

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Факультет «Комп'ютерних технологій і систем»

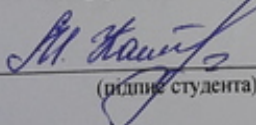
Кафедра «Автоматика та телекомунікації»

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

на тему: Обладнання залізничної ділянки системою цифрового
транкінгового радіозв'язку

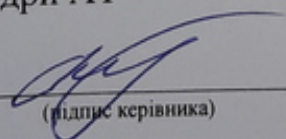
за освітньою програмою Автоматика та автоматизація на транспорті
зі спеціальності: 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(шифр і назва спеціальності)

Виконав: студентка групи АТ2126


(підпис студента)

/ Марина КАМІНСЬКА /
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

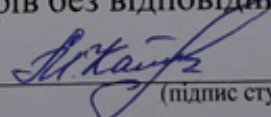
Керівник: доцент кафедри АТ


(підпис керівника)

/ Костянтин ГОНЧАРОВ /
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

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

Студент


(підпис студента)

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

Факультет «Комп'ютерних технологій і систем»

Кафедра «Автоматика та телекомунікації»

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

на тему: Обладнання залізничної ділянки системою цифрового
транкінгового радіозв'язку

за освітньою програмою Автоматика та автоматизація на транспорті
зі спеціальності: 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(шифр і назва спеціальності)

Виконав: студентка групи АТ2126

(підпис студента) / Марина КАМІНСЬКА /
(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Керівник: доцент кафедри АТ

(підпис керівника) / Костянтин ГОНЧАРОВ /
(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

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

Студент _____
(підпис студента)

Дніпро – 2022 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: Equipment of the railway section with the trunking radio
communication digital system

according to educational curriculum Automatic and automation in transport

in the Specialty: 151 Automation and computer-integrated technologies
(specialty and its code)

D
o
n
e
S
b
y
e
p
h
e
f
i
e
u
a
u
e
h
e
r
o
f
s
e
r

Dnipro – 2022

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.

З А В Д А Н Н Я

на кваліфікаційну роботу _____ магістра
(ступінь вищої освіти)

студентці _____ Камінській Марині Василівні
(Прізвище, Ім'я По батькові)

1. Тема роботи: _____ Обладнання залізничної ділянки системою цифрового
транкінгового радіозв'язку

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

затверджені наказом від _____ "18" жовтня 2021 р. № 705ст

2. Строк подання студентом роботи: 05.12.2022 р.

3. Вихідні дані до роботи: _____ характеристика залізничної ділянки, загальна
довжина, кількість та категорії залізничних станцій

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

4.1 Аналітична частина: виконати порівняльний аналіз існуючих стандартів
стільникового та транкінгового радіозв'язку

4.2 Основна частина: 1) визначити можливу дальність та пропускну
спроможність базової станції TETRA; 2) виконати територіально-частотне
планування мережі транкінгового радіозв'язку для заданої залізничної
ділянки; 3) провести імітаційне моделювання базової станції TETRA

5. Перелік графічного матеріалу:

структурна схема системи транкінгового радіозв'язку TETRA, схема
розташування базових станцій TETRA, графічні залежності, отримані в
результаті розрахунків та імітаційного моделювання базової станції

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Порівняльний аналіз існуючих стандартів транкінгового та стільникового радіозв'язку	01.04.2022	
2	Визначення дальності дії та пропускнуєї спроможності базової станції стандарту TETRA	01.07.2022	
3	Частотно-територіальне планування мережі цифрового транкінгового радіозв'язку	01.09.2022	
4	Імітаційне моделювання базової станції стандарту TETRA	01.11.2022	
5	Оформлення кваліфікаційної роботи	01.12.2022	
6	Подання кваліфікаційної роботи до кафедри	05.12.2022	
7	Захист кваліфікаційної роботи на засіданні Екзаменаційної комісії	19.12.2022 – 23.12.2022	

Студентка

(підпис)

Марина КАМІНСЬКА

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник роботи

(підпис)

Костянтин ГОНЧАРОВ

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи магістра:

63 сторінки, 16 рисунків, 8 таблиць, 10 джерел літератури.

Об'єкт розробки – мережа цифрового транкінгового радіозв'язку TETRA для заданої залізничної ділянки.

Мета роботи – обладнання залізничної ділянки системою цифрового транкінгового радіозв'язку.

Методи дослідження – методи математичного моделювання розповсюдження радіохвиль; методи територіально-частотного планування мережі транкінгового радіозв'язку; методи теорії масового обслуговування; імітаційне моделювання.

У першому розділі проведений порівняльний аналіз різних стандартів транкінгового та стільникового радіозв'язку, розглянуто їх особливості та технічні характеристики, показана доцільність застосування на залізничному транспорті системи TETRA. У другому розділі за допомогою моделі Хата проведено оцінку дальності дії базової станції TETRA для міської, приміської та селищної місцевості. В третьому розділі проведено територіально-частотне планування мережі цифрового транкінгового радіозв'язку, визначено кількість базових станцій, розподілення робочих частот та потужності радіопередавачів. В четвертому розділі проведено імітаційне моделювання базової станції TETRA як системи масового обслуговування, проведена оцінка імовірності блокування виклику для різних категорій користувачів.

Висновок. Обладнання залізничної ділянки Дніпро-Головний – П'ятихатки-Стикова системою цифрового транкінгового зв'язку TETRA згідно з рекомендаціями, отриманими в рамках даної дипломної роботи, дозволить забезпечити надійний радіозв'язок для всіх категорії користувачів.

Ключові слова: ТРАНКІНГОВИЙ РАДІОЗВ'ЯЗОК, СТАНДАРТ TETRA, МОДЕЛЬ ХАТА, БАЗОВА СТАНЦІЯ, МОБІЛЬНА СТАНЦІЯ, СИСТЕМА МАСОВОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ, ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ.

ЗМІСТ

Вступ	8
1 ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ СИСТЕМ ТРАНКІНГОВОГО ТА СТІЛЬНИКОВОГО РАДІОЗВ'ЯЗКУ	9
1.1 Загальні принципи побудови систем транкінгового радіозв'язку	9
1.2 Огляд існуючих систем транкінгового радіозв'язку	14
1.3 Особливості та технічні характеристики системи TETRA	16
1.4 Особливості та технічна характеристики системи стільникового зв'язку для залізничного транспорту GSM-R	21
1.5 Порівняння стільникових та транкінгових систем	23
1.6 Висновки до розділу 1	24
2 ВИЗНАЧЕННЯ ДАЛЬНОСТІ ДІЇ ТА ПРОПУСКНОЇ СПРОМОЖНОСТІ БАЗОВОЇ СТАНЦІЇ TETRA	25
2.1 Моделі розповсюдження радіохвиль	25
2.1.1 Модель Окамура	26
2.1.2 Модель Хата	29
2.1.3 Модель Лі	31
2.2 Визначення дальності дії базової станції стандарту TETRA	32
2.3 Радіоінтерфейс стандарту TETRA	35
2.4 Визначення ємності базової станції стандарту TETRA	38
2.5 Висновки до розділу 2	40
3 ТЕРИТОРІАЛЬНО-ЧАСТОТНЕ ПЛАНУВАННЯ МЕРЕЖІ ЦИФРОВОГО ТРАНКІНГОВОГО РАДІОЗВ'ЯЗКУ	41
3.1 Загальна характеристика залізничної ділянки Дніпро- Головний-П'ятихатки-Стикова	41
3.2 Територіально-частотне планування мережі транкінгового зв'язку	44
3.3 Розрахунок потужності радіопередавачів базових станцій	47
3.4 Висновки до розділу	50

4 ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ БАЗОВОЇ СТАНЦІЇ СТАНДАРТУ TETRA	51
4.1 Особливості та різновиди систем масового обслуговування	51
4.2 Імітаційна модель базової станції TETRA	54
4.3 Результати моделювання	59
4.4 Висновки до розділу 4	61
Висновки	62
Список використаних джерел	63

ВСТУП

На сьогоднішній день в Україні використовується застарілі аналогові системи залізничного радіозв'язку: поїзний радіозв'язок, станційний, маневровий радіозв'язок, ремонтно-оперативний радіозв'язок та ін. Вони мають ряд недоліків, а саме неефективне використання частотного ресурсу, громіздка та високовартісна апаратура, обмежені функціональні можливості, відсутність захисту інформації. Ці недоліки заважають організувати високоточний та якісний зв'язок на залізничній ділянці.

Розробка обладнання системи цифрового транкінгового радіозв'язку дозволить спроектувати надійний, якісний та гнучкий вид зв'язку. Цифровий транкінговий радіозв'язок має ряд переваг. Він дозволяє створювати різні конфігурації мереж зв'язку: від найпростіших локальних однозонових систем до складних систем регіонального або національного рівня. Системи на основі популярних стандартів транкінгового радіозв'язку забезпечують різні режими передачі мови та даних та можливість організації зв'язку з різними системами за стандартними інтерфейсами. У системах радіозв'язку застосовуються сучасні способи голосоперетворення, суміщені з ефективними методами завадостійкого кодування інформації. Системи транкінгового радіозв'язку мають більший радіус зон покриття, що дає змогу розміщення меншої кількості апаратури на великих залізничних ділянках. Як наслідок того – менше витрат на комутаційне обладнання, лінії прив'язки, оренду приміщень тощо.

Правильне проектування та розробка обладнання системи цифрового транкінгового радіозв'язку на залізничній ділянці дозволить побудувати якісний вид залізничного зв'язку, який забезпечить безперебійну роботу та безпеку руху на залізниці, а також спростить комунікації між її працівниками.

1 ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ СИСТЕМ ТРАНКІНГОВОГО ТА СТІЛЬНИКОВОГО РАДІОЗВ'ЯЗКУ

1.1 Загальні принципи побудови системи транкінгового радіозв'язку

Транкінгова система радіозв'язку (ТСР) - це система, в якій використовується принцип рівної доступності каналів для всіх абонентів або груп абонентів. Цей принцип давно і повсюдно використовується в телефонних мережах, звідки в радіозв'язок і надійшло слово trunk (пучок, тобто пучок рівнодоступних каналів). Транкові системи створювалися як відомчі і добре себе зарекомендували в експлуатації протягом 30 років. Суть транкінгу ось у чому. Розглянемо ситуацію, коли є три радіочастотні канали, кожен з яких жорстко закріплений за кількома групами користувачів. Для такої системи (точніше трьох окремих систем) типова ситуація: канал 1 перевантажений і абонент цієї групи не може вийти на зв'язок, в той же час канали 2 і 3 не використовуються. У разі, коли три канали об'єднані в єдину систему (тобто є елемент централізації – базова станція) і рівнодоступні для будь-якої групи абонентів, цей абонент має можливість встановлення зв'язку. Основною, що визначає назву, функцією обладнання ТСР є автоматичне надання вільного радіоканалу на вимогу абонента радіостанції і перемикання на цей канал абонента або групи абонентів, що викликається. До речі, з цієї точки зору бездротові телефони (такі, як PANASONIC KX-T9080), що працюють на загальному наборі радіоканалів, також утворюють ТСР. Транкінгові мережі зв'язку надають широкий спектр послуг, а саме: внутрішні виклики (індивідуальний та груповий); роумінг; передача даних; режим безпосереднього зв'язку; тарифікація; дистанційне керування абонентськими радіостанціями. Системи професійного радіозв'язку характеризуються великим радіусом дії, оскільки навіть у найпростішій ТСР зв'язок радіостанцій між собою здійснюється через ретранслятори базової станції (БС). Крім того, багатозонові ТСР мають у своєму складі декілька (від одиниць до сотень) БС, кожна з яких обслуговує свою зону. При цьому система встановить з'єднання між радіостанціями незалежно від

їхнього розташування і, як правило, абсолютно прозоро для користувачів радіостанцій, що викликається і викликає. Крім виклику групи радіостанцій (є у всіх ТСР), майже всі системи забезпечують індивідуальний виклик конкретної радіостанції. При цьому багато сучасних ТСР забезпечують розподіл всього парку радіостанцій на окремі загони. Загін - це сукупність радіостанцій, що належать певній організації, всередині якого здійснюють індивідуальний та груповий виклик. Передбачається, що виклики між загонами здебільшого заборонені. Таким чином, кожна з організацій, що користуються ТСР, може мати свою ізольовану систему зв'язку. Як правило, ТСР забезпечують зв'язок радіостанції з абонентами міської та кількох установчих телефонних мереж, причому їхнє підключення до таких мереж може здійснюватися як найпростішим способом за абонентськими лініями (аналогічно офісним АТС), так і з'єднувальним лініям. В останньому випадку з точки зору нумерації абонентів ТСР стає частиною телефонної мережі міста або установи.

Доступ до кожного виду послуг, що надаються системою, зазвичай програмується для кожного абонента індивідуально. Крім того, програмується граничний час розмови та пріоритет абонента. ТСР також мають захист від несанкціонованого доступу до системи. Усі радіостанції, розраховані працювати у ТСР, мають можливість перемикання режим звичайної радіостанції. Обладнання будь-якої ТСР розраховане на комерційну експлуатацію, тому обов'язково забезпечує врахування часу використання системи кожним абонентом (тарифікація).

На рисунку 1.1 представлено узагальнену структурну схему однозонової ТСР. До складу БС, крім радіочастотного обладнання (ретранслятори, об'єднання радіосигналів, антени) входять також комутатор, пристрій управління (УУ) та інтерфейси до зовнішніх мереж. Ретранслятор - набір приймально-передавального обладнання, що обслуговує одну пару несучих частот. До останнього часу в переважній більшості ТСР одна пара несучих означала один канал трафіку (КТ). В даний час з появою систем стандарту TETRA та системи EDACS ProtoCALL, що передбачають тимчасове ущільнення, один РТ може

забезпечити два або чотири КТ. Антени БС, зазвичай, мають кругову діаграму спрямованості. При розташуванні БС краю зони застосовуються спрямовані антени. БС може розташовувати як єдиною приймальною антеною, так і роздільними антенами для прийому та передачі. У деяких випадках на одній щоглі може розміщуватися кілька прийомних антен для боротьби із завмираннями, викликаними багатопробієвим поширенням. Пристрій об'єднання радіосигналів дозволяє використовувати те саме антенне обладнання для одночасної роботи приймачів і передавачів на декількох частотних каналах. РТ працюють лише в дуплексному режимі, рознесення частот прийому та передачі становить від 45 МГц до 3 МГц [1].

