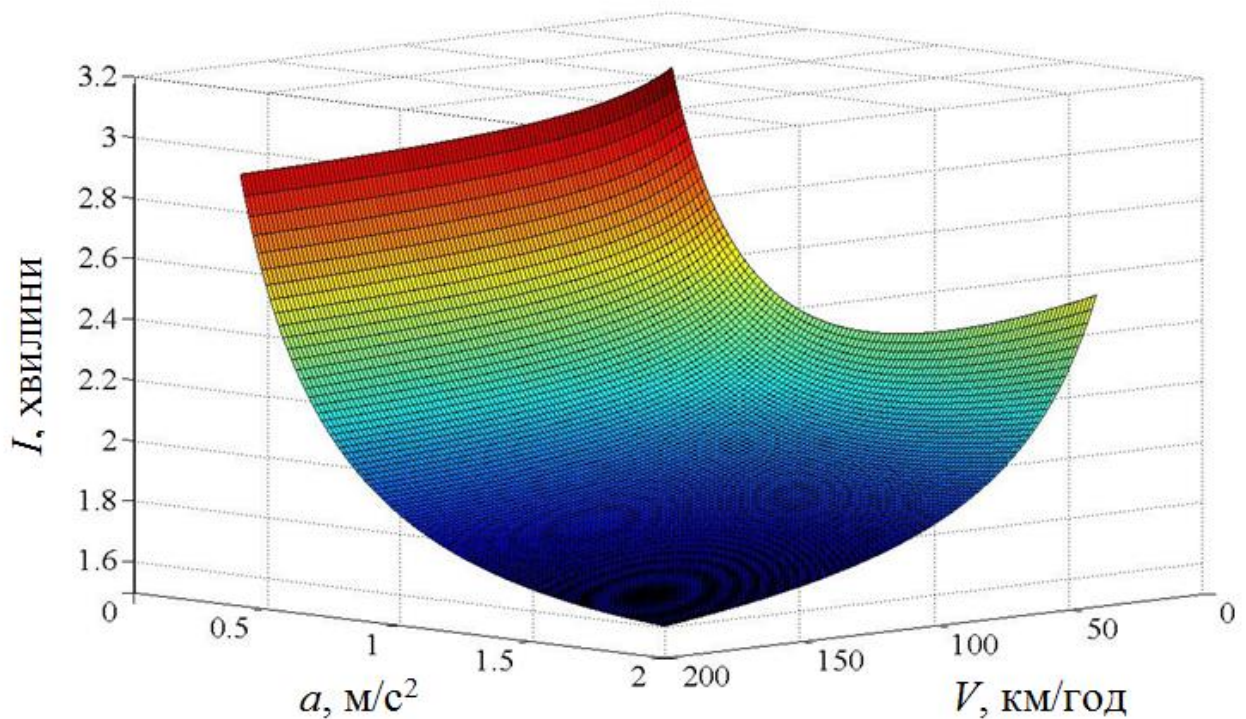


Рис. 3.4. Залежність між поїзного інтервалу від швидкості руху поїзда та прискорення гальмування

Як показують результати розрахунків при використанні традиційного трьохзначного автоблокування зі збільшенням швидкості поїзда пропускна спроможність монотонно зростає. При чому чим менше довжина блок-ділянки, тим більша пропускна спроможність. Проте з урахуванням гальмівного шляху є обмеження на максимальну швидкість. Наприклад для блок-ділянки без нахилу довжиною 1000 м максимально можлива швидкість пасажирського поїзда складає 110 км/год, а при довжині 1300 м – 120 км/год. Координатна СІРПП забезпечує суттєво вищу пропускну спроможність перегону у порівнянні з трьохзначним автоблокуванням. При цьому залежність пропускну спроможності від швидкості руху поїзда має екстремум. Тобто є оптимальна швидкість, при якій забезпечується максимально можлива пропускна спроможність.

Також була побудована залежність міжпоїздного інтервалу для координатної СІРПП від швидкості руху поїзда та прискорення гальмування, яке змінювали від 0,4 до 2 м/с². Результати представлені на рис. 3.4. Як видно міжпоїздний інтервал зменшується не лише зі збільшенням швидкості руху поїзда, але і зі збільшенням прискорення гальмування. Таким чином, координатну СІРПП доцільно застосовувати на швидкісних та високошвидкісних ділянках, де поїзди мають високі швидкості та прискорення гальмування, а також на ділянках зі змішаним рухом.

3.4. Висновки по розділу 3

Перехід до координатних систем інтервального регулювання руху поїздів дозволяє суттєво скоротити міжпоїзні інтервали та підвищити пропускну спроможність перегону. Особливо ефективним є впровадження таких систем на швидкісних та високошвидкісних ділянках, а також ділянках зі змішаним рухом, де рухаються поїзди з різними швидкостями, довжинами і гальмівними характеристиками.

РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ЦИФРОВОГО РАДІОЗВ'ЯЗКУ З РУХОМИМИ ОБ'ЄКТАМИ

При проектуванні мережі цифрового радіозв'язку для залізничного транспорту необхідно вирішити наступні задачі:

- 1) Вибір стандарту цифрового радіозв'язку
- 2) Вибір частотного діапазону
- 3) Вибір ширини частотної полоси
- 4) Визначення радіуса дії кожної базової станції
- 5) Визначення ємності кожної базової станції

4.1. Аналіз існуючих стандартів цифрового радіозв'язку з рухомими об'єктами

Якісний радіозв'язок - обов'язкова умова організації залізничних перевезень. Сучасні системи управління рухом поїздів використовують як голосовий радіозв'язок, так і канали передачі даних для інформаційно-керуючих систем.

Щоб забезпечити вирішення всіх завдань, пов'язаних з обміном інформацією між наземною інфраструктурою і рухомими об'єктами на ділянці зі швидкісним рухом, залізничний радіозв'язок повинен включати наступне:

- цифрові системи технологічного радіозв'язку;
- систему технологічного та ремонтно-оперативного радіозв'язку (РОРС) на базі мереж рухомого зв'язку комерційних операторів (по таким радіомережам може передаватися тільки інформація, не пов'язана з безпекою руху поїздів);
- цифрову бездротову систему передачі даних (БСПД) для інформаційно-керуючих систем (ИУС) [20].

В даний час в системах ІРРП йде процес розширення використання цифрових радіоканалів. На залізницях світу в системах ІРРП використовуються стандарти цифрового радіозв'язку GSM, GSM-R, TETRA.

GSM - глобальний стандарт цифрового мобільного стільникового зв'язку з розділенням каналів за часом (TDMA) і частотою (FDMA). Стандарт

розроблений в кінці 1980-х під егідою Європейського інституту стандартизації електрозв'язку (ETSI) групою Groupe Special Mobile, яка пізніше була перейменована в Global System for Mobile Communications. На базі цього стандарту було розроблено стандарт мобільного зв'язку для залізничних перевезень GSM-R (GSM-Railway), який забезпечує захищений голосовий зв'язок і передачу даних між залізничними службами і поїздами. Аббревіатура TETRA до квітня 1997 р. означала трансєвропейське транкінгове радіо (Trans-European Trunked Radio). Згодом, коли інтерес до стандарту TETRA розширився за межі Європи, сенс аббревіатури TETRA змінився і став розшифровуватись як Наземне транкінгове радіо (Terrestrial Trunked Radio). [26]. Проаналізуємо особливості кожного із стандартів цифрового радіозв'язку.

4.1.1. Система мобільного зв'язку GSM

GSM - це стандарт мобільних мереж другого покоління 2G, система з комутацією каналів. Вона розділяє всі канали 200кГц на вісім часових інтервалів 25кГц. Стандарт працює на трьох різних несучих частотах: 900МГц, яка використовувалася вихідною системою GSM; 1800МГц, яка була додана для підтримки числа абонентів, що збільшуються і частоти 1900МГц, яка використовується, головним чином, в США. Діапазон 850 МГц також використовується для GSM і 3GSM в Австралії, Канаді та багатьох країнах Південної Америки. GSM підтримує швидкість передачі даних до 9,6 кбіт / с, що дозволяє передавати базові послуги передачі даних, такі як SMS. Іншою важливою перевагою є можливість міжнародного роумінгу. Супутниковий роумінг GSM також розширив доступ до послуг у районах, де наземне покриття поза зоною досяжності.

Різниця між GSM-900 та GSM-1800 полягає в тому, що GSM-900 має подвійне охоплення порівняно з GSM-1800. Це пов'язано з тим, що в міру збільшення частоти розмір чарунки зменшується через збільшення втрат в дорозі. Тому для забезпечення повного охоплення конкретної території в GSM-1800 необхідно встановити більшу кількість веж, ніж в GSM-900. Але оскільки в діапазонах GSM-1800 є більше частот, більше можливостей, можна

забезпечити хороший трафік. Це дозволяє GSM-1800 обробляти більше абонентів, ніж GSM-900. Баланс обох може допомогти досягти хорошого охоплення. [30]

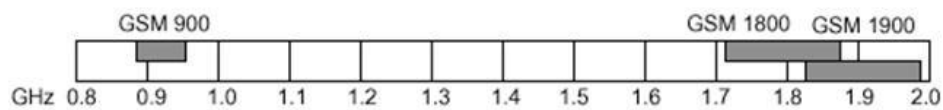


Рис.4.1. Частотні діапазони GSM

Система GSM складається з трьох основних підсистем:

- підсистема базових станцій (BSS — Base Station Subsystem),
- підсистема комутації (NSS — Network Switching Subsystem),
- центр технічного обслуговування (OMC — Operation and Maintenance Centre).

В окремий клас устаткування GSM виділені термінальні пристрої - мобільні станції (MS - Mobile Station), також відомі як мобільні (стільникові) телефони.

Підсистема базових станцій. BSS складається з власне базових станцій (BTS - Base Transceiver Station) і контролерів базових станцій (BSC - Base Station Controller). Діаметр кожної шестикутної чарунки може бути різним - від 400 м до 50 км. Максимальний теоретичний радіус чарунки становить 120 км, що обумовлено обмеженою можливістю системи синхронізації до компенсації часу затримки сигналу.

Базова станція (BTS) забезпечує прийом / передачу сигналу між MS і контролером базових станцій. BTS є автономною і будується за модульним принципом. Спрямовані антени базових станцій можуть розташовуватися на вишках, дахах будівель і т.д.

Контролер базових станцій (BSC) контролює з'єднання між BTS і підсистемою комутації. У його повноваження також входить управління черговістю з'єднань, швидкістю передачі даних, розподіл радіоканалів, збір статистики, контроль різних радіовимірів, призначення та управління процедурою Handover.

Підсистема комутації. NSS складається з нижченаведених компонентів.

