

Міністерство освіти і науки України  
Український державний університет науки і технологій

Факультет «Комп'ютерні технології і системи»


Кафедра «Автоматика та телекомунікації»

Пояснювальна записка  
до кваліфікаційної роботи  
на здобуття освітнього ступеня «магістр»

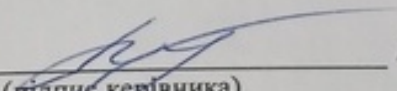
на тему: Удосконалення систем забезпечення безпеки руху поїздів  
шляхом впровадження цифрового радіоканалу передачі даних

за освітньою програмою «Автоматика та автоматизація на транспорті»  
зі спеціальності: 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Виконав: студент групи АТ2222 (968М)

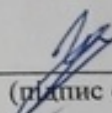
  
\_\_\_\_\_ / Андрій НЕКУР /  
(підпис студента)

Керівник: доцент кафедри АТ

  
\_\_\_\_\_ / Костянтин ГОНЧАРОВ /  
(підпис керівника)

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

Студент

  
\_\_\_\_\_ (підпис студента)

Дніпро – 2024 рік

**Ministry of Education and Science of Ukraine**  
**Ukrainian State University of Science and Technologies**  
**Faculty of Computer Technologies and Systems**  
**Department of Automation and Telecommunication**

**Explanatory Note**

to Master's Thesis

master

(higher education degree)

on the topic: Improving the systems for ensuring the train traffic safety  
by implementation a digital radio data transmission channel

according to educational curriculum «Automatic machinery and automation in transport industry»

in the Specialty: 151 Electronics and automation (Automation and computer-integrated technologies)

Done by the student of the group AT2222 (968M)

/ Andrii NEKUR /

Scientific Supervisor: associate professor

/ Kostiantyn HONCHAROV /

**Міністерство освіти і науки України**  
**Український державний університет науки і технологій**

Факультет: Комп'ютерних технологій і систем  
Кафедра: Автоматика та телекомунікації  
Рівень вищої освіти: Другий (магістерський)  
Освітня програма: Автоматика та автоматизація на транспорті  
Спеціальність: 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АТ

\_\_\_\_\_ Володимир ГАВРИЛЮК

(підпис)

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 202\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ**

на кваліфікаційну роботу магістра  
(ступінь вищої освіти)

студенту Некур Андрію Олеговичу  
(Прізвище, Ім'я По батькові)

**1. Тема роботи:** Удосконалення систем забезпечення безпеки руху поїздів шляхом впровадження цифрового радіоканалу передачі даних

Керівник роботи: Гончаров Костянтин Вікторович, к.т.н., доцент  
(Прізвище, Ім'я, По батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом від " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2022 р. № \_\_\_\_\_

**2. Строк подання студентом роботи:** 08.01.2024 р.

**3. Вихідні дані до роботи:** Структура та технічні характеристики існуючих систем забезпечення безпеки руху поїздів

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

4.1 Аналітична частина: виконати аналітичний огляд існуючих систем

забезпечення безпеки руху поїздів. 4.2 Основна частина: 1) розробити

структурну схему та алгоритм роботи системи забезпечення безпеки руху

поїздів із застосуванням цифрового радіоканалу; 2) виконати порівняльний

аналіз координатних та традиційних систем ІРРП; 3) виконати

територіально-частотне планування мережі цифрового радіозв'язку LTE-R

**5. Перелік графічного матеріалу:**

Структурна схема та блок-схема алгоритму роботи системи забезпечення

безпеки руху поїздів із застосуванням цифрового радіоканалу; схема

розташування базових станцій мережі LTE-R; графічні залежності,

отримані в результаті розрахунків

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітичний огляд існуючих систем забезпечення безпеки руху поїздів	03.07.2023	
2	Розробка структури та алгоритмів роботи системи забезпечення безпеки руху поїздів із застосуванням цифрового радіоканалу	02.10.2023	
3	Порівняльний аналіз координатних та традиційних систем інтервального регулювання руху поїздів	13.11.2023	
4	Територіально-частотне планування мережі цифрового радіозв'язку LTE-R	26.12.2023	
5	Оформлення кваліфікаційної роботи	08.01.2024	
6	Подання кваліфікаційної роботи до кафедри	15.01.2024	
7	Захист кваліфікаційної роботи на засіданні Екзаменаційної комісії	22.01.2024 – 28.01.2024	

Студент

\_\_\_\_\_ (підпис)

Андрій НЕКУР

\_\_\_\_\_ (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_ (підпис)

Костянтин ГОНЧАРОВ

\_\_\_\_\_ (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

## РЕФЕРАТ

**Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи магістра:**

61 сторінка, 26 рисунків, 2 таблиці, 11 джерел літератури.

**Об'єкт розробки** – система забезпечення безпеки руху поїздів на базі цифрового радіозв'язку

**Мета роботи** – удосконалення систем забезпечення безпеки руху поїздів шляхом впровадження цифрового радіоканалу передачі даних

**Методи дослідження** – аналіз існуючих технічних рішень, методи розрахунку пропускної спроможності залізничних ліній, методи визначення дальності радіозв'язку, методи територіально-частотного планування стільникової мережі.

У першому розділі проведений аналіз існуючих систем забезпечення безпеки руху поїздів, зокрема розглянуто принципи побудови та особливості систем керування рухом поїздів на базі радіозв'язку, такі як ERTMS та CTCS. У другому розділі запропоновано структуру та принцип побудови системи забезпечення безпеки руху поїздів на базі цифрового радіозв'язку. Розроблений алгоритм роботи системи локомотивної безпеки. В третьому розділі проведений порівняльний аналіз пропускної здатності традиційних систем автоблокування з фіксованими блок-ділянками та координатних систем інтервального регулювання. Визначено, що координатну систему доцільно впроваджувати на ділянках зі змішаним рухом та високошвидкісних ділянках. В четвертому розділі визначена дальність дії базової станції LTE-R для міської, приміської та селищної місцевості, розрахована пропускна спроможність базової станції. Виконано територіально-частотне планування мережі LTE-R для залізничної ділянки Дніпро-Головний – Кам'янське.

**Висновок.** Впровадження системи забезпечення безпеки руху поїздів на базі цифрового радіозв'язку дозволить підвищити пропускну спроможність залізничних ліній та знизити експлуатаційні витрати.

**Ключові слова:** СИСТЕМА ІНТЕРВАЛЬНОГО РЕГУЛЮВАННЯ РУХУ ПОЇЗДІВ, РУХЛИВІ БЛОК-ДІЛЯНКИ, ЦИФРОВИЙ РАДІОЗВ'ЯЗОК, МОДЕЛЬ ОКАМУРА-ХАТА, БАЗОВІ СТАНЦІЇ, СТІЛЬНИКОВА МЕРЕЖА LTE-R.

## ЗМІСТ

ВСТУП	9
1 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКИ РУХУ ПОЇЗДІВ	11
1.1 Призначення та особливості систем автоматичного блокування	11
1.2 Огляд існуючих локомотивних систем забезпечення безпеки руху поїзда	14
1.2.1 Система АЛСН	14
1.2.2 Система КЛУБ-У	16
1.2.3 Система Improtrain 250	19
1.3 Системи інтервального регулювання руху поїздів на базі радіоканалу	20
1.3.1 Європейська система ERTMS	20
1.3.2 Китайська система CTCS	24
1.4 Висновки до розділу 1	28
2 СТРУКТУРА ТА АЛГОРИТМИ РОБОТИ СИСТЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКИ РУХУ ПОЇЗДІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ЦИФРОВОГО РАДІОКАНАЛУ	29
2.1 Структура та принцип дії системи забезпечення безпеки руху поїздів на базі цифрового радіозв'язку	29
2.2 Алгоритм роботи системи локомотивної безпеки	32
2.3 Координатні системи інтервального регулювання	35
2.4 Висновки до розділу 2	37
3 ПОРІВНЯННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ АВТОБЛОКУВАННЯ ТА КООРДИНАТНИХ СИСТЕМ ІНТЕРВАЛЬНОГО РЕГУЛЮВАННЯ	38
3.1 Пропускна здатність перегонів при трьохзначному та чотирьохзначному автоблокуванні	38

3.2 Пропускна здатність перегонів при координатній системі інтервального регулювання	41
3.3 Висновки до розділу 3	43
4 ТЕРИТОРІАЛЬНО-ЧАСТОТНЕ ПЛАНУВАННЯ МЕРЕЖІ ЦИФРОВОГО РАДІОЗВ'ЯЗКУ LTE-R	44
4.1 Організація цифрового радіозв'язку з рухомими об'єктами на залізничних ділянках	44
4.2 Модель розповсюдження радіохвиль Окамура-Хата	46
4.3 Визначення дальності дії базової станції LTE-R	47
4.4 Територіально-частотне планування стільникової мережі LTE-R для залізничної ділянки Дніпро-Головний – Кам'янське	53
4.5 Висновки до розділу 4	58
ВИСНОВКИ	59
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	61

## ВСТУП

Системи управління рухом поїздів не тільки забезпечують задану безпеку перевезень, а й накладають певні обмеження на параметри перевізного процесу і тим самим впливають на його ефективність. Тому, протягом всієї історії розвитку залізничного транспорту поліпшувалися функціональні характеристики і технічні параметри систем управління рухом з метою підвищення ефективності перевезень і збільшення їх обсягів. На сьогоднішній день, на вітчизняних залізницях, регулювання руху поїздів здійснюється за допомогою систем автоблокування (АБ), автоматичної локомотивної сигналізації (АЛС) і систем централізованого управління стрілками і сигналами на станціях (ЕЦ). Всі вони базуються на роботі рейкових кіл, які виконують функції датчиків контролю зайнятості колійної ділянки, та цілісності рейкової лінії. Такі системи мають ряд недоліків: застаріла матеріально-технічна база; неможливість збільшення пропускної та провізної спроможності, а через це і неможливість забезпечення високошвидкісного руху на магістралях; великі матеріальні затрати на установку та обслуговування пристроїв автоматики і телемеханіки; суттєва залежність функціонування рейкових кіл від кліматичних умов; негативний вплив тягового струму.

За останні десятиліття середні швидкості руху на залізницях розвинених країн стрімко зросли, і ця тенденція буде продовжуватись в подальшому. У зв'язку з цим, існує необхідність зменшення міжпоїзних інтервалів та збільшення пропускної здатності залізничних ліній. Особливо це необхідно робити на ділянках зі змішаним рухом, де рухаються поїзди різних категорій, що мають різні характеристики, гальмівні шляхи тощо, та класичні системи не дозволяють забезпечити мінімальний міжпоїзний інтервал. В такому випадку, одним з найбільш ефективних способів збільшення провізної і пропускної здатності є скорочення міжпоїзного інтервалу, за рахунок реалізації координатного принципу інтервального регулювання. Підтвердженням цього є досвід розвинених країн у вирішенні даного питання. Головною відмінністю координатних систем інтервального регулювання від

класичних є те, що керування рухом поїзда відбувається не на границю блок-ділянки, а на координату “хвоста” поїзда, що знаходиться попереду.

Координатні системи дозволяють позбавитись від недоліків класичних систем інтервального регулювання на базі рейкових кіл, та мають ряд своїх переваг: значне збільшення пропускної здатності; зменшення затрат на інфраструктуру; використання електронної карти маршрутів, яка автоматично буде завантажуватись через радіоканал при зміні допустимих параметрів руху; покращення умов праці; використання сучасних мікроелектронних компонентів; модульна архітектура системи, а тому – можливість збільшувати функціональні можливості у випадку необхідності; гнучкість технічних рішень з організації руху поїздів, використовуючи фіксовані чи рухомі блок-ділянки. Для організації координатних систем інтервального регулювання використовується цифровий радіоканал, який забезпечує передачу команд управління та інших повідомлень від центру радіоблокування на локомотив.

Метою магістерської роботи є розробка структури та алгоритмів роботи системи забезпечення безпеки руху поїздів на базі цифрового радіозв'язку, проведення порівняльного аналізу класичних та координатних систем інтервального регулювання руху поїздів, дослідження системи цифрового зв'язку LTE-R.

# 1 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКИ РУХУ ПОЇЗДІВ

## 1.1 Призначення та особливості систем автоматичного блокування

Системи автоматичного блокування (АБ) були розроблені з метою збільшення пропускної здатності перегонів. При застосуванні АБ, перегони між станціями ділять на блок-ділянки, кожна з яких огорожується прохідними світлофорами. Їх показання залежать від стану цієї блок-ділянки та декількох інших, що знаходяться за ним по ходу слідування поїзда. Таким чином зменшується безпечний міжпоїзний інтервал та, відповідно, пропускна здатність перегону [1, 2].

Системи АБ (рис.1.1) для кожної блок-ділянки складаються (у випадку децентралізованого розміщення апаратури) з: рейкового кола (РК), лінійного кола (ЛК) та прохідних світлофорів з релейними шафами (РШ). РК виконують функції датчиків контролю зайнятості колійної ділянки, а також цілісності рейкової лінії. Лінійним колом забезпечується зв'язок між світлофорами.

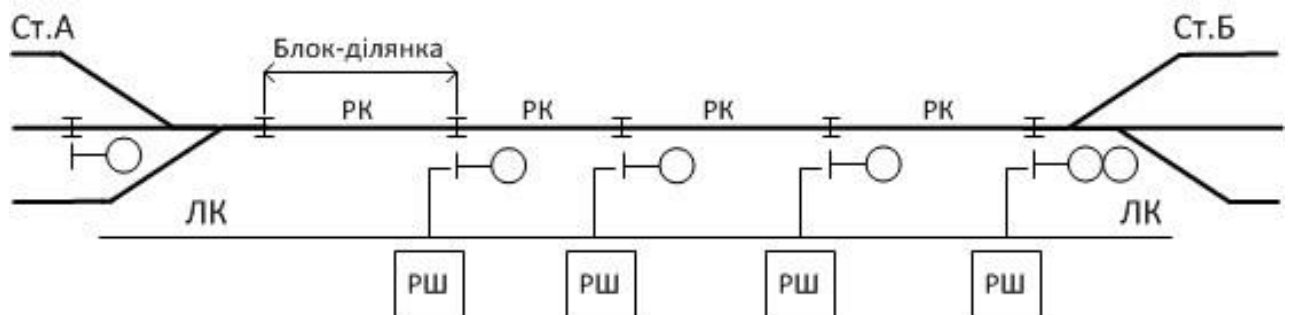


Рисунок 1.1 - Схема системи АБ (з децентралізованим розміщенням обладнання)

Основними функціями системи АБ є [1, 2]:

- автоматична зміна показань прохідного світлофора;
- огороження поїзда, що рухається чи стоїть на блок-ділянці від наїзду на нього іншого поїзда;
- вказувати машиністу кількість вільних блок-ділянок, а також швидкість руху, необхідність гальмування чи зупинки перед світлофором;

- контроль цілісності рейкової лінії, та у випадку її пошкодження перекриття прохідного світлофора.

За кількістю сигнальних показань світлофора розрізняють 2-х, 3-х та 4-х значні АБ. При 2-х значній АБ прохідні світлофори мають лише 2 показання – червоний та зелений вогні. Червоний вогонь означає, що лежача за ним блок-ділянка зайнята або рельсова лінія пошкоджена; зелений вогонь означає вільність блок-ділянки та цілісність рельсової лінії. Для виключення зіткнень поїздів, або входу поїзда на ділянку з пошкодженою рейкою необхідно, щоб довжина блок-ділянки була не менше ніж [1, 2]:

$$l_{B2} \geq l_{BC} + S_{Tmax} \quad (1.1)$$

де  $l_{BC}$  – шлях, що проходить поїзд за час сприйняття машиністом сигналу світлофору;

$S_{Tmax}$  – гальмівний шлях повного службового гальмування при максимальній швидкості потягу.

Мінімальна міжпоїздна відстань між центрами поїздів в цьому випадку приймається рівною [1, 2]:

$$L_2 = l_{B2} + l_n \quad (1.2)$$

де  $l_n$  – довжина поїздів.

Для забезпечення безпеки руху величина  $l_n$  повинна братися максимально можливою довжиною поїздів, що рухаються на даній ділянці.

Недоліки 2-х значного АБ:

– при поганій видимості в силу різних причин, червоний вогонь може бути не помічений машиністом, наслідком чого може бути серйозна аварія;

– раптова поява червоного вогню одразу після проходження світлофора із зеленим показанням не сприяє впевненному веденню поїзда машиністом.

Через ці недоліки 2-х значна АБ не отримала розповсюдження на залізничних магістралях. І в основному застосовують її тільки в метрополітені.

Найбільш широке розповсюдження отримала 3-х значна сигналізація, при якій світлофори мають 3 сигнальні показання: червоний вогонь, жовтий вогонь (вільна одна блок-ділянка), зелений вогонь (вільні 2 чи більше блок-ділянок).

Довжина блок-ділянки при 3-х значній сигналізації визначається співвідношенням [1, 2]:  $l_{БЗ} \geq S_{Tmax}$ , таким чином в даному випадку не потрібен час на сприйняття сигналу, тобто  $l_{BC} = 0$ .

Впевнене та плавне ведення поїзда досягається при 3-х блочному розмежуванні, коли рух здійснюється за правилом «під зелений на зелений» сигнал.