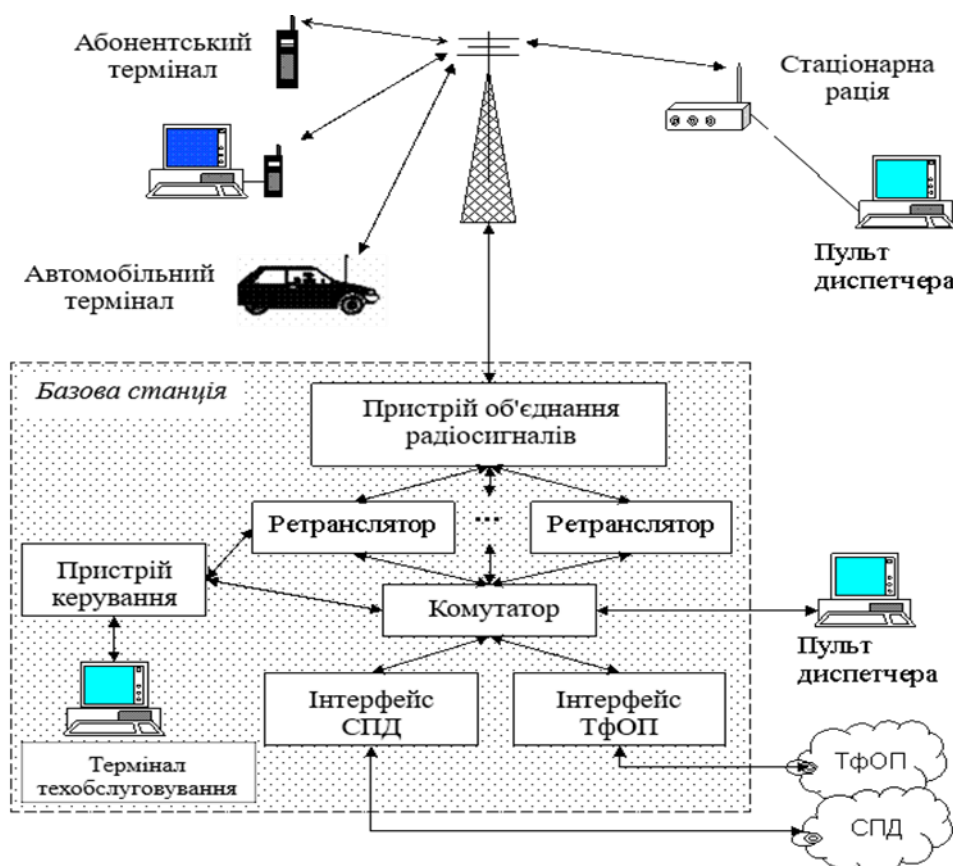


Рисунок 1.1 - Структурна схема однозонової ТСР

Комутатор в однозоновій ТСР обслуговує весь її трафік, включаючи з'єднання абонента з ТФОП та всі виклики, пов'язані з передачею даних. Пристрій управління забезпечує взаємодію всіх вузлів БС. Воно також обробляє

виклики, здійснює аутентифікацію абонентів, ведення черг викликів, внесення записів до БД погодинної оплати. У деяких системах УУ регулює максимально допустиму тривалість з'єднання з ТСР. Як правило, використовуються два варіанти регулювання: зменшення тривалості з'єднання в заздалегідь заданий годинник найбільшого навантаження, або адаптивна зміна залежно від поточного навантаження. Інтерфейс до ТФОП реалізується в ТСР у різний спосіб. У недорогих системах (наприклад, SmarTrunk) підключення здійснюється по двопровідній комутованій лінії. Більш сучасні ТСР мають у складі інтерфейсу до ТФОП апаратуру прямого набору номера, що забезпечує доступ до абонентів транкінгової мережі з використанням стандартної нумерації АТС. Ряд систем використовує цифрове ІКМ-з'єднання з апаратурою АТС. Однією з основних проблем при реєстрації та використанні транкінгових систем у Росії є проблема їх поєднання з ТФОП. При вихідних викликах транкінгових абонентів у телефонну мережу складність полягає в тому, що деякі транкінгові системи не можуть набирати номер у декадному режимі абонентських ліній електромеханічних АТС. Таким чином, необхідно використовувати додатковий пристрій для перетворення тонального набору в декадний. Вхідний зв'язок від абонентів ТФОП до радіоабонентів виявляється також проблематичним з низки причин. Більшість транкінгових мереж сполучаються з телефонною мережею по двопровідним абонентським лініям. У цьому випадку після набору номера ТФОП потрібен донабір номера радіоабонента. Однак після повного набору номера абонентської лінії та замикання шлейфу керуючим пристроєм транкінгової системи телефонне з'єднання вважається встановленим, і подальший набір номера в імпульсному режимі утруднений, а в деяких випадках неможливий. Застосовуваний у системі SmarTrunk II детектор «кляцань» не гарантує правильності імпульсного донaborу, оскільки якість «імпульсів-кляцань», що приходять з абонентської лінії, залежить від її електричних характеристик, довжини і т.д. Телефонний інтерфейс ELTA 200 призначений для поєднання транкінгових систем зв'язку різних типів з ТФОП; інтерфейс дозволяє поєднувати транкінгові системи зв'язку та ТФОП цифровими каналами (2,048

Мбіт/с), трипровідним з'єднувальним лініям з декадним набором номера або чотирипровідним каналам тональної частоти з системами сигналізації різних типів з відомчими телефонними мережами. З'єднання з ТфОП є традиційним для ТСР, але останнім часом все більше зростає кількість додатків, що передбачають передачу даних, тому наявність інтерфейсу до мереж передачі даних (СПД) також стає обов'язковим. Термінал технічного обслуговування та експлуатації розташовується, як правило, на БС. Термінал призначений для контролю за станом системи, проведення діагностики несправностей, тарифікації, внесення змін до БД абонентів. Більшість ТСР мають можливість віддаленого підключення терміналу через ТФОП чи СПД. Необов'язковими, але характерними елементами ТСР є диспетчерські пульти (ДП). ТСР використовуються в першу чергу споживачами, робота яких потребує диспетчера - служби охорони, швидка медична допомога, пожежна охорона, транспортні компанії, муніципальні служби. ДП можуть включатися в систему за абонентськими радіоканалами, або підключатися по виділених лініях безпосередньо до комутатора БС. У межах однієї ТСР може бути організовано кілька незалежних мереж зв'язку. Користувачі кожної з таких мереж не помічатимуть роботу сусідів та не зможуть втручатися у роботу інших мереж. Тому в одній ТСР можуть працювати кілька ДП, по-різному підключених до неї. Абонентське обладнання ТСР включає широкий набір пристроїв. Як правило, найбільш численними є напівдуплексні РС, тому що вони найбільше підходять для роботи в замкнутих групах. В основному це функціонально обмежені пристрої, які не мають цифрової клавіатури. Їхні користувачі мають можливість зв'язуватися лише з абонентами всередині своєї робочої групи, а також надсилати екстрені виклики диспетчеру. Існують і напівдуплексні РС з широким набором функцій та цифровою клавіатурою, але вони, будучи суттєво дорожчими, призначені для більш вузького кола абонентів. У ТСР поступово знаходить застосування новий клас абонентських пристроїв - дуплексні РС, що нагадують стільникові телефони, але мають значно більшу функціональність у порівнянні з останніми. Як напівдуплексні, і дуплексні транкінгові РС випускаються у

портативному, а й у автомобільному виконанні. Як правило, вихідна потужність передавачів автомобільних РС вища. Щодо нового класу пристроїв для ТСП є термінали ПД.

1.2 Огляд існуючих систем транкінгового радіозв'язку

Транкінгові системи радіозв'язку класифікують за такими ознаками:

1) За методом передачі мовної інформації: аналогові та цифрові. Передача мовлення в радіоканалі аналогових систем здійснюється з використанням частотної модуляції, крок сітки частот зазвичай становить 12,5 кГц або 25 кГц. Для передачі мови в цифрових системах використовуються різні типи вокодерів, що перетворюють аналоговий мовний сигнал цифровий потік зі швидкістю до 4,8 кбіт/с.

2) Залежно від кількості БС та загальної архітектури: однозонові або багатозонові системи. У системах першого типу є одна БС, у системах другого типу – кілька БС із можливістю роумінгу.

3) За методом об'єднання БС у багатозонових системах. БС можуть об'єднуватись за допомогою єдиного комутатора (системи з централізованою комутацією), або з'єднуватись один з одним безпосередньо, або через системи з розподіленою комутацією (СОП).

4) На кшталт багатостанційного доступу: FDMA, FDMA+TDMA. У більшості ТСП використовується багатостанційний доступ із частотним поділом (FDMA), включаючи цифрові системи. Комбінація FDMA та багатостанційного доступу з тимчасовим поділом (TDMA) використовується у системах стандарту TETRA.

5) За способом пошуку та призначення каналу: системи з децентралізованим (СДУ) та централізованим (СЦУ) управлінням. У СДВ процедуру пошуку вільного каналу виконують абонентські радіостанції (АР). У цих системах ретранслятори БС зазвичай пов'язані друг з одним і працюють незалежно. Особливістю СДВ є відносно великий час встановлення з'єднання між абонентами, що зростає зі збільшенням числа ретрансляторів. Така залежність

викликана тим, що АР змушені безперервно послідовно сканувати канали в пошуках сигналу виклику (останній може надійти від будь-якого ретранслятора) або вільного каналу (якщо абонент сам посилає виклик). Представниками цього класу є системи стандарту SmarTrunk.

У СЦУ пошук та призначення вільного каналу здійснюється на БС. Для забезпечення нормального функціонування таких систем організуються канали двох типів: робітники (трафіку, розмовні) та управління. Всі запити на надання зв'язку надсилаються каналом управління, цим же каналом БС повідомляє абонентські пристрої про призначення каналу, відхилення запиту, або про постановку запиту в чергу.

б) На кшталт каналу управління (КУ). У всіх каналах ТСП управління є цифровими. За принципом дії КУ можна виділити три типи: скануючі ТСП; ТСП з розподіленим керуючим каналом; ТСП із виділеним керуючим каналом.

Цифрові транкінгові системи в порівнянні з аналоговими мають низку переваг за рахунок реалізації вимог щодо підвищеної оперативності та безпеки зв'язку, надання широких можливостей щодо передачі даних, ширшого спектра послуг зв'язку (включаючи специфічні послуги зв'язку для реалізації спеціальних вимог служб громадської безпеки), можливостей організації взаємодії абонентів різних мереж.

До найбільш популярних стандартів цифрового транкінгового радіозв'язку, що заслужили міжнародне визнання, на основі яких у багатьох країнах розгорнуті системи зв'язку, відносяться: EDACS, розроблений фірмою Ericsson; TETRA, розроблений Європейським інститутом стандартів зв'язку; APCO 25, розроблений Асоціацією офіційних представників служб зв'язку органів громадської безпеки; Tetrapol, розроблений фірмою Matra Communication (Франція); iDEN, розроблений фірмою Motorola (США). Усі ці стандарти відповідають сучасним вимогам до систем транкінгового радіозв'язку. Вони дозволяють створювати різні конфігурації мереж зв'язку: від найпростіших локальних однозонових систем до складних систем регіонального або національного рівня. Системи на основі даних стандартів забезпечують різні

режими передачі мови (індивідуальний зв'язок, груповий зв'язок, широкомовний виклик тощо) та даних (комутовані пакети, передача даних з комутацією ланцюгів, короткі повідомлення тощо) та можливість організації зв'язку з різними системами за стандартними інтерфейсами (з цифровою мережею з інтеграцією послуг, з телефонною мережею загального користування, з установчими АТС тощо). У системах радіозв'язку зазначених стандартів застосовуються сучасні способи голосоперетворення, суміщені з ефективними методами завадостійкого кодування інформації [2].

1.3 Особливості та технічні характеристики системи TETRA

На даний час найпопулярнішим стандартом транкінгових систем радіозв'язку є стандарт TETRA.

Стандарт TETRA (TETRA - Terrestrial Trunked Radio) - перший і поки що єдиний відкритий загальноєвропейський стандарт цифрового транкінгового радіотелефонного зв'язку - встановлений ETSI (Європейським інститутом зі стандартизації в галузі телекомунікацій), який координує діяльність виробників обладнання, операторів мереж, національних адміністрацій та користувачів. Стандарт пройшов через ретельну процедуру затвердження, що гарантує TETRA високу якість. Найбільші виробники обладнання, оператори мереж, організації користувачів, фірми, що тестують, і розробники програмних додатків підписали в грудні 1994 року меморандум взаєморозуміння (MoU) щодо просування технології TETRA. На даний момент TETRA MoU об'єднує понад 97 компаній з усього світу.

Стандарт надає користувачам широкий спектр функцій та послуг, зокрема: передачу мови (симплекс/дуплекс); передачу даних/пакетну передачу даних; організацію індивідуальних, групових, циркулярних та пріоритетних викликів; передачу статусних та коротких повідомлень; автоматичну реєстрацію та роумінг абонентів; зв'язок радіоабонентів із абонентами ТФОП (УАТС); наскрізну нумерацію з абонентами УВАТС; дистанційне прослуховування

навколишнього оточення; автоматичний пошук та ідентифікацію абонентів; блокування абонентських радіостанцій під час спроби несанкціонованого доступу до мережі; автоматичну диспетчеризацію всіх типів з'єднань відповідно до типу та пріоритету виклику, завантаженості мережі та прав абонентів; можливість функціонування в режимі конвенційного зв'язку поза зоною дії базової станції; режим "подвійного" спостереження, при якому забезпечується прийом повідомлень від абонентів, що працюють у режимі транкінгового зв'язку, та від абонентів, що працюють у режимі конвенційного зв'язку; режим роботи мобільної радіостанції як ретранслятор (шлюз) для розширення зони радіопокриття портативних радіостанцій; підтримка режиму передачі даних про місцезнаходження від системи GPS; облік використання абонентами ефірного часу та ін.

Для забезпечення широкого відкритого ринку за участю у ньому безлічі постачальників у стандарті TETRA визначено такі вимоги до інтерфейсів: інтерфейс радіосигналів (AIR IF) забезпечує можливість роботи термінального обладнання різних виробників; інтерфейс термінального обладнання (TEI) сприяє незалежній розробці мобільних програм для передачі даних; міжсистемний інтерфейс (ISI) забезпечує можливість поєднання мереж TETRA різних виробників; інтерфейс роботи у прямому режимі (DMO) гарантує роботу між терміналами різних виробників поза зоною обслуговування системи. Політика, обрана MoU, забезпечує суттєві переваги відкритого стандарту перед закритими протоколами: великий ринок надає можливість вибрати оптимальні за співвідношенням ціна/якість системи та термінальне обладнання; технічну сумісність (роумінг) із системами інших виробників. Слід зазначити, що внутрішньосистемні інтерфейси TETRA не стандартизуються. Це надає виробникам можливість самим впроваджувати найбільш раціональні та традиційні для них мережеві рішення, що робить систему більш гнучкою в використанні.[3]

Таблиця 1.1 – Технічні характеристики стандарту TETRA

Метод ущільнення каналів передачі даних та мови	TDMA (Багатостанційний доступ з тимчасовим поділом каналів): 4 канала передачі мови і даних у смузі 25 кГц
Метод статичного ущільнення в режимі PDO	Швидка пакетна передача (менше 100 мс на пакет 128 байт)
Тип модуляції	Відносна квадратурна фазова маніпуляція
Інформаційна швидкість	До 19.2 кбіт/с
Час встановлення швидкості	Менше 300мс
Час повторного встановлення швидкості	Менше 1с
Дуплексний рознос	10 МГц(45 МГц в 900МГц в діапазоні)
Рознос каналів	25 кГц
Сумарна швидкість передачі	36 кбіт/с
Максимальна швидкість передачі даних	28.8 кбіт/с
Метод віддаленого доступу	Інтервальна «щільова» ALOHA
Метод кодування мови	ACELP, 4.8 кбіт/с
Низькошвидкісне кодування	7.2 кбіт/с
Рівень потужності	1.3 Вт та 10 Вт
Швидкість транспортного засобу	До 200 км/год
Розмір соти	До 60 км
Шифрування	По радіотракту, або за вибором, між кінцевими пристроями

Загальна структурна схема мережі стандарту TETRA представлена на рисунку 1.2.