Центр комутації (MSC — Mobile Switching Center). MSC контролює певну географічну зону з розташованими на ній BTS і BSC. Здійснює установку з'єднання до абонента і від нього всередині мережі GSM, забезпечує інтерфейс між мережами радіозв'язку, мережами передачі даних. Також виконує функції маршрутизації викликів, управління викликами, естафетної передачі обслуговування при переміщенні MS з однієї комірки в іншу. Після завершення виклику MSC обробляє дані по ньому і передає їх в центр розрахунків для формування рахунку за надані послуги, збирає статистичні дані. MSC також постійно стежить за становищем MS, використовуючи дані з HLR і VLR, що необхідно для швидкого знаходження і встановлення з'єднання з MS в разі її виклику.

Домашній реєстр місця розташування (HLR — Home Location Registry). Містить базу даних абонентів, приписаних до нього. Тут міститься інформація про надані даному абоненту послуги, інформація про стан кожного абонента, необхідна в разі його виклику, а також Міжнародний Ідентифікатор Мобільного Абонента (IMSI - International Mobile Subscriber Identity), який використовується для аутентифікації абонента (за допомогою AUC). Кожен абонент приписаний до одного HLR. До даних HLR мають доступ всі MSC і VLR в даній GSM-мережі, а в разі міжмережевого роумінгу - і MSC інших мереж.

Підсистема OMC (Operations and Maintenance Center). З'єднана з іншими компонентами мережі та забезпечує контроль якості роботи і управління всією мережею. Обробляє аварійні сигнали, при яких потрібне втручання персоналу. Забезпечує перевірку стану мережі, можливість проходження виклику. Виконує оновлення програмного забезпечення на всіх елементах мережі і ряд інших функцій.

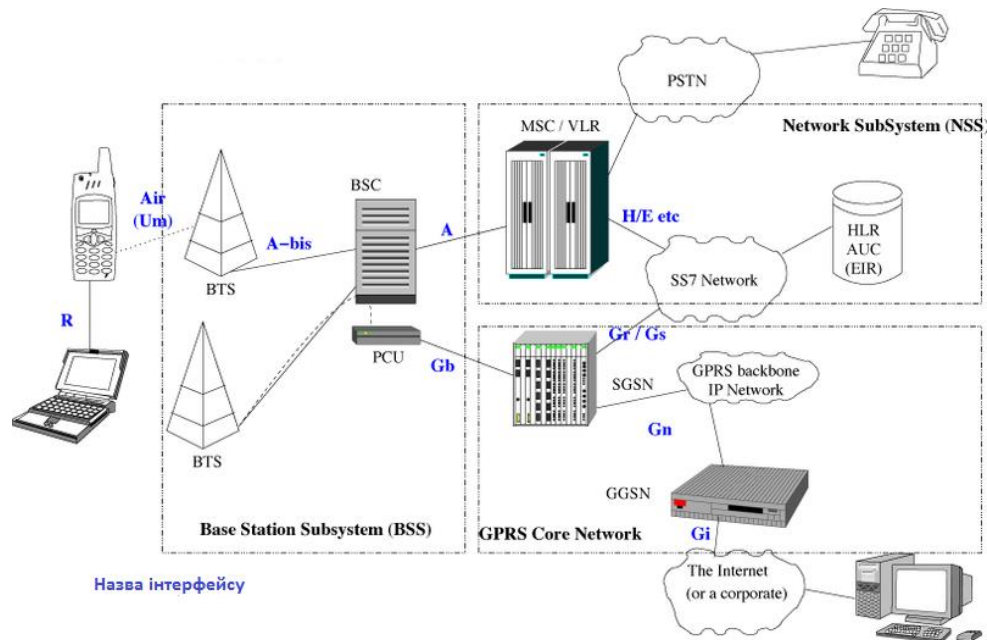


Рис.4.2. Структура мережі GSM (ключові елементи)

Переваги стандарту GSM:

- менші, у порівнянні з аналоговими стандартами, розміри і вага телефонних апаратів при більшому часу роботи без підзарядки акумулятора. Це досягається в основному за рахунок апаратури базової станції, яка постійно аналізує рівень сигналу, що приймається від апарату абонента. У тих випадках, коли він вище необхідного, на стільниковий телефон автоматично подається команда знизити потужність, що випромінюється;
- гарна якість зв'язку при достатній щільності розміщення базових станцій;
- велика ємність мережі, можливість великого числа одночасних з'єднань;
- низький рівень індустріальних перешкод в даних частотних діапазонах;
- поліпшений (в порівнянні з аналоговими системами) захист від підслуховування і нелегального використання, що досягається шляхом застосування алгоритмів шифрування;
- ефективне кодування (стиснення) мови;
- широке розповсюдження, особливо в Європі, великий вибір обладнання;
- можливість роумінгу.

Недоліки стандарту GSM:

- спотворення мови при цифровій обробці і передачі;

- зв'язок можливий на відстані не більше 120 км від найближчої базової станції навіть при використанні підсилювачів і спрямованих антен. Тому для покриття певної площі необхідна більша кількість передавачів. [19]

4.1.2. Система мобільного зв'язку GSM – R

GSM-R - стандарт радіозв'язку Європейської системи управління рухом поїздів. GSM-R - бездротова комунікаційна платформа підвищеної надійності для залізниць реалізована на основі GSM. Від звичайного стандарту його відрізняє підтримка деяких спеціальних функцій, розроблених на замовлення залізничників. Призначена для зв'язку поїздів з керуючими центрами, а також забезпечення роботи додатків, управління трафіком. Гарантує зв'язок при швидкості руху до 500 км / ч. [29]

Мережі GSM-R в Європі створюються за вимогами EIRENE (European Integrated Railway Radio Enhanced Network - європейська інтегрована залізнична мережа радіозв'язку), що забезпечує зокрема набір сервісів, експлуатаційну сумісність і координацію частот. Для системи GSM-R виділена смуга шириною 4 МГц в діапазоні 876-880 МГц для передачі від рухомої до базової станції і 921-925 МГц для передачі від базової до мобільної станції. У цій смузі можна розмістити до 19 часових каналів полосою по 200 кГц з частотно-часовим поділом.

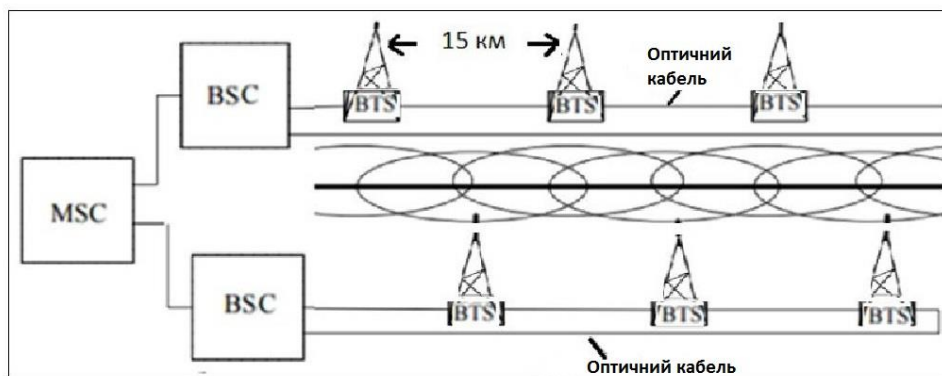


Рис. 4.3. Два набори чергування базових станцій BTS з кільцевими з'єднаннями по оптичним кабелям

На рис. 4.3 показані три основних вузла мобільної мережі GSM-R (в традиційній мережі GSM вони виконують ті ж функції):

- BTS – Базова приймально-передавальна станція забезпечує радіозв'язок в певній зоні;
- BSC – Контролер базової станції виконує безліч функцій: управління розподілом каналів; контроль з'єднання і регулювання їх черговості; модуляція і демодуляція сигналів; кодування і декодування повідомлень; кодування мови; адаптацію швидкості передачі мови, даних і сигналів виклику; управління черговістю передачі повідомлень персонального виклику;
- MSC – Центральний комутатор рухомого зв'язку (аналог великого телефонного вузла) обслуговує групу зон і забезпечує всі види з'єднань з мобільними станціями.

Радіовежі BTS встановлюються з 50% -м перекриттям зон сусідніх сот для того, щоб забезпечити високі вимоги залізниці по надійності зв'язку при високих швидкостях руху (до 500 км). В результаті, відстань між сусідніми вежами вздовж дороги становить всього 7 - 15 км. Уздовж дороги прокладено дві пари оптичних кабелів (теж для надійності) для підключення двох рядів BTS. За вимогами EIRENE поїзна бригада повинна мати сполучення з центром управління безперервно. У разі ж втрати зв'язку поїзд зупиняється.

GSM-R є закритою мережею. У мережі GSM-R кожен абонент має не тільки особливий «функціональний» номер, який залежить від того, яку функцію виконує даний абонент в процесі залізничних перевезень (диспетчер, машиніст, начальник поїзда, обхідник, зчіплювач і т.п.), але і пов'язані з виконуваною функцією права здійснення виклику і пріоритет обслуговування. Наприклад, диспетчер має більш високий пріоритет, ніж інші абоненти. Найвищий же пріоритет має аварійний виклик. При появі такого виклику від одного з абонентів на даній ділянці шляху система забезпечує розрив з'єднань з більш низьким пріоритетом і оповіщення про аварійну ситуацію. Планом нумерації мережі GSM-R передбачається адресація практично всього персоналу, який бере участь в забезпеченні процесу залізничних перевезень, починаючи від машиніста, начальника поїзда, провідників до офіціантів вагона-ресторану. Для всіх передбачена своя область в плані нумерації [25].

Переваги стандарту GSM-R:

1) Синхронізація команд початку/зупинки руху;

2) Зменшення інтервалів слідування поїздів;

3) Підвищення середньої швидкості пересування;

4) Ряд властивостей, які дозволяють задовольнити особливі потреби залізниць за рахунок застосування групових (VGCS) і циркулярних (VBS) викликів, а також механізму пріоритетів (eMLPP). Диспетчер може, наприклад, викликати всі поїзди, що знаходяться в межах зони групового виклику, складеної з зон дії декількох базових радіостанцій. У мережі забезпечуються п'ять рівнів пріоритетів (Multi-Level Precedence and Pre-emption Service, eMLPP) - від 0 до 4. Найвищий пріоритет - нульовий, використовується в основному для екстрених викликів.

В специфікаціях EIRENE виділені наступні класи викликів:

- PtP Call (Point-to-Point Call) – звичайний виклик, як в мережі GSM;
- VGCS (Voice Group Call System) – груповий виклик (в кожний момент говорить тільки один з групи);
- VBS (Voice Broadcast System) – режим мовлення: один говорить, всі останні слухають;
- REC (Railways Emergency Call) – екстрений виклик з управління рухом (типу VGCS) з префіксом 299, володіє вищим пріоритетом;
- SEC (Shunting Emergency Call) – екстрений виклик експлуатації (типа VGCS) з префіксом 599, володіє вищим пріоритетом;

Інтелектуальні виклики:

- функціональна адресація (Functional Addressing, FA) - виклик від абонента, про який відома тільки його функція (наприклад, машиніст поїзда з таким-то номером);
- адресація в залежності від місця розташування абонента (Location Dependent Addressing, LDA) - наприклад, виклик диспетчера машиністом поїзда в русі;
- режим шунтування (Shunting mode) - наприклад, виклики від бригади колійних працівників. [29]

Недоліки стандарту GSM-R:

- 1) Достатньо низька швидкість передачі даних.
- 2) Сильно відстає від сучасної технології 3G і 4G, не кажучи вже про 5G.