Можливе і 2-х блочне розмежування, проте воно має свій недолік: рух відбувається по принципу «під зелений на жовтий» сигнал і це потребує певного зниження швидкості перед жовтим сигналом, а в разі раптової появи зеленого вогню – примушує машиніста збільшувати швидкість. Таким чином не забезпечується рівномірне ведення поїзда, тому таке розмежування допускається лише при збоях графіку руху поїздів [1, 2].

Мінімальна довжина блок-ділянки при 3-х значній сигналізації повинна бути не менше гальмівного шляху поїзда, у якого він максимальний. Це значить, що на ділянках з рухом вантажних, дальніх пасажирських та приміських поїздів довжина блок-ділянок не повинна бути меншою за гальмівний шлях вантажного поїзда. Це обумовлює величину міжпоїздної інтервалу не менше 6 хвилин.

Разом з тим при русі поїздів з різними швидкостями, довжинами та гальмівними характеристиками бажано забезпечити максимальну пропускну здатність. Такими ділянками являються приміські зони великих міст. Для досягнення максимальної пропускну здатності таких ділянок застосовують 4-х значну сигналізацію, в якій також використовуються трьохзначні світлофори але додається ще одне сигнальне показання – жовтий із зеленим вогні, що означає вільність 2 блок-ділянок за світлофором, а зелений вогонь, в свою чергу, означає вільність 3-х і більше блок-ділянок за світлофором.

Довжина блок-ділянки при 4-х значній сигналізації визначається з умови [2]:  $2l_{Б4} \geq S_{Tmax}$ , та крім цього довжина блок-ділянки повинна бути не менше максима-

льної довжини гальмівного шляху того виду поїзда, для якого вона мінімальна. До таких поїздів відносяться приміські електропоїзди.

Сума довжин кожної пари суміжних блок-ділянок повинна бути не менше максимальної довжини гальмівного шляху тої категорії поїздів, у яких вона найбільша. Сюди відносяться швидкісні поїзди або деякі види вантажних.

Довжина кожної блок-ділянки  $l_{Б4}$  повинна бути еквівалентна половині максимальної довжини гальмівного шляху швидкісного поїзда.

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

Зі збільшення значності АБ мінімально допустимі інтервали між попутними поїздами зменшуються, і як результат збільшується пропускна здатність ділянок залізниці.

## **1.2 Огляд існуючих локомотивних систем забезпечення безпеки руху поїзда**

### **1.2.1 Система АЛСН**

В Україні використовується автоматична сигналізація локомотивна безперервного типу з числовим кодуванням (АЛСН). При такій сигналізації в кабіну локомотива безперервно передаються світлові показання попередніх колійних світлофорів. Для передачі на локомотив кожне світлове показання колійного світлофора перетворюється на кодові комбінації електричних сигналів, які посилаються в рейкове коло назустріч поїзду [2, 3].

Формування кодових комбінацій проводиться за допомогою спеціальних пристроїв – кодових колійних трансмітерів (КПТ). В даний час застосовуються два типи цих пристроїв: КПТ-5 і КПТ-7, які формують кодові комбінації одного і того ж показання світлофора з різною тривалістю циклу. Для трансмітера типу КПТ-5 тривалість одного циклу передачі сигналу світлофора становить 1,6 с., а для

КПТ-7 - 1,9 с. Як правило, в системі АЛСН до сусідніх блок-ділянок підключають КПТ різного типу. Це дає можливість на локомотиві визначати момент переходу з одного блоку на інший. На деяких станційних ділянках з метою унеможливлення впливу сигналів АЛСН головного шляху на сигнали бічного шляху використовується спеціальний захисний код для передачі сигналу КЖ. Кодові цикли показані на рис. 1.2.

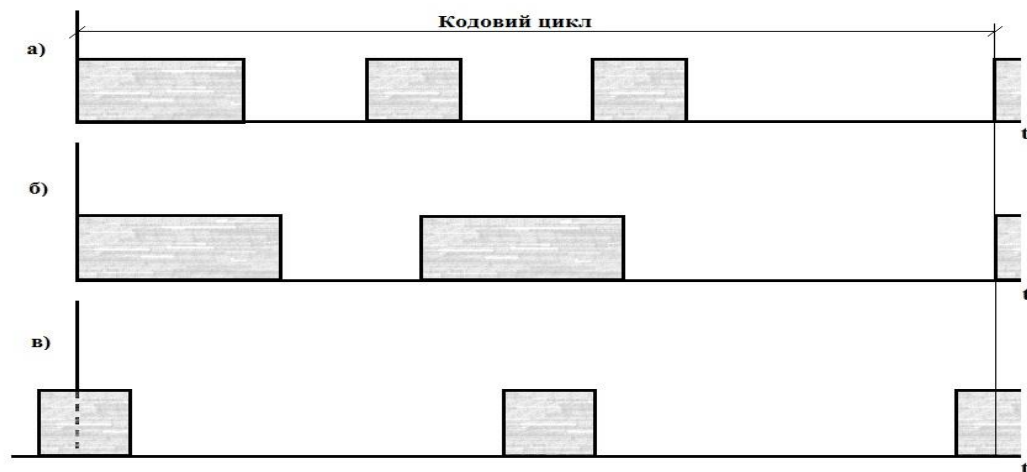


Рисунок 1.2 - Кодові цикли системи АЛСН:

а) для коду «З»; б) для коду "Ж"; в) для коду "КЖ"

Задля більшої стійкої роботи локомотивної сигналізації в колійні пристрої подають сигнальні струми певної величини. При електричній тязі постійного струму мінімальний струм сигналу локомотивної з частотою 50 Гц на вхідному кінці рейкового ланцюга повинен бути не менше 2 А. При електричній тязі змінного струму мінімальний струм локомотивної сигналізації з частотою 25 і 75 Гц на вхідному кінці рейкового ланцюга струм має бути не менше 1,4 А. На ділянках із тепловою тягою цей струм (із частотою 50 Гц) має бути не менше 1,2 А. У кожному рейковому колі на перегоні або станції передача сигналів на локомотив проводиться у напрямку від світлофора до локомотива. Рівень сигналу в рейках у міру просування поїзда до світлофора безперервно зростає і може збільшуватись 10...15 разів.

## 1.2.2 Система КЛУБ-У

Останнім часом на залізниця України та інших країн світу впроваджуються системи локомотивної безпеки, які здійснюють контроль швидкісного режиму з урахування сигналів АЛС, постійних та тимчасових обмежень швидкості, визначають поточне місцезнаходження поїзда, перевіряють пильність машиніста, у разі порушень умов безпеки руху здійснюють автоматичне гальмування. До таких систем відноситься комплексний локомотивний пристрій забезпечення безпеки руху поїзда КЛУБ-У [5], структурна схема якого представлена на рис. 1.3.

До складу системи КЛУБ-У входять наступні блоки:

1. Блок електроніки локомотивний БЕЛ-У;
2. Блок індикації локомотивний;
3. Блок індикації помічника машиніста БИЛ-ПОМ;
4. Блок комутації й реєстрації інформації БКР-У;
5. Блок введення локомотивний БВЛ-У;
6. Блок реєстрації інформації на касету з довгочасною енергонезалежною електронною пам'яттю БР-У;
7. Викличний пристрій ВП;
8. Рукоятка підтвердження пильності машиніста РБ, РБС й помічника машиніста РБП;
9. Приймальні котушки КПУ сигналів АЛСН (АЛС-ЕН) й коробку сполучну КС;
10. Датчики виміру шляху та швидкості ДПС 1 і ДПС 2;
11. Блок спряження датчиків ДПС з апаратурою КЛУБ-У – БС-ДПС;
12. Датчики виміру тиску в гальмівних пристроях локомотива ДД;
13. Електропневматичний клапан екстреного гальмування ЕПК;
14. Блок контролю несанкціонованого відключення ЕПК ключем КОН;
15. Антенно-підсилюючий пристрій АУУ супутникової навігаційної системи СНС і антену СНС (АСНС);
16. Антена радіоканалу АРК;

17. Приймально-передавальний пристрій цифрового радіозв'язку ППУ-РС і антену радіозв'язку АРС;
18. Блок узгодження інтерфейсів БСИ;
19. Джерело живлення ИПЛЕ.

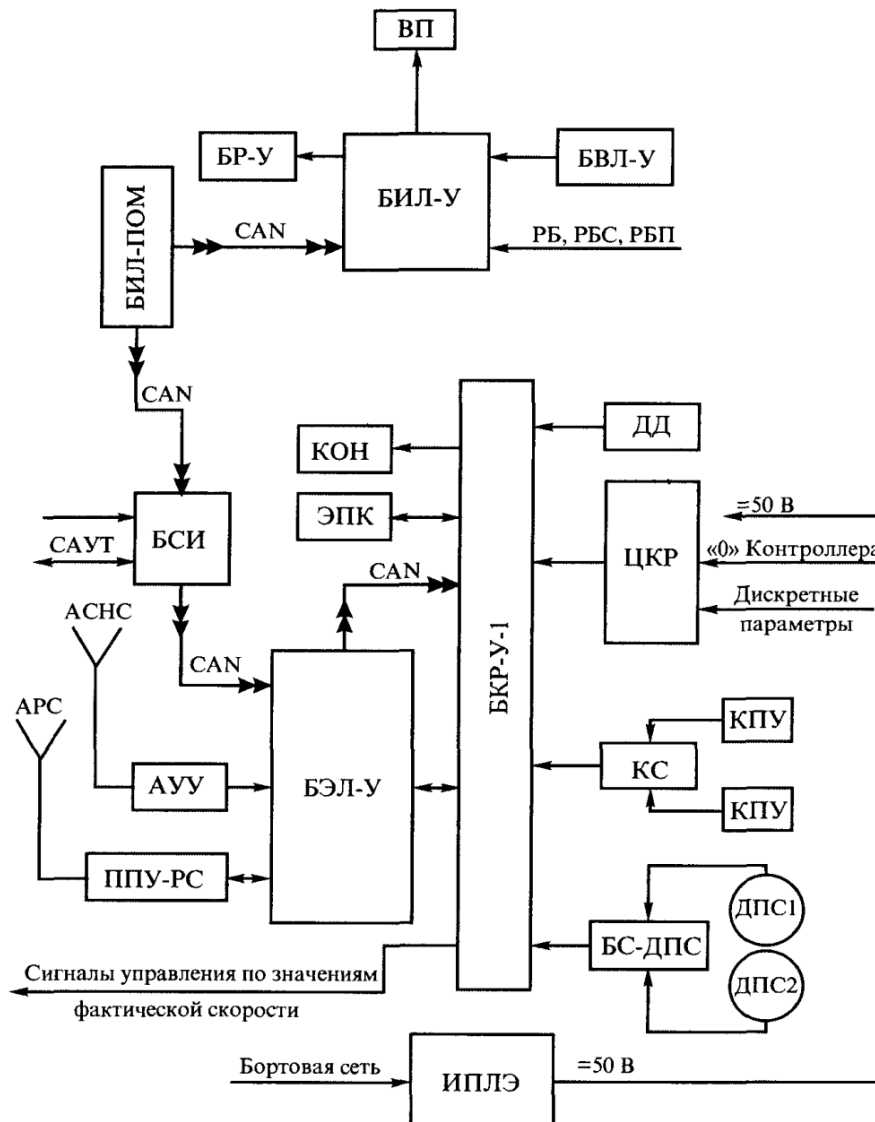


Рисунок 1.3 - Структурна схема системи КЛУБ-У

Блок електроніки – БЕЛ-У приймає сигнали від зовнішніх пристроїв, контролює та оброблює інформацію, що надходить між усіма сполученнями системи КЛУБ-У. Виконується на базі мікропроцесорних компонентів. БЕЛ-У містить у собі наступні логічні модулі: модуль зовнішніх пристроїв, радіоканалу, маршруту, вимірювач параметрів руху, центральний обробник.

Обмін інформацією відбувається за допомогою CAN-інтерфейсу.

Блок індикації локомотивний БИЛ виконує наступні функції: обробка та відображення інформації, що виводиться на лицьову панель, вироблення світлового та звукового сигналів «Увага» й прийому сигналів про положення рукояток РБ, РБС, РБП і від блока БВЛ-У, задання режиму роботи локомотиву (поїзний, маневровий, подвійної тяги), введення, зберігання та запису на касету реєстрації локомотивних та поїзних характеристик, завдання режимів діагностування модулів КЛУБ-У та зовнішніх пристроїв (САУТ, ТСКБМ), реєстрації оперативної інформації про рух потяга на касету реєстрації КР.

До складу БИЛ входять наступні частини: модуль керування, модуль індикації, блок введення локомотивних, поїзних характеристик та службових команд, модуль реєстрації.

Модуль керування забезпечує приймання інформації від інших модулів КЛУБ-У за допомогою CAN-інтерфейсу.

Блок комутації і реєстрації БКР-У призначений для приймання аналогових сигналів від датчиків тиску в зрівняльних резервуарах ДДУР1, ДДУР2, гальмівному циліндрі ДДТМ, пред'явлення їх у цифровому форматі для індикації БИЛ, приймання дискретних сигналів, комутація кіл контролю, живлення ЕПК та кіл приймальних котушок, передача сигналу керування ЕПК від пристрою КОН, включення живлення апаратури КЛУБ-У, передача інформації для реєстрації на касету.

Блок містить у собі пристрій формування і реєстрації даних УФІР.

Система КЛУБ-У виконує наступні функції [5]:

1. Прийом з рейкових кіл сигналів автоматичної локомотивної сигналізації типу АЛСН, АЛС-ЕН, також сигналів, що передаються через цифровий радіоканал, сигналів про показання прохідних світлофорів, діючі обмеження швидкості на даному відрізку шляху, сигналів примусової зупинки локомотива, а також дозвіл машиністу пройти забороняючий світлофор;

2. Визначення швидкості та координати локомотива за допомогою сигналів від осьових датчиків шляху і швидкості, апаратури супутникової навігаційної системи GPS/ГЛОНАСС;

3. Індикація машиністу поточного астрономічного часу і залізничної координати локомотива;
4. Неперервне формування максимального значення швидкості руху поїзда; Формування та індикація машиністу відстані до актуальної перешкоди зі вказанням швидкості, на якій необхідно її проїхати;
5. В разі перевищення допустимої швидкості руху поїзда вмикання екстреного гальмування;
6. Уникнення проїзду світлофора с забороненим сигналом;
7. Уникнення скочування рухомого складу;
8. Індикація необхідної інформації машиністу локомотива та його помічнику;
9. Контроль пильності машиніста методом фіксації натискання рукояток пильності;
10. Реєстрація параметрів руху поїзда на знімну касету для наступного дешифрування за допомогою стаціонарного пристрою дешифрування (СПД);
11. Формування короткочасних звукових сигналів при зміні параметрів руху;
12. Введення та відображення характеристик рухомого складу та збереження їх у вимкненому стані;
13. Приймання та реєстрація сигналів від пристрою локомотиву;
14. Обмін інформацією з бортовими пристроями САУТ та іншими бортовими системами.

### **1.2.3 Система Improtrain 250**

Система локомотивної безпеки Improtrain 250 була розроблена українською компанією НВО «Імпульс» (м. Сєвєродонецьк). Система може застосовуватись на залізницях, у тому числі на швидкісних та високошвидкісних ділянках з автономною та електричною тягою постійного та змінного струму, забезпечених колійними пристроями автоматичної локомотивної сигналізації (АЛСН), багатозначної автоматичної локомотивної сигналізації (АЛС-ЕН); на ділянках залізниць, облад-

наних системою координатного регулювання руху поїздів на базі цифрового радіоканалу.

Основні функції [6]:

- визначення швидкості та координат локомотива за інформацією від пристроїв супутникової навігації та датчиків шляху та швидкості;
- формування значення допустимої швидкості руху з використанням сигналів АЛСН, АЛС-ЕН, радіоканалу, даних електронної картки;
- індикація необхідної інформації для машиніста та його помічника;
- забезпечення гальмування при перевищенні фактичної швидкості над допустимою швидкістю;
- виключення проїзду світлофорів із заборонними сигналами;
- виключення несанкціонованого руху локомотива (скочування);
- службове гальмування через приставку крана машиніста за командою, переданою цифровим радіоканалом;
- контроль пильності машиніста;
- запис на знімну касету реєстрації параметрів руху локомотива;
- взаємодія з іншими бортовими системами локомотива за допомогою цифрових інтерфейсів (CAN, MVB, RS-485).

### **1.3. Системи інтервального регулювання руху поїздів на базі радіоканалу**

#### **1.3.1 Європейська система ERTMS**

Європейська система управління залізничним рухом – комплекс єдиних стандартів, розроблених у рамках міжнародного співробітництва для залізничної автоматизації, телемеханіки, зв'язку та диспетчерського контролю. При використанні традиційних систем забезпечення руху поїздів на кожній блок-дільниці, на які поділяються перегони, може бути не більше одного складу. В основу роботи ERTMS покладено ідею безперервного контролю перевізного процесу за допомогою сукупності різних технічних засобів, завдяки чому досягається безпечне зменшення

інтервалу попутного прямування, а значить збільшення пропускної спроможності. Дія ERTMS заснована на визначенні розташування поїзда, обчисленні відстані між поїздами, контролі максимально дозволеної швидкості на ділянці, розрахунку кривої гальмування (залежності швидкості від пройденого шляху), зіставленні даних про маршрут з технічними характеристиками поїзда. Прийом, обробка та передача всієї необхідної інформації здійснюється комплексом підлогових та бортових пристроїв та систем ERTMS. Безперервний контроль руху, пристосований до постійної зміни дорожнього стану, дозволяє оптимізувати трафік і знизити енерговитрати [3, 7].