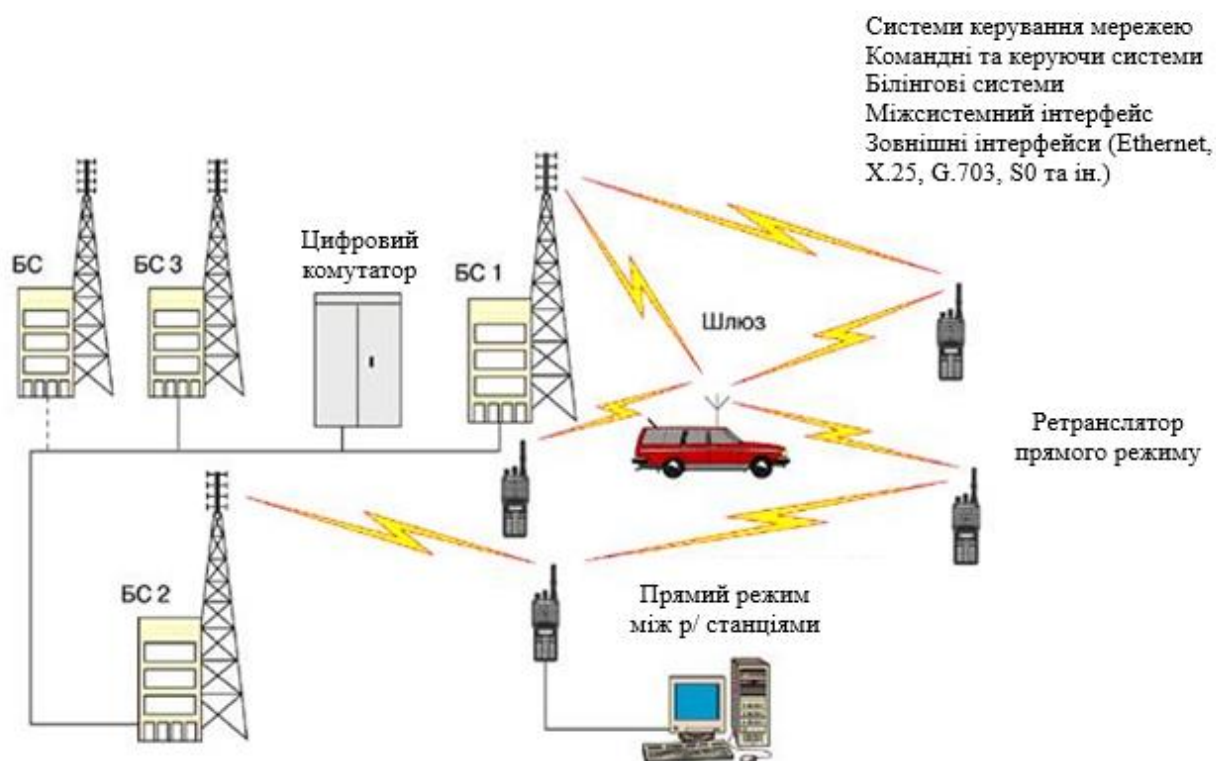


Рисунок 1.2 – Структурна схема мережі стандарту TETRA

У системах TETRA використовується цифрова технологія TDMA 25 кГц багатостанційного доступу з тимчасовим поділом каналів, що дозволяє на одній фізичній частоті забезпечувати функціонування 4-х логічних каналів. Реалізована в TETRA технологія гарантує чотириразову економію частотного спектру, дозволяє забезпечити виклик у режимі повного дуплексу, комбіновану передачу голосу та даних та високошвидкісну передачу даних (включаючи передачу відео) зі швидкістю до 28 кбіт/с. Стандарт TETRA передбачає адаптивну дискретну зміну рівня вихідної потужності в процесі сеансу зв'язку абонентів відповідно до необхідної напруженості поля, що при високій щільності радіозасобів призводить до істотного зменшення взаємних радіоперешкод. Мережі TETRA забезпечують виконання широкого діапазону з'єднань із зовнішніми мережами завдяки стандартизації інтерфейсів AIR IF, TEI, ISI та DMO. Мережа TETRA може бути приєднана, наприклад, до міської та установчої телефонних мереж, різних типів мереж передачі даних, а також

командних та контрольних систем. Причому ці мережі можуть бути доступні з мобільного терміналу. Здатність TETRA забезпечувати пару практично з усіма сучасними мережами передачі голосу і даних з урахуванням можливості виділення за запитом смуги пропускання (адаптація до необхідної швидкості передачі інформації) робить стандарт TETRA чудовою платформою для розробки систем передачі даних. Стандарт TETRA встановлює базові послуги передачі мови та даних, які можна розділити на дві категорії: послуги зв'язку та послуги носія. Послуги зв'язку забезпечують повну можливість зв'язку між користувачами, включно з усіма функціями терміналів. У стандартах TETRA послуги зв'язку охоплюють послуги мовного зв'язку. Послуги носія забезпечують можливість зв'язку між термінальними мережевими інтерфейсами, крім функцій терміналів.

Стандартом TETRA описуються два режими функціонування абонентського обладнання (радіостанцій):

- Режим транкінгового радіозв'язку (Trunked Operation Mode, TMO). Режим можливий, коли абонент знаходиться в зоні дії базової станції. Режим TMO може надавати абоненту всі можливості TETRA і оптимізований для вирішення наступних завдань: а) одночасної передачі голосу і даних (V+D), б) пакетної передачі даних (Packet data optimized);

- Режим прямої передачі (Direct Mode Operation, DMO) Режим призначений для групового взаємодії між абонентами за межами зони дії базових станцій TETRA. Зв'язок між абонентами здійснюється в напівдуплексному режимі, але при цьому зберігається можливість зробити індивідуальний або груповий виклик.

В рамках стандарту TETRA передбачені заходи щодо забезпеченню безпеки в мережі зв'язку, спрямовані на виключення несанкціонованого використання ресурсів системи та забезпечення конфіденційності переданої інформації в мережі. Ці заходи забезпечуються наступними механізмами:

- аутентифікація як абонентів, так і інфраструктури;
- шифрування інформації;

- забезпечення секретності параметрів абонента.

Аутентифікація абонентів здійснюється на основі головного ключа (K-key) та унікального номера TEI. Абонентський термінал з неправильним ідентифікатором не допускається до ресурсів системи TETRA [3].

1.4 Особливості та технічні характеристики системи стільникового зв'язку для залізничного транспорту GSM-R

Гідним конкурентом транкінговій системі радіозв'язку є система стільникового зв'язку для залізничного транспорту GSM-R.

GSM-R (GSM-Railway - стандарт GSM для залізничного транспорту) - був створений шляхом внесення спеціалізованих функцій і властивостей в стандарт GSM, розроблений інститутом ETSI для загальнодоступних мереж стільникового радіозв'язку в якості системи радіозв'язку з рухомими об'єктами на залізничному транспорті.

Структура мережі GSM-R суттєво не відрізняється від структури мобільних мереж загального користування та їх розширень в сенсі елементів мережі, стандартизованих інтерфейсів і сполучення. Повторне використання частот для розширення ємності мережі, мікrostільникова структура в зонах високої щільності (наприклад, на залізничних станціях) і принципи накладеної мережі з залежним від швидкості перемиканням вже використовуються в мережі GSM загального користування і тому досить просто реалізувати в GSM-R з невеликими модифікаціями, що враховують специфіку залізниць. Відмінності полягають лише в конфігурації та планування мережі, що впливають із критичних вимог залізничних мереж.

Фундаментальною вимогою до структури мережі GSM-R є наявність безперервної мережі радіостільників, розташованих уздовж залізничної колії. Кожен радіостільник містить одну або більше прийомо-передаючих станцій з направленими антенами вздовж колії, які, в свою чергу, підключаються до контролерів базових станцій. Кожен контролер відповідає за обслуговування

декількох радіостільників. В цілому контролер базових станцій являє собою інтерфейс до системи комутації, через яку підключаються всі лінії зв'язку і забезпечується з'єднання з іншими мережами.

Типова структура мережі GSM-R показана на рисунку 1.3, на якій MSC-центр комутації рухомого зв'язку; SSP - служба пункту комутації різних сервісів, BSS - обладнання базової станції; OMC - центр управління і обслуговування; MS - мобільні станції; ABC - адміністративний і білінговий центр; SMP - служба точки управління; SCP - служба контрольної точки; CBS - служба стільникового мовлення.

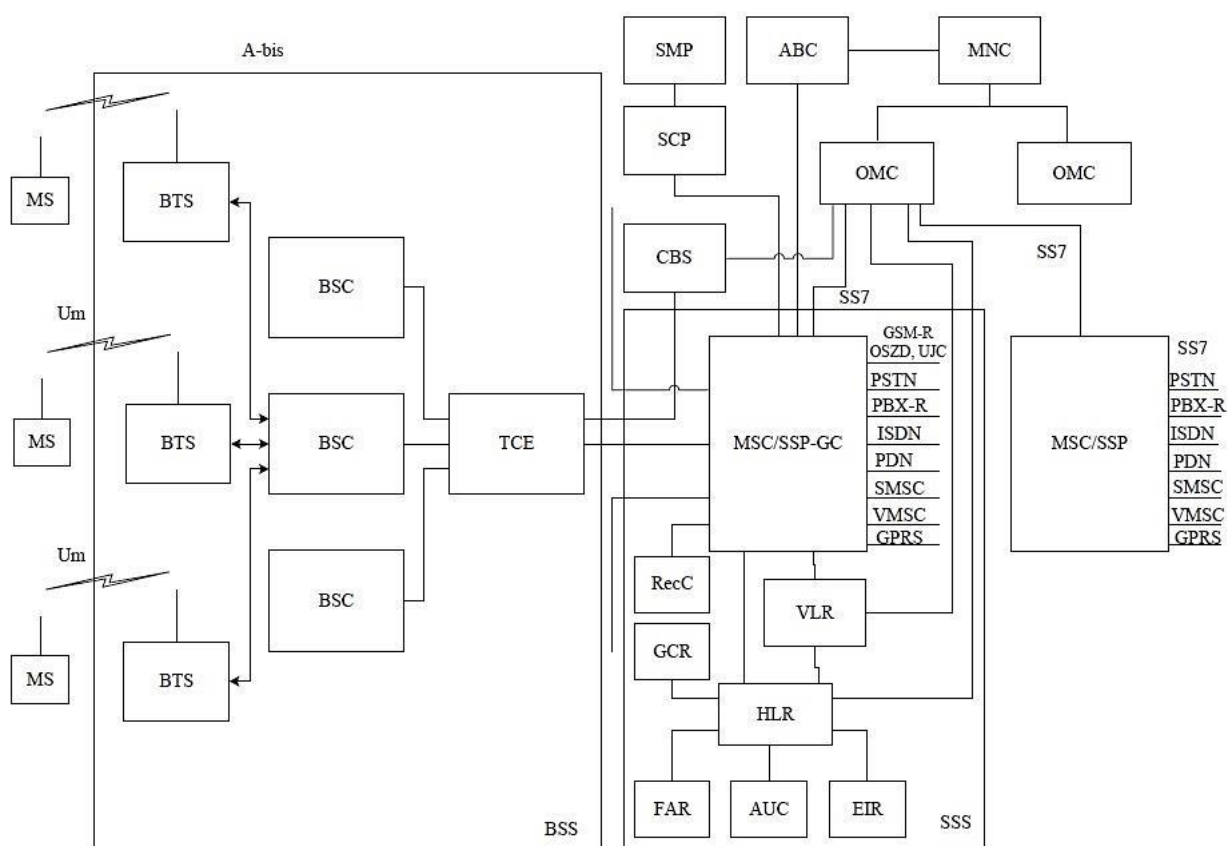


Рисунок 1.3 – Структурна схема мережі GSM-R

Мережа складається з мобільного комутаційного центру MSC з регістрами «гостьових» абонентів (реєстри переміщення) VLR. VLR підключаються до національного чи міжнародного рівня так званих регістрів «домашніх» абонентів (реєстри положення) HLR, які дозволяють здійснити зв'язок при перетині кордонів [4].

1.5 Порівняння стільникових та транкінгових систем

Транкінгові системи над стільниковими мають ряд переваг:

- гнучка система викликів (індивідуальний, груповий, пріоритетний, аварійний, голосове мовлення);
- малий час встановлення зв'язку (порядку 0,5 с);
- наявність режиму прямого зв'язку (минути базові станції);
- більший радіус зон покриття;
- ефективніше використання частотного спектру (в 4 рази);
- захист від прослуховування;
- організація незалежних виділених мереж зв'язку;
- висока надійність системи.

У транкінгової системі зв'язку ймовірність виникнення зайнятої лінії (каналу) дуже мала і становить трохи більше 0,5 %. Зрозуміло, що у стільникових радіотелефонних системах цей показник значно вищий.

На відміну від стільникового, де чудово організований індивідуальний зв'язок, але передати повідомлення одночасно групі користувачів вкрай складно (режим конференц-зв'язку), у транкінговому зв'язку передбачено як індивідуальний, так і груповий зв'язок між абонентами. Ця можливість є однією з переваг транкінгового зв'язку, що зумовлює його професійну орієнтацію. Групові дзвінки використовуються для одночасного встановлення сеансу зв'язку між усіма користувачами, що входять до цієї групи. Це найшвидший та економічніший спосіб зв'язку при керуванні виїзними бригадами та транспортом. Будь-яке число абонентів, членів цієї групи, може встановити зв'язок із усіма простим натисканням тангенти. Крім того, груповий виклик може бути організований і для обмеженої кількості абонентів цієї групи.

Завдяки підвищеній потужності передавачів базових та абонентських станцій зони обслуговування кожної з базових станцій транкінгового зв'язку у кілька

разів більше, ніж у стільникових. Наслідок – менше витрат на комутаційне обладнання, лінії прив'язки, оренду приміщень тощо.

1.6 Висновки до розділу 1

В даному розділі були розглянуті загальні принципи побудови транкінгового радіозв'язку, а також існуючі системи (аналогові та цифрові), були виділенні їх недоліки та переваги.

Розглянуто особливості та технічні характеристики системи TETRA і особливості та технічні характеристики системи стільникового зв'язку GSM-R, проведено їх порівняльний аналіз.

Показана доцільність застосовування системи TETRA в якості єдиної телекомунікаційної платформи для забезпечення всіх видів залізничного радіозв'язку.

2 ВИЗНАЧЕННЯ ДАЛЬНОСТІ ДІЇ ТА ПРОПУСКНОЇ СПРОМОЖНОСТІ БАЗОВОЇ СТАНЦІЇ TETRA

2.1 Моделі розповсюдження радіохвиль

При проектуванні системи радіозв'язку з рухомими об'єктами і, зокрема, стільникових систем зв'язку, виникає необхідність у визначенні зони обслуговування базової станції (БС), в якій буде забезпечено зв'язок із заданими якістю та надійністю, та мінімально допустимої відстані між БС мережі зв'язку, які використовують одні та ті ж частотні канали і тому можуть створювати один одному перешкоди.