4.1.3. Система транкінгового зв'язку TETRA

TETRA - європейський стандарт на транкінгові системи рухомого радіозв'язку, розробив Європейський інститут телекомунікаційних стандартів (ETSI). У розробці брали участь найбільші виробники транкінгових систем - Motorola, Ericsson, Matra. Аббревіатура TETRA до квітня 1997 р означала трансєвропейське транкінгове радіо (Trans-European Trunked Radio). Згодом, коли інтерес до стандарту TETRA розширився за межі Європи, смисл аббревіатури TETRA змінився і став розшифровуватись Наземне транкінгове радіо (Terrestrial Trunked Radio).

При виробленні параметрів нового стандарту враховувалися рішення стандарту GSM. Цим пояснюється вибір ширини радіоканалу 25 кГц. Стандарт використовує широкий діапазон частот - від 60 до більш ніж 1000 МГц (за європейськими службами безпеки закріплена смуга від 380 до 400 МГц, а для комерційних цілей виділені діапазони 410, 450 і 870 МГц). Стандарт забезпечує передачу як мови, так і даних (в кадровому і пакетному форматах до 28 кбіт / с). У режимі одночасної передачі мови і даних TETRA може взаємодіяти з системами GSM, отримуючи комутований канал передачі даних. У режимі "тільки дані" (для нього розроблений спеціальний підстандарт PDO - Packet Data Optimixed) можливі передачі коротких повідомлень (пейджинг), електронної пошти і віддалена обробка даних, передача відеозображень. У стандарті закладені можливості індивідуального виклику, групового виклику з підтвердженням і широкомовного ("всім, хто мене чує"). Серед додаткових послуг систем TETRA є режим прямого виклику (Direct mode), коли розмова йде без "посередництва" базової станції, безпосередньо між двома радіостанціями. Наявність цього режиму є одним з головних вимог служб безпеки.

Серед інших вимог: кілька рівнів пріоритету (в тому числі примусове роз'єднання абонентів з нижчим рівнем пріоритету), режим скороченого набору (менше 300 мс), завадостійке кодування (метод ACELP - найбільш перешкодостійкий з відомих) і кілька рівнів секретності. При з'єднанні можлива ідентифікація абонента і мережі. Можна відзначити режим "псевдовідкритого" каналу (розподіл навантаження і ресурсів мережі здійснюється на вимогу абонента з урахуванням пріоритетності, утримування виклику і т.п.), в той час, як "відкритий" канал забезпечує постійний розподіл навантаження і ресурсів.

Надані додаткові послуги: виклик через диспетчера, пріоритетний виклик, пріоритетний виклик з додатковим скиданням, вибіркове прослуховування, утримання виклику, ідентифікація виклику, ідентифікація сторони, що говорить, реєстрація виклику, завершення виклику до звичайного абоненту, переадресація виклику, обхідний виклик, очікування виклику, завершення виклику при відсутності відповіді абонента, адресація укороченим номером, підключення до розмови, блокування вихідних дзвінків, виділення динамічних конформних груп (виділення групи абонентів). Надаються можливості підключення до абонентського інтерфейсу різних терміналів: переносних комп'ютерів, пристроїв PDA (цифрові асистенти), факсів, принтерів і т.п.

Додаткові відомості про систему стандарту TETRA:

- швидкість транспортного засобу не більше 200 км/ч;
- розмір соти не більше 60 км. [6]

Мережі стандарту TETRA містять такі основні елементи:

- базова приймально-передавальна станція (BTS) - забезпечує зв'язок в певній зоні чарунки. БС виконує основні функції, пов'язані з передачею радіосигналів: сполучення з МС, шифрування ліній зв'язку, просторово-рознесений прийом, управління вихідною потужністю мобільних РС, управління радіоканалами;

- пристрій управління БС (BCF) - елемент мережі з можливостями комутації, який управляє декількома БС і забезпечує доступ до зовнішніх мереж, а також використовується для підключення ДП і терміналів ТОЕ;

- контролер БС (BSC) - елемент мережі з великими в порівнянні з пристроєм BCF комутаційними можливостями, що дозволяє обмінюватися даними між декількома BCF. Так само, як і BCF забезпечує доступ до зовнішніх мереж. BSC має гнучку модульну структуру, що дозволяє використовувати велику кількість інтерфейсів різного типу. У мережах TETRA контролери БС можуть виконувати функції сполучення з іншими мережами TETRA і управління централізованими БД;

- ДП - пристрій, що підключається до контролера БС по провідній лінії і забезпечує обмін інформацією між оператором (диспетчером мережі) і іншими користувачами мережі;

- мобільна станція (MS);

- стаціонарна радіостанція (FRS - Fixed Radio Station) - РС, яка використовується абонентом в певному місці;

- термінал ТОЕ - термінал, призначений для контролю за станом системи, проведення діагностики несправностей, обліку тарифікаційної інформації і т.п. [2]

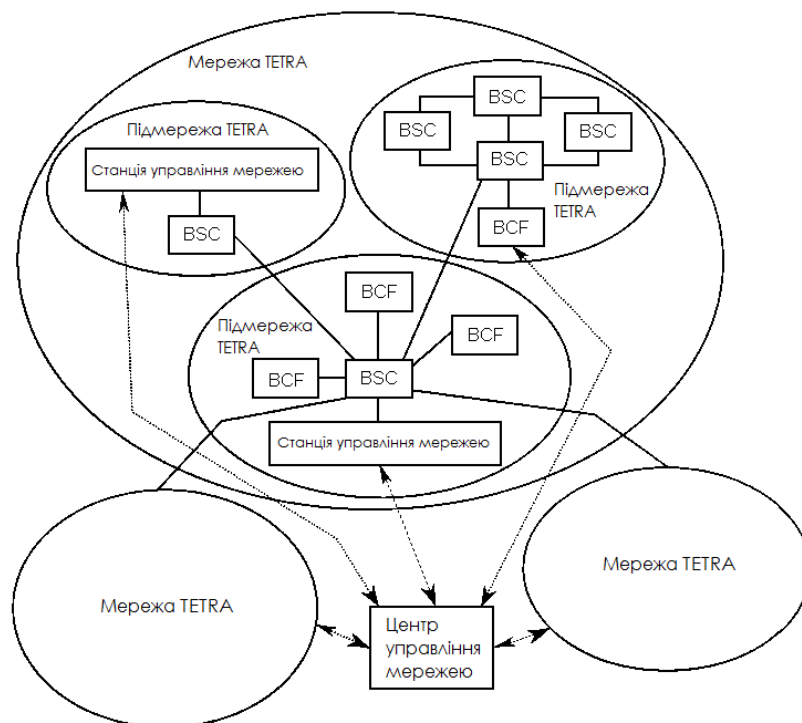


Рис. 4.4. Структура мережі TETRA

Переваги мережі TETRA:

1) Висока економічність

2) Наявність додаткових спеціальних функцій

3) Наявність пріоритетності викликів [31]

Недоліки:

1) Швидкість транспортного засобів не більше 200 км/ч

2) Низька швидкість передачі даних.

4.1.4. Система мобільного зв'язку третього та четвертого поколінь

UMTS - це основна технологія стільникового зв'язку третього покоління (3G). UMTS дозволяє підтримувати швидкість передачі інформації до 21 Мбіт/с. UMTS мережі є розвитком GSM і попередниками LTE мереж. Діапазони частот UMTS: 850, 900, 1900, 2100 МГц. [23]

LTE (Long-Term Evolution, часто позначається як 4G / LTE) - стандарт бездротової високошвидкісної передачі даних для мобільних телефонів і інших терміналів, що працюють з даними. Він заснований на мережевих технологіях GSM і UMTS, але працює повністю в області пакетної комутації, користуючись новими протоколами сигналізації SIP і LTE [25].

Розглянемо структуру мережі UMTS (рис. 4.5).

Підсистема комутації UMTS

У перших релізах стандарту UMTS підсистема комутації не відрізнялася за своєю структурою від тієї ж підсистеми мереж другого покоління. У неї входили MSC - Mobile Switching Centre, який виконував функції комутації, встановлення з'єднання, тарифікації та ін., а також ряд реєстрів HLR, VLR, AUC, які призначені для зберігання абонентських даних. У більш пізніх релізах функції MSC були розділені між двома пристроями: MSC-Server і MGW (Media gateway). MSC-Server відповідає за встановлення з'єднань, тарифікацію, виконує деякі функції аутентифікації. MGW є комутаційне поле, підлегле MSC-Server.

Підсистема базових станцій

В мережі UMTS у порівнянні з мережею GSM найбільші зміни відбулися у підсистема базових станцій. Основні елементи, що входять до

підсистеми базових станцій:

RNC (Radio Network Controller) - контролер мережі радіодоступу системи UMTS. Він є центральним елементом підсистеми базових станцій і виконує велику частину функцій: контроль радіоресурсів, шифрування, встановлення з'єднань через підсистему базових станцій, розподіл ресурсів між абонентами та ін. В мережі UMTS контролер виконує набагато більше функцій ніж в системах стільникового зв'язку другого покоління.

NodeB - базова станція системи стільникового зв'язку стандарту UMTS. Основною функцією NodeB є перетворення сигналу, отриманого від RNC в широкосмуговий радіосигнал, переданий до телефону. Базова станція не приймає рішень про виділення ресурсів, про зміну швидкості до абонента, а лише служить мостом між контролером і обладнанням абонента, і вона повністю підпорядкована RNC.

Устаткування абонента отримало назву UE (User Equipment).

Пакетні дані в мережі UMTS передаються від MGW до відомого нам по системі GSM елементу SGSN, після чого через GGSN надходять до інших зовнішніх мереж передачі даних, наприклад Internet.