Система рівня 1 забезпечує регулювання швидкості поїзда залежно від переданих з колії на локомотив даних, сформованих на основі показань перегінних сигналів. Така система розроблена як доповнення до існуючих систем забезпечення безпеки руху поїздів. Для організації каналу зв'язку колія-локомотив застосовуються спеціалізовані прийомо-передатчики (євробалізи), розташовані безпосередньо на залізничному полотні поряд з перегінними сигналами і сполучені з центром управління рухом поїздів (рис. 1.4). Приймаючи управляючий сигнал через євробалізи, бортове обладнання ETCS автоматично обчислює максимальну швидкість поїзда і координату наступного пункту гальмування, зважаючи на гальмівні характеристики поїзда і дані про профіль колії. Ця інформація передається машиністу за допомогою спеціалізованого екрану в кабіні локомотиву. Швидкість поїзда безперервно контролюється бортовим обладнанням ETCS. При перевищенні максимально дозволеної швидкості, спрацьовує автоматичне гальмування. Система рівня 1 забезпечує сумісність різних національних систем сигналізації та управління, а також дозволяє покращити безпеку руху за рахунок постійного контролю швидкісного режиму поїзда.

Система рівня 2 є закінченою системою управління і забезпечення безпеки руху поїздів без використання перегінних сигналів, але зі збереженням жорсткого розділення лінії на блок-ділянки. За допомогою колійних пристроїв (рейкових кіл або лічильників осей) визначається місце розташування поїздів і контролюється їх цілісність (рис. 1.5). Управляючі сигнали передаються безпосередньо з центру ра-

діоблокування (РБЦ) до бортової одиниці, використовуючи систему GSM-R. Євробалізи використовуються тільки для передачі "фіксованих повідомлень", таких як поточна координата, ухил, обмеження швидкості і так далі. Безперервний потік даних, що надходить по мережі GSM-R, обробляється бортовим обладнанням ETCS, внаслідок чого визначаються максимальна і оптимальна швидкість руху для цієї ділянки, безпечна відстань і гальмівний шлях до поїзда, що знаходиться попереду. Отримані дані відображаються на локомотивному моніторі. При порушенні швидкісного режиму ведення потягу спрацьовує автоматичне гальмування.

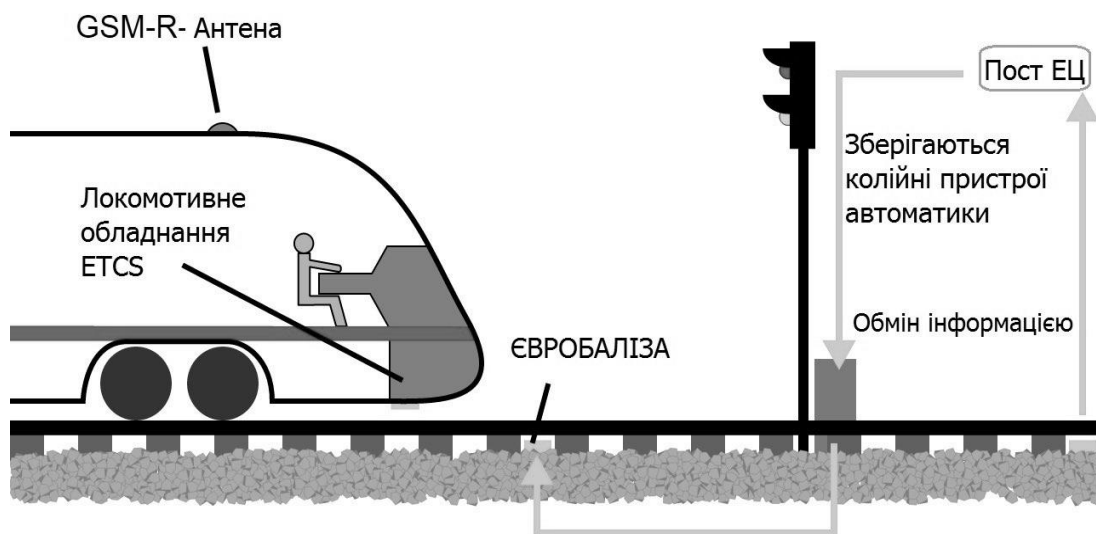


Рисунок 1.4 – Перший рівень ERTMS/ETCS

Система рівня 2 дозволяє значно зменшити експлуатаційні затрати, завдяки відсутності перегінних сигналів. Крім цього, забезпечується можливість для підвищення пропускної здатності ліній.

Система рівня 3 - це закінчена система управління і забезпечення безпеки руху потягів без використання колійних сигналів і з рухливими блок- ділянками. У системі відсутні перегінні світлофори і колійні пристрої контролю вільності ділянок (рис1.6). Визначення місця розташування поїзда здійснюється безпосередньо бортовими засобами за допомогою локомотивних датчиків шляху і швидкості. Корегування розрахованої координати робиться в реперних точках шляху по сигналах від євробаліз. До складу бортових засобів ERTMS входить також обладнання для перевірки цілісності рухомого складу. За допомогою системи GSM - R точні дані

про положення кожного поїзда безперервно передаються в центр радіоблокування. У зворотному напрямі передаються управляючі сигнали, за допомогою яких бортове обладнання ETCS розраховує швидкісний режим ведення поїзда. Оскільки поїзд безперервно контролює своє власне положення, немає ніякої потреби у фіксованих блок-ділянках – швидше, сам поїзд розглядається як блок-ділянка.

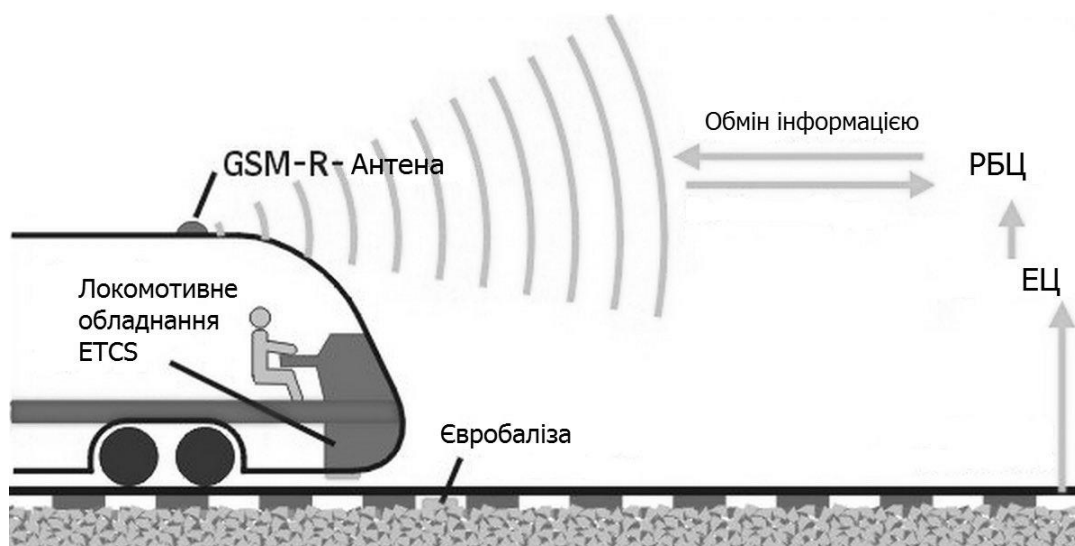
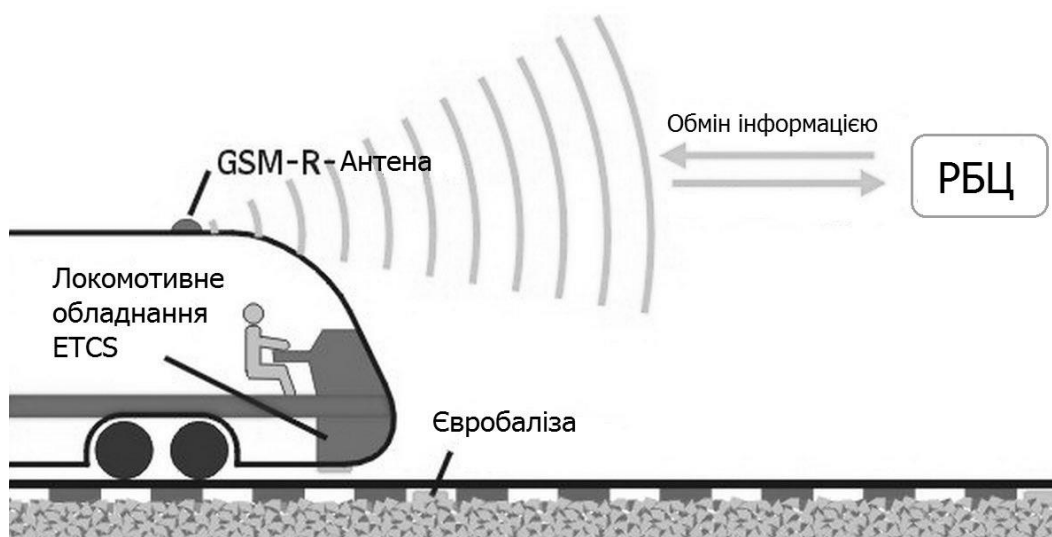


Рисунок 1.5 – Другий рівень ERTMS/ETCS

Система рівня 3 дозволяє в повній мірі реалізувати всі цілі, які ставилися при розробці системи ERTMS. Система третього рівня встановлена та знаходиться в постійній експлуатації (з 2012 року) на одноколіїній лінії протяжністю 129 км в Швеції (між містами Малунг та Бурленге). За час експлуатації система добре себе зарекомендувала, а також не мала жодної небезпечної відмови.



### Рисунок 1.6 – Третій рівень ERTMS/ETCS

Усі три рівні ERTMS сумісні між собою, як у функціональному, так і в технічному відношенні, тобто поїзд, обладнаний системою верхнього рівня, може курсувати на лінії, обладнаній системою нижчого рівня. Проект ERTMS враховує плавну модернізацію від одного рівня до іншого. Наприклад, модернізація рівня 1 до рівня 2, головним чином, вимагає установки радіомережі, центру радіоблокування і деяких додаткових датчиків. Система рівня 2 може бути доведена до рівня 3 шляхом додавання додаткових модулів розширення. Для забезпечення сумісності нової системи управління рухом поїздів з існуючими передбачено проміжне включення спеціальних модулів передачі STM (Specific Transmission Modul). Вибір рівня ERTMS робиться з урахуванням багатьох чинників: особливостей існуючих систем сигналізації, можливості обладнати лінію технологією GSM-R, необхідній пропускній здатності ділянки, економічних аспектів. На сьогоднішній день системами рівнів 1 і 2 обладнані швидкісні залізничні лінії більшості країн Західної Європи [8].

#### 1.3.2 Китайська система CTCS

Для управління рухом поїздів на високошвидкісних лініях у Китаї застосовується національна система управління рухом поїздів CTCS, під час створення якої значною мірою спиралися на досвід розробки та розвитку Європейської системи ETCS. Разом з тим у CTCS враховується китайська специфіка, зокрема широко використовується передача інформації зі шляху на поїзд по рейкових ланцюгах поряд із точковою передачею за допомогою шляхових приймачів [8].

До появи високошвидкісних ліній залізниці Китаю використовували у мережі різні системи локомотивної сигналізації з урахуванням рейкових кіл кількох типів. У 2002 році Міністерство залізниць Китаю прийняло концепцію системи управління рухом поїздів CTCS, мета якої полягає у стандартизації систем сигналізації на звичайних та високошвидкісних лініях. Тимчасові загальні технічні вимоги до CTCS були узгоджені 2004 року. При цьому було поставлено завдання до-

могтися сумісності нових систем сигналізації з існуючими. Серед інших цілей концепції:

- стандартизація інтерфейсів між системами сигналізації та форматів переданих даних;
- спрощення переходу від існуючих систем сигналізації до CTCС;
- підвищення безпеки, надійності та продуктивності систем;
- зниження витрат на технічне обслуговування;
- зменшення потреби в інвестиціях;
- реалізація принципів відкритого ринку для постачальників обладнання.

Як і в Європейській системі управління рухом поїздів ETCS, у системі CTCС передбачено кілька рівнів, які різняться за функціональністю та використовуваними технічними засобами.

CTCS рівня 0 передбачає використання існуючих рейкових ланцюгів та бортової системи сигналізації в кабіні машиніста та контролю за рухом поїзда. При цьому машиніст керується показаннями сигналів підлог, сигналізація в кабіні управління локомотива є допоміжним засобом. Для впровадження CTCС рівня 0 вносити зміни до наявного підлогового обладнання не потрібно. Усі необхідні функції виконує бортова мікропроцесорна система LKJ-2000, розроблена наприкінці 1990-х років у Пекінському транспортному університеті. CTCС рівня 0 забезпечує безпечний рух поїздів зі швидкістю 120 км/год. Системою CTCС рівня 0 обладнано у Китаї 12 тис. Локомотиви.

CTCS рівня 1 включає існуючі рейкові ланцюги (для визначення місцезнаходження поїзда), шляхові прийомовідповідачі і бортову систему LKJ-2000 з функцією контролю швидкості. Вона розрахована на максимально допустиму швидкість руху від 120 до 160 км/год. Підлогові прохідні системи блокування не потрібні, машиніст керується свідченнями на пульті керування. Експлуатаційні режими CTCС рівня 1 передбачають контроль відстані до перешкоди або ступенів допустимої швидкості.

CTCS рівня 2 охоплює рейкові ланцюги тональної частоти (цифрові або аналогові), шляхові приймачі та бортову систему з безпечним комп'ютером. При

цьому цифрові рейкові ланцюги здатні передавати на локомотив більший обсяг інформації. Підлогові світлофори на перегонах не передбачені. Інтервальний рух поїздів регулюють центри блокування, що взаємодіють із системами централізації. СТСS рівня 2 забезпечує безпечний рух поїздів зі швидкістю понад 160 км/год (до 250 км/год), контролює відстань до перешкоди та відноситься до систем з точковою та безперервною передачею інформації. Вона може використовуватися як резервна система для СТСS рівня 3.

СТСS рівня 3 значною мірою ідентична ЕТСS рівня 2. У ній використовуються рейкові ланцюги для контролю вільності колії, шляхові приймачі і бортовий пристрій з безпечним комп'ютером, а також система радіозв'язку GSM-R для зв'язку з центром радіо блокування.

На СТСS рівня 4 реалізується принцип рухомих ділянок. Обмін інформацією здійснюється за радіоканалом GSM-R, а для визначення розташування поїздів використовуються бортові засоби в поєднанні з супутниковою навігацією або дорожніми приймачами. Бортовий пристрій контролює повноскладність поїзда. Рейкові ланцюги влаштовані лише на станціях. Таким чином, обладнання для підлоги зведено до мінімуму, що дозволяє скоротити витрати на технічне обслуговування інфраструктури. Диспетчерське керування дозволяє гнучко регулювати міжпоїзні інтервали залежно від густини руху на лінії. В даний час СТСS рівня 4 на практиці не реалізовано.

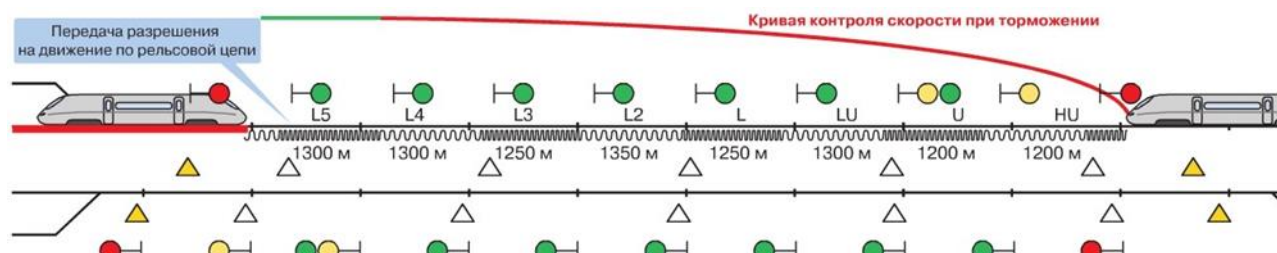


Рисунок 1.7 - Контроль швидкості при гальмуванні в системі СТСS 2 рівня

Також є системи СТСS другого рівня. Особливістю СТСS рівня 2 є застосування центрів блокування та комбінованої (безперервна та точкова) передачі інформації зі шляху на поїзд

Система розрахована на швидкість руху поїздів до 250 км/год (це приблизно половина мережі високошвидкісних ліній у Китаї). За принципом побудови CTCС рівня 2 схожа на систему локомотивної сигналізації TVM300, що використовується на високошвидкісних лініях у Франції.