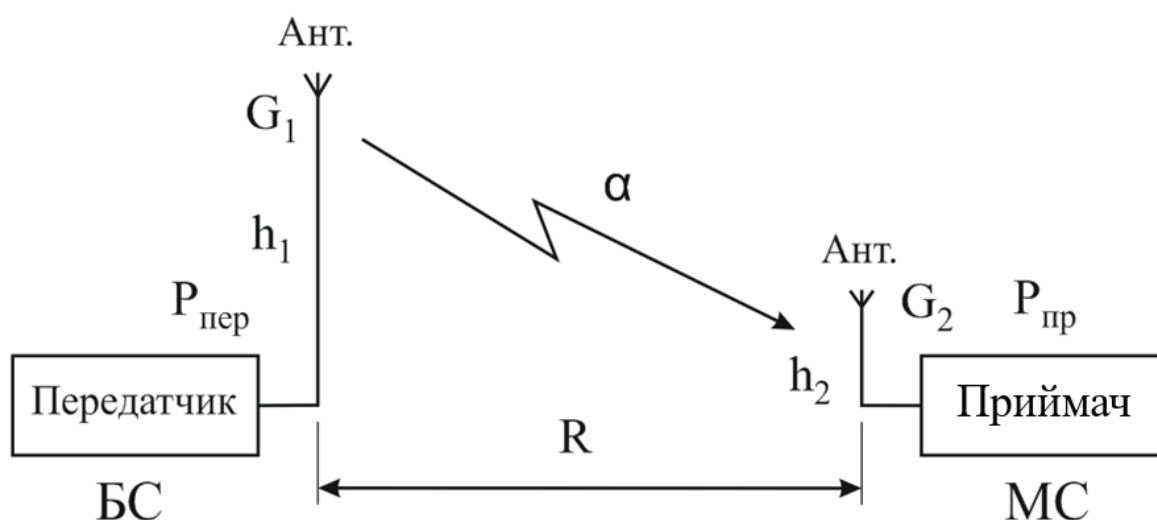


Рисунок 2.1 – Модель системи радіозв'язку: $P_{\text{пер}}$ – потужність передатчика, $P_{\text{пр}}$ – потужність приймача, h_1 – висота мачты антени передатчика, h_2 – висота антени приймача, G_1 – коефіцієнт підсилення антени передатчика, G_2 – коефіцієнт підсилення антени приймача, $\alpha = P_{\text{пр}}/P_{\text{пер}}$ – загасання радіохвиль, R – відстань між базовими та мобільними станціями

Для розрахунку зон обслуговування БС та мінімально допустимої відстані між БС у мережах рухомого зв'язку (СПС) необхідно враховувати:

- потужності передавачів БС та абонентських станцій (АС);
- параметри антенно-фідерного тракту приймально-передавальної апаратури (характеристики діаграми спрямованості приймальної антени, що її діє висоти, втрат в антенно-фідерному тракті тощо);
- рівень зовнішніх та внутрішніх шумів на вході приймача та його чутливість; - статистичні закономірності поширення радіохвиль в умовах пересіченої місцевості та міської забудови;
- параметри радіоканалу зв'язку (характер місцевості, ступінь урбанізації тощо);
- електричні параметри застосовуваної апаратури (Робоча частота, тип модуляції, ширина смуги пропускання приймача тощо);
- системні параметри УПС (наявність інтермодуляційних перешкод, інтенсивність телефонного навантаження, характер повторного використання частоти тощо).

Крім того, необхідно враховувати умови поширення радіохвиль у місті та передмістях. У УПС зв'язок здійснюється між стаціонарною БС та рухомим абонентським терміналом, при цьому параметри лінії зв'язку (або каналу зв'язку) безперервно змінюються. Тому при опис поведінки сигналів поширюються в міських чи приміських умовах користуються статистичними методами. При поширенні радіохвиль у міських умовах існує кілька явищ, що викликають зміну сигналу у точці прийому. Середній рівень сигналу головним чином зумовлений технічними характеристиками БС та АС, а також відстанню між БС та АС.

Найбільш поширеними моделями розповсюдження радіохвиль є модель Окамура, модель Хата та модель Лі.

2.1.1 Модель Окамура

Модель Окамура - це модель поширення радіохвиль, яка була побудована з використанням даних, зібраних у місті Токіо, Японія. Модель ідеальна для використання в містах з великою кількістю міських будівель, але з невеликою

кількістю високих блокуючих споруд. Модель послужила основою для моделі Хата. Модель Окамура була збудована у трьох режимах. Для міських, дачних та відкритих територій. Модель для міських територій була побудована першою і використовувалася як основа для інших.

Таблиця 2.1 – Характеристики моделі Окамура

Частота	150-1920 МГц
Висота антени мобільної станції	Від 1м до 3м
Висота антени базової станції	Від 30м до 100м
Дальність зв'язку	Від 1км до 100км

Модель Окамура формально виражається як:

$$L = L_{FSL} + A_{MU} - H_{MG} - H_{BG} - \sum Kcorrection, \quad (2.1)$$

де, L - медіанні втрати на тракті. Одиниця: децибел (дБ);

L_{FSL} - втрата вільного простору. Одиниця: децибел (дБ);

A_{MU} - Середнє загасання. Одиниця: децибел (дБ);

H_{MG} - коефіцієнт посилення антени мобільної станції по висоті;

H_{BG} - коефіцієнт посилення антени базової станції за висотою;

K -корекція - посилення поправочного коефіцієнта (наприклад, тип навколишнього середовища, водні поверхні, ізолювана перешкода тощо).

Модель Окамура - одна з моделей, що найбільш широко використовуються для прогнозування сигналів у міських районах. Ця модель застосовна для частот у діапазоні 150-1920 МГц (хоча зазвичай вона екстраполюється до 3000 МГц) та відстаней 1-100 км. Її можна використовувати для антен базових станцій висотою від 30 до 1000 м. Окамура розробив набір кривих, що дають медіанне згасання щодо вільного простору (A_{mu}) у міській зоні над квазігладкою місцевістю з ефективною висотою антени базової станції (h_{te}) 200 м та висотою

(hre). З м. Ці криві були побудовані на основі великих вимірювань з використанням вертикальних всеспрямованих антен як на базовій, так і на мобільній станції, побудовані як функція частоти в діапазоні 100-1920 МГц і як функція відстані від базової станції в діапазоні 1-1. 100 км. Щоб визначити втрати на трасі з використанням моделі Окамура, спочатку визначається втрата у вільному просторі між точками, що цікавлять, а потім до неї додається значення $A_{mi}(f, d)$ (зчитуване з кривих) разом з поправочними коефіцієнтами для враховувати тип місцевості.

До моделі Окамура можуть бути внесені інші поправки. Деякі з важливих параметрів, пов'язаних з рельєфом місцевості, є висота хвилястості місцевості (A/i), висота ізолюваного гребеня, середній ухил місцевості та змішаний параметр суша-море. Після розрахунку параметрів, пов'язаних з рельєфом місцевості, необхідні поправні коефіцієнти можуть бути додані або відраховані за необхідності. Всі ці поправні коефіцієнти також доступні у вигляді кривих Окамура. На нерівній місцевості часто зустрічаються шляхи поза прямою видимістю, викликані перешкодами біля. Модель Окамура включає поправочний коефіцієнт, який називається фактором «ізолюваного гребеня», для обліку перешкод. Однак це виправлення застосовується лише до перешкод, що відповідають цьому опису; тобто. ізолюваних хребет. Складніший ландшафт не може бути змодельований поправочним коефіцієнтом ізолюваного хребта. Існує ряд загальніших моделей для розрахунку дифракційних втрат. Однак жоден з них не може бути застосований безпосередньо до основного середнього загасання Окамура. Для цього було розроблено власні методи; однак, як відомо, жоден із них не є суспільним надбанням. Модель Окамура повністю ґрунтується на даних вимірювань і не дає жодних аналітичних пояснень. У багатьох ситуаціях можна виконати екстраполяцію отриманих кривих для отримання значень за межами діапазону вимірювань, хоча достовірність таких екстраполяцій залежить від обставин і гладкості кривої, що розглядається. Модель Окамура вважається однією з найпростіших і найкращих з точки зору точності прогнозування втрат на трасі для зрілих стільникових та наземних мобільних радіосистем у

захащених середовищах. Це дуже практично і стало стандартом для системного планування в сучасних системах рухомого наземного радіозв'язку в Японії. Основним недоліком моделі є її повільна реакція на швидкі зміни ландшафту, тому модель досить гарна в міських та приміських районах, але не така гарна в сільській місцевості. Загальні стандартні відхилення між прогнозованими та виміряними значеннями втрат на трасі становлять від 10 дБ до 14 дБ [5].

2.1.2 Модель Хата

Модель Хата - це модель поширення радіохвиль для прогнозування втрат на шляху стільникової передачі у зовнішньому середовищі, дійсна для мікрохвильових частот від 150 до 1500 МГц. Це емпіричне формулювання, засноване на даних моделі Окумура, тому її також часто називають моделлю Окумури – Хата. Модель включає графічну інформацію з моделі Окумури та розвиває її, щоб зрозуміти ефекти дифракції, відображення та розсіювання, викликані міськими структурами. Крім того, модель Хата застосовує поправки до додатків у приміській та сільській місцевості.

Таблиця 2.2 – Характеристики моделі Хата

Частота	150-1500 МГц
Висота антени мобільної станції	Від 1м до 10м
Висота антени базової станції	Від 30м до 200м
Дальність зв'язку	Від 1км до 10км

З таблиці бачимо, що хоча модель Хати основана на моделі Окамури вона не забезпечує охоплення всього діапазону частот, що охоплюється моделлю Окамура.

Модель Хата для міського середовища є базовим формулюванням, оскільки вона ґрунтується на вимірах Окумура, зроблених у забудованих районах Токіо. Він формується наступним образом:

$$L_U = 69.55 + 26.16 \log_{10} f - 13.82 \log_{10} h_B - C_H + [44.9 - 6.55 \log_{10} h_B] \log_{10} d, \quad (2.2)$$

де L_U - втрати на трасі у міських районах. Одиниця: децибел;

h_B - висота антени базової станції. Одиниця виміру: метр (м);

h_M - висота антени мобільної станції. Одиниця виміру: метр (м);

f - частота передачі. Одиниця: мегагерц (МГц);

C_H - коефіцієнт поправки на висоту антени;

d - відстань між базовою та мобільною станціями. Одиниця: кілометр (км).

Крім того, модель Хата застосовує поправки до додатків у приміській та сільській місцевості.

Модель Хата для приміського середовища застосовується до ліній електропередачі лише з міст і сільській місцевості, де є штучні споруди, але не такі високі та щільні, як у містах. Якщо бути точнішим, ця модель підходить там, де є будинки, але мобільна станція не має значної зміни своєї висоти. Він сформульований як:

$$L_{Su} = L_u - 2(\log_{10} \frac{f}{28})^2 - 5.4, \quad (2.3)$$

де L_{Su} - втрати на трасі в приміських зонах. Одиниця: децибел(дБ);

L_U - втрати на трасі з версії моделі для малих міст. Одиниця: децибел (дБ);

f - частота передачі. Одиниця: мегагерц (МГц).

Модель Хата для сільської місцевості може бути застосована до передач на відкритих майданчиках, де жодні перешкоди не блокують лінію передачі. Він сформульований як:

$$L_O = L_U - 4.78(\log_{10}f)^2 + 18.33(\log_{10}f) - 40.94, \quad (2.4)$$

де L_O - втрата шляху на відкритих ділянках. Одиниця: децибел (дБ);

L_U - середні втрати на трасі для версії моделі для малих міст (дБ);

f - частота передачі (МГц) [6].

2.1.3 Модель Лі

Модель Лі дозволяє прогнозувати рівень сигналу в діапазоні НВЧ на вході мобільної станції приймача з урахуванням характеру місцевості. Місцевість класифікують за двома ознаками: структурою, сформованою людиною (характер забудови): відкрита територія; приміська зона; міська забудова; за природними властивостями (характер траси): гладка траса, горбиста траса, траса над водною поверхнею, траса через листяні ліси. Модель Лі створена виходячи з аналізу експериментальних вимірів рівня сигналу (локального середнього), опублікованих різними авторами для зон із різним характером забудови.

В її основі лежать два наступні експериментальні параметри моделі:

P_1 - рівень сигналу в точці, що віддаляється від БС на 1 км;

γ - нахил кривої втрат поширення, який чисельно дорівнює послабленню сигналу зі збільшенням довжини траси вдесятеро. Одиниці виміру - дБ на декаду (дБ/дек).

Відповідно до моделі Лі, рівень потужності сигналу на вході приймача модельної станції:

$$P_C = P_1 - \gamma \lg R_{mi} + a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + a_5, \quad (2.5)$$

де R_{mi} - протяжність траси;

$a_1 \dots a_5$ - поправочні коефіцієнти. Вводяться у випадку, коли технічні параметри радіоінтерфейсу відрізняються від типових. Вони визначаються за формулами

таблиці 2.3. При цьому вплив висот антен враховується так само, як і моделі Окамури [7].

Таблиця 2.3 – Характеристики моделі Лі

Параметри	Стандартні значення	Поправочні коефіцієнти
Рівень потужності передатчика	40 Дбм	$a_1 = P_{6c} - 40$
Висота антени БС	30 м	$a_2 = 20lg$
Коефіцієнт підсилення антени БС	6 Дб	$a_3 = g_1 - 6$
Висота антени МС	6 м	$a_4 = 10lg$

2.2 Визначення дальності дії базової станції стандарту TETRA

Розглянемо модель системи радіозв'язку, яка містить радіопередавач (базову станцію) та радіоприймач (мобільну станцію) (рисунок 2.1). Модель має наступні параметри:

$P_{пер}$ – потужність радіосигналу на виході передавача;

$P_{пр}$ – потужність радіосигналу на вході приймача;

h_1 – висота щогли антени передавача;

h_2 – висота щогли антени приймача;

G_1 – коефіцієнт підсилення антени передавача;

G_2 – коефіцієнт підсилення антени приймача;

$L = \frac{P_{пр}}{P_{пер}}$ – загасання радіосигналу;

R – відстань між базовою та мобільною станціями.

Для визначення дальності дії базової станції TETRA приймаємо наступні значення параметрів системи:

частотний діапазон (для України) – 413...420/423...430 МГц;

$P_{пер} = 40$ Вт (для базової станції Motorola MTS2 TETRA);

$$h_1 = 50 \text{ м};$$

$$h_2 = 1,5 \text{ м};$$

$$G_1 = 15 \text{ дБ};$$

Схема модуляції – DQPSK;

Схема кодування – 2/3.

Визначимо дальність дії базової станції TETRA за допомогою моделі Hata.

1. Визначаємо потужність теплових шумів на вході приймача

$$P_{\text{тепл}} = 10 \lg(K_B \cdot T \cdot \Delta f \cdot 1000) = 10 \lg(1.38 \cdot 10^{-23} \cdot 300 \cdot 25 \cdot 10^3 \cdot 1000) = -129.9 \text{ дБм}, \quad (2.6)$$

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

$T = 300 \text{ К}$ – абсолютна температура.

2. Знаходимо чутливість приймача (мінімальну потужність на вході приймача, при якій ще забезпечується радіоприйом).