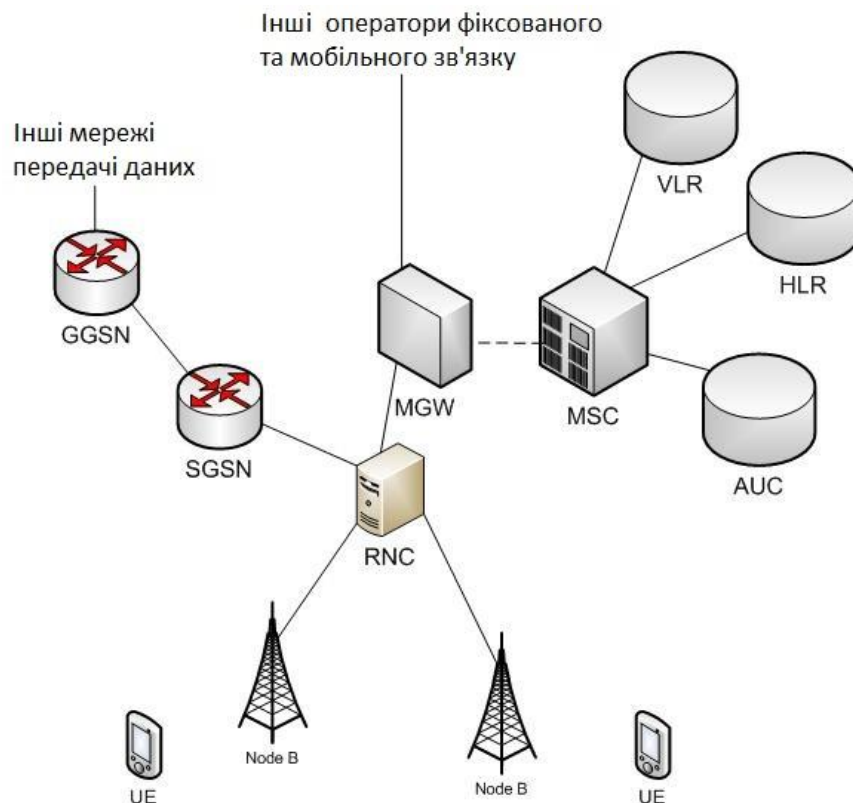


Рис.4.5 Структура мережі UMTS

Переваги 3G над 2G:

- 1) Висока ефективність використання каналного ресурсу. Зростання пропускної здатності мережі.
- 2) Скорочення потужності абонентських і базових станцій, що зменшує перешкоди для інших електронних пристроїв.
- 3) Простота частотного планування, оскільки всі базові станції мережі використовують один і той же каналний ресурс.
- 4) Спрощення зміни швидкостей передачі вгору і вниз для різних абонентів. Підтримка асиметричних видів передачі інформації, таких як Інтернет.
- 5) Можливість реалізації м'якого хендовера. Скорочення числа обривів зв'язку через хендовер. Підвищення якості зв'язку, особливо при передачі даних, відеосигналу і мультимедіа.
- 6) Застосування Rake приймача дозволяє виділяти і обробляти найбільш потужні сигнали при багатопроменовому поширенні.
- 7) Підвищення якості передачі телефонії за рахунок усунення замирань при багатопроменовому поширенні.
- 8) Забезпечення високої надійності зв'язку, Інтернет повідомлень.
- 9) Простота передачі каналів управління.
- 10) Полегшення реалізації нових послуг: прийом мультимедіа, високошвидкісних потоків даних, аудіо- та відеокліпів.

Недоліки 3G:

- 1) Необхідність синхронізації кодуєть послідовностей в приймачах. Вимоги до реалізації когерентної обробки прийнятих сигналів.
- 2) Необхідність швидкого регулювання потужності передавачів мобільного і базової станцій.
- 3) Залежність дальності зв'язку від швидкості передачі і швидкості пересування абонента.
- 4) Знижується якість зв'язку при перевантаженні стільників.

Четверте (4G) покоління мобільного зв'язку характеризується поліпшеними можливостями в порівнянні з попередніми стандартами. У їх числі - забезпечення передачі даних для стаціонарних клієнтів зі швидкістю не

нижче 1 Гб / с, для користувачів, що переміщаються - не нижче 100 Мбіт / с.

З інженерно-технічної точки зору ключовою відмінністю даного стандарту від попередньої технології (3G) є те, що він працює на основі тільки протоколів пакетної передачі даних, а 3G використовує і пакетну, і каналну комутацію.

4.1.5. Система мобільного зв'язку 5G

Якщо специфікація 5G буде завершена раніше переходу на мережу LTE плюс R, то наступником GSM-R може стати обладнання 5G. Але на даний момент немає припущень про те, коли стандарт 5G можна буде впроваджувати на залізницях [25].



Рис. 4.6. Теоретично максимальні швидкості передачі мереж 4G / LTE і 5G.

Мережі 5G забезпечують передачу даних на швидкості 1-10 ГГбіт/с із затримкою від краю до краю всього 1 мс. Передбачається зменшення споживання енергії на 90% і десятирічний термін служби батареї для пристроїв з низьким енергоспоживанням.

Мережі 5G припускають використання нових смуг спектра, включаючи низькі частоти нижче 1 ГГц і міліметровий спектр вище 6 ГГц, антени MIMO (Multiple Input Multiple Output), неортогональні хвильові форми і ін. Використання міліметрових хвиль буде дуже складним, зокрема, для розробки контрольно-вимірювальної апаратури.

У зв'язку з різким збільшенням швидкості передачі даних для 5G радіо потрібно додатковий спектр. Але проблема в тому, що радіочастотний спектр є обмеженим ресурсом, на який претендує безліч користувачів. На сьогоднішній день залізнична галузь має свою власну виділену смугу радіочастотного спектру для GSM-R. Малоймовірно, що таке вдасться для мережі 5G. Залізницям доведеться ділити спектр радіочастот з іншими користувачами, що

породить безліч проблем надійності зв'язку.

Мережа 5G-R зможе збільшити пропускну здатність і послуги з високою швидкістю передачі даних. Через широку смугу високих частот і зниження здатності покриття мережа 5G-R не підходить для оснащення залізничної лінії, але підходить для спілкування в вокзалі і всередині вагона. Одним з ключових методів реалізації 5G є застосування антен MIMO. Однією з найскладніших завдань для мережі 5G-R при різних залізничних сценаріях є побудова моделі каналу з антенами MIMO в частотних діапазонах 6, 28, 38, 60 і 300 ГГц.

Таким чином, найбільш перспективним стандартом для побудови сучасної системи залізничного цифрового радіозв'язку є стандарт LTE. Проте такий стандарт необхідно доповнити відповідно до потреб залізничного транспорту: виділити окрему смугу частот, ввести додаткові функції, організувати пріоритетність викликів, забезпечити високу надійність радіозв'язку шляхом апаратного та інформаційного резервування. На сьогоднішній день проводяться роботи з розробки специфікацій нового стандарту для залізничного транспорту LTE Railway (LTE-R).

4.2. Особливості радіо інтерфейсу LTE мереж

Одна з головних особливостей мереж LTE - це використання технології OFDMA (Orthogonal Frequency Multiple Access), в якій користувачам призначається набір каналів з ортогональними частотами. Використання ортогональних частот дозволяє знизити інтерференцію між каналами з сусідніми частотами і таким чином поліпшити ефективність використання частотного спектра. У технології LTE спектральна ефективність в 2-4 рази краще, ніж в мережах 3G. Також в мережах LTE є можливість використання багатоантенної технології MIMO (Multiple Input Multiple Output).

Теоретичною швидкісною межею LTE є 326.4 Мбіт / с в низхідному напрямку (від базової станції до абонента) і 172.8 Мбіт / с - у висхідному (від абонента до базової станції). Високі швидкості передачі даних в мережах LTE досягаються шляхом застосування модуляцій високого порядку. У мережах LTE передбачається використання трьох видів модуляції сигналу: квадратурна

фазова модуляція (Quadrature Phase Shift Keying, QPSK) і два види квадратурної амплітудної модуляції (Quadrature Amplitude Modulation, QAM) - 16QAM і 64QAM. Модуляція QPSK дозволяє передавати два біта в одному символі, модуляція 16QAM - 4 біта в символі і 64QAM - 6 біт в одному символі. Однак, для квадратурної амплітудної модуляції, стан радіоканалу має бути досить хорошим, і вимоги до співвідношення сигнал / шум дуже високі. Чим вище порядок модуляції, тим більше має бути співвідношення сигнал / шум в приймачі, для того, щоб повідомлення було успішно декодовано.

Для захисту переданої інформації, в LTE передбачена система корекції помилок методом попередження (Forward Error Correction, FEC також іменується Channel Coding), яка полягає в тому, що інформаційним бітам додаються контрольні біти, за якими, в разі втрати біт інформації, можна буде відновити початкове повідомлення. Чим гірше стан радіоканалу (чим нижче співвідношення сигнал / шум), тим більше контрольних біт буде додано в початкове повідомлення. Очевидно, що контрольні неінформаційні біти знижують корисну швидкість передачі даних.

У LTE застосовуються такі коефіцієнти кодування: $1/8$, $1/5$, $1/4$, $1/3$, $1/2$, $2/3$, $3/4$ і $4/5$. Ці співвідношення показують кількість контрольних біт в повідомленні. Наприклад, співвідношення $2/3$ показує, що з 3-х переданих біт, два біта є інформаційними і один - контрольним.

Важливим фактором при оцінці можливостей LTE є застосування технології MIMO (Multiple Input Multiple Output). Існують кілька варіантів застосування MIMO - для збільшення абонентської ємності, при цьому з різних антен передається різна інформація, і для поліпшення покриття. В останньому випадку з декількох антен передається одна і та ж інформація, що дозволяє абонентським пристрою комбінувати сигнал з різних антен, покращуючи його якість. Як правило, для збільшення абонентської ємності, оператори використовують першу опцію MIMO. У цьому випадку використання MIMO 2x2 ($N_{MIMO} = 2$ - порядок MIMO) призведе до збільшення швидкості передачі даних в каналі Downlink вдвічі. Однак реалізація такої схеми потребуватиме додаткових частотно-часових ресурсів

для передачі опорних пілот-сигналів антен.

Інформація, передана через радіоінтерфейс, ділиться на службову інформацію, яка транслюється по різних каналах управління, і на призначені для користувача дані каналу PDSCH (Physical Downlink Shared Channel).

Радіоінтерфейс LTE підтримує як частотне, так і часове дуплексування каналів Uplink та Downlink (FDD і TDD), що дозволяє розгортати мережі навіть при відсутності спарених діапазонів. Так як більшість операторів, які запустили LTE, мають спарені смуги частот, розглянемо особливості саме FDD режиму, його структуру кадру і співвідношення між призначеними для користувача і службовими ресурсами.