Рейкові ланцюги служать для контролю вільності колії та передають на поїзд інформацію про кількість вільних блок-ділянок перед ним.

Активні приймач-відповідачі служать для передачі на поїзди інформації про тимчасові обмеження швидкості і даних про встановлений маршрут, а пасивні - відомостей про ділянку, постійні обмеження швидкості і довжини 10 блок-діляниць.

Основним завданням бортового пристрою є обробка даних від рейкових ланцюгів та колійних приймачів з урахуванням параметрів поїзда для формування кривої безперервного контролю швидкості та моніторингу безпечного руху поїзда в реальному часі.

Принцип управління рухом поїздів з використанням CTCС рівня 2 передбачає передачу заданих параметрів руху з центру системи диспетчерського управління до її лінійного пункту, з якого до системи централізації надходить команда на встановлення маршруту, а до центру блокування (ТСС-Train Control Center) – інформація про тимчасові обмеження швидкості. Система централізації збирає від рейкових ланцюгів та перевіряє інформацію про стан окремих ізольованих ділянок та положення стрілок, після чого відповідно до команди центру диспетчерського управління встановлює маршрут та перевіряє стан стрілок та сигналів. Інформацію про маршрут система централізації передає в ТСС, який генерує коди для рейкових ланцюгів та повідомлення про маршрут та тимчасові обмеження швидкості для шляхових приймачів. Бортовий пристрій приймає коди з рейкових ланцюгів та повідомлення від шляхових приймачів, після чого генерує контрольну криву швидкості. CTCС рівня 2 може використовуватися як резервна система на лініях, обладнаних CTCС рівня 3.

Система CTCС рівня 3 заснована на використанні мережі радіозв'язку GSM-R для обміну інформацією між поїздом та центром радіо блокування, який генерує дозвіл на рух та передає його в бортовий комп'ютер. Для контролю вільності шляху служать рейкові ланцюги. Як і в CTCС рівня 2, пасивні шляхові прийомо-відповідачі дозволяють коригувати показання бортових датчиків позиціонування поїзда.

Дозвіл на рух формується в центрі радіо блокування на основі команди з центру диспетчерського управління, який збирає із систем централізації інформацію про вільність ділянок колії та встановлені маршрути, а також тимчасові обмеження швидкості. Двосторонній обмін інформацією дозволяє контролювати у центрі диспетчерського управління фактичну швидкість поїздів, їх місцезнаходження, а також технічний стан у реальному часі.

Базові станції мережі GSM-R розміщують уздовж лінії таким чином, щоб при виході з ладу однієї базової станції зберігався стійкий зв'язок з поїздом.

Система дозволяє гнучко призначати тимчасові обмеження швидкості ділянок довільної довжини. CTCС рівня 3 має дев'ять режимів роботи, у тому числі режими часткового контролю та сигналізації в кабіні машиніста, які використовуються для реалізації функцій CTCС рівня 2.

#### **1.4 Висновки до розділу 1**

В даному розділі проведений аналіз існуючих систем забезпечення безпеки руху поїздів. Розглянуто принципи побудови систем двох, трьох та чотирьох значного автоблокування, принцип передачі команд в системи автоматичної локомотивної сигналізації АЛСН, особливості, структуру та функції комплексних локомотивних пристроїв безпеки КЛУБ-У та Improtrain-250. Крім цього, розглянуто сучасні системи керування рухом поїздів на базі радіозв'язку ERTMS та CTCС. Показано, що впровадження подібних систем дозволяє підвищити безпеку руху поїздів та пропускну спроможність залізничних ліній.

## **2 СТРУКТУРА ТА АЛГОРИТМИ РОБОТИ СИСТЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКИ РУХУ ПОЇЗДІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ЦИФРОВОГО РАДІОКАНАЛУ**

### **2.1 Структура та принцип дії системи забезпечення безпеки руху поїздів на базі цифрового радіозв'язку**

Для удосконалення систем забезпечення безпеки руху поїздів пропонується доповнити традиційні системи інтервального регулювання (автоблокування та електричну централізацію) пристроями цифрового радіозв'язку та супутникової навігації. Структура схема запропонованої системи АБ-ЦР представлена на рис. 2.1. Система побудована відповідно до принципів ERTMS другого рівня з урахування особливостей національних систем залізничної автоматики. На відміну від ERTMS для визначення місцезнаходження поїзда використовуються не бази, а супутникова навігація. Крім цього, залишається традиційний канал АЛС через рейкову лінію.

Управління стрілками та світлофорами на станціях здійснюється через типову систему електричної централізації з підвищеним ступенем захисту від помилок системи та операторів. Вільність/зайнятість ділянок колії на станціях контролюється насамперед рейковими колами. У рейкові кола подається сигнал автоматичної локомотивної сигналізації. Як система управління рухом поїздів на перегонах використовується автоблокування.

Система АБ-ЦР за допомогою мережі радіозв'язку стандарту LTE-R взаємодіє з локомотивами, отримуючи від них інформацію про місцезнаходження та передаючи на локомотив інформацію про показання колійних світлофорів, тимчасові обмеження швидкості (у тому числі про наявність місць, де на шляху працюють люди).

Система локомотивної безпеки (СЛБ) визначає швидкість і місце розташування локомотива шляхом комплексування даних від супутникових навігаційних приймачів (СНС) та осьових датчиків швидкості (ДШ), здійснює прийом сигналів

від колійних пристроїв автоматичної локомотивної сигналізації та взаємодіє через радіоканал з пристроями автоматики на станціях і перегонах. СЛБ також контролює швидкість руху локомотива, не допускаючи перевищення допустимої швидкості та проїзди світлофорів із забороняючим сигналом, контролює пильність машиніста та реєструє всю необхідну інформацію у знімну касету реєстрації.

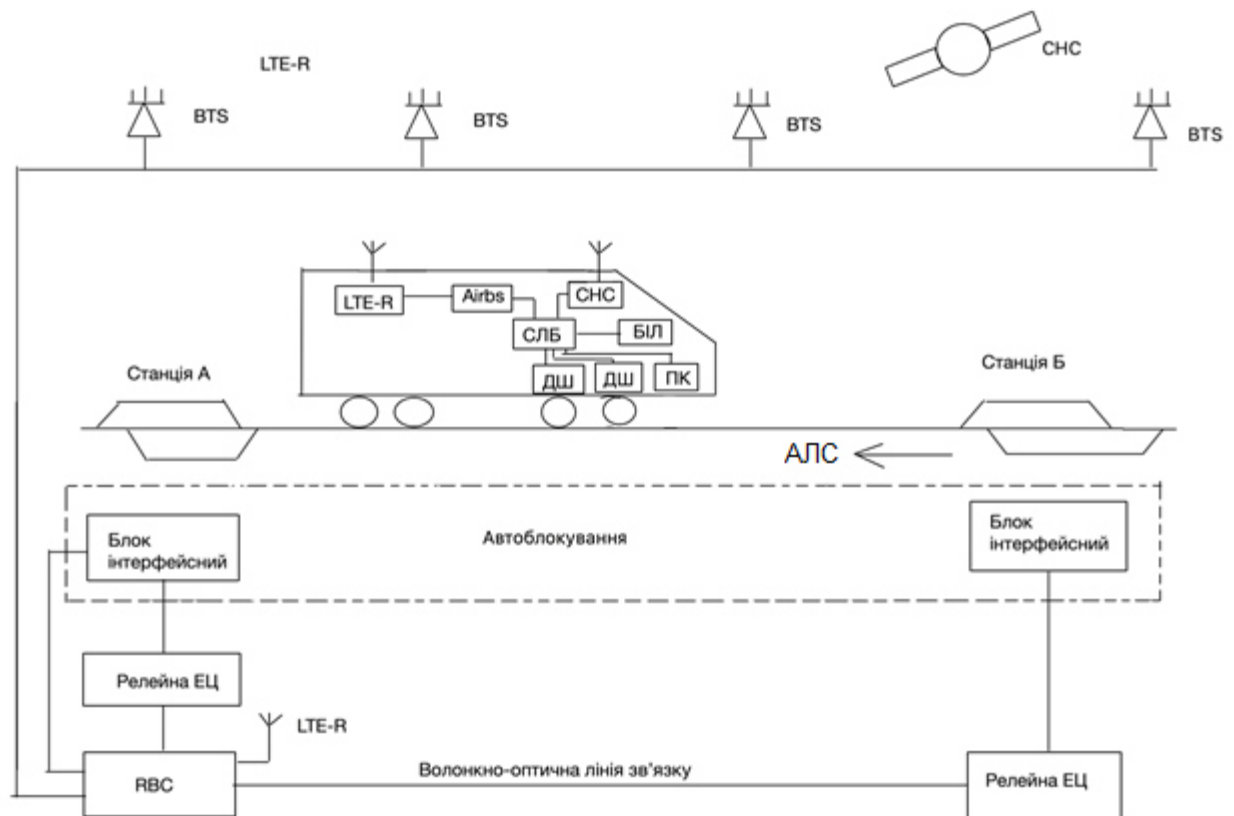


Рисунок 2.1 - Система забезпечення безпеки руху поїздів на базі цифрового радіозв'язку АБ-ЦР

У системі передбачається автоматизована комп'ютерна розшифровка та аналіз даних, що реєструються.

Система АБ-ЦР включає такі структурні частини:

- традиційні системи інтервального регулювання рухом поїздів (автоблокування, електричну централізацію, автоматичну локомотивну сигналізацію);
- систему локомотивної безпеки (СЛБ), яка відповідає за забезпечення безпеки руху поїзда відповідно до інформації про допустиму швидкість та про вільність попереднього шляху, що отримується від RBC та існуючих систем сигналізації;

– центр радіоблокування RBC. Є колійним обладнанням системи АБ-ЦР, відповідає за контроль проходження поїзда відповідно до даних, що отримуються від централізації та автоблокування, та спільно з бортовим обладнанням СЛБ реалізує всі функції автоматизованого контролю руху поїзда;

– AIRBS (бортова система комплексного радіозв'язку), призначена для безпечного радіозв'язку з RBC.

- мережі цифрового радіозв'язку стандарту LTE-R.

Основна роль в управлінні рухом у системі АБ-ЦР належить центру RBC, що має безпечну архітектуру та виконує такі функції ERTMS/ETCS другого рівня:

контроль проходження поїздів за сигналами автоблокування;

управління обміном інформацією з бортовою системою СЛБ за допомогою радіомережі LTE-R;

керування інтерфейсами, що забезпечують взаємодію із системами СЦБ з використанням робочих станцій MMI;

реєстрація основних процесів роботи центру;

безпечне управління функціями інтервального регулювання руху поїздів, а також проходження поїздів із зони дії центру в зовнішні зони і навпаки, різними експлуатаційними режимами спільно з бортовою системою СЛБ, тимчасовими обмеженнями швидкості, екстреними повідомленнями за допомогою інтерфейсу.

Фактично RBC передає інформацію про стан пристроїв систем управління рухом та забезпечення безпеки, наприклад, вільності та зайнятості прийомовідправних колій та стрілочних ділянок, а також дані, що надходять від систем електричної централізації та автоблокування. Центр є додатковим каналом для отримання інформації для роботи систем безпеки руху поїздів.

Стрілками та світлофорами на станціях управляє електрична централізація, що має підвищений ступінь захисту від помилок системи та операторів. Вільність та зайнятість ділянок колії на станціях контролюється насамперед рейковими колами тональної частоти. Крім того, через рейкові кола передається сигнал автоматичної сигналізації локомотивної.

Система АБ-ЦР за допомогою радіоканалу LTE-R взаємодіє з рухомим складом, отримуючи від нього інформацію про місцезнаходження та передаючи на локомотив інформацію про показання колійних світлофорів, тимчасові обмеження швидкості, у тому числі про наявність місць, де на шляху працюють люди.

Локомотивна система безпеки СЛБ визначає швидкість та місце розташування локомотива шляхом комплексування даних від супутникових навігаційних приймачів та осьових датчиків швидкості, приймає сигнали від колійних пристроїв автоматичної локомотивної сигналізації та взаємодіє по радіоканалу з центром RBC. Бортові пристрої також контролюють швидкість руху локомотива, не допускаючи її перевищення та проїзду світлофорів із заборонним сигналом, забезпечують пильність машиніста та реєструють всю необхідну інформацію.

## **2.2 Алгоритм роботи системи локомотивної безпеки**

Система локомотивної безпеки (СЛБ), виконує обробку повідомлень, що надходять з різних інформаційних джерел: каналу АЛС, мережі LTE-R, модулю супутникової навігації, датчиків шляху та швидкості, електронної карти. В результаті обробки отриманих даних визначаються фактична та допустима швидкість руху поїзда для даної залізничної ділянки. Дана інформація відображається на блоці індикації БІЛ. При перевищенні допустимої швидкості руху включається попереджувальна світлова та звукова сигналізація, запускається процедура перевірки пильності машиніста. Якщо після цього швидкість поїзду не знижується виконується автоматичне екстрене гальмування.

Блок-схема алгоритму роботи системи локомотивної безпеки представлена на рис. 2.2. Розглянемо даний алгоритм більш детально. Після включення живлення або скидання системи запускається процедура ініціалізація, під час якої здійснюються початкові налаштування: запис конфігураційних даних в реєстри конфігурації, налаштування портів, таймерів, периферійних модулів тощо. Далі перевіряється наявність сигналу LTE-R. Якщо сигнал присутній, приймається повідомлення від центру радіоблокування RBC: сигнали керування, інформація

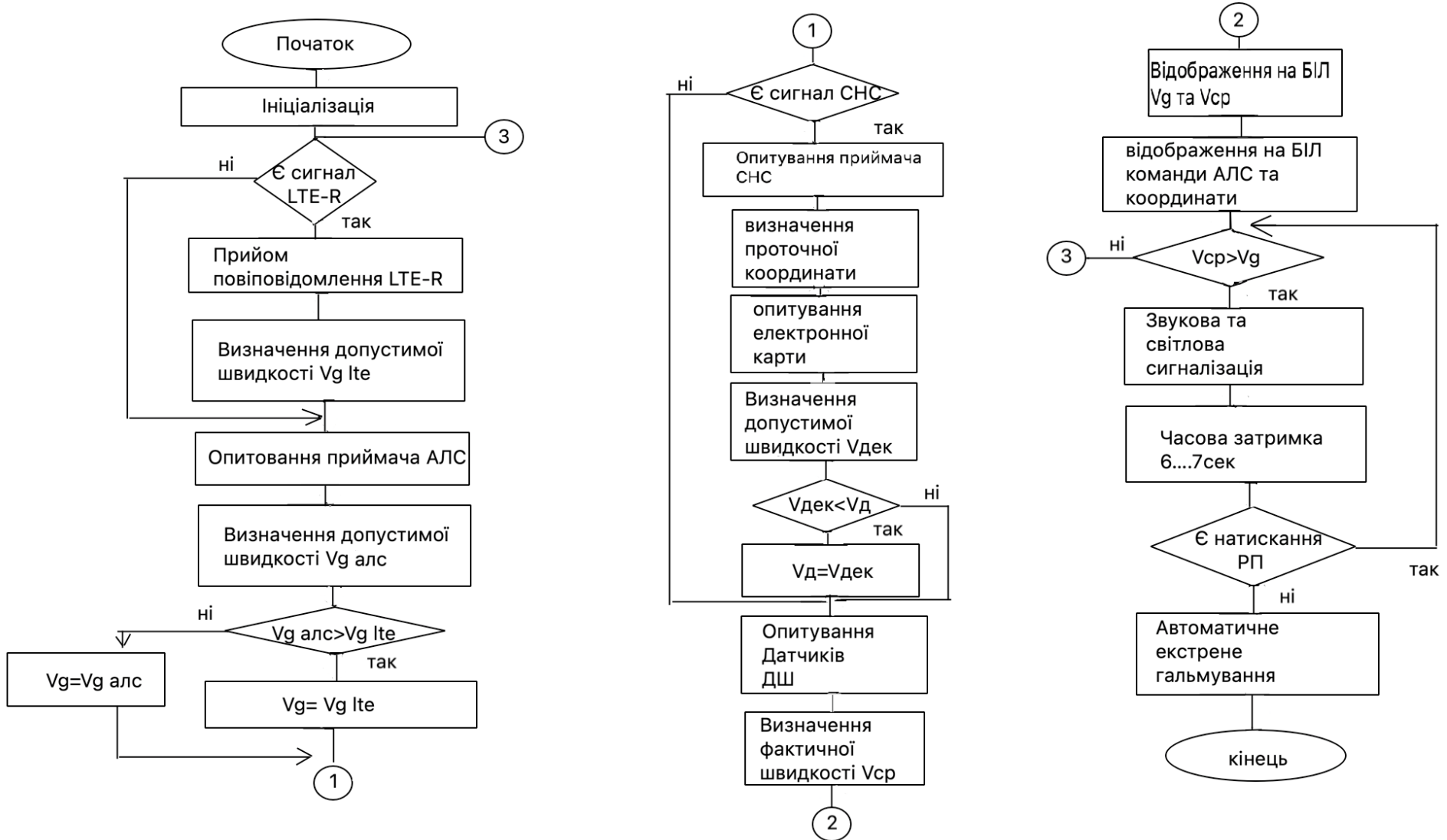


Рисунок 2.2 – Алгоритм роботи системи локомотивної безпеки

про поточну поїзну ситуацію, тимчасові обмеження швидкості. На підставі отриманих даних визначається допустима швидкість  $V_{\text{дLTE}}$ . Після цього відбувається опитування приймача АЛС. У разі відсутності сигналу LTE система одразу переходить до опитування АЛС. Відповідно до отриманого сигналу АЛС також визначається допустима швидкість для даної ділянки колії  $V_{\text{дАЛС}}$ . Отримані значення швидкості порівнюються між собою і в якості допустимої швидкості приймається найменше з цих значень.