Для схеми модуляції та кодування DQPSK 2/3 необхідне відношення сигнал/шум

$$\text{SNR} = 4,3 \text{ дБ}.$$

Тоді чутливість приймача складає:

$$P_{\text{пр min}} = \text{SNR} + K_{\text{ш}} + P_{\text{тепл}} = 4,3 + 9 + (-129,9) = -116,6 \text{ дБм}, \quad (2.7)$$

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

3. Знаходимо потужність передавача в дБм

$$10 \lg \frac{P_{\text{пер}}}{10^{-3}} = 10 \lg \frac{40}{10^{-3}} = 46 \text{ дБм} \quad (2.8)$$

4. Знаходимо допустиме загасання радіосигналу

$$L_{\text{гон}} = P_{\text{пер}} + G_1 - a_{\text{каб}} - a_{\text{інм}} + P_{\text{пр min}} = 46 + 15 - 2 - 2.5 + 116.6 = 173.1 \text{ дБ}, \quad (2.9)$$

де $a_{\text{каб}} = 2$ дБ – згасання у кабелі;

$a_{\text{інт}} = 2,5$ дБ – поправка на інтерференцію.

5. За допомогою моделі Ната розраховуємо залежність загасання радіосигналу від відстані між мобільною та базовою станціями.

Для міської місцевості загасання визначається за наступною формулою:

$$L_M = 69.55 + 26.16 \lg f - 13.82 \lg h_1 - a(h_2) + (44.9 - 6.55 \lg h_1) \cdot \lg R, \quad (2.10)$$

де $f = 420$ МГц – частота радіосигналу;

$a(h_2)$ – поправочний коефіцієнт, що враховує висоту розташування мобільної станції.

Для приміської та селищної місцевості:

$$a(h_1) = (1.1 \lg f - 0.7) \cdot h_2 - (1.56 \cdot \lg f - 0.8) \quad (2.11)$$

Для міського середовища:

$$a(h_2) = 3,2(\lg(11.75 \cdot h_2))^2 - 4.97 \quad (2.12)$$

Загасання радіосигналу для приміської місцевості визначається за наступною формулою:

$$L_{\text{пр}} = L_M - 2(\lg(f(28)))^2 - 5.4 \quad (2.13)$$

Загасання радіосигналу для селищної місцевості:

$$L_{\text{сел}} = L_M - 4.78(\lg f)^2 + 18.33 \cdot \lg f - 40.94 \quad (2.14)$$

За допомогою моделі Ната були побудовані залежності загасання радіосигналу від відстані між базовою та мобільною станціями (рисунок 2.2)

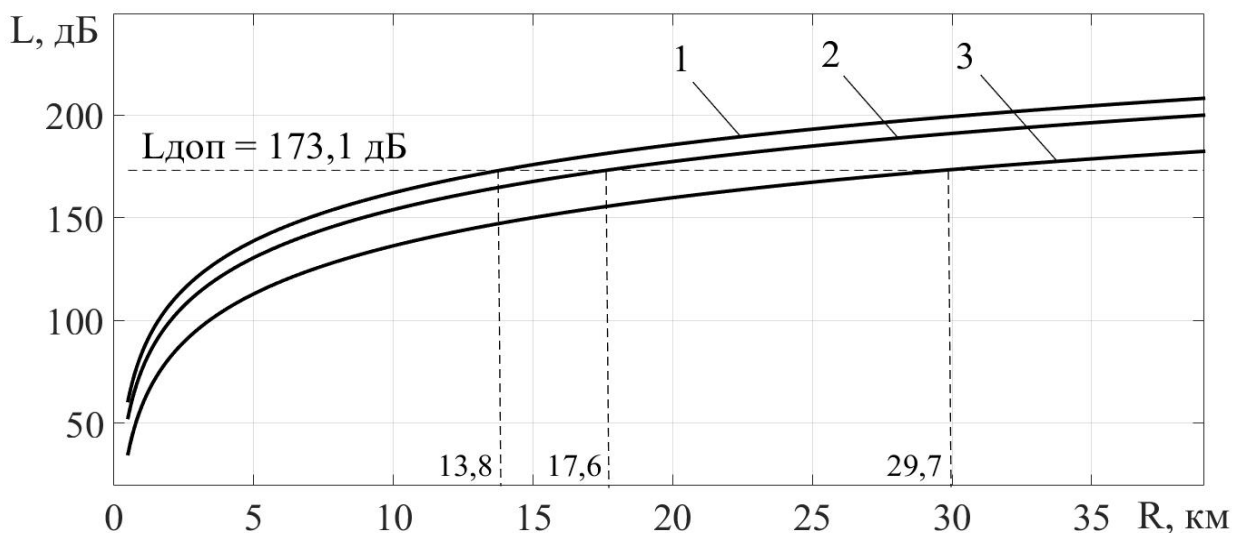


Рисунок 2.2 – Залежності загасання радіосигналу від відстані між базовою та мобільною станціями: 1- для міського середовища, 2 – приміське середовище, 3 – селищна місцевість

Враховуючи рівень допустимого загасання $L_{\text{дон}} = 173.1$ дБ, визначаємо за графіками дальність дії базової станції TETRA:

для міського середовища – 13,8 км;

для приміського середовища – 17,6 км;

для сільської місцевості – 29,7 км.

2.3 Радіоінтерфейс стандарту TETRA

Стандарт TETRA використовує технологію багатостанційного доступу з часовим розділенням (TDMA) спільно з технологією частотного дуплексу (FDD). Тип модуляції радіоканалу - відносна диференціальна фазова маніпуляція зі зсувом кратним $\pi/4$ ($\pi/4$ DQPSK).

Стандарт TETRA реалізує максимально можливу в системах рухомого радіозв'язку частотну ефективність - 4 логічних каналу займають 25 кГц. На рис.2.3 представлена структура радіоінтерфейсу стандарту TETRA в режимі ТМО.

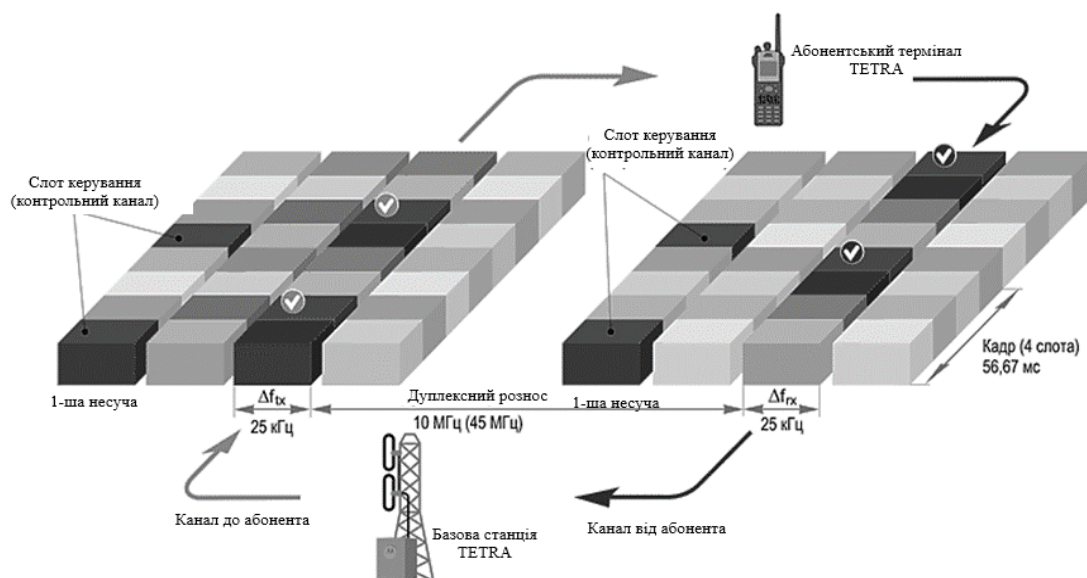


Рисунок 2.3 - Структура радіоінтерфейсу стандарту TETRA в режимі ТМО

Один з логічних каналів базової радіостанції TETRA є управляючим. Зазвичай це перший слот на першій несучій. Керуюча інформація також передається у 18 кожному кадрі на кожному логічному каналі. При цьому кадр загальною тривалістю 56,67 мс складається з 4 тимчасових інтервалів (слотів). Основні аспекти комутації в рамках стандарту TETRA:

1. Голосові виклики займають тільки один логічний канал.
2. Виклики передачі даних можуть займати до 4 логічних каналів одночасно.
3. Голос і дані можуть передаватися одночасно в різних логічних каналах.

В режимі DMO картина інша (див. рис. 2.4). У відсутність базової станції синхронізація між фізичними каналами відсутня. Синхронізацію в логічному каналі здійснює термінал-майстер (термінал, у якої натиснута клавіша РТТ). А крім цього абонентські термінали не можуть використовувати всі доступні слоти. Перша фаза стандарту TETRA передбачає використання в режимі DMO тільки одного логічного каналу з 4 доступних. При цьому інші групи, закріплені на цій же частоті, отримують повідомлення про зайнятість каналу. Друга фаза передбачає можливість здійснення одночасно 2 групових дзвінків в режимі DMO.

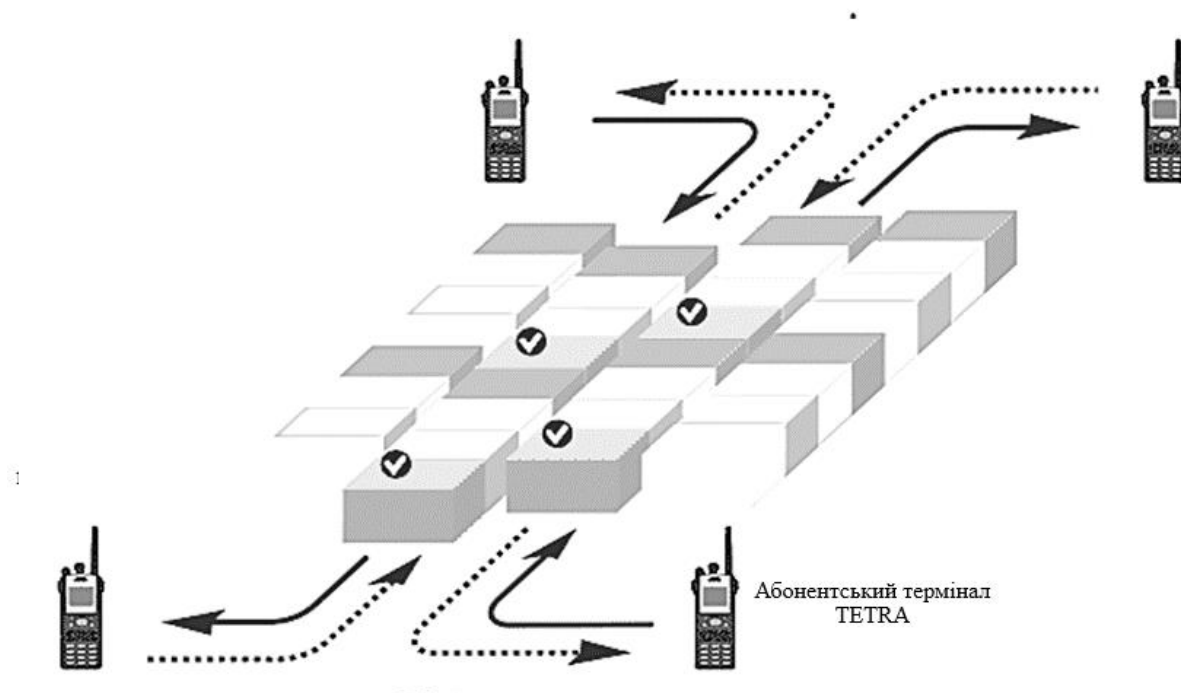


Рисунок 2.4 - Структура каналів стандарту TETRA при роботі в режимі DMO

Для виявлення помилок при передачі в каналі радіозв'язку, їх виправлення на каналному кодуванні застосовуються технології Forward Error Correction (FEC) і Cyclic Redundancy Check (CRC) у вигляді чотирьох процедур: блокового кодування, згорткового кодування, перемежування та шифрування, після чого формуються інформаційні канали.

Для кодування мови використовується мовний кодек ACELP (лінійне передбачення з порушенням від алгебраїчної кодової книги) зі швидкістю 4,8 кб/с. Якщо порівнювати по шкалі MOS якість голосу в мережах стандарту TETRA з якістю голосу в звичних всіх мережах GSM, то якість кодека TETRA виявляється трохи меншою (див. рис. 4). Але при цьому не варто забувати, що стандарт TETRA в чотири рази ефективніше GSM з точки зору використання частотного спектру.

Важливим наслідком організації радіоінтерфейсу є питання енергетики радіоліній TETRA. Говорячи про зони покриття базової радіостанції, слід згадати, що радіус зони обслуговування залежить не тільки від типу модуляції і кодування, але і від наявності природних перешкод і навколишнього

електромагнітної обстановки. В умовах правильно реалізованого антенно-фідерного обладнання досягалися вражаючі результати - зв'язок на відстані до 50 км від базової станції.

Істотною перевагою мереж стандарту TETRA, у порівнянні з аналоговими системами або мережами APCO25, є функція автоматичного регулювання випромінюваної потужності мобільних терміналів. Автоматичне керування потужністю випромінюваного сигналу дозволяє істотно економити ресурси акумуляторних батарей переносних терміналів, а також знизити рівень випромінювань аж до 15 дБм.

2.4 Визначення ємності базової станції стандарту TETRA

В Україні для організації транкінгового радіозв'язку використовується смуга частот 413...420 МГц/ 423...430 МГц. Дуплексний разнос частот складає 10 МГц. Таким чином, ширина частотного діапазону в кожному напрямку дорівнює $\Delta F = 7$ МГц:

$$N_{\text{чк}} = \frac{\Delta F}{\Delta f} - 1 = \frac{7 \cdot 10^6}{25 \cdot 10^3} - 1 = 279 \text{ (каналів)} \quad (2.15)$$

В мережах транкінгового радіозв'язку використовується принцип повторного використання радіочастот. При цьому в сусідніх базових станціях використовуються різні набори радіочастот, які чергуються періодично в залежності від кількості наборів радіочастот розрізняються трьохкластерні мережі, чотирьохкластерні, семикластерні тощо (рис.2.5).

Визначимо кількість радіочастот для однієї базової станції.