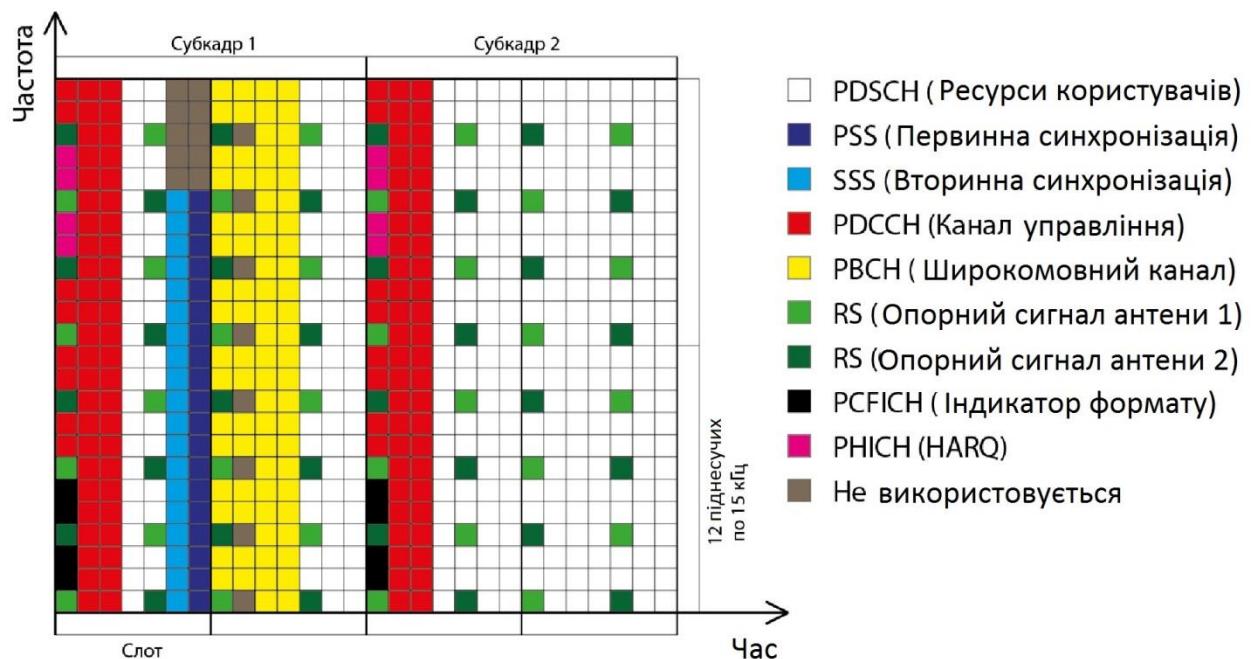


Рис.4.7. Структура кадру LTE в режимі FDD. Фізичні канали LTE

FDD-кадр LTE складається з десяти субкадрів по 1 мс ($NSFR = 10$). Кожен субкадр складається з двох слотів, всередині яких може бути в залежності від часу поширення (радіуса стільники) або 6 або 7 OFDM-символів або ресурсних елементів. На рис.4.7 показаний випадок з невеликим часом поширення (коротким циклічним префіксом, який займає один OFDM-символ) і відповідно 7 символів в слоті.

Для синхронізації абонентів з мережею в першому субкадрі кожного кадру по каналах первинної і вторинної синхронізації (PSS і SSS) передаються спеціальні послідовності. Вони займають 72 піднесучих (з урахуванням

невикористаних ресурсних елементів по краях діапазону) - 72 OFDM-символу.

Використання MIMO збільшує швидкість в кратне число раз. Це найосновніші особливості, які необхідно враховувати при оцінці швидкості [7].

4.3.Моделювання базової станції системи цифрового радіозв'язку LTE-R

LTE-R – майбутній стандарт на заміну GSM-R. За основу взято стандарт LTE з додаванням деяких функцій. Мережі зв'язку покривають тільки області вздовж рейкової лінії. Використовується окрема смуга частот.

Вибір вільного частотного діапазону для організації системи LTE-R є достатньо складною задачею. Наприклад, в Росії для мережі LTE-R пропонується використовувати частотний діапазон – 1785... 1805 МГц – це захисний інтервал для мереж GSM та LTE. Ширина даного частотного діапазону складає 20 МГц. Пропонуємо використовувати в межах даного частотного ресурсу смугу частот шириною 10 МГц (5 МГц для організації каналу Uplink – відправка даних від мобільної до базової станції, 5 МГц для каналу Downlink – завантаження даних від базової до мобільної станції). При цьому залишаються захисні інтервали шириною 5 МГц між смугою LTE-R та смугами мереж GSM та LTE.

Для визначення параметрів мережі LTE-R виконаємо математичне моделювання. В якості вихідних параметрів для розробленої моделі використовуються:

- 1) Частотний діапазон - 1790... 1800 МГц
- 2) Ширина частотної полоси (Δf) – 5 МГц
- 3) Потужність передавача базової станції ($P_{\text{пер}}$) – 43 дБм
- 4) Коефіцієнт підсилення антени передавача ($G_{\text{пер}}$) – 18 дБ
- 5) Висота щогли базової станції (h_g) – 50 м
- 6) Висота приймача (h_m) – висота мобільної станції – 1,5 м
- 7) Коефіцієнт шуму приймача ($K_{\text{ш}}$) – 9 дБ

- 8) Необхідне співвідношення сигнал/шум на вході приймача (SNR)
- 9) Вид модуляції (QPSK, 16QAM, 64 QAM)
- 10) Схема завадостійкого кодування

Значення параметрів передавача та приймача вибрані із літературних джерел [7, 14].

1. Визначимо потужність теплового шуму приймача

$$P_{\text{тепл}} = 10 \lg(K_B \cdot T \cdot \Delta f \cdot 1000), \text{ [дБм]} \quad (4.1)$$

де $K_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$ (стала Больцмана),

T – абсолютна температура [нехай $T=300 \text{ К}$]

Δf – смуга частот, Гц.

$$P_{\text{тепл}} = 10 \lg(1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300 \cdot 5 \cdot 10^6 \cdot 1000) = -106,8(\text{дБм}) \quad (4.2)$$

2. Визначимо чутливість приймача

$$P_{\text{пр min}} = \text{SNR} + K_{\text{ш}} + P_{\text{тепл}} = -5,1 + 9 + (-106,8) = -102,9(\text{дБм}) \quad (4.4)$$

SNR - відношення сигнал/шум

Припустимо, що використовується модуляція QPSK та коефіцієнт кодування $1/8$. При цьому мінімально необхідне відношення сигнал/шум дорівнює $\text{SNR}=5,1\text{дБ}$. Значення відношення сигнал/шум для інших видів модуляції та кодування наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Відношення сигнал/шум для різних видів модуляції та кодування

Модуляція	Схема кодування	SNR, дБ
QPSK	1/8	-5,1
	1/5	-2,9
	1/4	-1,7
	1/3	-1
	1/2	2
	2/3	4,3
	3/4	5,5
	4/5	6,2

QAM-16	1/2	7,9
	2/3	11,3
	3/4	12,2
	4/5	12,8
QAM-64	2/3	15,3
	3/4	17,5
	4/5	18,6

$K_{ш} = 9$ дБ (коефіцієнт шуму змінюється від 6 до 11 дБ, в розрахунках взяли 9 дБ)

3. Визначимо допустиме загасання радіосигналу (допустимі втрати)

$$\alpha_{доп} = P_{пер} + G_{пер} - \alpha_{каб} - \alpha_{инт} - \alpha_{куз} + P_{пр\min} = 43 + 18 - 2 - 2,5 - 6 + 102,9 = 153,4 \text{ (дБ)} \quad (4.5)$$

$\alpha_{каб} = 2$ дБ – загасання в кабелі (кабель, що включає антену передавача і приймача)

$\alpha_{инт} = 2,5$ дБ – поправка на інтерференцію

$\alpha_{куз} = 6$ дБ – поглинання кузовом локомотива

4. Побудуємо залежність загасання радіосигналу від відстані між базовою і мобільною станціями. Використовуємо модель Хата (Hata). Модель Хата - це модель поширення радіохвиль для прогнозування втрат на шляху стільникової передачі у зовнішньому середовищі. Модель підходить як для двоточкового, так і для широкомовного зв'язку і охоплює висоту антени мобільної станції 1-10 м, висоту антени базової станції 30-200 м і відстані між лініями зв'язку 1-10 км. [14]

$$\alpha_{зор} = 69,55 + 26,16 \lg(f) - 13,82 \lg(h_e) - a(h_m) + [44,9 - 6,55 \lg(h_e)] \lg R, \text{ [дБ]} \quad (4.6)$$

$\alpha_{зор}$ - загасання для міської місцевості;

f - робоча частота в МГц;

h_e - висота антени базової станції в метрах;

$a(h_m)$ - коефіцієнт, що залежить від висоти антени мобільної станції;

R - відстань в км.

Приймаємо $f = 1800$ МГц;

$$\text{Для приміських районів: } \alpha_{np} = \alpha_{zop} - 2\left(\lg \frac{f}{28}\right)^2 - 5,4 [\text{дБ}] \quad (4.7)$$

$$\text{Для сільської місцевості: } \alpha_{сел} = \alpha_{zop} - 4,78(\lg(f))^2 - 18,33 \cdot \lg(f) - 40,94 \quad (4.8)$$

$$a(h_m) = 0,8 + (1,1 \lg f - 0,7)h_m - 1,56 \lg f; \quad (4.9)$$

$$h_m = 1,5 \text{ м}$$

a - коефіцієнт поправки на висоту антени мобільної станції.

За допомогою програми Matlab були проведені розрахунки та побудовані залежності загасання радіосигналу від відстані між мобільною та базовою станціями (рис. 4.8 - 4.10). На даних графіках також показано допустиме загасання радіосигналу для різних видів модуляції та кодування. Це дозволяє визначити максимально можливу відстань між мобільною та базовою станціями.

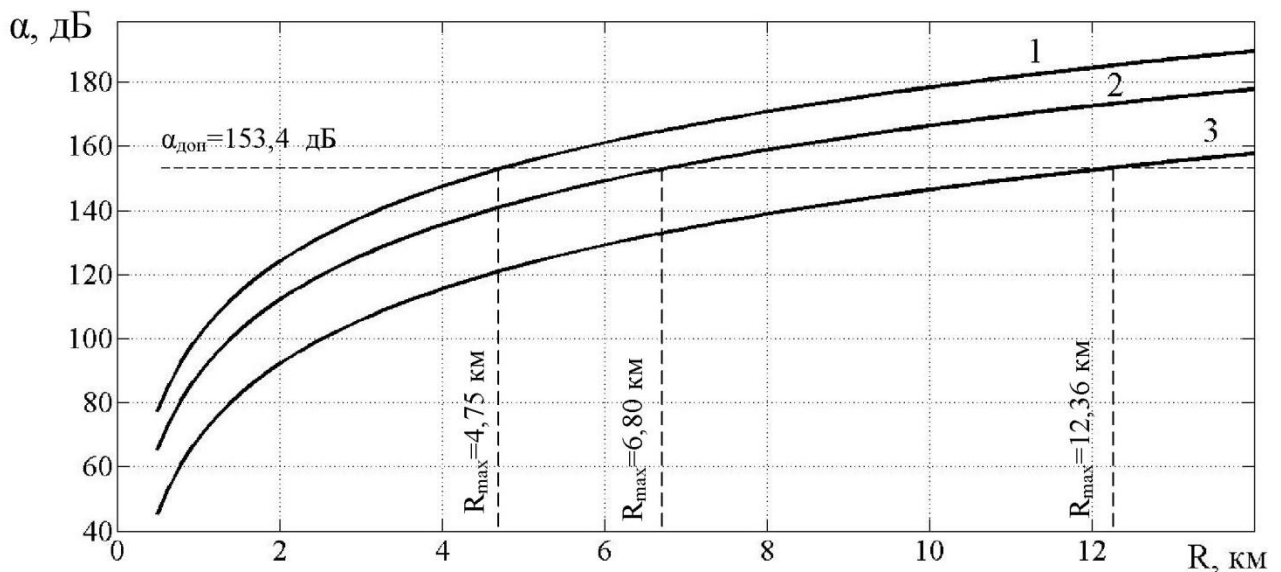


Рис.4.8.Залежність загасання радіосигналу від відстані між базовою та мобільною станціями (модуляція QPSK, коефіцієнт кодування 1/8):