Після відбувається опитування модулю супутникової навігації СНС, визначається поточне місцезнаходження поїзда. Далі з електронної карти зчитуються постійні обмеження швидкості для даної залізничної ділянки, визначається допустима швидкість руху  $V_{\text{дек}}$ .

Далі виконується порівняння значення допустимої швидкості, яке було визначено відповідно до повідомлення LTE-R та команди АЛС, зі значенням постійного обмеження швидкості відповідно до електронної карти. Для забезпечення безпеки руху в якості допустимої швидкості руху поїзда для даної залізничної ділянки обирається найменше з цих значень.

В результаті обробки вихідних сигналів датчиків ДШ, визначається фактична швидкість руху поїзда. Отримані значення фактичної та допустимої швидкості, поточна координата поїзда та команда АЛС відображаються на локомотивному блоці індикації БІЛ.

Однієї з головних причин порушення умов безпеки руху поїзда є перевищення допустимої швидкості. Система локомотивної безпеки постійно порівнює фактичну та допустиму швидкість. Якщо фактична швидкість перевищує допустиме значення, включається попереджувальна світлова та звукова сигналізація. Після цього очікується реакція машиніста. Якщо машиніст протягом 6...7 секунд натиснув рукоятку пильності (РП), то після певної часової затримки відбувається повторне порівняння швидкостей. Якщо ж машиніст не натиснув РП, відбувається автоматичне екстрене гальмування.

### 2.3 Координатні системи інтервального регулювання

Суттєвими відмінностями координатних систем інтервального регулювання (КСІР) від розглянутих раніше є :

- регулювання руху поїзда відбувається не на межу блок-ділянки, а на координату хвоста поїзда, що попереду;
- розрахунок мінімально допустимого, за умовами безпеки руху, міжпоїздного інтервалу відбувається із врахуванням реальних гальмівних характеристик обох поїздів;
- використовується технологія рухомих блок-ділянок, яка є найбільш ефективною на загрузених ділянках зі змішаним рухом та на високошвидкісних магістралях.

Розглянемо загальні принципи функціонування координатної системи інтервального регулювання руху поїздів (рис. 2.3).

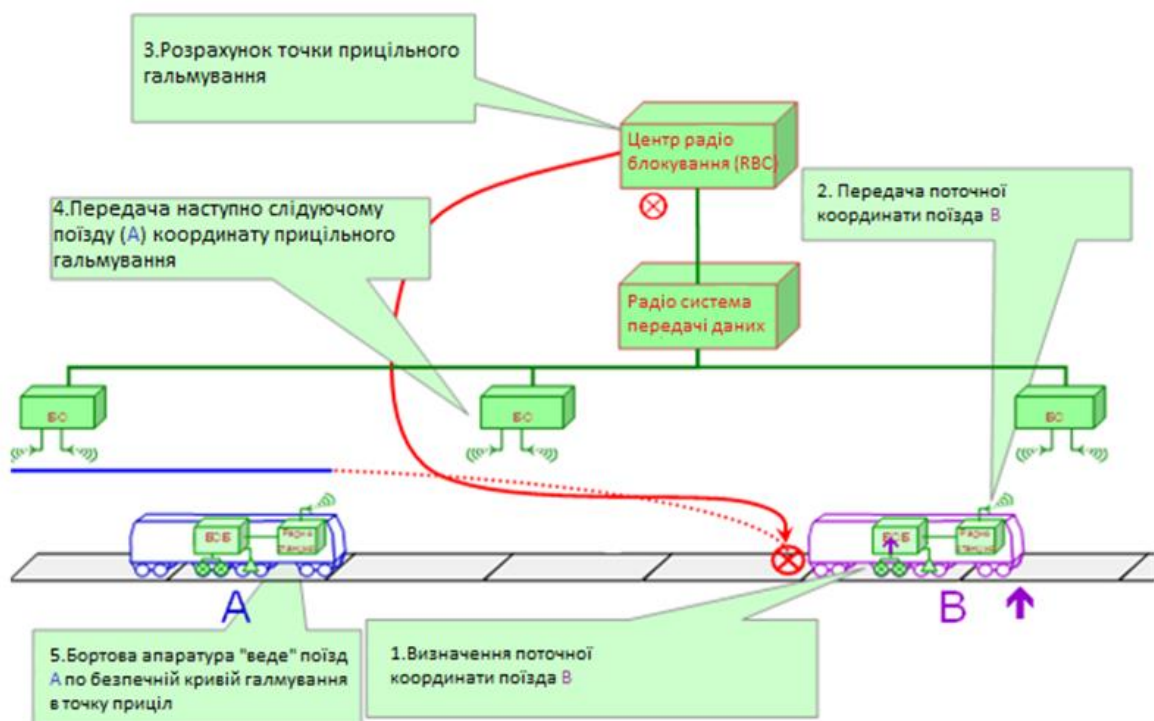


Рисунок 2.3 - Координатна система інтервального регулювання

Вздовж залізничної лінії розташовується мережа базових станцій мобільного зв'язку, які забезпечують постійний радіозв'язок між всіма поїздами в зоні дії системи та центром радіо блокування RBC. Відповідно до рис. 2.3 поїзд В за допомогою пристроїв одометрії визначає своє поточне місцезнаходження та передає координати голови та хвоста, а також значення поточної швидкості руху до центру радіо блокування. На підставі даної інформації в центрі RBC визначається точка прицільного гальмування для поїзда А, який їде позаду. Інформація про швидкість руху поїзда В та точку прицільного гальмування передається через мережу радіозв'язку до поїзда А. Локомотивна апаратура поїзда А визначає його поточну координату та швидкість, з урахуванням цього на підставі повідомлення від центру RBC розраховується допустима швидкість руху поїзда. Таким чином реалізується необхідний швидкісний режим поїзда та безпечні між поїзні інтервали.

Розробка КСІР в різних країнах бере за основу необхідність врахування різних експлуатаційних факторів:

- забезпечення високої інтенсивності руху на ділянках, де швидкості вантажних та пасажирських поїздів суттєво відрізняються (в Японії);
- намагання застосувати уніфіковану систему, яка дозволила б без затримок пересікати кордони різних держав (в Європі);
- економічна вигода від максимального скорочення кількості перегінного обладнання.

Актуальність розробки таких систем в Україні можна обумовити наступними чинниками:

- необхідність збільшення пропускної здатності однопутних ділянок, окремих ділянок, які зменшують результуючу пропускну здатність цілого напрямку перевезень а також тимчасово однопутних ділянок в період будівельно-монтажних робіт;
- гармонізація руху прискорених, звичайних пасажирських та вантажних поїздів;
- зменшення кількості колійного обладнання систем автоматики.

## 2.4 Висновки до розділу 2

Для удосконалення систем забезпечення безпеки руху поїздів пропонується доповнити традиційні системи інтервального регулювання (автоблокування та електричну централізацію) пристроями цифрового радіозв'язку та супутникової навігації. Розроблена структурна схема та алгоритм роботи системи інтервального регулювання на базі радіозв'язку АБ-ЦР. Система побудована відповідно до принципів ERTMS другого рівня з урахування особливостей українських систем залізничної автоматики. На відміну від ERTMS для визначення місцезнаходження поїзда використовуються не балізи, а супутникова навігація. Для передачі команд керування від центру радіо блокування на локомотив запропоновано використовувати мережу цифрового радіозв'язку LTE-R. Крім цього, залишається традиційний канал АЛС через рейкову лінію. Розроблений алгоритм роботи системи локомотивної безпеки, яка здійснює контроль швидкісного режиму поїзда відповідно до повідомлень LTE-R, супутникової навігації та команд АЛСН.

### 3 ПОРІВНЯННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ АВТОБЛОКУВАННЯ ТА КООРДИНАТНИХ СИСТЕМ ІНТЕРВАЛЬНОГО РЕГУЛЮВАННЯ

#### 3.1 Пропускна здатність перегонів при трьохзначному та чотирьохзначному автоблокуванні

Для отримання заданої пропускної здатності ділянки, обладнаної пристроями АБ, визначають мінімальний міжпоїзний інтервал попутного слідування. Його розраховують на ділянках профілю колії, на яких рух поїздів відбувається з найменшою швидкістю. Такими ділянками можуть бути підйоми, виходи зі станції, де поїзд може мати зупинку, приміські ділянки – в районах зупиночних платформ. В якості мінімального міжпоїзного інтервалу вибирають найбільший з усіх інтервалів, отриманих на ділянці [2, 9].

Мінімальний інтервал при 3-х значній сигналізації та 4-х значній АЛС визначають при 3-х блочному розмежуванні, що забезпечують нормальний рух на зеленій вогонь (рис.3.1).

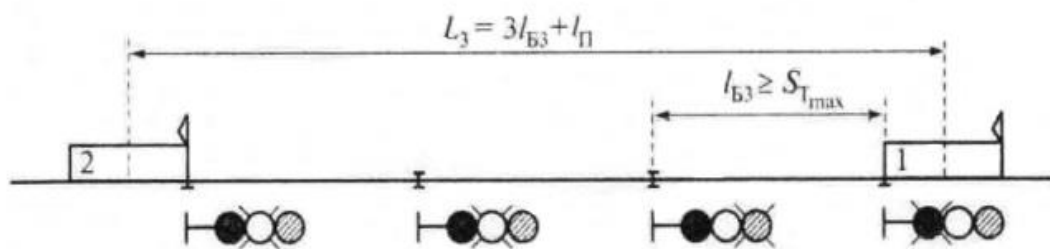


Рисунок 3.1 - Автоблокування з трьохзначною сигналізацією

Відстань зближення поїздів при трьох блочному розмежуванні визначають між центрами цих поїздів наступним чином:

$$L_{3min} = 3l_{БЛ} + l_n \quad (3.1)$$

де  $l_{БЛ}$  – довжина блок-ділянки, м;

$l_n$  – довжина поїзда, м.

Час мінімального інтервалу при трьох блочному розмежуванні буде рівним:

$$I_3 = 0,06 \cdot \frac{3l_{БЛ} + l_{П}}{V_{cp}}, \text{ хв} \quad (3.2)$$

де  $V_{cp}$  – середня швидкість поїзда на розрахунковій ділянці, км/год;

0.06 – коефіцієнт переводу 1 км/год в 1 м/хв.

На виході з роздільних пунктів, після зупинки поїздів, а також на ділянках із затяжними підйомами розмежування 3-ма блок-ділянками збільшує мінімальний інтервал, що викликає зниження пропускної здатності. Тому на таких ділянках інтервал попутного слідування визначають при розмежуванні 2-ма блок-ділянками. Час мінімального інтервалу в даному випадку рівний [2, 9]:

$$I_{3/2} = 0,06 \cdot \frac{2 \cdot l_{БЛ} + l_{П}}{V_{cp}} + 0.5, \text{ хв} \quad (3.3)$$

де 0.5 – час на сприйняття зміни показань на прохідному світлофорі (з жовтого на зелений), хв.

Недоліком 2-х блочного розмежування є те, що при зближенні поїздів подальший рух другого поїзда буде відбуватись на жовтий вогонь зі зменшеною швидкістю [10].

На ділянках, де курсують поїзди з різними середніми швидкостями та гальмівними шляхами, замість 3-х значної сигналізації застосовують 4-х значну. Найчастіше це роблять на приміських ділянках зі змішаним та насиченим рухом. Приміські поїзди на цих ділянках часто зупиняються, розвивають менші швидкості та мають менші гальмівні шляхи в порівнянні з дальніми поїздами.

Мінімальний міжпоїзний інтервал попутного слідування при 4-х значній сигналізації визначають за умови, що довжина двох суміжних блок-ділянок була не

менше гальмівного шляху поїзда при максимально можливій швидкості, а також не менше пройденої відстані при екстремому гальмуванні з урахуванням часу на спрацювання пристроїв АЛС та автостопу, але не менше 1000 м. А довжина кожної блок-ділянки при цьому не повинна бути меншою за гальмівний шлях, необхідний для зниження максимальної швидкості руху поїздів до розрахункової швидкості проходу світлофора з жовтим вогнем, та для зниження цієї швидкості до повної зупинки поїзда перед світлофором із забороняючим показанням [10].

Мінімальний інтервал при 4-х значній сигналізації та системі АЛСН визначають при розмежуванні поїздів 4-ма блок-ділянками мінімальної довжини, що забезпечує нормальний рух поїздів на зелений вогонь (рис.3.2).

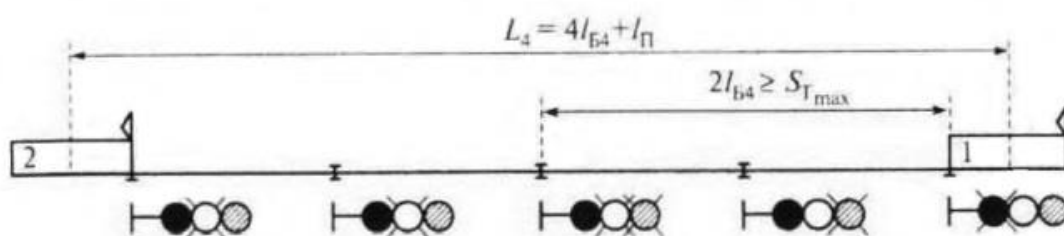


Рисунок 3.2 - Автоблокування з чотирьохзначною сигналізацією

Відстань зближення поїздів при 4-х блочному розмежуванні визначають між центрами цих поїздів наступним чином:

$$L_{4min} = 4l_{БД} + l_{П} \quad (3.4)$$

Отже, 4-х значна сигналізація дозволяє скоротити мінімальну відстань зближення на величину  $l_{БД}$ .

А час мінімального інтервалу при чотирьохзначній сигналізації:

$$I_4 = 0,06 \cdot \frac{4l_{БД} + l_{П}}{V_{cp}}, \text{ хв} \quad (3.5)$$

Однією з особливостей розрахунків міжпоїзних інтервалів є те, що при 3-х значній сигналізації мінімальну довжину блок-ділянки вибирають по гальмівному шляху вантажного поїзда (але не менше 1000 м), а при 4-х значній сигналізації  $l_{\text{БЛ}}$  вибирають по гальмівному шляху приміського поїзда [2, 9].

Порівняння мінімальних відстаней зближення поїздів при 3-х блочному та при 4-х блочному розмежуванні показує, що останнє дозволяє отримати більш високу пропускну здатність ділянки.

### 3.2 Пропускна здатність перегонів при координатній системі інтервального регулювання

Координатні системи інтервального регулювання (КСІР) відрізняються від систем АБ тим, що в них використовується технологія «рухомих» блок-ділянок, суть якої полягає в тому, що регулювання руху виконується на координату хвоста поїзда, що попереду, а сам поїзд можна розглядається в якості блок-ділянки. В такому випадку інтервал попутного слідування зменшується в порівнянні з класичними системами, та вслід за цим збільшується пропускна здатність перегону [3].

Мінімальний міжпоїзний інтервал для координатних систем визначається наступним чином:

$$I_{\text{коорд}} = 0,0046 \cdot \frac{V}{2a} + 0,06 \cdot \frac{L_{\text{вирт}}^{\text{загр}} + l_n + \Delta l_n + 2 \cdot \Delta l_{\text{сн}}}{V}, \text{ хв} \quad (3.6)$$

де 0.0046 та 0.06 – коефіцієнти переводу 1км/год в 1 м/хв;  $L_{\text{вирт}}^{\text{загр}}$  – віртуальна загороджувальна ділянка, м;  $l_n$  – довжина поїзда, м;  $\Delta l_n$  – похибка визначення довжини поїзда, м;  $\Delta l_{\text{сн}}$  – похибка визначення координати голови поїзда, м;

$V$  – розрахункова швидкість руху, км/год;  $a$  – прискорення гальмування, м/с<sup>2</sup>.