Трьохелементний кластер:

$$N_{\text{чк}}^{\text{БС}} = \frac{279}{3} = 93 \text{ (канала)} \quad (2.16)$$

Чотирьохелементний кластер:

$$N_{\text{чк}}^{\text{БС}} = \frac{279}{4} \approx 69 \text{ (каналів)} \quad (2.17)$$

Семиелементний кластер:

$$N_{\text{КЧ}}^{\text{БС}} = \frac{279}{7} \approx 39 \text{ (каналів)} \quad (2.18)$$

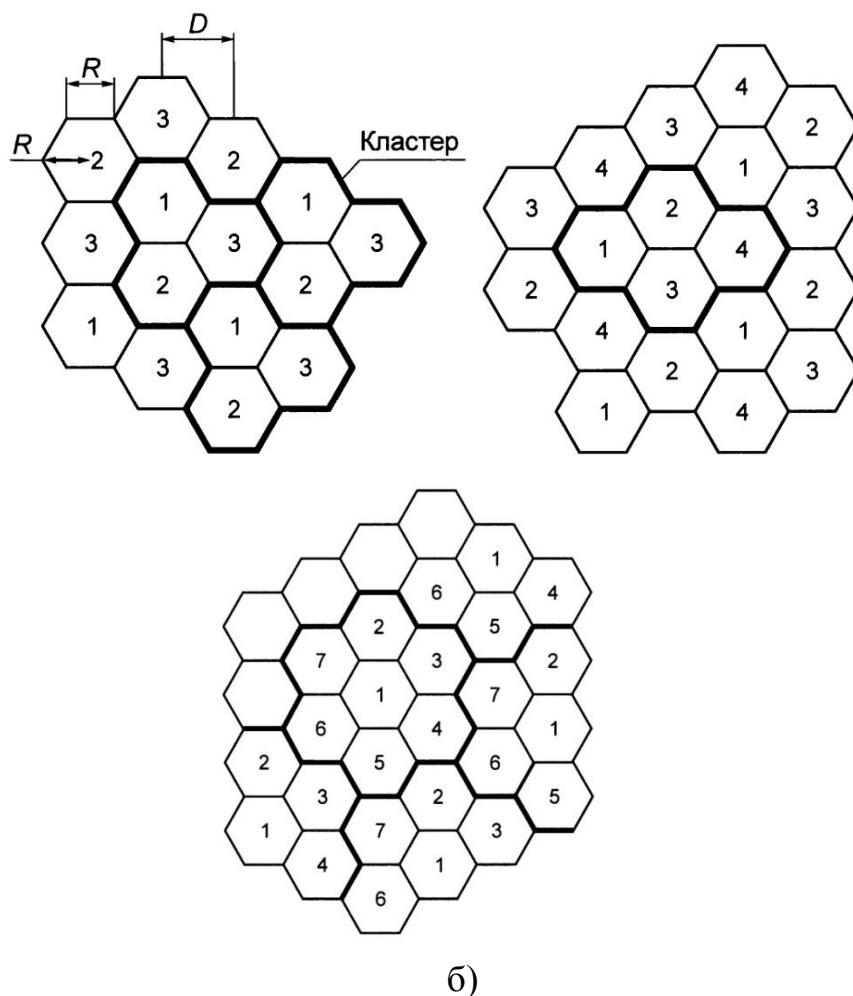


Рисунок 2.5 – Розподілення радіочастот при їх повторному використанні:

а) трьохелементний кластер; б) чотирьохелементний кластер;

в) семиелементний кластер

В стандарті TETRA використовується часове розділення. При цьому в кожному радіоканалі організовується чотири логічних канали (рис.2.3). Визначимо кількість логічних каналів для однієї базової станції:

Трьохелементний кластер:

$$N_{\text{ЛК}}^{\text{БС}} = 4 \cdot 93 = 372 \text{ (канали)} \quad (2.19)$$

Чотирьохелементний кластер:

$$N_{\text{ЛК}}^{\text{БС}} = 4 \cdot 69 = 276 \text{ (каналів)} \quad (2.20)$$

Семиелементний кластер:

$$N_{\text{ЛК}}^{\text{БС}} = 4 \cdot 39 = 156 \text{ (каналів)} \quad (2.21)$$

Голосовий виклик займає один логічний канал. В кожному вісімнадцятому циклі логічні канали використовуються для передачі керуючої інформації.

Визначимо загальну кількість голосових каналів, яку забезпечує одна базова станція (ємність базової станції).

Трьохелементний кластер:

$$N_{\text{БС}} = 372 \cdot \frac{17}{18} \approx 351 \text{ (канали)} \quad (2.22)$$

Чотирьохелементний кластер:

$$N_{\text{БС}} = 276 \cdot \frac{17}{18} \approx 260 \text{ (каналів)} \quad (2.23)$$

Семиелементний кластер:

$$N_{\text{БС}} = 156 \cdot \frac{17}{18} \approx 147 \text{ (каналів)} \quad (2.24)$$

2.5 Висновки до розділу 2

В даному розділі були розглянуті найвідоміші та найактуальніші моделі розповсюдження радіохвиль (модель Окамура, модель Хата та модель Лі). Враховуючи умови поширення хвиль у місті і передмісті для розробки даної роботи була обрана саме модель Хата. Ця модель включає графічну інформацію з моделі Окумури та розвиває її, щоб зрозуміти ефекти дифракції, відображення та розсіювання, викликані міськими структурами. За допомогою моделі Хата була проведена оцінка дальності дії базової станції TETRA для міської, приміської та сільської місцевості.

Розглянуто також структуру радіоінтерфейсів стандарту TETRA в різних режимах та визначили ємності базової станції стандарту, що дозволило нам отримати конкретні значення даних для використання їх у розробці даної роботи.

3 ТЕРИТОРІАЛЬНО-ЧАСТОТНЕ ПЛАНУВАННЯ МЕРЕЖІ ЦИФРОВОГО ТРАНКІНГОВОГО РАДІОЗВ'ЯЗКУ

3.1. Загальна характеристика залізничної ділянки Дніпро-Головний – П'ятихатки-Стикова

Для обладнання системою транкінгового зв'язку обрана залізнична ділянка від станції Дніпро-Головний до станції П'ятихатки-Стикова (рис.3.1).



Рисунок 3.1 – Схема Придніпровської залізниці

Таблиця 3.1 – Характеристика залізничних станцій на ділянці
Дніпро-Головний – П'ятихатки-Стикова

Назва станції	Призначення	Клас станції	Розташування структурних підрозділів
Дніпро-Головний	пасажирська	позакласна	ТЧ-8, ВЧД-1, ПЧ-9, ШЧ-6, НГЧ-1, ШЧ-1
Горяїнове	вантажна	другий	
Діївка	вантажна	другий	
Сухачівка	дільнична	третій	
Запоріжжя- Кам'янське	вантажна	перший	
Кам'янське- Пасажирське	пасажирська	третій	
Воскобійня	проміжна	четвертий	
Верхньодніпровськ	вантажна	третій	
Верхівцево	дільнична	перший	ВЧД-13, ПЧ-10, ЕЧ-3, ПМС-202, РСП-39
Вільногірськ	вантажна	третій	
Залізнякове	проміжна	четвертий	
П'ятихатки	дільнична	перший	ТЧ-9, ВЧД-12, ПЧ-11, ШЧ-7, ПМС-237
П'ятихатки- Стикова	дільнична, станція стикування постійного та змінного струму	перший	

Примітка. Інформація отримана з офіційного сайту регіональної філії
«Придніпровська залізниця» АТ «Укрзалізниця»

На цій залізничній ділянці розташовані наступні 13 станцій: Дніпро-Головний, Горяїнове, Діївка, Сухачівка, Запоріжжя–Кам'янське, Кам'янське–Пасажирське, Воскобійня, Верхньодніпровськ, Верхівцево, Вільногірськ, Залізнякове, П'ятихатки та П'ятихатки-Стикова.

Кожна станція має свої призначення, класність та структурні підрозділи АТ «Укрзалізниця» (табл.3.1)

Залежно від обсягу та складності виконуваної роботи станції підрозділяють на позакласні, 1, 2, 3, 4, 5 класів. На обраній ділянці розташовані: одна позакласна станція (Дніпро-Головний), чотири станції першого класу (П'ятихатки-Стикова, П'ятихатки, Верхівцево та Запоріжжя-Кам'янське), дві станції другого класу (Горяїнове та Діївка), чотири станції третього класу (Вільногірськ, Верхньодніпровськ, Кам'янське-Пасажирське та Сухачівка).

За призначенням станції поділяються на пасажирські, вантажні, проміжні, дільничні та станція стикування постійного та змінного струму.

На трьох станціях розташовані залізничні структурні підрозділи: станція Дніпро-Головний (ТЧ-8, ВЧД-1, ПЧ-9, ШЧ-6, НГЧ-1, ШЧ-1), станція Верхівцево (ВЧД-13, ПЧ-10, ЕЧ-3, ПМС-202, РСП-39) та станція П'ятихатки (ТЧ-9, ВЧД-12, ПЧ-11, ШЧ-7, ПМС-237).

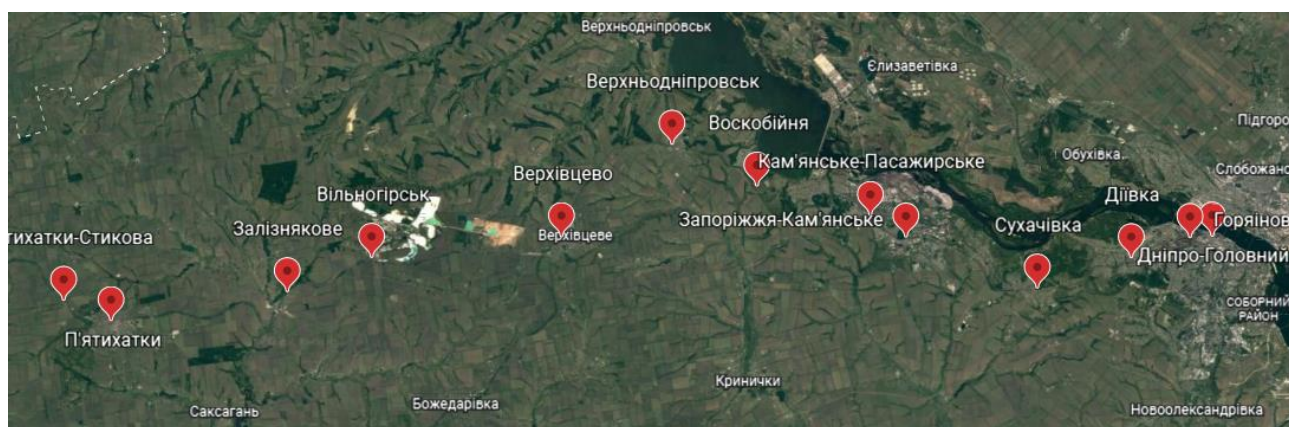


Рисунок 3.2 - Розташування залізничних станцій на ділянці
Дніпро-Головний – П'ятихатки-Стикова

Загальна відстань між залізничними станціями ділянки Дніпро-Головний – П’ятихатки – Стикова складає 108,4 км.

Таблиця 3.2 – Відстані (по прямій) між залізничними станціями ділянки
Дніпро-Головний – П’ятихатки-Стикова

Ділянка	Відстань, км
Дніпро-Головний – Горяїнове	2
Горяїнове – Діївка	5,5
Діївка – Сухачівка	8,7
Сухачівка – Запоріжжя-Кам’янське	12,3
Запоріжжя-Кам’янське – Кам’янське-Пасажирське	3,6
Кам’янське-Пасажирське – Воскобійня	10,3
Воскобійня – Верхньодніпровськ	8,3
Верхньодніпровськ – Верхівцево	12,6
Верхівцево – Вільногірськ	16,8
Вільногірськ – Залізнякове	8
Залізнякове – П’ятихатки	15,8
П’ятихатки – П’ятихатки-Стикова	4,5

Примітка. Відстані розраховані за допомогою додатка Google Earth

3.2. Територіально-частотне планування мережі транкінгового зв’язку

В цьому пункті обираємо місце розташування базових станцій транкінгового радіозв’язку та їх кількість для забезпечення всіх видів на радіозв’язку на ділянці Дніпро-Головний – П’ятихатки-Стикова.

Відповідно до розрахунків (пункт 2.3) в стандарті TETRA забезпечується можливість організувати 279 частотних каналів (робочих частот). Для організації радіозв’язку на ділянці Дніпро-Головний – П’ятихатки-Стикова будемо використовувати семикластерну структуру мережі транкінгового зв’язку. В

кожній базовій станції буде використовуватись один з семи наборів робочих частот. Кожен набір містить 39 робочих частот.

Таблиця 3.3 – Розподілення базових станцій транкінгового радіозв’язку та робочих частот на ділянці Дніпро-Головний – П’ятихатки-Стикова

Назва залізничної станції	Кількість базових станцій транкінгового радіозв’язку	Умовні назви базових станцій	Номери наборів робочих частот
Дніпро-Головний	5	BS1.1	1
		BS1.2	2
		BS1.3	3
		BS1.4	4
		BS1.5	5
Горяїнове	2	BS2.1	6
		BS2.2	7
Діївка	2	BS3.1	1
		BS3.2	2
Сухачівка	2	BS4.1	3
		BS4.2	4
Запоріжжя-Кам’янське	3	BS5.1	5
		BS5.2	6
		BS5.3	7
Кам’янське-Пасажирське	2	BS6.1	1
		BS6.2	2
Воскобійня	1	BS7	3
Верхньодніпровськ	2	BS8.1	4
		BS8.2	5

Верхівцево	4	BS9.1	6
		BS9.2	7
		BS9.3	1
		BS9.4	2
Вільногірськ	2	BS10.1	3
		BS10.2	4
Залізнякове	1	BS11	5
П'ятихатки	4	BS12.1	6
		BS12.2	7
		BS12.3	1
		BS12.4	2
П'ятихатки-Стикова	2	BS13.1	3
		BS13.2	4

Так як відстань (по прямій) між залізничними станціями менша, ніж максимальна дальність дії базової станції TETRA (пункт 2.2), пропонуємо розміщувати всі базові станції на території залізничних станцій. Це спрощує технологію обслуговування базових станцій. Кількість базових станцій TETRA будемо обирати з урахуванням призначення та класу залізничних станцій, а також розташування структурних підрозділів різних служб, що впливає на кількість користувачів.

Пропонуємо для обслуговування абонентів позакласної станції Дніпро-Головний використовувати п'ять базових станцій TETRA, для вузлових дільничних станцій Верхівцево та П'ятихатки – по чотири базових станції, для дільничної станції Запоріжжя-Кам'янське – три базових станції, для проміжних станцій Воскобійня та Залізнякове – по одній базовій станції, для всіх інших – по дві базові станції. Використання на всіх залізничних станціях крім проміжних не менше двох базових станцій забезпечує можливість резервування та підвищує надійність радіозв'язку.

3.3 Розрахунок потужності радіопередавачів базових станцій

В системи транкінгового радіозв'язку реалізується принцип повторного використання радіочастот. При цьому весь діапазон робочих частот розбивається на декілька наборів, які періодично чергуються в різних базових станціях. Для обладнання залізничної ділянки Дніпро-Головний – П'ятихатки-Стикова системою радіозв'язку пропонується використовувати семикластерну транкінгову мережу (сім наборів робочих частот). Для виключення взаємних завад зони дії базових станції з однаковим набором робочих частот не повинні перетинатись.

За допомогою додатку Google Earth для були визначені відстані (по прямій) між базовими станціями, в яких використовуються однакові робочі радіочастоти. Такі відстані називаються захищеними інтервалами. Результати представлені в табл. 3.4. Після цього був визначений радіус дії кожної базової станції таким чином, щоб він був на 20 % менший половини захищеного інтервалу:

$$R_{BC} = 0,8 \cdot \frac{D}{2},$$

де R_{BC} – радіус базової станції; D – захищений інтервал.

Радіус дії кожної базової станції залежить від потужності радіопередавача та висоти щогли. Відповідно до моделі Hata (див. п. 2.1) за допомогою пакету MATLAB було розраховане загасання радіосигналу на відстані, яка дорівнює необхідному радіусу кожної базової станції. При цьому висота щогли обиралась 20, 30, 40 або 50 метрів в залежності від радіусу дії базової станції. Після цього для кожної базової станції визначалась потужність радіопередавача, яка забезпечує необхідний радіус дії:

$$P_{пер} = L_{дон} - G_1 + \alpha_{каб} + \alpha_{инт} + P_{прmin},$$

де $P_{пер}$ – потужність передавача в дБм; $G_1 = 15$ дБ – коефіцієнт підсилення антени передавача; $\alpha_{каб} = 2$ дБ – загасання у кабелі; $\alpha_{инт} = 2,5$ дБ – поправка на інтерференцію; $P_{прmin} = -116,6$ дБм – чутливість приймача.