1 – міська місцевість; 2 – передмістя; 3 – сільська місцевість

Для модуляції 16QAM при коефіцієнті кодування 1/2 – SNR=7,9 дБ; тоді

$$\alpha_{дон} = 140,4 \text{ дБ}$$

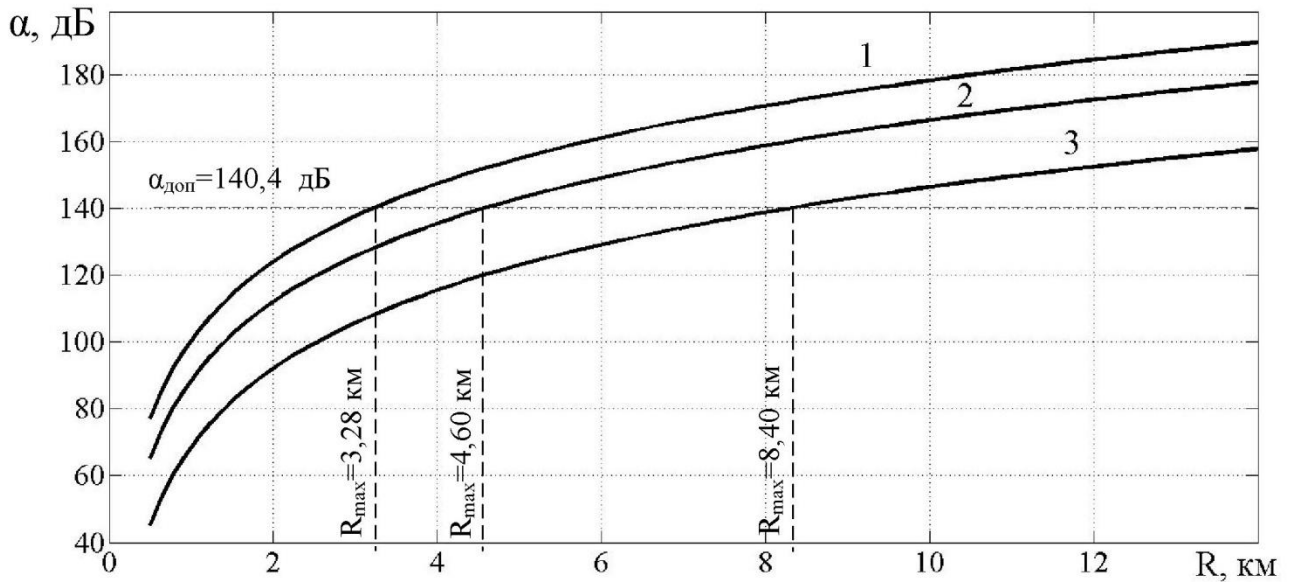


Рис.4.9.Залежність загасання радіосигналу від відстані між базовою та мобільною станціями (модуляція 16QAM, коефіцієнт кодування 1/2):

1 – міська місцевість; 2 – передмістя; 3 – сільська місцевість

Для модуляції 64QAM при коефіцієнті кодування 4/5 – SNR=18,6 дБ;

тоді $\alpha_{dop} = 129,7$ дБ

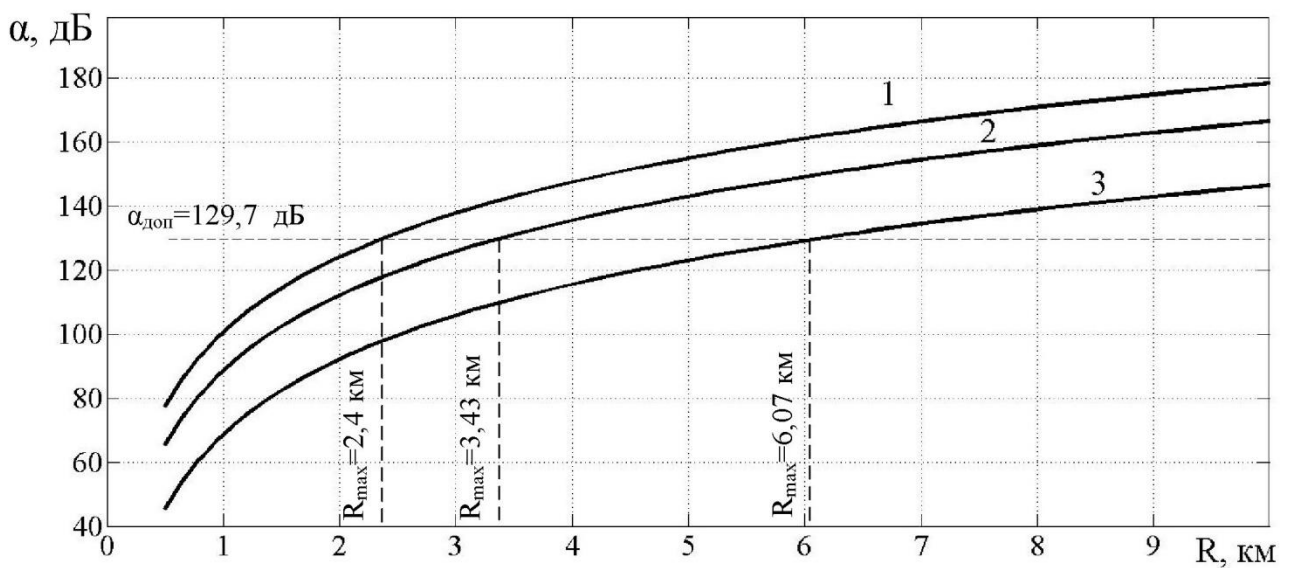


Рис.4.10.Залежність загасання радіосигналу від відстані між базовою та мобільною станціями (модуляція 64QAM, коефіцієнт кодування 4/5):

1 – міська місцевість; 2 – передмістя; 3 – сільська місцевість

В результаті розрахунків отримали наступні значення максимально допустимої відстані між мобільною та базовою станціями:

1) для міської місцевості – 2, 4 км (для схеми 64QAM, 4/5), 3,28 км (для схеми 16QAM, 1/2), 4,75 км (для схеми QPSK, 1/8);

2) для передмістя – 3,43 км (для схеми 64QAM, 4/5), 4,60 км (для схеми 16QAM, 1/2), 6,80 км (для схеми QPSK, 1/8);

3) для сільської місцевості – 6,07 км (для схеми 64QAM, 4/5), 8,40 км (для схеми 16QAM, 1/2), 12,36 км (для схеми QPSK, 1/8).

5. Визначаємо ємність (пропускну здатність) базової станції

5.1. Знайдемо число OFDM символів в одному кадрі:

$$N_K = 10 \cdot 14 \cdot 12 \cdot N_{RB} = 10 \cdot 14 \cdot 12 \cdot 25 = 42000(\text{симв}) \quad (4.10)$$

$N_{RB}=25$ (число ресурсних блоків для смуги 5 МГц) [7]. Інформація про кількість ресурсних блоків для різної ширини частотної смуги наведена у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2

Співвідношення ширини частотної смуги та кількості ресурсних блоків

Смуга, МГц	1.4	3	5	10	15	20
Число піднесучих	72	180	300	600	900	1200
Число ресурсних блоків	6	15	25	50	75	100

5.2. Знайдемо число службових символів:

$$N_{cl}^1 = 0,259 \cdot N_K = 10878(\text{симв}) (\text{при високому навантаженні на мережу}) \quad (4.11)$$

$$N_{cl}^2 = 0,116 \cdot N_K = 4872(\text{симв}) (\text{при низькому навантаженні на мережу}) \quad (4.12)$$

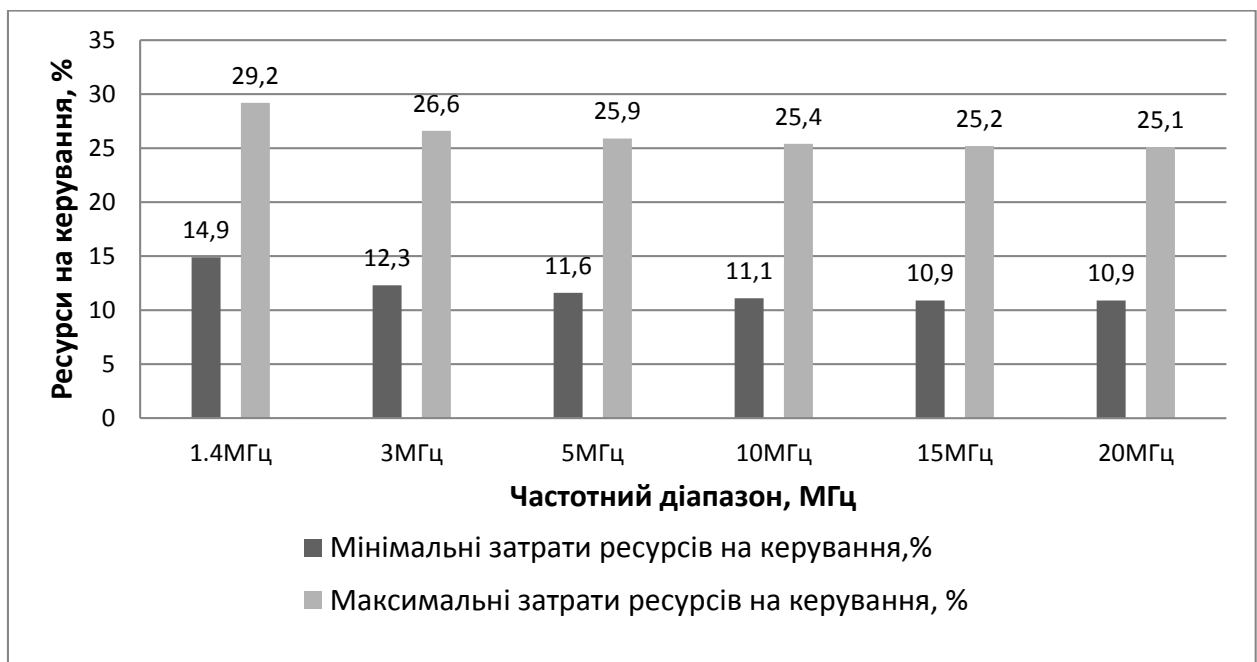


Рис.4.11. Витрати частотно-часових ресурсів каналу Downlink LTE на передачу інформації каналів управління (без MIMO)

5.3. Знайдемо число інформаційних символів в одному кадрі:

$$N_{инф}^1 = N_K - N_{сл}^1 = 42000 - 10878 = 31122(симв) \quad (4.13)$$

$$N_{инф}^2 = N_K - N_{сл}^2 = 42000 - 4872 = 37128(симв) \quad (4.14)$$

5.4. Визначимо швидкість передачі даних для різних схем модуляції і кодування (при високому навантаженні на мережу):