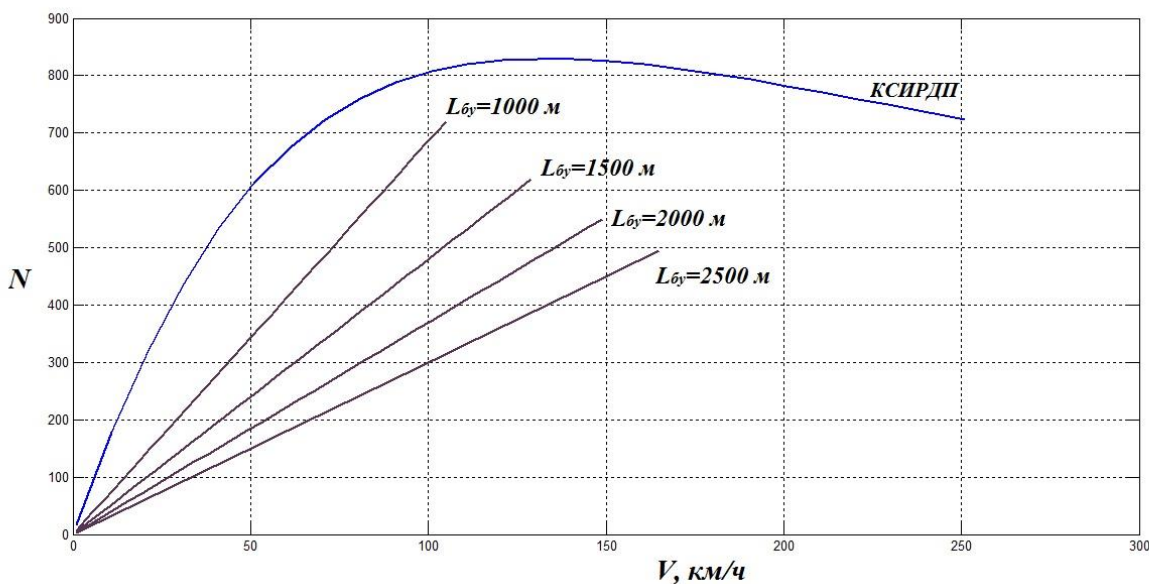


Рисунок 3.3 - Залежність пропускної здатності перегону від швидкості руху

Використовуючи формули (3.2) та (3.6) можна зробити порівняльний аналіз пропускної здатності перегону при 3-х значній сигналізації та при КСІР. Пропускную здатність розраховуємо за формулою:

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

При розрахунках використаємо наступні дані:  $l_{БЛ} = 1000..2500 \text{ м}$ ,  $l_n = 500 \text{ м}$ ,  $a = 0.5 \text{ м/с}^2$ ,  $L_{\text{вирт}}^{\text{здер}} = 800 \text{ м}$ ,  $\Delta l_n = 15 \text{ м}$ ,  $\Delta l_{\text{сн}} = 30 \text{ м}$ .

За допомогою програми MATLAB були отримані такі залежності: порівняльний графік залежності пропускної здатності перегону для 3-х значної сигналізації та для КСІР (рис.3.3); графік залежності міжпоїзного інтервалу від швидкості руху та прискорення гальмування для КСІР (рис. 3.4).

З рис.3.3 видно, що координатні системи дозволяють збільшити пропускную здатність перегону в порівнянні з системою АБ. Крім цього при КСІР залежність є нелінійною та дозволяє зберегти високу пропускную здатність при різних швидкостях руху, і маючи при цьому точку максимуму. Розрахувавши за цією точкою максимуму оптимальну швидкість та дотримуючись її, можна приблизитись до по-

тенційної пропускної здатності. На рис. 3.4 видно, що найменший інтервал попустого слідування спостерігається при високих швидкостях ( $V > 100$  км/год) та великих прискореннях гальмування ( $a > 1$  м/с<sup>2</sup>), в той же час при високих швидкостях та малому прискоренню гальмування інтервал починає збільшуватись.

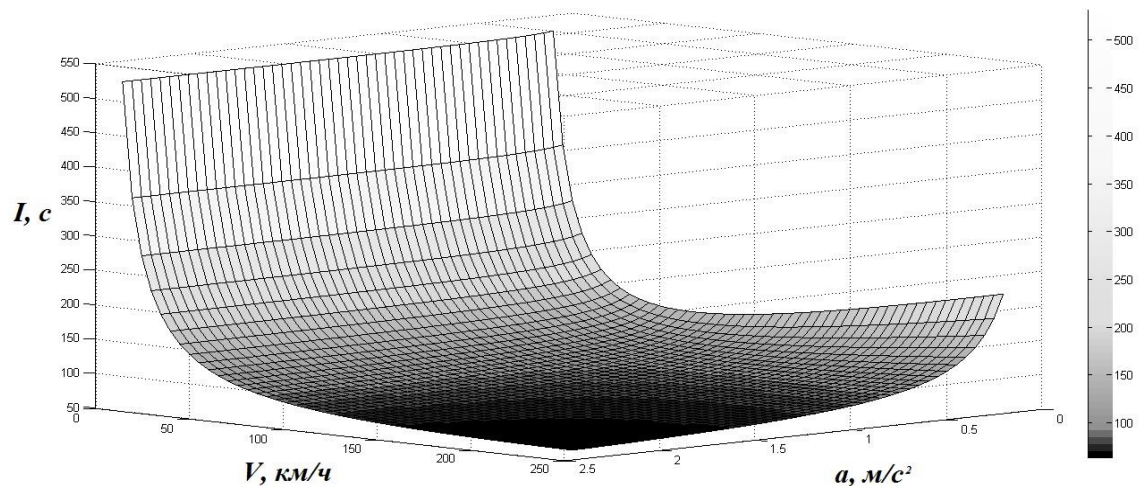


Рисунок 3.4 - Залежність міжпоїзного інтервалу від швидкості руху та прискорення гальмування для КСІР

### 3.3 Висновки до розділу 3

Координатні системи інтервального регулювання дозволяють позбавитись багатьох недоліків традиційних систем, і задовольняють сучасні вимоги до систем автоматики, які диктуються тенденціями збільшення швидкостей, інтенсивності руху та об'ємів перевезень. Вони забезпечують більшу пропускну здатність, дозволяють відмовитись від колійних пристроїв автоматики та світлофорів на перегонах, покращують умови праці. На шляху широкого розповсюдження таких систем стоять декілька проблем: безпека (перевірка системи на виконання всіх існуючих норм безпеки); матеріально-економічні затрати (створення радіомережі, установка базових станцій, створення центру радіо блокування, створення бази електронних карт маршрутів, обладнання всіх локомотивів комплектами апаратури). Подальші дослідження КСІР пов'язане саме з вирішенням цих недоліків.

## 4 ТЕРИТОРІАЛЬНО-ЧАСТОТНЕ ПЛАНУВАННЯ МЕРЕЖІ ЦИФРОВОГО РАДІОЗВ'ЯЗКУ LTE-R

### 4.1 Організація цифрового радіозв'язку з рухомими об'єктами на залізничних ділянках

Особливі вимоги до мереж цифрового радіозв'язку з рухомими об'єктами на залізничних перегонах пов'язані із забезпеченням гарантованого зв'язку при швидкостях руху об'єктів до 500 км/год. Крім того, необхідно забезпечити рівномірне покриття залізничного простору, особливо в межах залізничних станцій і маневрових зон, незалежно від того, на якій місцевості лежить полотно – в тунелі або на відкритому просторі. Зв'язок повинен встановлюватися в дуже короткий термін, а швидкість перемикання між мережами повинна бути максимальною. І нарешті, канали передачі повинні бути завжди доступні.

Мережа цифрового радіозв'язку з рухомими об'єктами на залізничних перегонах складається з базових радіостанцій BTS, які з'єднуються за допомогою кабельних ліній до центру комутації MSC. Кожна базова станція забезпечує радіозв'язок з мобільними об'єктами в зоні свого покриття. Центр комутації обслуговує групу базових станцій, виконує комутацію інформаційних потоків, забезпечує маршрутизацію викликів, інтерфейс з іншими мережами мобільного та стаціонарного зв'язку та ін. Як відомо, критичним місцем у будь-якій системі мобільного зв'язку є точка підключення кабелю до BTS. Оскільки надійність мідного кабелю або оптоволоконного кабелю в поєднанні з необхідними пристроями лінійного закінчення (HDSL-модемами або мультиплексорами введення/виводу) не є обов'язково такими ж надійними, як базові станції BTS та контролери базових станцій BSC, навіть дуже високонадійна BTS не забезпечить поліпшення доступності системи. З цієї причини залізничні мережі з високими вимогами до надійності повинні використовувати петлеву архітектуру. Такий підхід має свої переваги, оскільки перекриття BTS двох різних петель зменшить наслідки виходу з ладу BTS або BSC. Радіальне з'єднання використовується спеціально для секторованих

BTS з декількома носіями. При послідовному з'єднанні BTS в разі збою BTS або дефекту інтерфейсу каналу зв'язку для передача з'єднання буде "м'якою".

Послідовно – радіальна схема використовується при недостатній кількості каналів на певних ділянках. Функціонування в разі виходу з ладу BTS або каналу зв'язку аналогічно першим описаним типам з'єднань.

На рис. 4.1 зображена схема організації, що забезпечує більш високі показники надійності системи. При використанні резервованих каналів зв'язку SDH, надійність системи визначатиметься безперебійністю роботи BTS і інтерфейсів каналів, тому переважніше схема організації зв'язку з високим резервуванням або з повним резервуванням (рис. 4.2).

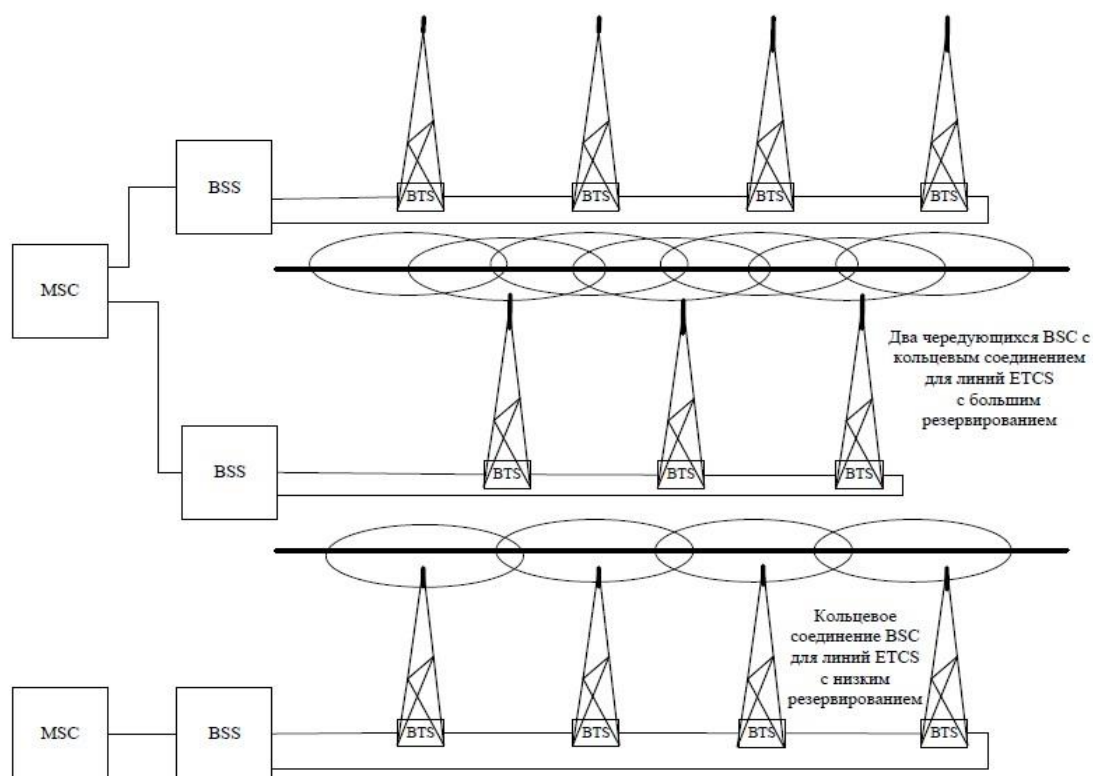


Рисунок 4.1 – Схема організації мережі мобільного радіозв'язку з високим рівнем резервування

Типова мережа цифрового радіозв'язку з рухомими об'єктами на перегонах складається з декількох еліптичних чарунок вздовж залізничних колій, переважно з направленими антенами у напрямку колії. Часто використовуються складені чарунки, тобто спрямовані антени уздовж шляху, які утворюють тільки одну чарун-

ку. Використання цієї технології переважно на лініях з ETCS, при бажанні зменшити число перемикань.

Показаний вище варіант (рис.4.2) являє собою повністю дубльовану мережеву структуру з співвіднесеними або розташованими в шаховому порядку радіостільниками. Найбільш часто використовується останній варіант з шаховим розташуванням базових станцій, проте на лініях з менш інтенсивним рухом також доволі часто застосовують схожий варіант але з одним центром MSC (рис.4.1). Для нашої системи АБ-ЦР було обрано варіант з шаховим розміщенням базових станцій, повним дублюванням, двома центрами MSC та з кластером, який дорівнює трьом.

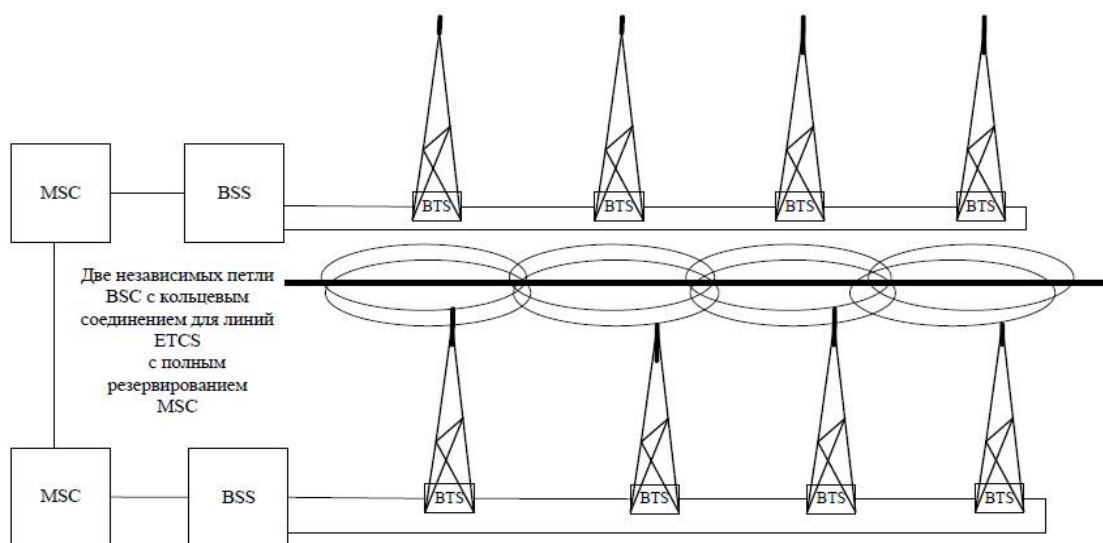


Рисунок 4.2 – Схема організації мережі мобільного радіозв'язку з повним резервуванням

## 4.2 Модель розповсюдження радіохвиль Окамура-Хата

При планування мереж мобільного радіозв'язку використовуються різноманітні розрахункові моделі розповсюдження радіохвиль. Найбільш часто застосовується модель Окамура-Хата, яка описує процес поширення (загасання) радіохвиль в урбанізованих районах без урахування інформації про рельєф місцевості. Дана модель враховує особливості території і забудови (міська, приміська, відкрита сільська) і населеного пункту (великий, середній, маленький) [11].

Модель Окамура - Хата дає змогу отримувати досить точні значення медіанних втрат на трасах наземного рухомого зв'язку за наступних обмежень:

- частота сигналу  $f = (100 \dots 1500)$  МГц;
- дальність зв'язку  $R = (1 \dots 20)$  км;
- висота підйому антени базової станції  $h_{BC} = (30 \dots 200)$  м.

Відповідно до моделі Окамура – Хата залежність загасання радіосигналу (втрати) в децибелах від відстані до радіопередавача для міської місцевості описується наступним виразом

$$L_m = 69,55 + 26,16 \lg(f_{[\text{МГц}]}) - 13,82 \lg(h_{BC[\text{М}]}) - k(44,9 - 6,55 \lg(h_{BC[\text{М}]}) * \lg(r_{[\text{км}]}) - a(h_{ms[\text{М}]}) \quad (4.1)$$

Втрати в передмісті, дБ:

$$L_{\text{ПМ}} = L_M - 2 \left( \lg \left( \left( \frac{f_{[\text{МГц}]}}{28} \right)^2 \right) - 5,4 \quad (4.2)$$

Втрати на відкритій місцевості, дБ:

$$L_{BM} = L_M - 4,78 \lg \left( (f_{[\text{МГц}]})^2 \right) + 18,33 \lg(f_{[\text{МГц}]}) - 40,96. \quad (4.3)$$

де  $f$  – частота, МГц;

$h_{BC}$ ,  $h_{MC}$  – висоти антен базової і мобільної станцій, м;

$k$  – поправочний коефіцієнт, який враховує довжину траси;  $R$  – відстань від базової станції до мобільної станції, км.

### 4.3 Визначення дальності дії базової станції LTE-R

Загальна модель розповсюдження радіосигналу в системі мобільного зв'язку представлена на рис. 4.3. Модель складається з передавача, який формує радіосигнал потужністю  $P_{\text{пер}}$ , радіолінії та приймача, на вході якого присутній радіосигнал потужністю  $P_{\text{пр}}$ . До радіопередавача підключена антена з коефіцієнтом підсилення  $G_1$ , яка розміщена на щоглі висотою  $h_1$ . До радіоприймача підключена антена з коефіцієнтом  $G_2$ , висота розташування приймальної антени –  $h_2$ . При розповсюдженні радіохвилі відбувається загасання її потужності  $\alpha$ . Чим більше відстань  $R$  між передавачем і приймачем, тим більше загасання  $\alpha$  і менше потужність

сигналу на вході приймача  $P_{пр}$ . Якщо потужність на вході приймача стає менше його чутливості, то приймач не може виділити отриманий сигнал на фоні завад і радіозв'язок порушується.