Розраховані значення потужності радіопередавача та висоти щогли для кожної базової станції представлені у табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Відстані (по прямій) між базовими станціями з однаковими робочими частотами (захищений інтервал)

Назва базової станції	Захищений інтервал		Радіус дії базової станції, км	Потужність передавача, дБм	Висота щогли, м
	Ділянка	Відстань, км			
BS1.2	Дніпро-Головний –	7,4	3	33,9	20
BS1.2	Діївка				
BS1.3	Дніпро-Головний –	16,1	6,4	37,6	20
BS1.4	Сухачівка				
BS1.5	Дніпро-Головний –	27	10,8	40,1	30
	Запоріжжя-Кам'янське				
BS2.1,	Горяїнове –	25	10	37,4	30
BS2.2	Запоріжжя-Кам'янське				
BS3.1	Діївка –	23,3	9,3	34,8	30
BS3.2	Кам'янське-Пасажирське				
BS4.1	Сухачівка –	26,2	10,5	39,1	30
	Воскобійня				
BS4.2	Сухачівка –	34,5	13,8	42,6	40
	Верхньодніпровськ				
BS5.1	Запоріжжя-Кам'янське –	22	8,8	41	20
	Верхньодніпровськ				

BS5.2	Запоріжжя-		30,2	12,1	38,1	40
BS5.3	Кам'янське	—				
	Верхівцево					
BS6.1	Кам'янське-		27,2	10,9	40,4	30
BS6.2	Пасажирське	—				
	Верхівцево					
BS7	Воскобійня	—	34,4	13,8	37,8	50
	Вільногірськ					
BS8.1	Верхньодніпровськ	—	28,3	11,32	41,7	30
	Вільногірськ					
BS8.2	Верхньодніпровськ	—	36,2	14,5	39,5	50
	Залізнякове					
BS9.1,	Верхівцево	—	40,2	16,1	43	50
BS9.2	П'ятихатки					
BS9.3						
BS9.4						
BS10.1	Вільногірськ	—	27,3	10,9	40,4	30
BS10.2	П'ятихатки-Стикова					
BS11	Верхньодніпровськ	—	36,3	14,5	39,5	50
	Залізнякове					
BS12.1	Верхівцево	—	40,2	16,1	43	50
BS12.2	П'ятихатки					
BS12.3						
BS12.4						
BS13.1	Вільногірськ	—	27,3	10,9	40,4	30
BS13.2	П'ятихатки-Стикова					

3.4. Висновки до розділу 3

В даному розділі ми обрали залізничну ділянку від станції Дніпро-Головний до станції П'ятихатки-Стикова для обладнання системою транкінгового зв'язку. Для організації зв'язку на даній ділянці ми використали семикластерну структуру мережі транкінгового зв'язку стандарту TETRA. Всі базові станції розміщуються на території залізничних станцій. Кількість базових станцій TETRA обрано з урахуванням призначення та класу залізничних станцій, а також розташування структурних підрозділів різних служб, що впливає на кількість користувачів. На всіх залізничних станціях, крім проміжних, використовується не менше двох базових станцій, що забезпечує можливість резервування та підвищує надійність радіозв'язку. Також був проведений розрахунок потужності радіопередавачів базових станцій.

При правильному розрахунку і реалізації даного проекту на залізничній ділянці може бути побудований якісний транкінговий зв'язок з масою переваг у використанні.

4 ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ БАЗОВОЇ СТАНЦІЇ СТАНДАРТУ TETRA

4.1 Особливості та різновиди систем масового обслуговування

Відмови, які виникають в радіомережі TETRA, можна розділити на три основні типи:

1. Апаратні та програмні відмови – відмови, що викликані збоями в апаратурі або в програмному забезпеченні;
2. Відмови, що викликані впливом електромагнітних завад, які призводять до викривлення інформації;
3. Блокування виклику – відмова, що виникає в результаті зайнятості всіх каналів.

З першим типом відмов борються шляхом застосування апаратного та інформаційного резервування, спеціальних програм самотестування, з другим типом – шляхом ефективних методів модуляції сигналів та завадостійкого кодування даних (блочного, циклічного, згорткового), а також використовують кластерну організацію мережи радіозв'язку. Для зменшення впливу третього фактору необхідно дослідити систему на витримання великої кількості заявок та оцінити ймовірність їх блокування.

Для дослідження базової станції будемо використовувати математичний апарат теорії масового обслуговування. Предметом теорії масового обслуговування є побудова математичних моделей, що пов'язують задані умови роботи системи масового обслуговування з її показниками ефективності, що описують здатність справлятися з потоком заявок.

Системою масового обслуговування (СМО) називається система, що включає в себе випадковий вхідний потік вимог (заявок), що мають бути обслуговані; дисципліну черги; механізм, що виконує обслуговування. Для опису вхідного потоку зазвичай задається ймовірнісний закон, що керує послідовністю моментів потрапляння вимог на обслуговування та кількістю вимог в кожній заявці (тобто

вимоги поступають одиничні або групові). Під дисципліною черги розуміють правила за якими заявка буде обслугована в порядку черги: «першим прийшов – першим обслуговано» або «останнім прийшов – першим обслуговано» або процес обслуговування може бути випадковим.

Система масового обслуговування призначена для обслуговування потоку заявок, що представляють собою послідовність подій, потрапляючих нерегулярно та в заздалегідь невідомі та випадкові моменти часу. Обслуговування заявок також має непостійний характер, відбувається у випадкові проміжки часу та залежить від багатьох і навіть невідомих причин. Випадковий характер потоку заявок і часу їх обслуговування обумовлює нерівномірність завантаження СМО: на вході можуть накопичуватися необслуговані заявки (перевантаження СМО) або заявок немає чи їх менше, ніж вільних каналів (недовантаження СМО). Модель СМО в загальному вигляді представлена на рис.4.1.



Рисунок 4.1 – Структура системи масового обслуговування

На рис. 4.1 використовуються наступні позначення:

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ – інтенсивність першого, другого та третього потоку заявок,

$T_{061}, T_{062}, T_{063}$ – час обслуговування однієї заявки для першого, другого і третього потоку.

В якості характеристик ефективності функціонування СМО можна обрати такі основні групи показників [8]:

1. Показники ефективності використання СМО:

1.1. Абсолютна пропускна спроможність СМО – середнє число заявок, яке може бути обслуговане СМО за одиницю часу.

1.2. Відносна пропускна спроможність СМО – відношення середньої кількості заявок, обслугованих СМО за одиницю часу до середньої кількості заявок, потрапивших за цей самий час.

1.3. Середня тривалість періоду зайнятості СМО.

1.4. Коефіцієнт використання СМО – середня доля часу, під час якого СМО зайнята обслуговуванням заявок.

2. Показники якості обслуговування заявок:

2.1. Середній час очікування заявки в черзі.

2.2. Середній час перебування заявки в СМО.

2.3. Ймовірність відмови заявки в обслуговуванні без очікування.

2.4. Ймовірність того, що нова заявка буде обслугована без черги.

2.5. Закон розподілу часу очікування заявки в черзі.

2.6. Закон розподілу часу перебування заявки в СМО;

2.7. Середня кількість заявок, що знаходиться в черзі.

2.8. Середня кількість заявок, що знаходяться в СМО.

Системи масового обслуговування класифікуються за наступними показниками.

За числом каналів СМО поділяють на одноканальні (з одним каналом обслуговування) та багатоканальні (або n -канальні). Одна заявка може обслуговуватися одночасно тільки одним каналом, а час обслуговування $T_{об}$ є неперервною величиною.

За дисципліною обслуговування СМО поділяють на три класи:

- СМО з відмовами – якщо під час зайнятості всіх каналів на вхід СМО потрапляє нова заявка, вона отримує «відмову» та покидає СМО;

- СМО з очікуванням (необмеженим очікуванням або чергою) – в таких системах, при зайнятості всіх каналів, формується черга з заявок, які очікують вільний канал, який прийме її на обслуговування;
- СМО комбінованого типу (з обмеженим очікуванням) – в даних системах накладається обмеження на час перебування заявки в черзі.

В СМО з очікуванням та СМО комбінованого типу використовуються різноманітні схеми обслуговування заявок з черги. Обслуговування може бути упорядкованим, коли заявки з черги обслуговуються в порядку їх потрапляння в систему, та неупорядкованим – заявки з черги обслуговуються у випадковому порядку. Також використовують обслуговування з пріоритетами, коли деякі заявки з черги вважаються пріоритетними і обслуговуються в першу чергу.

За обмеженням потоку заявок СМО розділяються на:

- Замкнуті
- Відкриті.

За кількості етапів обслуговування:

- Однофазні
- Багатофазні.

Після розгляду основних показників ефективності роботи систем масового обслуговування та їх класифікації можна зробити припущення, щодо представлення базової станції, як системи масового обслуговування. В подальшому у роботі будемо розглядати базову станції системи цифрового радіозв'язку TETRA, як багатоканальну систему масового обслуговування з пріоритетами та з відмовами.

4.2 Імітаційна модель базової станції TETRA

Згідно з рекомендаціями ОСЖД, для системи цифрового залізничного радіозв'язку необхідна гарантія доступності послуг мережі для поїзного та маневрового радіозв'язку 99,5% (на зовнішню антену рухомого складу), а для

інших користувачів – 95-97% (на внутрішню антену) [9]. Розглянемо базову станцію TETRA та зону її покриття, як систему масового обслуговування, в якій базову станцію (БС) представимо у вигляді N-канального серверу, який обслуговує потік заявок з різними рівнями пріоритетів. Випадковий характер потоку заявок і часу обслуговування призводить до того, що СМО виявляється завантаженою нерівномірно: в якісь періоди часу накопичується дуже велика кількість заявок (вони або стають в чергу, або залишають без обслуговування), в інші ж періоди СМО працює з недовантаженням або простоює.

При розробці моделі СМО будемо вважати, що базова станція являє собою багатоканальну систему масового обслуговування з пріоритетами. На вхід СМО можуть поступати заявки наступних рівнів пріоритету:

- 1) Перший рівень пріоритету – виклики для передачі команд керування поїздом (такі заявки повинні обслуговуватись зі 100-відсотковою гарантією);
- 2) Другий рівень пріоритету – виклики поїзного, маневрового, ремонтного та технологічного радіозв'язку (обслуговуються з високою гарантією);
- 3) Третій рівень пріоритету – всі інші виклики (обслуговуються при наявності вільних каналів).



Рисунок 4.2 – Формат блоку даних

Відповідно до розрахунків, проведених у пункті 2.4, при семикластерній структурі одна базова станція TETRA забезпечує $N_{BC}=156$ логічних каналів зв'язку. В кожному логічному каналі організовується один голосовий канал або канал передачі даних зі швидкістю 7,2 кбіт/с.

Будемо вважати, що на перегоні в зоні покриття однієї базової станції може знаходитись одночасно до чотирьох поїздів: $N_{II} = 4$.

Будемо також вважати, що при передачі команд управління на локомотив використовується наступний формат блоку даних:

Команда, що передається на локомотив, містить інформацію про допустиму швидкість руху поїзда (виділяється 8 біт), відстань до поїзда, що рухається попереду (виділяється 16 біт) та команди ДСП, до яких відносяться команда дозволу проїзду червоного вогню та зупинка поїзда за наказом ДСП. Передача команд управління має найвищий пріоритет після аварійного виклику. Для підвищення безпеки, необхідно забезпечити двократну передачу інформації (дублювання). Таким чином, обсяг однієї команди складає 64 біта.

Різні види викликів в системі залізничного радіозв'язку мають різні рівні пріоритетів (3 рівня):

1) Управління рухом:

при кількості поїздів в зоні обслуговування – 4, ми маємо $\lambda_1 = \frac{4}{0,5} = 8$ заявок

в секунду;

інтенсивність обслуговування $\mu_1 = \frac{1}{T_{об1}} \approx 112$ заявок за секунду;

в системі TETRA швидкість передачі даних складає 7,2 кбіт/с, отже одна команда буде передаватись: $T_{об1} = \frac{32 \cdot 2}{7200} = 8,9 \cdot 10^{-3} \text{ с}$

2) Технологічний радіозв'язок:

- поїзний радіозв'язок – 1 канал/поїзд, при 1 заявці за 5 хвилин (0,2 заявки за хвилину)

- начальник поїзда – 1 канал/поїзд, при 1 заявці за 10 хвилин (0,1 заявки за хвилину)

- 2 ремонтні бригади – 1 канал/бригада, $T_{об2} = 1$ хв. При 1 заявці за 10 хвилин (0,1 заявки за хвилину).

Інтенсивність потоку заявок дорівнює – $\lambda_2 = 0.2 \cdot 4 + 0.1 \cdot 4 + 0.1 \cdot 2 = 1.4$ заявок за хвилину, що дорівнює 0,0233 заявок/секунду.

Інтенсивність обслуговування – $\mu_2 = \frac{1}{T_{об2}} = \frac{1}{60} = 0.167$ заявок/секунду.

3) Комерційний зв'язок:

- в одному потязі приблизно $20 \cdot 45 = 900$ пасажирів, отже всього в зоні дії базової станції – $900 \cdot 4 = 3600$ пасажирів; з них кожен десятий робить 1 заявку за годину, тобто $\lambda_3 = 6$ заявок в хвилину, або 0,1 заявок/сек.

- А середній час обслуговування беремо 5 хвилин ($T_{об3} = 300$ с), таким чином $\mu_3 = 0,2$ заявки за хвилину, або 0,0033 заявок/сек.

Використовуючи пакет SimuLink та бібліотеку SimEvents [10], була побудована модель СМО з пріоритетною чергою та відмовами (рис.4.3). Блоки Entity Generator формують три потоки заявок з інтервалами часу, який формується за експоненційним законом, враховуючи вище перераховані умови. Блоки Set Attribute назначають кожній заявці певний атрибут, в нашому випадку це пріоритет (1,2,3) та час обслуговування заявки ($T_{об}$). Таким чином і формується три незалежних потоки заявок з різним рівнем пріоритету та часом обслуговування. Далі через «змішувач» (Path Combiner) заявки надходять до блоку Priority Queue, що представляє собою чергу за пріоритетами, тобто цей блок впорядковує заявки в залежності від наданого їм атрибуту. Наступним блоком є N-канальний сервер (базова станція), який обслуговує всі заявки в залежності від наданого їм другого атрибуту – часу обслуговування, за умови наявності вільного каналу. Далі через блок Output Switch відбувається сортування вже оброблених заявок, в залежності від їхнього пріоритету, та в блоках Entity Sink відбувається підрахунок прийнятих заявок. В результаті, розраховується коефіцієнт блокування виклику, як відношення N_{pol} (отриманих заявок) до N_{otr} (сформованих заявок). І ми отримуємо для кожного рівня пріоритету свій коефіцієнт блокування K_{bl} , оцінивши який, можна зробити висновки.