- 1) QPSK 1/2 – чотирьохпозиційна фазова маніпуляція, схема завадостійкого кодування 1/2 (інформаційні елементи займають 1/2 частину повідомлення)

$$R_1 = \frac{N_{инф}^1 \cdot 2 \cdot \frac{1}{2}}{T_K} = \frac{31122 \cdot 2 \cdot \frac{1}{2}}{10 \cdot 10^{-3}} = 31122 \cdot 10^2 \left(\frac{бит}{с} \right), (\approx 3,1 \text{ Мбит/с}) \quad (4.15)$$

де $T_K = 10$ мс – тривалість одного кадру

- 2) QPSK 3/4

$$R_1 = \frac{N_{инф}^1 \cdot 2 \cdot \frac{3}{4}}{T_K} = \frac{31122 \cdot 2 \cdot \frac{3}{4}}{10 \cdot 10^{-3}} = 46683 \cdot 10^2 \left(\frac{бит}{с} \right), (\approx 4,7 \text{ Мбит/с}) \quad (4.16)$$

- 3) QAM16 1/2 – шістнадцяти позиційна квадратурна модуляція, схема кодування – 1/2

$$R_1 = \frac{N_{инф}^1 \cdot 4 \cdot \frac{1}{2}}{T_K} = \frac{31122 \cdot 4 \cdot \frac{1}{2}}{10 \cdot 10^{-3}} = 62244 \cdot 10^2 \left(\frac{бит}{с} \right), (\approx 6,2 \text{ Мбит/с}) \quad (4.17)$$

- 4) QAM16 3/4

$$R_1 = \frac{N_{инф}^1 \cdot 4 \cdot \frac{3}{4}}{T_K} = \frac{31122 \cdot 4 \cdot \frac{3}{4}}{10 \cdot 10^{-3}} = 93366 \cdot 10^2 \left(\frac{бит}{с} \right), (\approx 9,3 \text{ Мбит/с}) \quad (4.18)$$

- 5) QAM64 3/4

$$R_1 = \frac{N_{инф}^1 \cdot 6 \cdot \frac{3}{4}}{T_K} = \frac{31122 \cdot 6 \cdot \frac{3}{4}}{10 \cdot 10^{-3}} = 140049 \cdot 10^2 \left(\frac{бит}{с} \right), (\approx 14 \text{ Мбит/с}) \quad (4.19)$$

- 6) QAM64 MIMO 2x2

$$R_1 = \frac{N_{инф}^1 \cdot 6 \cdot 2}{T_K} = \frac{31122 \cdot 6 \cdot 2}{10 \cdot 10^{-3}} = 37,3 \left(\frac{Мбит}{с} \right) \quad (4.20)$$

5.5. Визначимо швидкість передачі даних для різних схем модуляції і кодування (при низькому навантаженні на мережу):

- 1) QPSK 1/2 – чотирьохпозиційна фазова маніпуляція, схема завадостійкого кодування 1/2 (інформаційні елементи займають 1/2 частина повідомлення)

$$R_2 = \frac{N_{\text{инф}}^2 \cdot 2 \cdot \frac{1}{2}}{T_K} = \frac{37128 \cdot 2 \cdot \frac{1}{2}}{10 \cdot 10^{-3}} = 37128 \cdot 10^2 \left(\frac{\text{бит}}{\text{с}} \right), (\approx 3,7 \text{ Мбит/с}) \quad (4.21)$$

де $T_K = 10 \text{ мс}$ – тривалість одного кадру

- 2) QPSK 3/4

$$R_2 = \frac{N_{\text{инф}}^2 \cdot 2 \cdot \frac{3}{4}}{T_K} = \frac{37128 \cdot 2 \cdot \frac{3}{4}}{10 \cdot 10^{-3}} = 55690 \cdot 10^2 \left(\frac{\text{бит}}{\text{с}} \right), (\approx 5,6 \text{ Мбит/с}) \quad (4.22)$$

- 3) QAM16 1/2 – шістнадцяти позиційна квадратурна модуляція, схема кодування - 1/2

$$R_2 = \frac{N_{\text{инф}}^2 \cdot 4 \cdot \frac{1}{2}}{T_K} = \frac{37128 \cdot 4 \cdot \frac{1}{2}}{10 \cdot 10^{-3}} = 74260 \cdot 10^2 \left(\frac{\text{бит}}{\text{с}} \right), (\approx 7,4 \text{ Мбит/с}) \quad (4.23)$$

- 4) QAM16 3/4

$$R_2 = \frac{N_{\text{инф}}^2 \cdot 4 \cdot \frac{3}{4}}{T_K} = \frac{37128 \cdot 4 \cdot \frac{3}{4}}{10 \cdot 10^{-3}} = 111400 \cdot 10^2 \left(\frac{\text{бит}}{\text{с}} \right), (\approx 11,1 \text{ Мбит/с}) \quad (4.24)$$

- 5) QAM64 3/4

$$R_2 = \frac{N_{\text{инф}}^2 \cdot 6 \cdot \frac{3}{4}}{T_K} = \frac{37128 \cdot 6 \cdot \frac{3}{4}}{10 \cdot 10^{-3}} = 167100 \cdot 10^2 \left(\frac{\text{бит}}{\text{с}} \right), (\approx 17 \text{ Мбит/с}) \quad (4.25)$$

- 6) QAM64 MIMO 2x2

$$R_2 = \frac{N_{\text{инф}}^2 \cdot 6 \cdot 2}{T_K} = \frac{37128 \cdot 6 \cdot 2}{10 \cdot 10^{-3}} = 44,5 \left(\frac{\text{Мбит}}{\text{с}} \right) \quad (4.26)$$

Результати розрахунків представлені на рис. 4.12.

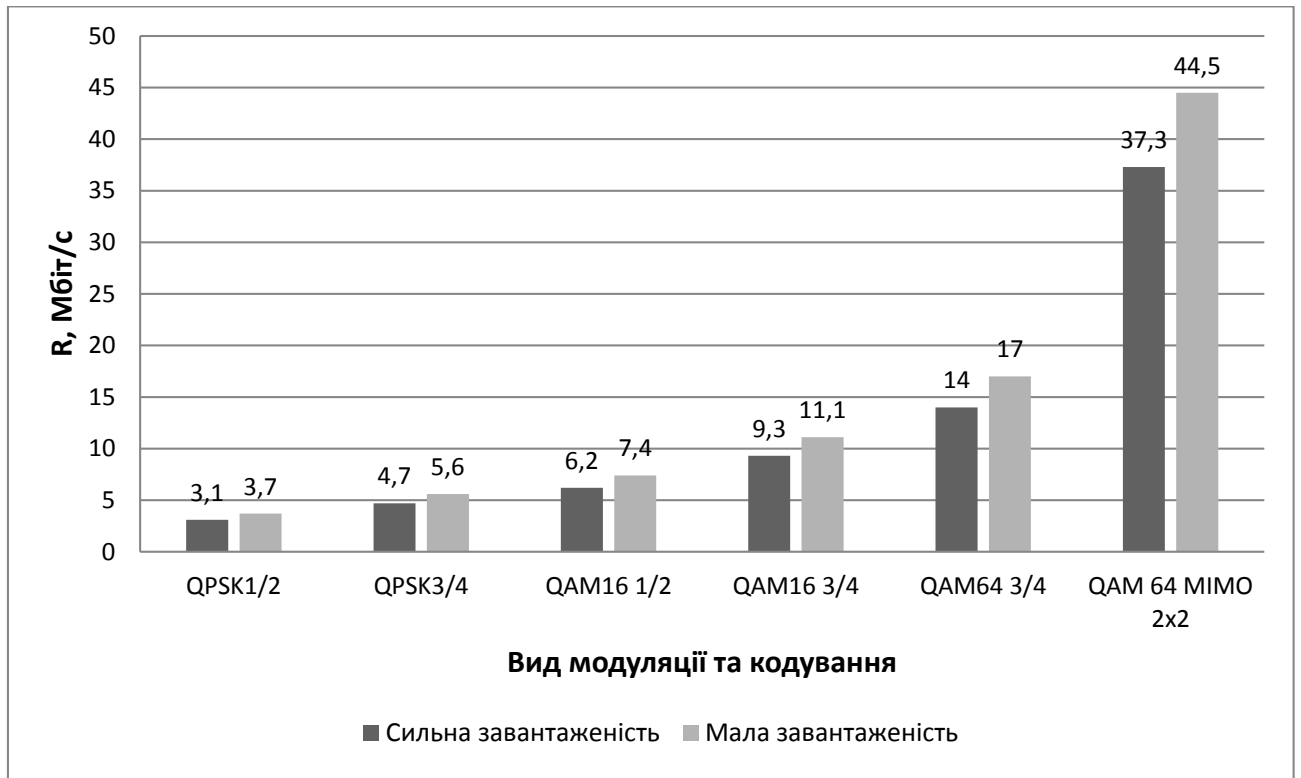


Рис.4.12. Пропускна здатність мережі LTE-R

Найгірший випадок при високому навантаженні на мережу: 3,1 Мбіт/с (пропускна здатність однієї базової станції LTE-R).

Проаналізуємо, чи забезпечує така пропускна спроможність базової станції LTE-R потреби залізничного транспорту. Нехай базові станції розташовуються через 7...8 км (рис. 4.13). Тоді в зоні дії кожної базової станції може розташовуватись максимум 4 поїзда. Оцінимо приблизну кількість каналів зв'язку, необхідних для одного поїзда:

- 1) Канал передачі команд управління – 1 канал
- 2) Поїзний зв'язок – 1 канал
- 3) Службовий зв'язок (провідники, начальник поїзда) – 5 каналів

Таким чином для чотирьох поїздів необхідно: $4 \cdot 7 = 28$ каналів. Виділимо також 5 каналів зв'язку для ремонтних бригад, які можуть працювати в зоні дії базової станції канали. Отримаємо разом 33 канали. В системах мобільного зв'язку для організації одного голосового каналу необхідна пропускна спроможність 13 кбіт/с (канал зі стисненням). Тоді, для організації службового радіозв'язку кожна базова станція повинна мати пропускну спроможність принаймні $13 \cdot 33 = 429$ кбіт/с.

Навіть у найгіршому випадку базова станція LTE-R забезпечує пропускну спроможність 3,1 Мбіт/с. Таким чином, залишається ще резерв у 2,67 Мбіт/с, який може бути використаним для надання телекомунікаційних послуг пасажирам.