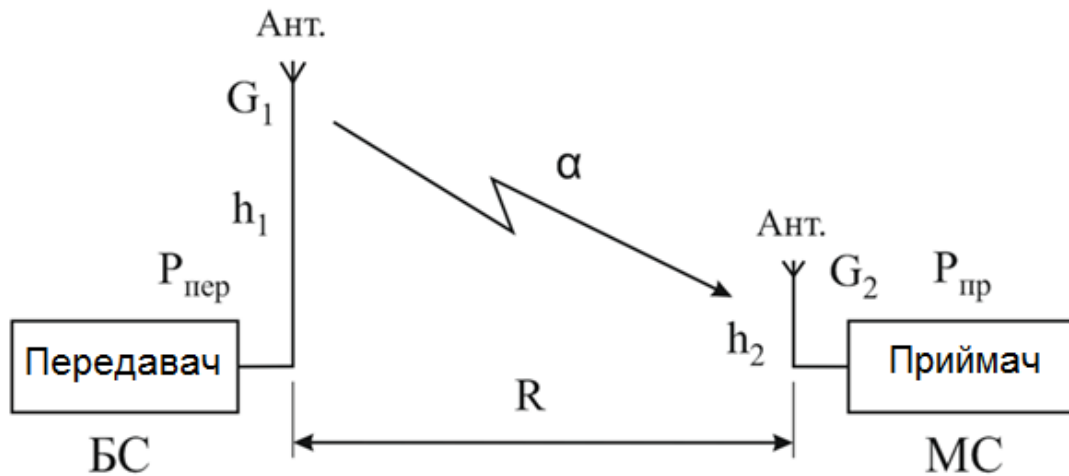


Рисунок 4.3 – Модель системи мобільного зв'язку

Розрахуємо максимально можливу дальність радіозв'язку в стандарті LTE-R при різних умов. Розрахунок проводимо для наступних параметрів системи радіозв'язку, які є типовими для стандарту LTE-R:

частотна смуга Uplink – 718...728 МГц;

частотна смуга Downlink – 773...783 МГц;

ширина частотної смуги – 10 МГц;

потужність радіопередавача базової станції – 25 Вт;

висота щогли антени базової станції – 30 м;

коефіцієнт підсилення антени радіопередавача – 15 дБ;

висота антени мобільної станції – 1,5 м.

коефіцієнт шуму приймача – 9 дБ.

В системі LTE-R забезпечується адаптивний вибір схем модуляції та кодування в залежності від якості радіозв'язку. В табл. 4.1 наведені значення мінімально допустимого відношення сигнал/шум на вході приймача в залежності від схеми модуляції та кодування.

Таблиця 4.1 – Мінімально допустиме відношення сигнал/шум на вході приймача для різних видів модуляції та кодування в системі LTE-R

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

Виконаємо розрахунок дальності радіозв'язку для обраних параметрів.

1. Розрахуємо потужність теплових шумів радіоприймача при температурі до-  
воколишнього середовища  $T = 300 \text{ K}$

$$P_{\text{тепл}} = 10 \lg(K_B \cdot T \cdot \Delta f \cdot 1000), \text{ [дБм]} \quad (4.4)$$

де  $K_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$  – постійна Больцмана;

$\Delta f = 10 \text{ МГц}$  – ширина частотної смуги в стандарті LTE-R.

$$P_{\text{тепл}} = 10 \lg(1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300 \cdot 10 \cdot 10^6 \cdot 1000) = -103,8 \text{ (дБм)} \quad (4.5)$$

2. Розрахуємо мінімально допустиму потужність на вході радіоприймача (чут-  
ливість приймача). Розрахунки виконаємо для трьох схем модуляції і кодування.

При використанні чотирьохпозиційної фазової маніпуляції QPSK та схеми ко-  
дування 1/2 мінімально допустиме відношення сигнал шум SNR складає 2 дБ  
(див. табл. 4.1). Тоді чутливість приймача

$$P_{\text{пр min}} = \text{SNR} + K_{\text{ш}} + P_{\text{тепл}} = 2 + 9 + (-103,8) = -92,8 \text{ (дБм)} \quad (4.6)$$

де  $K_{\text{ш}} = 9 \text{ дБ}$  – коефіцієнт шуму радіоприймача.

Для квадратурної модуляції QAM-16 та схеми кодування 1/2 мінімальне відношення сигнал/шум дорівнює 7,9 дБ. При цьому чутливість приймача

$$P_{np\min} = SNR + K_{ш} + P_{менл} = 7,9 + 9 + (-103,8) = -86,9 \text{ (дБм)} \quad (4.7)$$

Для схеми модуляції та кодування QAM-64 4/5 SNR = 18,6 дБ. Тоді чутливість приймача

$$P_{np\min} = SNR + K_{ш} + P_{менл} = 18,6 + 9 + (-103,8) = -76,2 \text{ (дБм)} \quad (4.8)$$

3. Визначимо потужність передавача базової станції в децибел-міліватах

$$P_{пер} = 10 \log \left( \frac{25}{10^{-3}} \right) = 44 \text{ (дБм)} \quad (4.9)$$

4. Розрахуємо максимально допустиме загасання радіохвилі.

Для схеми QPSK 1/2:

$$\begin{aligned} \alpha_{доп} &= P_{пер} + G_{пер} - \alpha_{каб} - \alpha_{инт} - \alpha_{куз} - P_{np\min} = \\ &= 44 + 15 - 2 - 2,5 - 6 + 92,8 = 141,3 \text{ (дБ)} \end{aligned} \quad (4.10)$$

де  $\alpha_{каб} = 2$  дБ – загасання в кабельній лінії, що з'єднує між собою радіопередавач та передавальну антену;

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

$\alpha_{куз} = 6$  дБ – поправка, що враховує поглинання радіохвиль кузовом локомотива.

Для схеми QAM-16 1/2:

$$\begin{aligned} \alpha_{доп} &= P_{пер} + G_{пер} - \alpha_{каб} - \alpha_{инт} - \alpha_{куз} - P_{np\min} = \\ &= 44 + 15 - 2 - 2,5 - 6 + 86,9 = 135,4 \text{ (дБ)} \end{aligned} \quad (4.11)$$

Для схеми QAM-64 4/5:

$$\begin{aligned} \alpha_{доп} &= P_{пер} + G_{пер} - \alpha_{каб} - \alpha_{инт} - \alpha_{куз} - P_{np\min} = \\ &= 44 + 15 - 2 - 2,5 - 6 + 76,2 = 124,7 \text{ (дБ)} \end{aligned} \quad (4.12)$$

5. Для розрахунку залежності загасання радіохвилі від відстані між передавачем та приймачем будемо використовувати модель Окамура-Хата. Відповідно до даної моделі загасання радіохвилі в межах міської місцевості визначається наступним виразом

$$\alpha_{міськ} = 69,55 + 26,16 \lg(f) - 13,82 \lg(h_1) - a(h_2) + [44,9 - 6,55 \lg(h_1)] \lg R, [\text{дБ}] \quad (4.13)$$

де  $\alpha_{міськ}$  – загасання радіохвилі для міської місцевості;

$f$  – частота радіохвилі в МГц;

$a(h_2)$  – коефіцієнт, який змінюється в залежності від висоти розташування антени мобільної станції

$$a(h_2) = 0,8 + (1,1 \lg f - 0,7)h_2 - 1,56 \lg f; \quad (4.14)$$

$R$  – відстань між мобільною та базовою станціями в км.

При проведенні розрахунків в якості робочої приймаємо середню частоту смуги Downlink  $f = 778$  МГц.

Для приміської місцевості загасання радіохвилі відповідно до моделі Хата:

$$\alpha_{пр} = \alpha_{міськ} - 2 \left( \lg \frac{f}{28} \right)^2 - 5,4 \text{ [дБ]} \quad (4.15)$$

Для селищної місцевості загасання радіохвилі:

$$\alpha_{сел} = \alpha_{міськ} - 4,78 (\lg(f))^2 - 18,33 \cdot \lg(f) - 40,94 \quad (4.16)$$

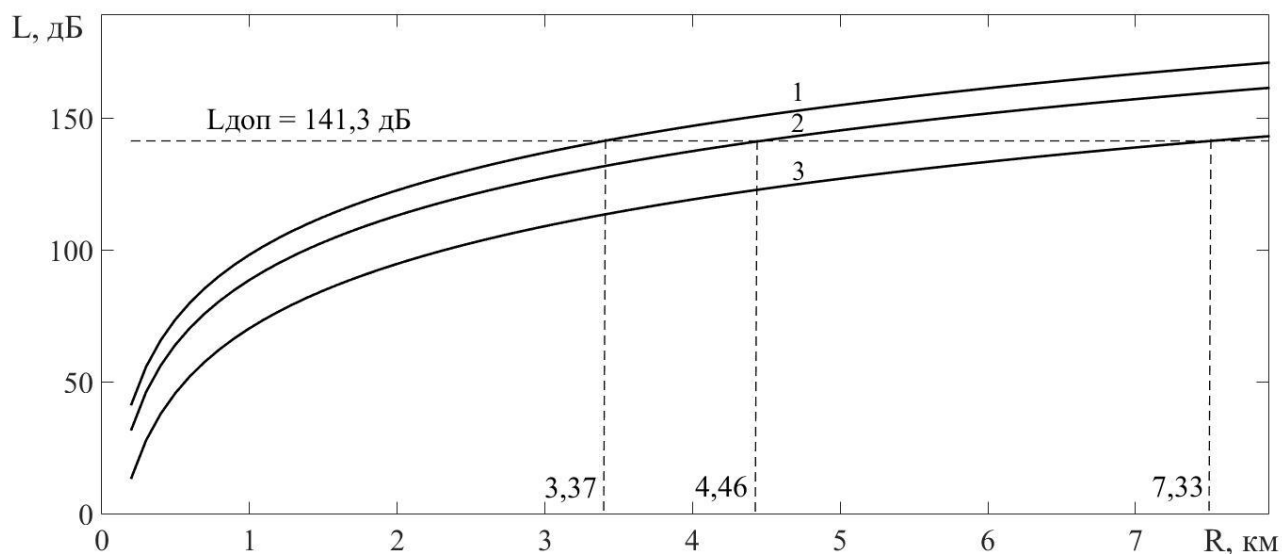


Рисунок 4.4 – Визначення дальності радіозв'язку для схеми модуляції та кодування QPSK 1/2: 1 – міська місцевість; 2 – приміська місцевість; 3 – селищна місцевість

Відповідно до виразів (4.13) – (4.16) за допомогою математичного пакету MATLAB були виконані розрахунки залежності загасання радіохвилі від відстані

між радіопередавачем та радіоприймачем. На підставі отриманих результатів були побудовані графіки, які представлені на рис. 4.4 - 4.6. На кожному графіку зображені три залежності: 1 – загасання для міської місцевості; 2 – для приміської місцевості; 3 – для селищної місцевості. Крім цього на кожному графіку показане допустиме загасання радіосигналу в залежності від схеми модуляції та кодування.

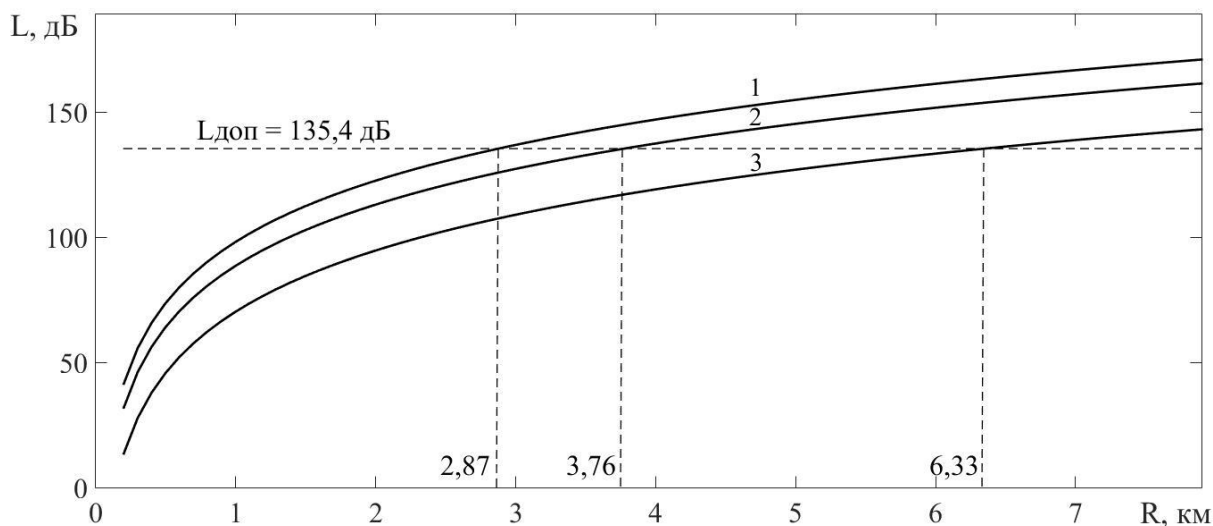


Рисунок 4.5 – Визначення дальності радіозв'язку для схеми модуляції та кодування QAM-16 1/2: 1 – міська місцевість; 2 – приміська місцевість; 3 – селищна місцевість

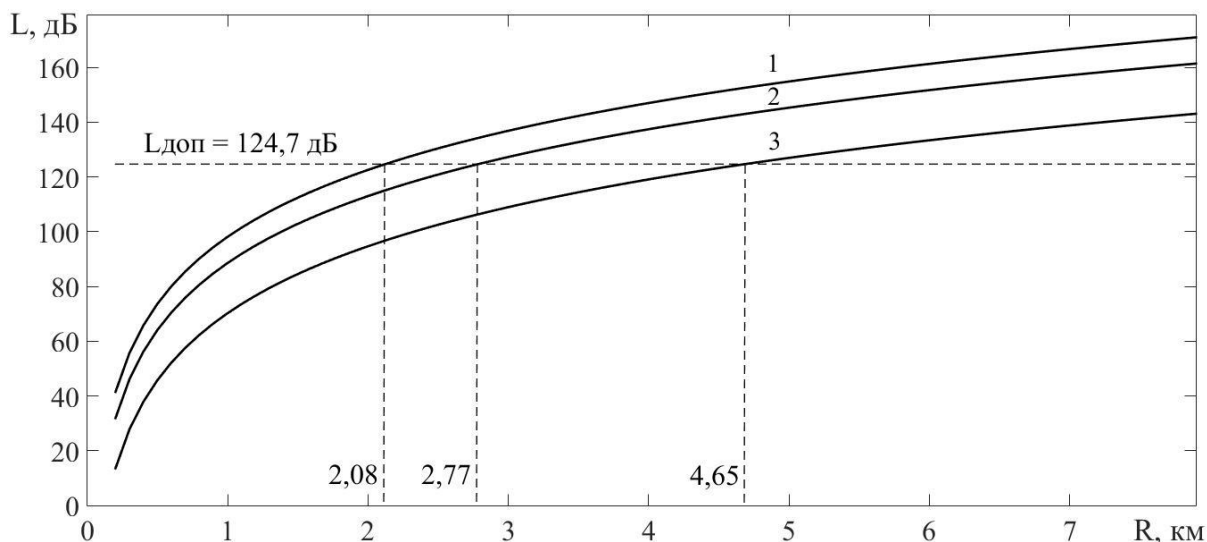


Рисунок 4.6 – Визначення дальності радіозв'язку для схеми модуляції та кодування QAM-64 4/5: 1 – міська місцевість; 2 – приміська місцевість; 3 – селищна місцевість

В результаті аналізу отриманих залежностей були визначені значення максимальної дальності радіозв'язку.

При використанні схеми QPSK 1/2 дальність радіозв'язку складає:

- для міської місцевості – 3,37 км;
- для приміської місцевості – 4,46 км;
- для селищної місцевості – 7,33 км.

При використанні схеми QAM-16 1/2 дальність радіозв'язку:

- для міської місцевості – 2,87 км;
- для приміської місцевості – 3,76 км;
- для селищної місцевості – 6,33 км.

При використанні схеми QAM-64 4/5 дальність радіозв'язку:

- для міської місцевості – 2,08 км;
- для приміської місцевості – 2,77 км;
- для селищної місцевості – 4,65 км.

#### **4.4 Територіально-частотне планування стільникової мережі LTE-R для залізничної ділянки Дніпро-Головний – Кам'янське**

Виконаємо територіально-частотне планування мережі мобільного зв'язку LTE-R для залізничної ділянки Дніпро-Головний – Кам'янське. Для забезпечення високої надійності та функціональної безпеки використовуються дві паралельних мережі базових станцій, які розташовуються вздовж залізничної лінії (рис. 4.7). З урахуванням цього будемо використовувати трьохкластерну мережу стільникового зв'язку. Крім цього, в кожній базовій станції організуємо два сектори покриття шляхом застосування двох антен з вузькою діаграмою спрямованості. Таким чином, для реалізації трьохкластерної мережі з двох секторною конфігурацією необхідно розділити весь частотний ресурс системи на шість груп робочих частот.