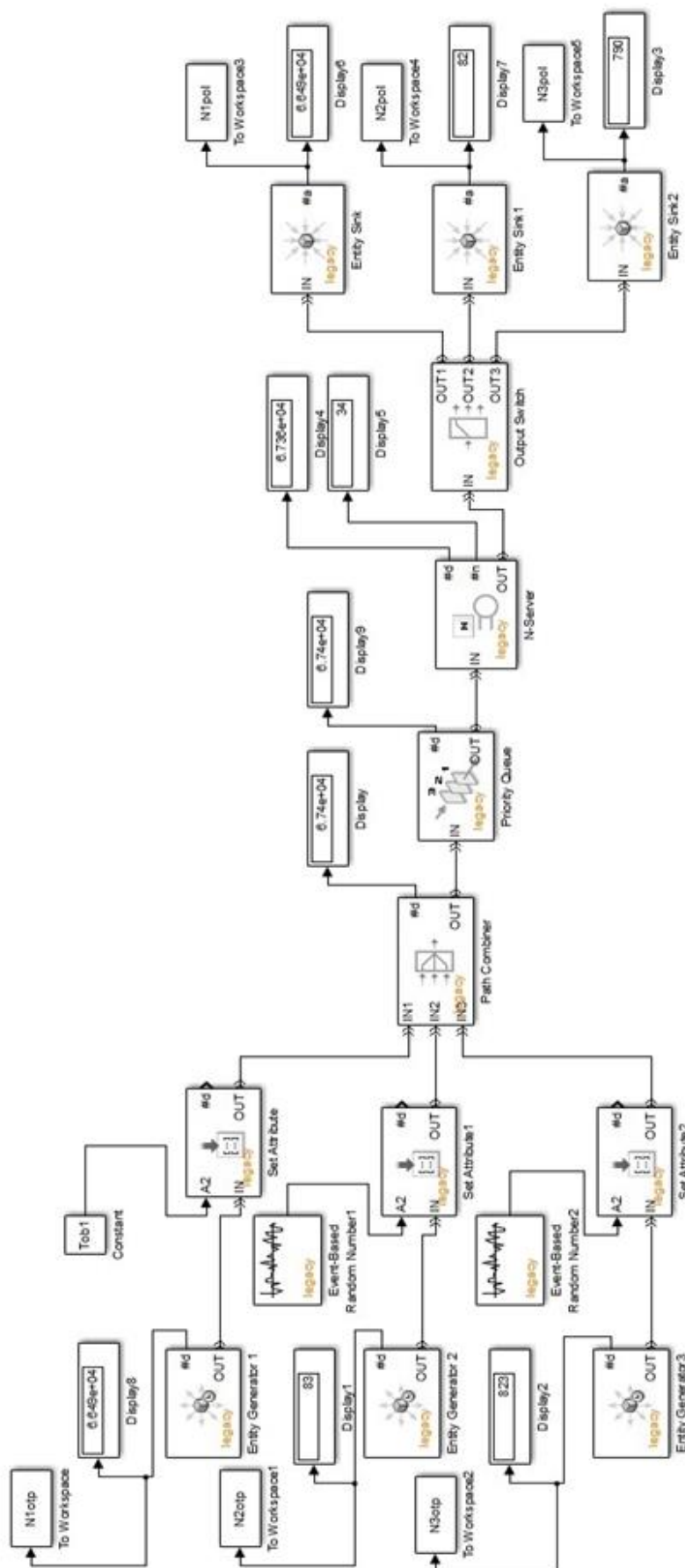


Рисунок 4.3 – Модель системы массового обслуживания в SimuLink

4.3 Результати моделювання

Результати моделювання підтвердили, що виклики першого пріоритету не блокуються (обслуговуються зі 100-відсотковою гарантією). Були отримані залежності коефіцієнту блокування викликів другого пріоритету від інтенсивності потоку заявок при різних значеннях середнього часу обслуговування (рис. 4.4). Точки на графіку – отримані значення в результаті моделювання, а лінії – це апроксимовані функції. Як видно, спостерігається лінійна залежність коефіцієнту блокування від інтенсивності потоку заявок. Згідно з вимогами ОСЖД для поїзного та маневрового радіозв'язку коефіцієнт блокування не повинен перевищувати 0,5%. За результатами моделювання можна визначити граничні значення інтенсивності заявок, при яких виконується дана умова: $L2=0.0183$ заявок/секунду при середньому часі обслуговування $Tob2=90$ с, $L2=0.0296$ заявок/секунду при $Tob2=60$ с, $L2=0.0725$ – заявок/секунду при $Tob2=30$ с.

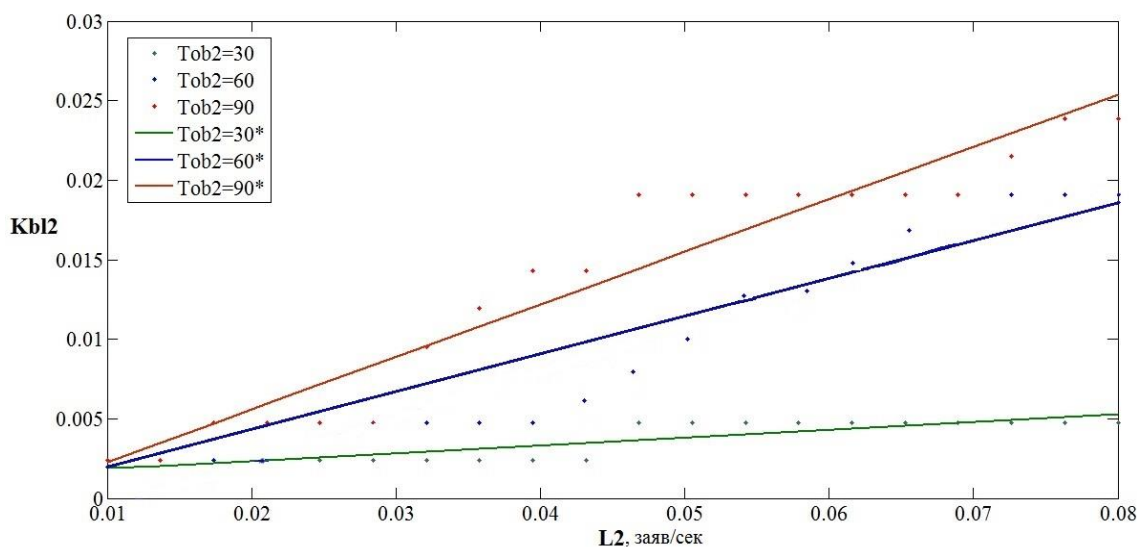


Рисунок 4.4 – Залежність коефіцієнту блокування викликів другого пріоритету K_{bl2} від інтенсивності потоку заявок $L2$

В результаті моделювання також були отримані залежності коефіцієнту блокування викликів третього пріоритету від кількості абонентів, що

знаходяться в зоні обслуговування однієї базової станції при різних значеннях середнього часу обслуговування (рис.4.5).

Згідно з вимогами ОСЖД коефіцієнт блокування для абонентів нижчо-го пріоритету не повинен перевищувати 5%. Таким чином для обраних умов моделювання гранична кількість абонентів в зоні обслуговування складає $N_{com}=210$ при $Tob3=90$ с і $N_{com}=305$ при $Tob3=60$ с.

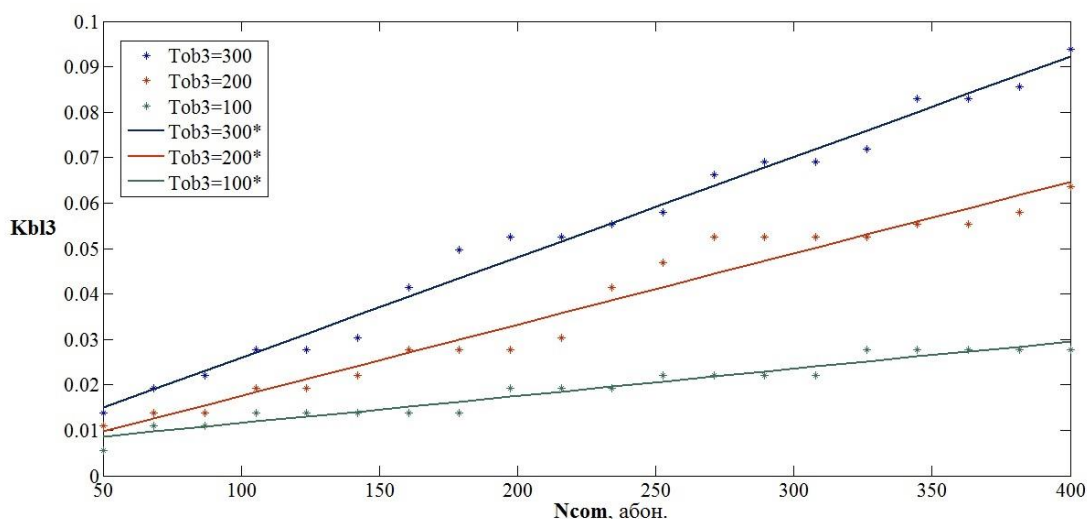


Рисунок 4.5 – Залежність коефіцієнту блокування викликів третього пріоритету K_{bl3} від кількості абонентів в зоні обслуговування N_{com}

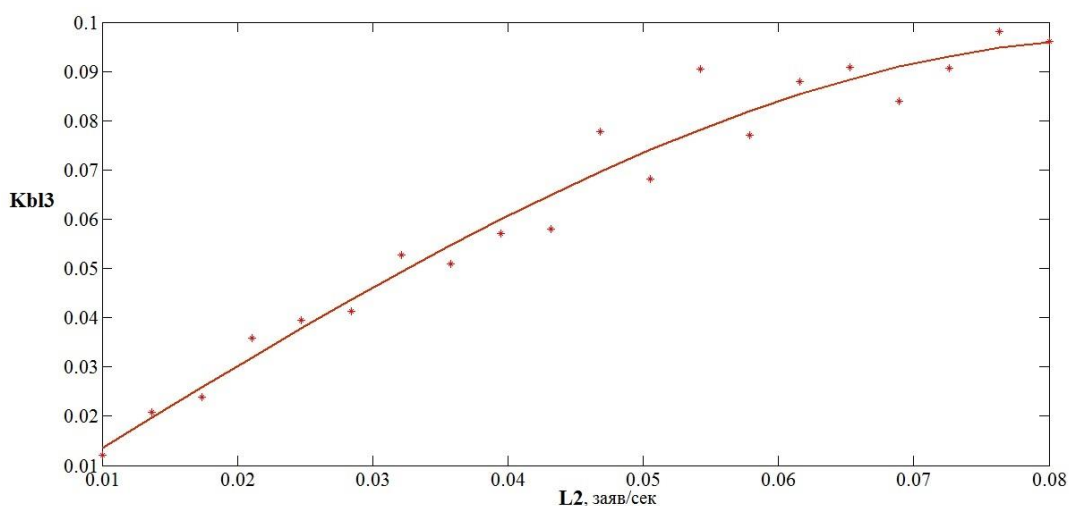


Рисунок 4.6 – Залежність коефіцієнту блокування викликів третього пріоритету K_{bl3} від інтенсивності потоку заявок другого пріоритету L_2

Була також досліджена залежність коефіцієнту блокування викликів третього пріоритету від інтенсивності потоку заявок другого пріоритету (рис. 4.6). Видно, що ця залежність є нелінійною. Допустиме значення L_2 , при якому виконується умова $K_{bl3} \leq 5\%$, дорівнює 0.033 заявок/секунду.

4.4 Висновки по розділу 4

Згідно з розробленою математичною моделлю базової станції, були отримані залежності коефіцієнтів блокування викликів від кількості абонентів та потоку заявок при різних рівнях пріоритету. В результаті, було з'ясовано, що ці залежності, при апроксимації, мають лінійний вид, та були встановлені граничні значення кількості абонентів та потоку заявок, при різному часі обслуговування абонентів, які задовольняють вимоги до систем залізничного радіозв'язку. Дана модель була використана для окремого випадку: 4 поїзда в зоні обслуговування, три рівня пріоритетів, задані значення інтенсивності потоку заявок та часу обслуговування заявок. Проте, в подальшому її можна застосувати для будь-якої конфігурації радіомережі. Дана модель може бути корисною при проектуванні мережі цифрового залізничного радіозв'язку для розрахунку відстані між базовими станціями та гранично допустимої завантаженості ділянок обслуговування.

ВИСНОВКИ

В даній роботі була вирішена задача обладнання залізничної дільниці Дніпро-Головний – П'ятихатки-Стикова системою транкінгового цифрового радіозв'язку TETRA.

У транкінговому зв'язку передбачено як індивідуальний, так і груповий зв'язок між абонентами. Ця можливість є однією з переваг такого зв'язку, що зумовлює його професійну орієнтацію. Це найшвидший та економніший спосіб зв'язку при керуванні виїзними бригадами та транспортом. Будь-яке число абонентів, членів цієї групи, може встановити зв'язок із усіма простим натисканням тангенти. Крім того, груповий виклик може бути організований і для обмеженої кількості абонентів цієї групи.

В роботі за допомогою моделі Хата проведено оцінку дальності дії базової станції TETRA для міської, приміської та селищної місцевості. Визначена кількість каналів зв'язку базової станції TETRA для трьох, чотирьох та семикластерної мережі. Проведено також територіально-частотне планування мережі цифрового транкінгового радіозв'язку, визначено кількість базових станцій, розподілення робочих частот та потужності радіопередавачів. За результатами імітаційного моделювання базової станції TETRA як системи масового обслуговування проведена оцінка імовірності блокування виклику для різних категорій користувачів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бондаренко І.М. Системи радіозв'язку [Електрон. ресурс]: навчальний посібник. – Харків: Харківський інститут ВПС, 2003.- 145 с. – Режим доступу: <https://openarchive.nure.ua/server/api/core/bitstreams/>
2. Архітектура транкінгових мереж. Класифікація транкінгових мереж. Транкінгова система SmarTrunk [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: <http://um.co.ua/10/10-8/10-88892.html>
3. Стандарт TETRA - основні характеристики систем [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: <http://www.radioscanner.ru/info/article124/>
4. Мережі стільникового зв'язку рухомого зв'язку в стандарті GSM-R [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: <https://www.osp.ru/nets/1996/06/141736>
5. Модель Окамура [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: https://ru.abcdef.wiki/wiki/Okumura_model
6. Модель Хата [Електрон.ресурс] – Режим доступа: [Модель Хата - Hata model - abcdef.wiki](https://ru.abcdef.wiki/wiki/Hata_model)
7. Модель Лі [Електрон.ресурс] – Режим доступа: [Модель Ли - Анализ параметров сотовой сети подвижной связи \(studbooks.net\)](https://studbooks.net/parametrs-sotovoy-seti-podvizhnoy-svyazi)
8. Ложковский А.Г. Теория массового обслуживания в телекоммуникациях [Текст]: учебник/ А.Г. Ложковский. – Одесса: ОНАС им. А. С. Попова, 2012. – 112 с.
9. Рекомендации по внедрению цифровой технологической радиосвязи на железнодорожном транспорте стандарта GSM-R [Текст] / ОСЖД // Р-888. – Варшава: 2005. – 48 с.
10. Терёхин В.В. Основы моделирования в MATLAB. Часть 2. Simulink [Текст]: Учебное пособие. – Новокузнецк: РИО НФИ КемГУ, 2004. - 304 с.