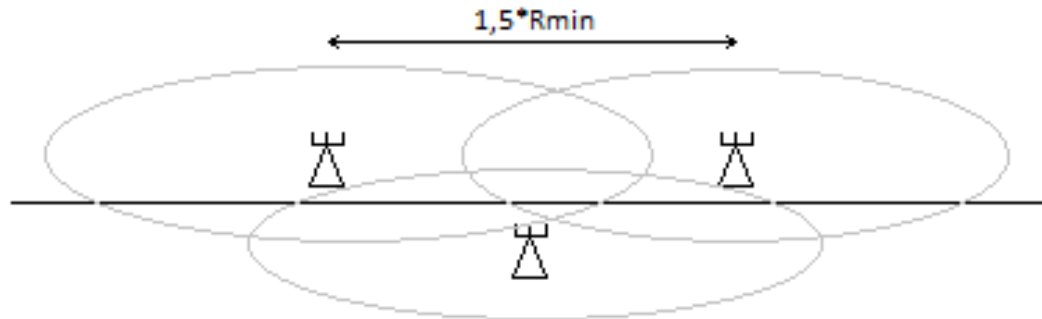


Рис.4.13. Розташування базових станцій на перегоні



Рис.4.14. Максимальна кількість поїздів в зоні дії однієї базової станції

У найкращому випадку при низькому навантаженні на мережу та якісному радіозв'язку одна базова станція має пропускну спроможність 44,5 Мбіт/с. Дві паралельні мережі базових станцій дадуть пропускну спроможність $R = 2 \cdot 44,5 = 89$ Мбіт/с. При цьому значний телекомунікаційний ресурс 88,57 Мбіт/с може бути виділений для надання телекомунікаційних послуг пасажирам.

Зробимо висновок, що навіть при найгірших умовах пропускну спроможності мережі LTE-R цілком достатньо для забезпечення всіх службових каналів зв'язку та навіть для надання інтернет-послуг пасажирам.

4.4. Висновки по розділу 4

Найбільш перспективним стандартом для побудови сучасної системи залізничного цифрового радіозв'язку є стандарт LTE. Проте такий стандарт необхідно доповнити відповідно до потреб залізничного транспорту: виділити окрему смугу частот, ввести додаткові функції, організувати пріоритетність викликів, забезпечити високу надійність радіозв'язку шляхом апаратного та інформаційного резервування. Все це потрібно врахувати при розробці специфікацій нового стандарту для залізничного транспорту LTE Railway (LTE-R).

В рамках даної роботи була розроблена математична модель, яка дозволяє оцінити радіус дії і пропускну здатність базової станції мережі LTE і використовувати ці дані для моделювання різних сценаріїв завантаження базової станції. Цей інструмент є доступним і не вимагає великих ресурсів персонального комп'ютера. В результаті моделювання було встановлено, що навіть при найгірших умовах завантаження мережі LTE-R її пропускна спроможність цілком достатня для забезпечення всіх службових каналів зв'язку та для надання телекомунікаційних послуг пасажирам.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В даній магістерській роботі, згідно з поставленими задачами, було проаналізовано існуючі системи інтервального регулювання руху поїздів поїздів та проведено дослідження системи інтервального регулювання руху поїздів із застосуванням цифрового радіозв'язку. В ході роботи було зроблено наступні висновки.

1. Доповнення системи цифрового радіозв'язку до традиційних систем інтервального регулювання дозволить суттєво покращити характеристики останніх. На першому етапі доцільно застосовувати цифровий радіоканал в якості додаткового каналу для передачі на локомотив розширених команд АЛС, інформації про тимчасові обмеження швидкості, а також відповідальних команд, таких як «зупинка поїзда», «дозвіл проїзду червоно вогню» та ін. В перспективі цифровий радіозв'язок може використовуватись як основний канал для передачі команд керування на локомотив. Це забезпечить можливість впровадження координатних систем інтервального регулювання.

2. Координатні системи інтервального регулювання дозволяють суттєво зменшити міжпоїзний інтервал та підвищити пропускну спроможність залізничних ліній. Особливо ефективним є застосування таких систем на швидкісних та високошвидкісних лініях, а також ділянках зі змішаним рухом. Проте впровадження такої системи можливе лише після ретельного дослідження та доказу їх надійності і функціональної безпечності.

3. Найбільш перспективним стандартом для побудови сучасної системи залізничного цифрового радіозв'язку є стандарт LTE. Проте такий стандарт необхідно доповнити відповідно до потреб залізничного транспорту: виділити окрему смугу частот, ввести додаткові функції, організувати пріоритетність викликів, забезпечити високу надійність радіозв'язку шляхом апаратного та інформаційного резервування.

4. В результаті моделювання було встановлено, що навіть при найгірших умовах завантаження мережі LTE-R її пропускну спроможність цілком достатня для забезпечення всіх службових каналів зв'язку та для надання телекомунікаційних послуг пасажирам.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ақылбеков, А. Н. Характеристика системі интервального регулирования движения поездов на базе радиоканала с подвижными блок-участками (СИРДП-Е) и анализе ее внедрения в Казахстане [Текст] / А. Н. Ақылбеков // КазАТК им.М.Тынышпаева – 2017. – С. 17-21.
2. Архитектура сети [Электрон. ресурс]: Информационные Технологии. Режим доступа: <http://kunegin.com/ref4/tetra/13.htm>
3. Баранов Л. А. Потенциальная оценка пропускной способности железнодорожных линий по системам безопасности [Текст] // Сборник докладов 7-ой международной научно-технической конференции ЮЖЕЛ 2000. – Югославия 2000. – С. 43-48.
4. Бурковский, Ю.В. Порівняльний аналіз традиційних та координатних систем інтервального регулювання руху поїздів [Текст] / Ю.В. Бурковский, К.В. Гончаров // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2014. – № 7. – С. 63-69.
5. Бутько, Т.В. Системы интервального регулирования движения поездов на перегонах [Текст]. / Т. В. Бутько, В. И. Гаврилюк, В. Н. Самсонкин – Харьков: УкрГАЗТ, 2005 – 241 с.
6. Горелов, Г.В. Типы и стандарты систем связи с подвижными объектами, применяемыми на железнодорожном транспорте [Текст]: Учебное пособие / Г.В. Горелов, А.П. Богачев, Е.А. Бахтиярова – М.:МИИТ, 2014. – 42 с.
7. Дроздова, В.Г. Оценка пропускной способности сетей LTE [Текст] / В.Г. Дроздова, М.А. Белов // ФГОБУ ВПО «Сибирский Государственный Университет Телекоммуникаций и Информатики»
8. Европейская система управления движением поездов [Электрон. ресурс]: Википедия. Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Европейская_система_управления_движением_поездов
9. Ефименко, Ю. И. Общий курс железных дорог [Текст]: учеб.пособие для студ.учреждений сред.проф.образования / Ю. И. Ефименко, М. М. Уздин, В. И. Ковалев – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 256 с.

10. Зорин, В.И. КЛУБ-У на службе безопасности движения поездов [Текст] / В.И Зорин // Евразия вести – 2004. – № 11.
11. Казаков, А. А. Системи інтервального регулювання руху поїздів [Текст]: учебник для техникумов ж.-д. трансп. / А. А. Казаков, В. Д. Бубнов, Е. А. Казаков – М.: Транспорт, 1986. – 399 с.
12. Комплексное локомотивное устройство безопасности клуб-у [Электрон. ресурс]: StudFiles. Режим доступа: <https://studfile.net/preview/392037/page:24/>
13. Кондратьева, Л. А. Системи регулювання руху на залізничному транспорті [Текст]: учебник для техникумов и колледжей ж.-д. трансп. / Л.А.Кондратьева, О.Н.Ромашкова. – М.: Маршрут, 2003. – 432 с.
14. Кукса, Е.А. Моделирование дальности действия и пропускной способности базовой станции мобильных сетей LTE[Текст]: / Е.А. Кукса // «Молодой учёный» Ежемесячный научный журнал – 2011. – № 8. – С. 68-73.
15. Лисенков, В.М. Системи управління движением поездов на перегонах [Текст]: учебник для вузов ж.-д. транспорта / В.М. Лисенков, П. Ф. Бестемьянов, В. Б. Леушин и др. – М.:ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2009. – 160 с.
16. Лоскутов, А.М. Европейська система управління рухом поїздів (ETCS) [Электрон. ресурс]: Студенческий научный форум / А.М. Лоскутов; Курганский институт железнодорожного транспорта филиал Уральского государственного университета путей сообщения – К.: 2019. – Режим доступа: <https://scienceforum.ru/2019/article/2018010509>
17. Многозначная автоматическая локомотивная сигнализация АЛСМ [Электрон. ресурс]: Электронная библиотека студента. Режим доступа: <https://www.bibliofond.ru/view.aspx?id=731753>
18. Новиков, В.Г. Координатная система интервального регулирования движения поездов с расширенными функциональными возможностями локомотивного устройства [Текст]: диссертация / В.Г. Новиков. – Москва, 2011
19. Новые системы интервального регулирования поездов [Электрон. ресурс]: Инновационный дайджест. Режим доступа: <http://www.rzd->

expo.ru/innovation/eastholme_management_and_traffic_safety_reducing_the_risk_of_emergencies/new_systems_of_interval_control_trains/

20. Основные требования к организации радиосвязи на высокоскоростной магистрали [Текст] / Д. Н. Роевков и др. // «Транспорт Российской Федерации» – 2015. – № 2. – С. 49-52.

21. Попов, П.А. Совершенствование методов и алгоритмов управления в системах интервального регулирования движения поездов с использованием радиоканала [Электрон. ресурс]: Электронная библиотека диссертаций / П.А. . Попов; Режим доступа: <https://www.dissercat.com/content/sovershenstvovanie-metodov-i-algoritmov-upravleniya-v-sistemakh-intervalnogo-regulirovaniya->

22. Системы управления движением поездов CTCS на высокоскоростных линиях Китая [Текст] // Железные дороги мира – 2015. – № 3. – С. 67-71.

23. Технология/стандарт UMTS. Скорость передачи данных в 3G/UMTS сетях [Электрон. ресурс]: WorkMobile. Режим доступа: <https://www.workmobiles.ru/tags/UMTS/>

24. Цифровая железная дорога Европы - от ERTMS до искусственного интеллекта [Текст] / О.Н. Покусаев и др. // International Journal of Open Information Technologies ISSN – 2019. – № 7. – С. 90-119.

25. Цифровая железная дорога и переход от сети GSM-R к LTE-R и 5G-R – состоится ли он? [Текст] / М.А. Шнепс-Шнеппе и др. // International Journal of Open Information Technologies ISSN – 2017. – № 1. – С. 71-80.

26. Шаманов, В. И. Системы інтервального регулювання руху поїздів з цифровими радіоканалами [Текст] / В. И. Шаманов // Российский университет транспорта (МИИТ) – 2018. – № 2. – С. 223-240.

27. Chinese Train Control System (CTCS) [Электрон. ресурс]. Режим доступа: https://en.wikipedia.org/wiki/Chinese_Train_Control_System

28. GSM [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/GSM#:~:text=Система%20GSM%20состоит%20из%20трёх,—%20Operation%20and%20Maintenance%20Centre>

29. GSM-R [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/GSM-R>

30. GSM [Электрон. ресурс]: LanMarket. Режим доступа:
<https://lanmarket.ua/entsiklopediya/besprovodnye-tekhnologii/gsm.html>

31. TETRA – цифровой стандарт для профессиональной мобильной радиосвязи [Текст] // Новости Rohde&Schwarz – 2003. – № 178. – С. 4-5.