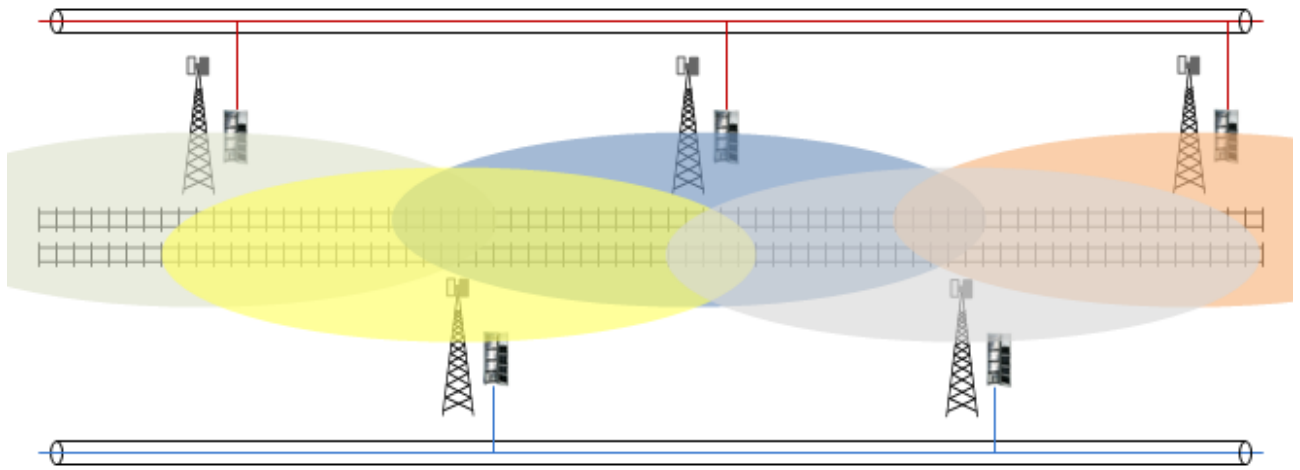


Рисунок 4.7 – Трьохкластерна структура мережі мобільного зв'язку LTE-R

Для забезпечення можливості обслуговування мобільних абонентів з високою швидкістю переміщення стільники базових станцій мережі LTE-R перекриваються на 50 відсотків. При цьому відстань між двома сусідніми базовими станціями дорівнює дальності дії кожної станції. В пункті 4.3 ми визначили, що дальність радіозв'язку залежить від типу місцевості (місто, приміська місцевість, селище), а також від обраної схеми модуляції та кодування. Спроекуємо мережу LTE-R таким чином, щоб забезпечувалась можливість використання найшвидкісної схеми модуляції та кодування QAM-64 4/5. Максимальна дальність дії базової станції для такої схеми в міській місцевості складає 2,08 км, а в селищній місцевості – 4,65 км.

За допомогою програми Google Earth були визначені позиції розташування базових станцій на залізничній ділянці Дніпро-Головний – Кам'янське. Для забезпечення можливості використання схеми QAM-64 4/5 базові станції в межах міст розташовувались на відстані 2 км одна від одної, а в межах селищ та на перегонах – на відстані 4,5 км. Розташування базових станції представлено на рис. 4.8. Використовуються дві паралельних мережі, які позначені червоними та синіми маркерами. Таким чином, для організації мобільного зв'язку на залізничній ділянці Дніпро-Головний – Кам'янське використовується 24 базових станції LTE-R.



Рисунок 4.8 – Розташування базових станцій LTE-R на залізничній ділянці Дніпро-Головний – Кам'янське

Визначимо загальну кількість каналів трафіку та кількість абонентів, яких може обслуговувати одна базова станція. В стандарті LTE-R в якості каналу розуміється один ресурсний блок, який включає в себе 12 піднесучих. Ширина кожної піднесучої 15 кГц. Таким чином, ширина одного каналу складає 180 кГц.

1. Розрахуємо можливу кількість каналів (ресурсних блоків) для мережі LTE-R

$$N_k = \frac{\Delta F}{\Delta f_k} = \frac{10 \cdot 10^6}{180 \cdot 10^3} = 55,5 \text{ (55 каналів)}, \quad (4.17)$$

де  $\Delta F = 10$  МГц – ширина частотної смуги LTE-R;

$\Delta f_k = 180$  кГц – ширина одного каналу.

2. Розрахуємо кількість каналів в одному секторі базової станції

$$N_{kсек} = \frac{N_k}{N_{кл} \cdot M_{сек}} = \frac{55}{3 \cdot 2} = 9,2 \text{ (9 каналів)}, \quad (4.18)$$

де  $N_k = 3$  – розмір кластеру;

$M_{сек} = 2$  – кількість секторів в одній базовій станції.

3. Визначимо кількість каналів трафіку в одному секторі

$$N = N_{kсек} \cdot N_{кмл} = 9 \cdot 2 = 18 \text{ каналів}, \quad (4.19)$$

де  $N_{кмл} = 2$  – кількість каналів трафіку в одному каналі LTE-R. Таким чином в кожному секторі базової станції використовується 18 ресурсних блоків LTE-R.

4. Розрахуємо залежність імовірності блокування виклику від телекомунікаційного навантаження за допомогою формули Ерланга

$$P_{\text{бл}} = \frac{A_{\text{сек}}^N / N!}{\sum_{k=0}^N (A_{\text{сек}}^k / k!)}, \quad (4.20)$$

де  $A_{\text{сек}}$  – телекомунікаційне навантаження на один сектор базової станції.

Результати розрахунки для  $N = 18$  представлені на рис. 4.9. Як видно з графіку, допустиме навантаження одного сектора базової станції при імовірності блокування виклику 1 % складає 10,44 Ерл. Навантаження від одного абонента змінюється від 0,04 до 0,2 Ерл. Будемо вважати, що навантаження від одного абонента  $A_1 = 0,1$  Ерл.

Визначимо кількість абонентів, що може обслуговувати базова станція

$$N_{\text{абБС}} = M_{\text{сек}} \frac{A_{\text{сек}}}{A_1} = 2 \cdot \frac{10,44}{0,1} = 208,8 \text{ (208 абонентів)}. \quad (4.21)$$

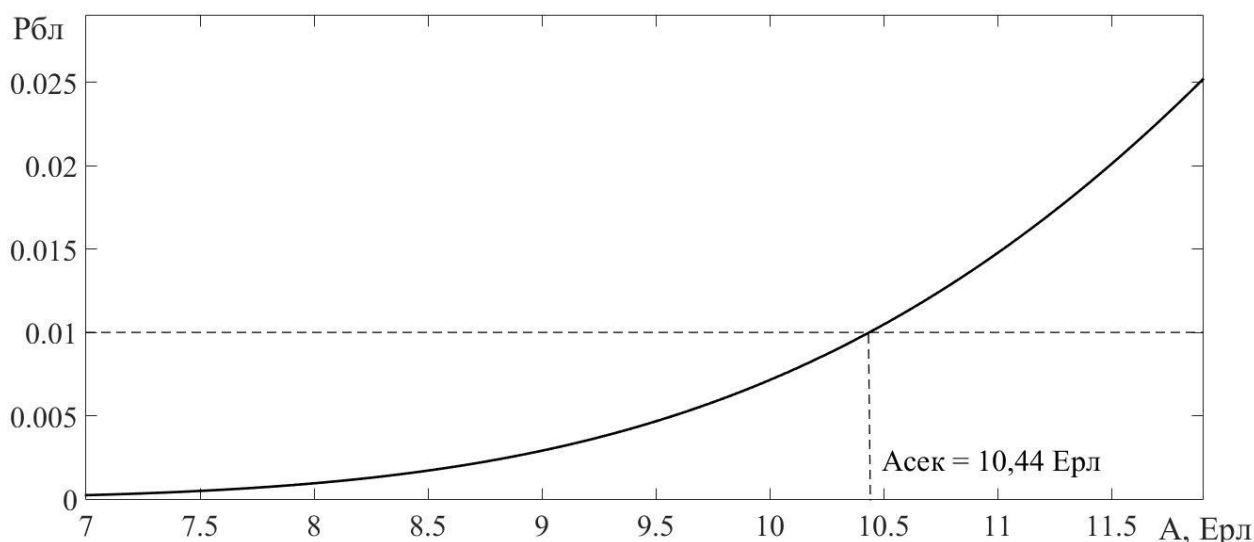


Рисунок 4.9 – Залежність імовірності блокування від телекомунікаційного навантаження для одного сектора базової станції

Таким чином, в мережі LTE-R можуть використовуватись 55 частотних каналів (ресурсних блоків), які розділяються на шість частотних груп по дев'ять каналів в кожній групі. Запропоноване розподілення частот для базових станцій на ділянці Дніпро-Головний – Кам'янське представлено у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Розподілення частот базових станцій LTE-R

Номер базової станції	Номер сектору	Номер групи частот
BTS1	сектор 1	1
	сектор 2	2
BTS2	сектор 1	3
	сектор 2	4
BTS3	сектор 1	5
	сектор 2	6
BTS4	сектор 1	1
	сектор 2	2
BTS5	сектор 1	3
	сектор 2	4
BTS6	сектор 1	5
	сектор 2	6
BTS7	сектор 1	1
	сектор 2	2
BTS8	сектор 1	3
	сектор 2	4
BTS9	сектор 1	5
	сектор 2	6
BTS10	сектор 1	1
	сектор 2	2
BTS11	сектор 1	3
	сектор 2	4
BTS12	сектор 1	5
	сектор 2	6
BTS13	сектор 1	1
	сектор 2	2
BTS14	сектор 1	3
	сектор 2	4
BTS15	сектор 1	5
	сектор 2	6
BTS16	сектор 1	1
	сектор 2	2
BTS17	сектор 1	3
	сектор 2	4
BTS18	сектор 1	5
	сектор 2	6
BTS19	сектор 1	1
	сектор 2	2
BTS20	сектор 1	3
	сектор 2	4

Продовження таблиці 4.2

Номер базової станції	Номер сектору	Номер групи частот
BTS21	сектор 1	5
	сектор 2	6
BTS22	сектор 1	1
	сектор 2	2
BTS23	сектор 1	3
	сектор 2	4
BTS24	сектор 1	5
	сектор 2	6

#### 4.5 Висновки до розділу 4

Для організації залізничного цифрового радіозв'язку запропоновано використовувати мережу мобільного зв'язку LTE-R з високим рівнем резервування. В такій системі радіозв'язку вздовж залізничної лінії розташовуються дві паралельних мережі базових станцій, комірки яких перекриваються більше ніж на п'ятдесят відсотків. Кожна мережа базових станцій підключається до центру комутації за петлевою схемою. Це все забезпечує високу надійність та гарантію доступності до мережі, а також можливість обслуговування абонентів з високою швидкістю руху.

За допомогою моделі розповсюдження радіохвиль Окамура-Хата була визначена дальність дії базової станції LTE-R. З урахуванням цього проведено територіально-частотне планування мережі LTE-R для покриття залізничної ділянки Дніпро-Головний – Кам'янське. Запропоновано використовувати трьохкластерну структуру мережі з розділення кожної комірки на два сектори. Визначена необхідна кількість базових станцій, місце їх розташування та розподіл частот по базових станціях і секторах. Визначена також кількість каналів зв'язку та можливу кількість абонентів для кожної базової станції.

## ВИСНОВКИ

У зв'язку із розвитком інформаційних та телекомунікаційних технологій змінюються принципи побудову систем автоматизації різних технологічних процесів. Зокрема, в різних країнах світу впроваджуються системи керування рухом поїздів на базі цифрового радіозв'язку такі як ERTMS, CTCS тощо. Такі системи дозволяють підвищити безпеку руху та пропускну спроможність залізничних ділянок, знизити експлуатаційні витрати.

В даній дипломній роботі пропонується доповнити традиційні системи інтервального регулювання (автоблокування, електричну централізацію, автоматичну локомотивну сигналізацію) пристроями цифрового радіозв'язку та супутникової навігації. Розроблена структурна схема та алгоритм роботи системи інтервального регулювання на базі радіозв'язку АБ-ЦР. Система побудована відповідно до принципів ERTMS другого рівня з урахування особливостей українських систем залізничної автоматики. На відміну від ERTMS для визначення місцезнаходження поїзда використовуються не балізи, а супутникова навігація. Для передачі команд керування від центру радіо блокування на локомотив запропоновано використовувати мережу цифрового радіозв'язку LTE-R. Крім цього, залишається традиційний канал АЛС через рейкову лінію. Розроблений алгоритм роботи системи локомотивної безпеки, яка здійснює контроль швидкісного режиму поїзда відповідно до повідомлень LTE-R, супутникової навігації та команд АЛСН.

Впровадження цифрового залізничного радіозв'язку забезпечує можливість реалізації координатних систем інтервального регулювання руху поїздів (КСІР). Такі системи забезпечують більшу пропускну здатність, дозволяють відмовитись від колійних пристроїв автоматики та світлофорів на перегонах, покращують умови праці. На шляху широкого розповсюдження таких систем стоять декілька проблем: безпека (перевірка системи на виконання всіх існуючих норм безпеки); матеріально-економічні затрати (створення радіомережі, установка базових станцій, створення центру радіо блокування, створення бази електронних карт марш-

рутів, обладнання всіх локомотивів комплектами апаратури). Подальші дослідження КСІР пов'язане саме з вирішенням цих недоліків.

Для організації залізничного цифрового радіозв'язку запропоновано використовувати мережу мобільного зв'язку LTE-R з високим рівнем резервування. В такій системі радіозв'язку вздовж залізничної лінії розташовуються дві паралельних мережі базових станцій, комірки яких перекриваються більше ніж на п'ятдесят відсотків. Кожна мережа базових станцій підключається до центру комутації за петлевою схемою. Це все забезпечує високу надійність та гарантію доступності до мережі, а також можливість обслуговування абонентів з високою швидкістю руху.

За допомогою моделі розповсюдження радіохвиль Окамура-Хата була визначена дальність дії базової станції LTE-R. З урахуванням цього проведено територіально-частотне планування мережі LTE-R для покриття залізничної ділянки Дніпро-Головний – Кам'янське. Запропоновано використовувати трьохкластерну структуру мережі з розділення кожної комірки на два сектори. Визначена необхідна кількість базових станцій, місце їх розташування та розподіл частот по базових станціях і секторах. Визначена також кількість каналів зв'язку та можливу кількість абонентів для кожної базової станції.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Бойнік, А. Б. Системи інтервального регулювання руху поїздів на перегоні [Текст] / А. Б. Бойнік, С. В. Кошевий, С. В. Панченко, В. О. Сотник. – Харків: УкрДАЗТ, 2005. – 256 с.
2. Казаков, А. А. Автоматизовані системи інтервального регулювання руху поїздів [Текст] / А. А. Казаков, В. Д. Бубнов, Е. А. Казаков. – М.: Транспорт, 1995. – 320 с.
3. Theeg, G. Railway Signalling and Interlocking. International Compendium [Текст] / G. Theeg, S. Vlasenko. – Hamburg: Eurailpress, 2009. – 448 p.
4. Корнійчук, М. П., Липовець Н.В., Шамрай Д.О. Технологія галузі і технічні засоби залізничного транспорту. Частина 2 [Текст] / М. П. Корнійчук, Н. В. Липовець, Д. О. Шамрай. – К.: «Видавництво Дельта», 2007. – 424с.
5. Зорін, В. І. Уніфікований комплексний локомотивний пристрій безпеки (КЛУБ-У) [Текст] / В. І. Зорин, В. І. Астрахан. – М. :ГОУ "Учбово-методичний центр з освіти на залізничному транспорті", 2008. - 177 с.
6. Система локомотивної безпеки «ImproTRAIN-250» [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: <http://www.imp.lg.ua/index.php/ru/slb>
7. Бергер, Р. Координація впровадження системи ETCS на європейській мережі [Текст] / Р. Бергер // Залізниці світу. – 2005. – № 10. – С. 57-61.
8. Chinese Train Control System [Текст] / В. Ning, Т. Tang, К. Qiu та ін. // School of Electronics and Information Engineering, Northern Jiaotong University – London, U.K.: The proceedings of Aspect 2003, 2003. — 213 с.
9. Козаченко, Д. М. Пропускна та провізна спроможність залізниць [Текст] / Д. М. Козаченко, О. Ю. Папахов, Н. О. Логвінова. – Дніпро: ДНУЗТ, 2017. – 108 с.
10. Вишукування та проектування залізниць [Текст] / В. М. Астахов, Н. В. Белікова, Є. І. Галагурия, Л. П. Ватуля. – Харків: УкрДАЗТ, 2010. – 96 с.
11. Особливості математичних моделей поширення радіохвиль у містах [Електрон. ресурс]. – Режим доступу [https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/41898/1/Parshyna\\_bakalavr.pdf](https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/41898/1/Parshyna_bakalavr.pdf)